

## Caratteristiche morfodinamiche di due rock glaciers attivi nel Gruppo Adamello-Presanella

Roberto SEPPI<sup>1\*</sup>, Carlo BARONI<sup>2</sup>, Alberto CARTON<sup>3</sup> & Luca BASSI<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Sezione di Geologia, Museo Tridentino di Scienze Naturali, Via Calepina 14, I-38100 Trento; Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pavia, Via Ferrata 1, I-27100 Pavia

<sup>2</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa & CNR, Istituto di Geoscienze e Georisorse, Via S. Maria 53, I-56126 Pisa

<sup>3</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pavia, Via Ferrata 1, I-27100 Pavia

<sup>4</sup>Via Degasperi 23, I-38062 Arco (TN)

\*E-mail dell'Autore per la corrispondenza: [seppi@mtsn.tn.it](mailto:seppi@mtsn.tn.it)

**RIASSUNTO** - *Caratteristiche morfodinamiche di due rock glaciers attivi nel Gruppo Adamello-Presanella* - Sono stati effettuati rilievi topografici multi-temporali su due rock glaciers selezionati nel Gruppo Adamello-Presanella, allo scopo di verificarne lo stato di attività e di studiarne in dettaglio le caratteristiche dinamiche. Sono stati scelti due rock glaciers rappresentativi situati in Val di Genova e Val d'Amola e collocati al limite superiore e inferiore della fascia di esistenza delle forme presunte attive sulla base delle caratteristiche geomorfologiche. Su ciascuno di essi è stata impostata una rete di rilevamento costituita da 25 massi. Lo spostamento medio nell'intero periodo di monitoraggio (2001-2004) è risultato rispettivamente di 0,15 m anno<sup>-1</sup> e di 0,10 m anno<sup>-1</sup>. Su entrambi i depositi è stato possibile individuare gruppi di punti caratterizzati da spostamenti omogenei. Nel caso del rock glacier collocato a quota più bassa, le caratteristiche geomorfologiche del settore frontale confermano il modello differenziato di comportamento dinamico evidenziato dalle misure topografiche. Il settore sinistro della fronte (0,15-0,18 m anno<sup>-1</sup>) è caratterizzato da un lobo rigonfio e da una scarpata ripida e instabile, con scarsa copertura vegetale. In entrambi i rock glaciers, il modello di spostamento dei massi si è conservato nei due intervalli di tempo nei quali si è svolta l'indagine (2001-2002 e 2002-2004). È stata tuttavia osservata una generale accelerazione dello spostamento nel secondo intervallo di tempo, soprattutto nel caso dei massi caratterizzati dalle maggiori velocità.

**SUMMARY** - *Morphodynamic characteristics of two active rock glaciers in the Adamello-Presanella Group* - Multi-temporal topographic surveys on two rock glaciers in the Adamello-Presanella Group have been carried out. The aim of these surveys was to check the morphometric characteristics of the landforms and to get detailed information about their dynamic behaviour. In order to do this, two rock glaciers located in Val di Genova and Val d'Amola and lying at the upper and lower limit of the belt containing active landforms have been selected. On each rock glacier, a monitoring network of 25 boulders has been established. The measurements carried out show that they are presently in motion and that they moved in three years (2001-2004) with velocities of respectively 0.15 m year<sup>-1</sup> and 0.10 m year<sup>-1</sup>. On both the rock glaciers, different areas characterized by homogeneous displacement rates can be found. In particular, on the rock glacier located at the lower altitude the geomorphologic characteristics of the frontal surface support the dynamic model highlighted by the topographic surveys. In fact, the more dynamic western sector of the frontal area (0.15-0.18 m year<sup>-1</sup>) is characterized by an evident swollen lobe and by a steep, unstable and vegetation-free frontal slope. In each monitoring interval (2001-2002 and 2002-2004) the behaviour of the two rock glaciers has been the same. Nevertheless, a general acceleration of the fast-moving boulders has been observed in the second interval (2002-2004).

*Parole chiave:* Gruppo Adamello-Presanella, Trentino, permafrost, rock glacier, caratteristiche morfodinamiche  
*Key words:* Adamello-Presanella Group, Trentino, permafrost, rock glacier, morphodynamic characteristics

### 1. INTRODUZIONE

Gli ambienti di alta quota sono fra i più sensibili alle sollecitazioni determinate dai cambiamenti climatici, le cui conseguenze si stanno rivelando parti-

colarmente importanti per gli elementi della criosfera, soprattutto per quanto riguarda la presenza e distribuzione del permafrost alpino. Il permafrost è infatti considerato come uno fra i più sensibili indicatori delle variazioni ambientali in atto nelle regioni alpine

e la sua degradazione viene valutata come una delle principali fonti di rischio ambientale in quota (Haeberli & Beniston 1998; Haeberli & Burn 2002; Harris *et al.* 2003; Haeberli 2005). Fra gli elementi del paesaggio periglaciale alpino, i rock glaciers sono una delle forme più diffuse e sono riconosciuti come una delle principali manifestazioni della presenza di permafrost (Haeberli 1985; Barsch 1996). Essi vengono infatti comunemente utilizzati per stimare la distribuzione del permafrost e, in particolare, per tarare e verificare i modelli che ne predicono la presenza, soprattutto per quanto riguarda il suo limite inferiore (Imhof 1996; Imhof *et al.* 2000; Lambiel & Reynard 2001; Hoelzle *et al.* 2001; Janke 2005).

I rock glaciers possono avere dimensioni molto varie, ma generalmente sono larghi da alcune decine a poche centinaia di metri e lunghi da alcune centinaia fino a una-due migliaia di metri. Le scarpate frontali e laterali sono alte da 10 a 30 m o più e, nel caso delle forme attive, sono caratterizzate da pendenze molto acclivi ( $30^{\circ}$ - $40^{\circ}$ ), generalmente superiori all'angolo di riposo del materiale (Barsch *op. cit.*). La superficie dei rock glaciers è caratterizzata da una copertura spessa fino a qualche metro, costituita da blocchi di dimensioni da metriche a plurimetriche privi di matrice. Le forme attive contengono ghiaccio in varie forme e aggregazioni e il materiale che le costituisce risulta perennemente congelato. La distribuzione del ghiaccio interno non è omogenea ed esso può saturare o soprassaturare il detrito. Può essere presente come ghiaccio interstiziale ma può anche formare corpi discreti, livelli e lenti del tutto privi di detrito (Haeberli *et al.* 1988, 1998, 1999; Guglielmin *et al.* 2004).

I rock glaciers attivi sono forme dinamiche soggette a una continua deformazione che si traduce, in superficie, in spostamenti orizzontali e verticali del materiale detritico. Il movimento orizzontale segue la pendenza del corpo detritico ed è generalmente compreso in un intervallo di velocità che va da pochi centimetri a più di 100 cm in un anno (Barsch *op. cit.*). La componente dinamica verticale è in parte dovuta ai processi di incremento o degradazione del permafrost contenuto nel deposito detritico e induce in movimenti orientati verso l'alto (incremento del permafrost) o verso il basso (degradazione del permafrost).

Le caratteristiche dinamiche della superficie dei rock glaciers attivi sono state studiate applicando numerose tecniche, fra le quali quelle topografiche. Con l'uso di teodoliti e distanziometri laser, sono stati misurati gli spostamenti di massi disposti secondo allineamenti (Wahrhaftig & Cox 1959) o distribuiti secondo una rete su tutto il corpo detritico.

Gli esempi di applicazione di questa tecnica, spesso abbinata ad altri sistemi per monitorare le caratteristiche dinamiche e stimare l'età dei corpi detritici,

sono numerosi sia nelle Alpi che in altre catene montuose. Un controllo topografico ripetuto nel tempo per un periodo di 11 anni (1980-1991), ad esempio, è stato realizzato nelle Alpi francesi da Francou & Reynaud (1992). Gli autori hanno potuto osservare sia variazioni di velocità, con un generale decremento a partire dal 1986, sia differenti velocità nei diversi settori del deposito, con bassi valori nella zona più elevata e alla fronte ( $30$ - $40$  cm anno<sup>-1</sup>) e valori più alti nella zona centrale ( $90$  cm anno<sup>-1</sup>). Sloan & Dyke (1998) hanno confrontato le velocità di spostamento a scala decennale e a scala dei millenni su alcuni rock glaciers del Canada (Selwin Mountains), utilizzando rispettivamente un rilievo topografico ripetuto a distanza di 12 anni e le tecniche lichenometriche. In quest'area, gli autori hanno riscontrato tassi di spostamento annuali analoghi nelle due scale di tempo considerate, pari a circa  $20$  cm anno<sup>-1</sup>. Sempre in Canada (Canadian Rocky Mountains), Koning & Smith (1999), mediante rilievi terrestri effettuati con teodolite, hanno riscontrato come dopo 8 anni i massi di dimensioni minori si siano mossi più velocemente di circa il 27% rispetto a quelli di dimensioni metriche o plurimetriche. Tale fenomeno è stato attribuito a possibili meccanismi di trasporto ausiliario che interesserebbero i massi di dimensioni minori, o a meccanismi di scivolamento e selezione del materiale che operano sulla superficie del rock glacier. Il movimento complessivo della massa detritica è stato valutato in  $1,61$  cm anno<sup>-1</sup>. Konrad *et al.* (1999) hanno effettuato a distanza di un anno un rilievo dettagliato di 100 punti marcati sulla superficie del rock glacier Galena Creek (Wyoming), riscontrando tassi di spostamento compresi fra 0 e  $1,0$  m anno<sup>-1</sup>.

Nelle Alpi Vallesi (Svizzera) è stato intrapreso il monitoraggio topografico di un rock glacier (17 punti), ripetendo più volte il rilievo durante la stagione estiva (Roer 2003; Roer *et al.* 2005). A distanza di un anno si sono riscontrati spostamenti compresi fra  $0,06$  e  $0,84$  cm a seconda delle diverse zone del deposito, osservando come vi sia uno stretto collegamento fra lo sviluppo della morfologia superficiale del rock glacier (lobi rigonfi) e le aree maggiormente dinamiche. Rilievi topografici di precisione pluriennali sono stati intrapresi anche nelle Alpi Bernesi (Mihajlovic *et al.* 2003), dove sono stati controllati gli spostamenti di 32 massi a cadenza mensile nel corso di un anno, rilevando un considerevole aumento della loro velocità durante i mesi estivi.

Nelle zone artiche sono stati recentemente realizzati monitoraggi topografici su diversi rock glaciers delle Isole Svalbard, dove sono state misurate le seguenti velocità superficiali:  $5$  e  $10$  cm anno<sup>-1</sup> (rilievi effettuati ogni anno dal 1994 al 1997) (Isaksen *et al.* 2000);  $5$  e  $13$  cm anno<sup>-1</sup> (rilievi effettuati nel 1996 e 1997) (Berthling *et al.* 1998);  $9,5$  e  $10,8$  cm anno<sup>-1</sup> (rilievi effettuati dal 1994 al 2002) (Ødegård *et al.*

2003). Nelle Alpi italiane alla fine degli anni '80 è stato effettuato un monitoraggio topografico su un rock glacier situato in Val Pisella (Smiraglia 1989), che ha registrato valori massimi di spostamento lineare di circa 40 cm anno<sup>-1</sup>.

In questo lavoro sono presentati i risultati dei rilievi topografici multi-temporali effettuati fra il 2001 e il 2004 su due rock glaciers del Gruppo Adamello-Presanella. Lo scopo delle indagini era di verificare l'effettivo stato di attività dei depositi studiati e le loro caratteristiche dinamiche. In questa regione alpina, la presenza di rock glaciers è documentata sia dal Catasto dei Rock Glacier delle Alpi italiane (Guglielmin & Smiraglia 1997), sia da altri studi che hanno avuto un approccio descrittivo (Castiglioni 1961; Baroni & Carton 1987, 1990, 1996; Baroni *et al.* 1998) o hanno analizzato la relazione fra la presenza e distribuzione di queste forme e le condizioni climatiche attuali del gruppo montuoso (Baroni *et al.* 2004; Seppi *et al.* 2002; Seppi 2006).

## 2. DESCRIZIONE DEI ROCK GLACIERS SELEZIONATI

Nell'ambito dei rock glaciers censiti nel Gruppo Adamello-Presanella sono stati selezionati due depositi situati al limite superiore e inferiore della fascia altimetrica che comprende le forme ritenute attive sulla base di caratteristiche geomorfologiche particolarmente restrittive, definite con la fotointerpretazione e le indagini di terreno (Baroni *et al. op. cit.*; Seppi *op. cit.*). I due depositi sono disposti secondo orientazioni opposte, rispettivamente la più favorevole (nord) e la meno favorevole (sud) per la presenza di permafrost. I rilievi topografici hanno quindi consentito di avere informazioni dettagliate sulle caratteristiche dinamiche di due rock glaciers collocati in contesti topografici e fasce altimetriche sensibilmente diversi. I due rock glaciers si trovano in alta Val di Genova a SW del Passo del Maroccaro e sul versante destro della Val d'Amola, immediata-

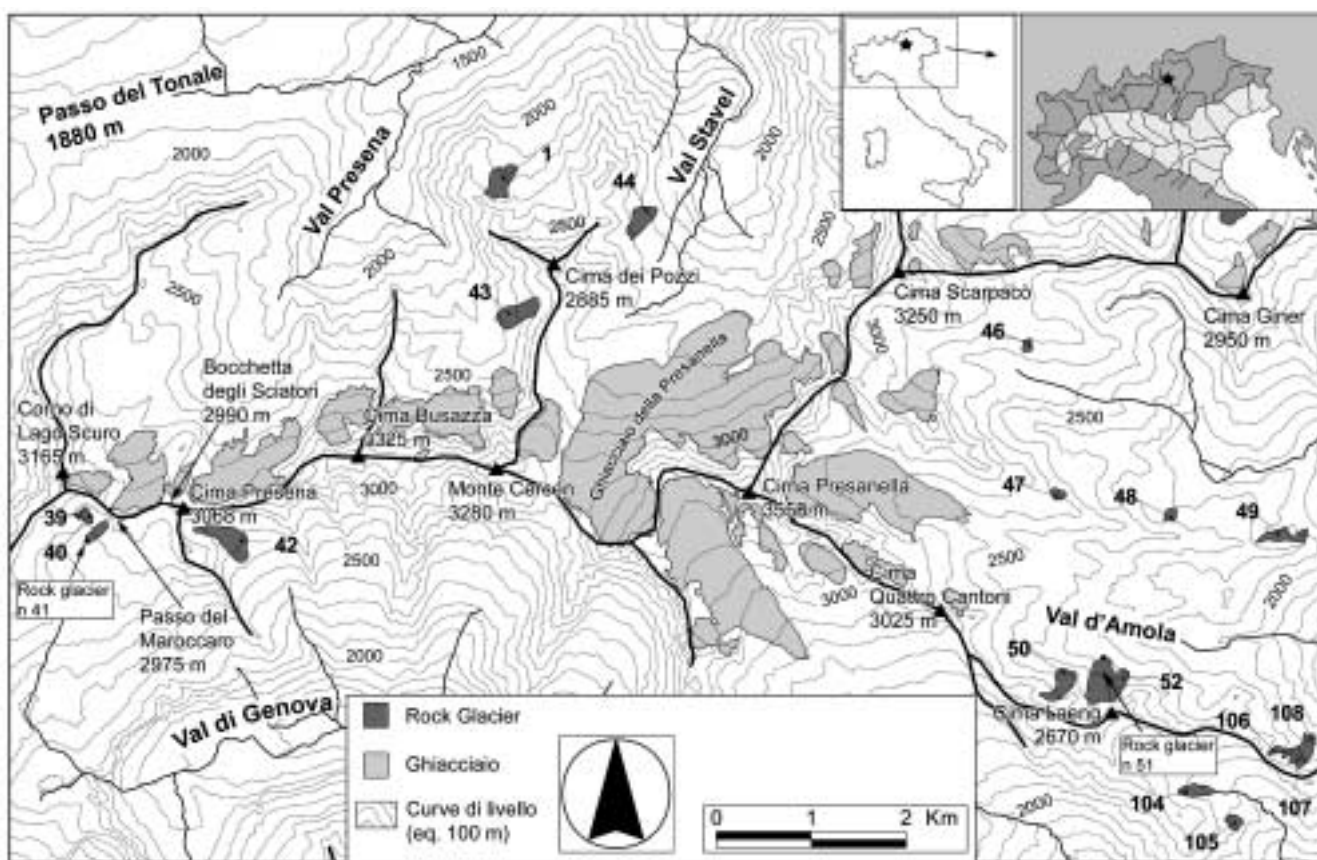


Fig. 1 - Inquadramento geografico dell'area studiata con l'ubicazione dei rock glaciers del Passo del Maroccaro (n. 41) e della Val d'Amola (n. 51). I numeri dei rock glaciers si riferiscono al catasto dei rock glaciers del Gruppo Adamello-Presanella pubblicato in Baroni *et al.* (2004).

Fig. 1 - Map of the study area with the location of the Passo del Maroccaro (n. 41) and Val d'Amola (n. 51) rock glaciers. Numbers of the rock glaciers refer to the rock glacier inventory of the Adamello-Presanella Group published in Baroni *et al.* (2004).

mente a N di Cima Laeng. In accordo con il catasto di Baroni *et al.* (*op. cit.*), i due rock glaciers sono identificati rispettivamente con il n. 41 e il n. 51 (Fig. 1).

Il rock glacier n. 41, di tipo *tongue shape*, è esposto a SW e collocato fra 2750 e 2870 m di quota (Fig. 2a). È lungo circa 280 m, largo circa 100 m e la sua superficie è di circa 2,5 ettari. La pendenza media della superficie è di circa 23 gradi. È caratterizzato da un corpo complessivamente rigonfio, ma privo di evidenti rilievi di superficie dovuti al flusso della massa detritica (solchi e rughe longitudinali e trasversali). La copertura del deposito è costituita da massi di dimensioni metriche o plurimetriche con una tessitura di tipo *open work*. Sono molto scarsi e isolati gli affioramenti di detrito a granulometria più fine (ghiaie e sabbie). Il corpo detritico è delimitato da una ripida scarpata frontale e laterale, in corrispondenza della quale emerge materiale mediamente più fine con matrice ghiaiosa e sabbiosa. La scarpata, caratterizzata da una pendenza piuttosto accentuata, appare instabile e incisa da solchi di degradazione e piccole nicchie di distacco del materiale. Alla base della scoperta si trova un accumulo di grossi blocchi caduti dal margine superiore, dove si osservano numerosi massi in posizione instabile. La copertura vegetale è quasi assente, ad eccezione di ceppi isolati di piante pioniere nelle aree dove emerge la matrice fine e di una scarsa presenza di licheni crostosi sui massi più favorevolmente esposti.

Anche il rock glacier n. 51 è di tipo *tongue shape*, è esposto a N e si sviluppa fra 2320 e 2490 m di quota (Fig. 2b). La lunghezza del deposito è di circa 530 m, la larghezza massima raggiunge i 250 m e la sua superficie è pari a 9,8 ettari. La pendenza media della superficie è di circa 18 gradi. Il corpo detritico appare rigonfio, soprattutto nella zona inferiore, mentre la zona dorsale è caratterizzata da rughe e solchi piuttosto pronunciati. Verso monte il rock glacier è caratterizzato da un'ampia conca a cucchiaio sviluppata in senso longitudinale e delimitata ai lati da due creste nettamente rilevate rispetto alla topografia circostante. La tessitura superficiale è di tipo *open work*, con prevalenza di massi di dimensioni metriche o plurimetriche, ma non mancano ampie zone dove affiora detrito più fine (ghiaia e sabbia). Materiale a granulometria fine emerge anche in corrispondenza della sommità delle rughe trasversali presenti nella parte bassa del deposito. La scarpata frontale e laterale, ripida e molto pronunciata, mette in evidenza il materiale più fine ed è caratterizzata da solchi di debris-flow e distacchi recenti di materiale. Alla base della scoperta è presente un accumulo di grossi massi franati dal margine superiore. La vegetazione erbacea si sviluppa sulle aree dove affiora il materiale più fine ed è particolarmente evidente in corrispondenza del settore orientale della scarpata frontale. Anche la



Fig. 2 - I rock glaciers del Passo del Maroccaro (a) e della Val d'Amola (b).

Fig. 2 - The Passo del Maroccaro rock glacier (a) and the Val d'Amola rock glacier (b).

copertura di licheni è piuttosto sviluppata e copre estesamente i massi situati sulla zona dorsale del deposito.

### 3. METODI

Su entrambi i rock glaciers scelti per i rilievi topografici è stata impostata una rete di monitoraggio costituita da 25 massi di dimensioni metriche, distribuiti dal margine superiore della scarpata frontale all'area prossima alla radice del deposito. Nei massi sono state infisse viti in metallo, sulle quali è stato appoggiato il prisma riflettente utilizzato nelle operazioni di rilievo. I punti contrassegnati sono stati numerati e la loro posizione è stata rilevata con un GPS palmare (modello "Trimble Geoexplorer 3c"), al fine di consentirne il ritrovamento negli anni successivi.

I punti sono stati posizionati e rilevati per la prima volta nel 2001, la seconda volta nel 2002 e la terza nel 2004. Al momento del primo rilievo è stato posizio-

nato il punto di stazione per il teodolite, collocato in entrambi i casi nella zona antistante il rock glacier, a circa 250 m di distanza dal deposito n. 41 e a circa 650 m dal n. 51. In questo secondo caso, la collocazione topografica particolare del rock glacier non ha consentito di individuare un punto di stazione a una distanza più ridotta, ma questo non ha comunque diminuito eccessivamente la precisione del rilievo. I rilievi sono stati effettuati utilizzando un distanziometro laser modello "Sokkia PowerSet 3100" con precisione di 3 centesimi di angolo (rilievi 2001 e 2002) e "Sokkia PowerSet 2030 R3" con precisione di due centesimi di angolo (rilievo 2004).

#### 4. RISULTATI E DISCUSSIONE

##### 4.1. Rock glacier del Passo del Maroccaro (n. 41)

I 25 massi plurimetrici rilevati a distanza di tre anni (2001-2004) sul rock glacier n. 41 hanno mostrato spostamenti lineari totali compresi fra 0,08 e 0,73 m, pari rispettivamente a 0,03 m anno<sup>-1</sup> e 0,24 m anno<sup>-1</sup> (Tab. 1; Fig. 3). I valori indicati nella tabella 1 si riferiscono alla proiezione in pianta dello spostamento reale dei punti misurati, che nella realtà avviene secondo la pendenza del corpo detritico. Lo spostamento medio dei punti rilevati in tutto il periodo

Tab. 1 - Spostamenti lineari dei massi rilevati sui rock glaciers del Passo del Maroccaro (n. 41) e della Val d'Amola (n. 51). Sono indicati gli spostamenti parziali (2001-2002 e 2002-2004) e lo spostamento totale rilevato a distanza di tre anni (2001-2004). (\*) Il masso contrassegnato con il n. 3 è caduto dal margine della fronte del deposito n 41 e non è stato rilevato nel 2004.

Tab. 1 - Linear displacement of the surveyed boulders on the Passo del Maroccaro (n. 41) and Val d'Amola (n. 51) rock glaciers. The partial (2001-2002 and 2002-2004) and the whole 3-year (2001-2004) displacements are shown. (\*) The boulder n. 3 (rock glacier 41) fell from the upper frontal edge after the first survey, therefore it has not been surveyed in the 2004.

Punto	Spostamento 2001-2002 (1 anno)		Spostamento 2002-2004 (2 anni)				Spostamento totale 2001-2004			
	RG n. 41		RG n. 41		RG n. 51		RG n. 41		RG n. 51	
	Totale (m)	Totale (m)	Totale (m)	Velocità (m anno <sup>-1</sup> )	Totale (m)	Velocità (m anno <sup>-1</sup> )	Totale (m)	Velocità (m anno <sup>-1</sup> )	Totale (m)	Velocità (m anno <sup>-1</sup> )
1	0,16	0,13	0,43	0,22	0,41	0,20	0,59	0,20	0,53	0,18
2	0,21	0,13	0,52	0,26	0,40	0,20	0,73	0,24	0,53	0,18
3(*)	0,20	0,15	-	-	0,39	0,20	-	-	0,54	0,18
4	0,18	0,12	0,48	0,24	0,35	0,17	0,65	0,22	0,46	0,15
5	0,17	0,06	0,44	0,22	0,19	0,10	0,60	0,20	0,25	0,08
6	0,17	0,05	0,47	0,24	0,09	0,05	0,63	0,21	0,14	0,05
7	0,16	0,02	0,45	0,22	0,11	0,06	0,60	0,20	0,13	0,04
8	0,15	0,04	0,37	0,18	0,08	0,04	0,51	0,17	0,10	0,03
9	0,11	0,04	0,27	0,13	0,05	0,02	0,37	0,12	0,07	0,02
10	0,17	0,04	0,47	0,24	0,15	0,08	0,64	0,21	0,18	0,06
11	0,16	0,02	0,46	0,23	0,04	0,02	0,61	0,20	0,02	0,01
12	0,15	0,07	0,38	0,19	0,26	0,13	0,52	0,17	0,33	0,11
13	0,16	0,13	0,42	0,21	0,36	0,18	0,57	0,19	0,50	0,17
14	0,13	0,11	0,29	0,15	0,37	0,18	0,40	0,13	0,47	0,16
15	0,15	0,16	0,35	0,17	0,39	0,20	0,49	0,16	0,56	0,19
16	0,13	0,04	0,32	0,16	0,15	0,08	0,44	0,15	0,19	0,06
17	0,08	0,07	0,15	0,08	0,24	0,12	0,20	0,07	0,31	0,10
18	0,08	0,04	0,07	0,03	0,22	0,11	0,13	0,04	0,23	0,08
19	0,07	0,15	0,03	0,02	0,33	0,17	0,09	0,03	0,48	0,16
20	0,08	0,07	0,06	0,03	0,25	0,12	0,08	0,03	0,32	0,11
21	0,04	0,08	0,11	0,06	0,20	0,10	0,15	0,05	0,28	0,09
22	0,09	0,04	0,20	0,10	0,13	0,06	0,29	0,10	0,17	0,06
23	0,12	0,06	0,30	0,15	0,23	0,12	0,42	0,14	0,29	0,10
24	0,15	0,04	0,38	0,19	0,15	0,08	0,54	0,18	0,20	0,07
25	0,10	0,04	0,22	0,11	0,13	0,07	0,31	0,10	0,17	0,06
Media	0,13	0,08	0,32	0,16	0,23	0,11	0,44	0,15	0,30	0,10

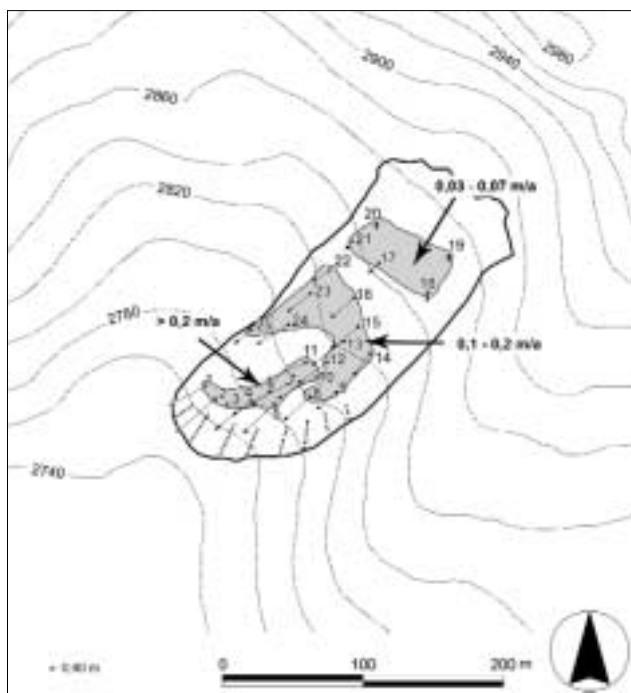


Fig. 3 - Risultati del rilievo topografico sul rock glacier del Passo del Maroccaro (n. 41). I vettori indicano lo spostamento complessivo intercorso fra il 2001 e il 2004. Le aree in grigio indicano i punti che hanno fatto registrare tassi di spostamento omogenei (in metri/anno) nel corso di tutto il periodo di misura (2001-2004).

*Fig. 3 - Results of the topographic surveys on the Passo del Maroccaro rock glacier (n. 41). Arrows indicate the 3-year total displacement (2001-2004) of the marked boulders. Boulders moving with an homogeneous rate in the whole monitoring period (2001-2004) are indicated with grey areas.*

considerato è risultato pari a 0,44 m, corrispondente a una velocità media di 0,15 m anno<sup>-1</sup>. Nel primo intervallo di rilevamento (2001-2002) la velocità media era risultata di 0,13 m anno<sup>-1</sup>, nel secondo (2002-2004) di 0,16 m anno<sup>-1</sup>. Nel periodo intercorso fra il rilievo del 2002 e quello del 2004 il masso contrassegnato dal n. 3, situato in corrispondenza del margine superiore della scarpata frontale, è franato e il relativo dato di spostamento è stato quindi perso.

I movimenti verticali dei massi misurati dopo tre anni sono risultati tutti orientati verso il basso, con valori compresi fra -0,37 e -0,07 m. È tuttavia difficile scomporre i valori di movimento verticale nelle due componenti, quella dovuta al movimento del masso verso valle e quella dovuta all'abbassamento del corpo detritico per una possibile degradazione del permafrost contenuto all'interno. Secondo Barsch (1996), il movimento verticale dei massi può essere spiegato da tre diversi fattori: a) stabilizzazione dovuta alla fusione del ghiaccio interno (spostamento verso il basso); b) guadagno di massa dovuto al con-

gelamento di acqua di fusione alla tavola del permafrost (spostamento verso l'alto); c) movimento verticale dovuto all'inclinazione del deposito (spostamento verso il basso). Dai calcoli topografici eseguiti su alcuni dei massi rilevati (6, 7, 12-15) è stata stimata una componente del movimento verticale non dovuta allo spostamento verso valle compresa fra 0,01 e 0,11 m. Pur con le dovute precauzioni, dovrebbe essere questo l'ordine di grandezza della perdita di massa del deposito dovuta alla possibile degradazione del permafrost nel corso del periodo di monitoraggio.

Il movimento dei massi nell'intero arco di tempo considerato (3 anni) è avvenuto secondo una direzione omogenea, che corrisponde approssimativamente alla direzione di massima pendenza del deposito. È possibile raggruppare i punti misurati secondo tassi di spostamento omogeneo e delineare tre aree con caratteristiche dinamiche diverse (Fig. 3). La zona più elevata del rock glacier (punti da 17 a 21) appare più stabile e ha fatto registrare velocità di spostamento annue comprese fra 0,03 e 0,07 m. La porzione centrale del deposito (punti 8, 9, 12-16, 22-25) è invece più dinamica, con velocità di spostamento comprese fra 0,10 e 0,20 m anno<sup>-1</sup>. La parte di deposito ancora più dinamica della precedente è quella situata immediatamente a monte del margine superiore della scarpata frontale. In quest'area i massi rilevati (1-7, 10, 11) hanno mostrato velocità di spostamento annuo comprese fra 0,20 e 0,24 m.

#### 4.2. Rock glacier della Val d'Amola (n. 51)

Sul rock glacier n. 51, i 25 massi rilevati hanno fatto registrare in tutto l'intervallo di tempo considerato (2001-2004) spostamenti lineari compresi fra 0,02 e 0,56 m, pari rispettivamente a 0,01 e 0,19 m anno<sup>-1</sup> (Tab. 1, Fig. 4). Alcuni punti sono risultati sostanzialmente fermi (punti 6-9), mentre altri hanno avuto spostamenti paragonabili a quelli del deposito n. 41 (punti 1-4). Lo spostamento lineare medio di tutti i punti rilevati è risultato pari a 0,30 m, corrispondente a una velocità media di 0,10 m anno<sup>-1</sup>. Nel primo intervallo di rilevamento (2001-2002), la velocità media di tutti i punti considerati era risultata pari a 0,08 m anno<sup>-1</sup>, nel secondo (2002-2004) a 0,11 m anno<sup>-1</sup>.

I rilievi topografici hanno mostrato come questo deposito sia complessivamente meno dinamico del precedente (n. 41). I massi caratterizzati dalle maggiori velocità si sono spostati nell'arco dei tre anni in direzioni orientate approssimativamente secondo la massima pendenza del deposito, anche se è possibile individuare diversi modelli. In particolare, i punti situati sulla cresta longitudinale che delimita il rock glacier a destra (punti 12-19) si muovono verso la parte centrale del deposito, caratterizzata da un'ampia conca topograficamente depressa rispetto alle zone



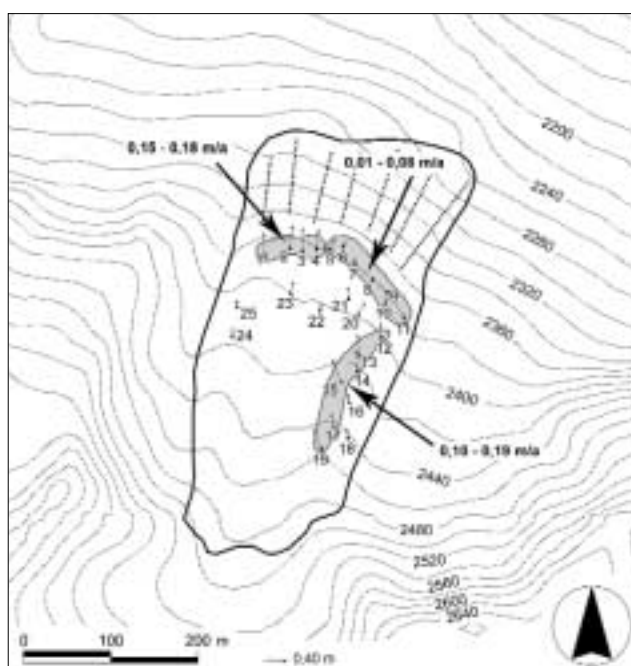


Fig. 4 - Risultati del rilievo topografico sul rock glacier della Val d'Amola (n. 51). I vettori indicano lo spostamento complessivo intercorso fra il 2001 e il 2004. Le aree in grigio indicano i punti che hanno fatto registrare tassi di spostamento omogenei (in metri  $\text{anno}^{-1}$ ) nel corso di tutto il periodo di misura (2001-2004).

Fig. 4 - Results of the topographic surveys on the Val d'Amola rock glacier (n. 41). Arrows indicate the 3-year total displacement (2001-2004) of the marked boulders. Boulders moving with an homogeneous rate in the whole monitoring period (2001-2004) are indicated with grey areas.

lateral. I punti più dinamici situati in corrispondenza del margine superiore della scarpata frontale (punti 1-4) e quelli situati nella parte centrale (punti 20-25) si muovono invece secondo la direzione di massima pendenza del deposito, anche se con angoli leggermente diversi fra loro (Fig. 4).

Raggruppando i punti misurati secondo tassi di spostamento omogeneo, è possibile individuare due aree nettamente più dinamiche (Fig. 4). La prima corrisponde alla cresta longitudinale che lo delimita a destra, caratterizzata da tassi di spostamento annuo compresi fra 0,10 e 0,19 m; la seconda coincide con il settore sinistro della scarpata frontale (punti 1-4), dove i massi si muovono con velocità comprese fra 0,15 e 0,18  $\text{m anno}^{-1}$ . Il settore destro della scarpata frontale è invece caratterizzato da una dinamica ridottissima, con spostamenti compresi fra 0,01 e 0,08  $\text{m anno}^{-1}$ . Si tratta in molti casi di spostamenti lineari al limite del margine di errore dello strumento di misurazione. Per quanto riguarda la zona frontale del deposito, le misure di velocità hanno quindi evidenziato caratteristiche dinamiche differenziate, con il

settore in sinistra idrografica nettamente più veloce del settore destro, il quale, alla luce delle misure effettuate, può essere definito inattivo.

Le caratteristiche geomorfologiche del settore frontale del rock glacier confermano il modello di comportamento dinamico differenziato messo in evidenza dalle misure topografiche. Il settore sinistro della fronte è infatti caratterizzato da un evidente lobo rigonfio e da una scarpata ripida e instabile, con scarsa o nulla copertura vegetale e con segni recenti di crollo di materiale (Fig. 5). La relativa stabilità del settore destro della fronte è invece messa in evidenza dalle caratteristiche geomorfologiche della scarpata, che appare meno acclive del settore sinistro e caratterizzata da un'ingente copertura vegetale (Fig. 5). Una relazione diretta fra le caratteristiche dinamiche dei rock glaciers e l'espressione geomorfologica esterna, con la formazione di lobi rigonfi in corrispondenza dei settori attivi caratterizzati da velocità di spostamento più elevata, è stata messa in evidenza anche in altri studi effettuati nelle Alpi svizzere (Roer 2003; Roer *et al.* 2005). Queste osservazioni, inoltre, confermano la validità dei criteri geomorfologici adottati nel presente lavoro per definire le caratteristiche



Fig. 5 - Rock glacier della Val d'Amola (n. 51). Si può osservare l'espressione morfologica dei diversi tassi di spostamento registrati con i rilievi topografici. Il settore in sinistra idrografica è risultato più dinamico (0,15-0,18  $\text{m anno}^{-1}$ ) e mostra un lobo frontale rigonfio con una scarpata acclive, priva di vegetazione e soggetta a crolli. Il settore in destra può essere definito inattivo (0,01-0,08  $\text{m anno}^{-1}$ ) e appare meno rigonfio, più stabilizzato e coperto da vegetazione erbacea.

Fig. 5 - Val d'Amola rock glacier (n. 51). The morphological evidence of the different displacement rate recorded with the topographic surveys can be observed. The left sector of the front is more dynamic (0.15-0.18  $\text{m year}^{-1}$ ) and shows a swollen lobe with a steep, unstable and vegetation-free frontal slope. The right sector can be regarded as inactive (0.01-0.08  $\text{m year}^{-1}$ ) and shows a flat morphology, with a stable and vegetated frontal slope.

morfodinamiche dei rock glaciers ed evidenziano come su uno stesso deposito possano coesistere a stretto contatto settori morfodinamicamente attivi con altri inattivi.

#### 4.3. Rock glaciers n. 41 e n. 51: caratteristiche morfodinamiche comuni

Nei grafici della figura 6 sono messi a confronto i tassi di spostamento dei massi rilevati nei due intervalli di tempo (2001-2002 e 2002-2004). Per entrambi i depositi studiati, il modello di attività è stato simile nei due intervalli di tempo, come viene evidenziato dall'analogo andamento delle curve della velocità dei diversi massi. Per il rock glacier n. 51, l'andamento omogeneo delle due curve di spostamento è confermato dall'ottima correlazione lineare riscontrata fra i tassi di spostamento dei diversi massi nei due intervalli di tempo ( $R^2 = 0,87$ ).

Una caratteristica comune dei due depositi sottoposti ai rilievi topografici di precisione è rappresentata dalla maggiore velocità dei massi superficiali evidenziata nel corso dell'ultimo anno di misura. Come viene messo in evidenza dai grafici di figura 6, quasi tutti i massi misurati sui due depositi si sono mossi più rapidamente nell'intervallo 2002-2004 che nel precedente anno di controllo (2001-2002). In particolare, tale differenza si evidenzia in misura maggiore per i punti più dinamici, come ad esempio nel caso dei punti 1-8 e 10-13 sul rock glacier n. 41 e dei punti 1-4 e 13-15 sul n. 51. Il valore medio di spostamento lineare nei due intervalli di tempo conside-

rati è stato di 0,15 contro 0,13 m anno<sup>-1</sup> per il rock glacier n. 41 e di 0,10 contro 0,08 m anno<sup>-1</sup> per il rock glacier n. 51. Soltanto nel caso del rock glacier n. 41 si nota un evidente "rallentamento" dei massi dal n. 17 al n. 20, tutti situati nel settore più elevato del deposito detritico.

Un simile comportamento, caratterizzato da un'evidente "accelerazione" della dinamica dei rock glaciers attivi nel corso degli ultimi anni, è stato rilevato in molti settori delle Alpi (Kääb *et al.* 2005; Lambiel 2005; Roer *et al. op.cit.*). Una delle possibili cause di questo comportamento è stata attribuita all'incremento delle temperature verificatosi negli ultimi anni, anche se una semplice connessione con tale fattore non è stata riscontrata a scala locale (Roer *et al. op.cit.*). È tuttavia da tenere in considerazione che nell'intervallo 2002-2004 è compresa l'estate del 2003 che, come noto, è stata caratterizzata da temperature eccezionalmente calde. In alcune zone della Svizzera, ad esempio, si sono avuti valori medi delle temperatura minime e massime dei mesi estivi fino a 6 °C superiori alle medie pluridecennali (Beniston 2004), mentre la temperatura del periodo estivo nell'intero territorio elvetico è stata di circa 3 °C più elevata della media 1961-1990 (Gruber *et al.* 2004). Presso la stazione meteorologica di Prà Rodont, situata a 1530 m in un'area limitrofa ai rock glaciers studiati, la temperatura media dell'estate 2003 (giugno-settembre) è stata superiore di circa 2,2 °C rispetto alla media degli ultimi 26 anni (Bezzi *et al.* 2003). Temperature estive più elevate della media hanno dato origine a uno strato attivo di maggior spessore

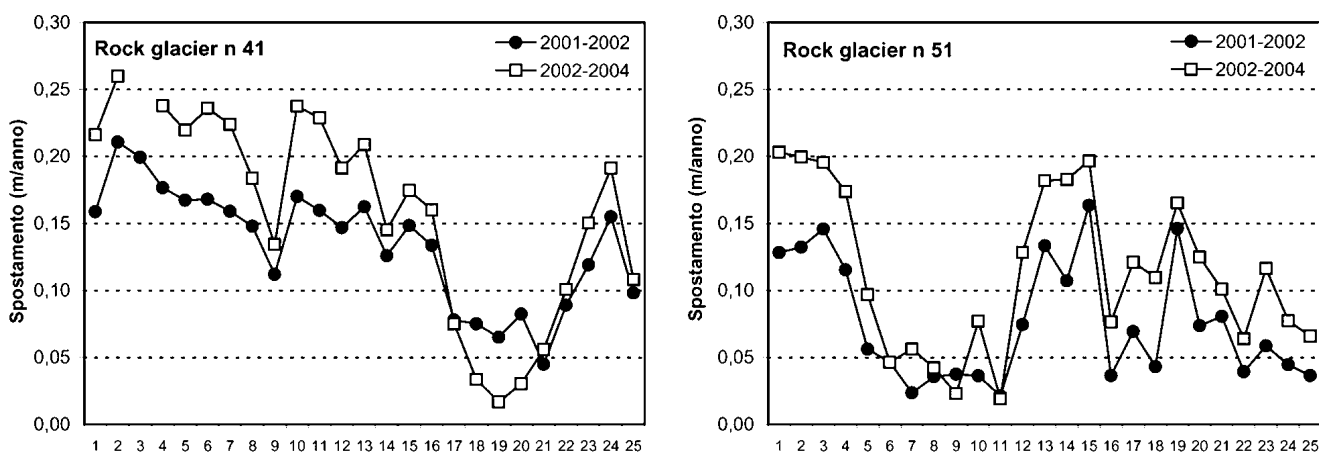


Fig. 6 - Spostamento in m anno<sup>-1</sup> dei punti misurati sui rock glaciers del Passo del Maroccaro (n. 41) e della Val d'Amola (n. 51) nei periodi 2001-2002 e 2002-2004. In entrambi i casi il modello di spostamento si è mantenuto nel tempo, ma si è registrata una generale "accelerazione" della velocità nel secondo periodo di controllo.

Fig. 6 - Displacement (m year<sup>-1</sup>) of the marked boulders on the Passo del Maroccaro (n. 41) and Val d'Amola (n. 51) rock glaciers in the two monitoring intervals (2001-2002 and 2002-2004). In each intervals the behaviour of the two rock glaciers has been the same, but a general "acceleration" of the fast-moving boulders has been observed in the second one (2002-2004).



sui due rock glaciers studiati, con il conseguente cambiamento delle caratteristiche dinamiche dei depositi. Anche se difficilmente valutabile, un simile comportamento è stato probabilmente registrato dal rilievo topografico effettuato nel 2004.

## 5. CONCLUSIONI

Gli spostamenti registrati nel corso dei tre anni di monitoraggio hanno consentito di confermare che i due rock glaciers studiati sono attivi, come era stato in precedenza ipotizzato sulla base delle caratteristiche geomorfologiche. Lo stato di attività dei due depositi, e quindi la presenza di permafrost sotto la copertura detritica a grossi blocchi, è stato confermato da altri tipi di indagini, quali rilievi BTS (*Bottom Temperature of the winter Snow cover*), misure del regime termico della superficie del suolo e misure di temperatura delle sorgenti che emergono in corrispondenza della fronte (Seppi 2006).

Entrambi i rock glaciers hanno messo in evidenza spostamenti di poco superiori alla decina di centimetri all'anno, mostrando caratteristiche dinamiche differenziate in diverse zone del deposito. In particolare, nel caso del rock glacier n. 51, la zona frontale ha messo in evidenza un settore più dinamico (0,15-0,18 m anno<sup>-1</sup>) e un settore che può essere considerato inattivo (0,01-0,08 m anno<sup>-1</sup>). Questo deposito ha quindi mostrato l'esistenza di porzioni attive contigue ad altre non attive. Esso si trova probabilmente in una fase dinamica di inattivazione ed è collocato in una zona situata al margine delle condizioni di esistenza del permafrost in quest'area.

Le caratteristiche geomorfologiche del settore frontale del rock glacier n. 51, inoltre, confermano il modello differenziato di comportamento dinamico messo in evidenza dalle misure topografiche. Il settore sinistro della fronte, rivelatosi più dinamico con i rilievi topografici, è infatti caratterizzato da un evidente lobo rigonfio e da una scarpata ripida e instabile, con scarsa o nulla copertura vegetale e con segni recenti di crollo di materiale.

In entrambi i rock glacier sottoposti al monitoraggio topografico, il modello di spostamento dei singoli massi si è conservato nei due intervalli di tempo considerati (2001-2002 e 2002-2004). Si è tuttavia osservata una generale accelerazione dello spostamento nel secondo intervallo di tempo, soprattutto nel caso dei massi caratterizzati dalle maggiori velocità. Un simile comportamento è stato osservato in numerosi studi effettuati in altre zone delle Alpi e potrebbe indicare un cambiamento delle caratteristiche morfodinamiche dei depositi, dovuto alle rapide mutazioni climatiche in corso nelle aree alpine.

La presenza di rock glaciers attivi collocati a una quota minima di poco superiore a 2300 m conferma

come nel Gruppo Adamello-Presanella il permafrost possa sporadicamente essere presente, nelle condizioni microclimatiche e topografiche più favorevoli, anche a quote relativamente poco elevate.

## RINGRAZIAMENTI

Il lavoro di terreno si è svolto con il supporto degli operatori del Comitato Glaciologico Trentino SAT. In particolare, si intendono ringraziare: Roberto Bezzi, Omar Cagliero, Carlo Carè, Luca Carturan, Stefano Fontana, Franco Marchetti, Andrea Paoli e Davide Tagliavini. Un particolare ringraziamento al Parco Naturale Adamello-Brenta per il supporto finanziario fornito alla ricerca.

## BIBLIOGRAFIA

- Baroni C. & Carton A., 1987 - Geomorfologia della Valle dell'Avio (Gruppo dell'Adamello). *Nat. Bresciana*, 23: 3-47.
- Baroni C. & Carton A., 1990 - Carta geomorfologica della Val Miller e della Conca del Baitone (Gruppo dell'Adamello). *Nat. Bresciana*, 25: 5-25.
- Baroni C. & Carton A., 1996 - Geomorfologia dell'alta Val di Genova (Gruppo dell'Adamello, Alpi Centrali). *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 19: 3-17.
- Baroni C., Carton A., Leso M., Martin S., Montresor L. & Rigatti G., 1998 - *Carta Geologica della Provincia di Trento. Sezione 042130 Laghi di Cornisello (scala 1:10000). Note Illustrative*. Provincia Autonoma di Trento, Servizio Geologico: 40 pp.
- Baroni C., Carton A. & Seppi R., 2004 - Distribution and behaviour of rock glaciers in the Adamello-Presanella Massif (Italian Alps). *Permafrost Periglac. Process.*, 15: 243-259.
- Barsch D., 1996 - *Rockglaciers: Indicators for the Present and Former geocology in High Mountain Environments*. Springer, Berlin: 331 pp.
- Beniston M., 2004 - The 2003 heat wave as an example of summers in a greenhouse climate? Observations and climate model simulations for Basel, Switzerland. *Global Planet. Change*, 44: 73-81.
- Berthling I., Etzelmüller B., Eiken T. & Sollid J.L., 1998 - Rock Glaciers on Prins Karls Forland, Svalbard. I: internal structure, flow velocity and morphology. *Permafrost Periglac. Process.*, 9: 135-145.
- Bezzi R., Carlesso N., Carturan L., Dellai C., Fontana S., Paoli A. & Seppi R., 2003 - Il bilancio di massa sul Ghiacciaio d'Agola (2002-2003). *Boll. SAT*, 4: 13-18.
- Castiglioni G.B., 1961 - *I depositi morenici del Gruppo Adamello-Presanella con particolare riguardo agli stadi glaciali postwürmiani*. Società Cooperativa Tipografica, Padova: 131 pp.
- Franco B. & Reynaud L., 1992 - Ten year surficial velo-

- city on a rock glacier (Laurichaud, French Alps). *Permafrost Periglac. Process.*, 3: 209-213.
- Gruber S., Hoelzle M. & Haeberli W., 2004 - Permafrost thaw and destabilization of Alpine rock walls in the hot summer of 2003. *Geophys. Res. Lett.*, 31: L13504, doi:10.1029/2004GL020051.
- Guglielmin M. & Smiraglia C., (a cura di) 1997 - Catasto dei rock glaciers delle Alpi italiane. *Arch. Comit. Glac. It.*, 3: 1-103.
- Guglielmin M., Camusso M., Polesello S. & Valsecchi S., 2004 - An old relict glacier body preserved in permafrost environment: the foscagno rock glacier ice core (Upper Valtellina, Italian Central Alps). *Arct. Antarct. Alp. Res.*, 36: 108-116.
- Haeberli W., 1985 - Creep of Mountain Permafrost: Internal structure and Flow of Alpine Rock Glaciers. *Mitt. der VAW/ETH*, 77: 1-119.
- Haeberli W., 2005 - Climate change and glacial/periglacial geomorphodynamics in the Alps: a challenge of historical dimensions. *Geogr. Fis. Dinam. Quat. Suppl.*, 7: 9-14.
- Haeberli W. & Beniston M., 1998 - Climate change and its impact on glaciers and permafrost in the Alps. *Ambio*, 27: 258-265.
- Haeberli W. & Burn C.R., 2002 - Natural hazards in forests: glacier and permafrost effects as related to climate change. In: Sidle R.C. (eds), *Environmental change and geomorphic hazards in forests*. IUFRO Research Series, 9: 167-202.
- Haeberli W., Huder J., Keusen H.-R., Pika J. & Röthlisberger H., 1988 - Core drilling through rock glacier-permafrost. In: *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Permafrost*. Trondheim, Norway: 937-942.
- Haeberli W., Hoelzle M., Kääb A., Keller F., Vonder Mühll D. & Wagner S., 1998 - Ten years after drilling through the permafrost of the active rock glacier Murtèl, eastern Swiss Alps: Answered questions and new perspectives. In: *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Permafrost*. Yellowknife, Canada: 403-410.
- Haeberli W., Kääb A., Wagner S., Vonder Mühll D., Geissler P., Haas J.N., Glatzel-Mattheier H. & Wagenbach D., 1999 - Pollen analysis and <sup>14</sup>C age of moss remains in a permafrost core recovered from the active rock glacier Murtèl-Corvatsch, Swiss Alps: geomorphological and glaciological implication. *Journ. Glaciol.*, 45: 1-8.
- Harris C., Vonder Mühll D., Isaksen K., Haeberli W., Sollid J.L., King L., Holmlund P., Dramis F., Guglielmin M. & Palacios D., 2003 - Warming permafrost in European mountains. *Global Planet. Change*, 39: 215-225.
- Hoelzle M., Mittaz C., Etzelmüller B. & Haeberli W., 2001 - Surface energy fluxes and distribution models of permafrost in European mountain areas: an overview of current developments. *Permafrost Periglac. Process.*, 12: 53-68.
- Imhof M., 1996 - Modelling and verification of the permafrost distribution in the Bernese Alps (Western Switzerland). *Permafrost Periglac. Process.*, 7: 267-280.
- Imhof M., Pierrehumbert G., Haeberli W. & Kienholz H., 2000 - Permafrost investigation in the Schilthorn Massif, Bernese Alps, Switzerland. *Permafrost Periglac. Process.*, 11: 189-206.
- Isaksen K., Ødegård R.S., Eiken T. & Sollid J.L., 2000 - Composition, flow and development of two tongue-shaped Rock Glaciers in the permafrost of Svalbard. *Permafrost Periglac. Process.*, 11: 241-257.
- Janke J.R., 2005 - The occurrence of alpine permafrost in the Front Range of Colorado. *Geomorphology*, 67: 375-389.
- Kääb A., Roer I. & Frauenfelder R., 2005 - Current changes in mountain permafrost creep: possible causes and consequences. Abstract, 2<sup>nd</sup> European Conference on Permafrost, Potsdam. *Terra Nostra*, 2: 96.
- Koning D.M. & Smith D.J., 1999 - Movement of King's Throne rock glacier, Mount Rae Area, Canadian Rocky Mountains. *Permafrost Periglac. Process.*, 10: 151-162.
- Konrad S.K., Humphrey N.F., Steig E.J., Clark D.H., Potter N. & Pfeffer W.T., 1999 - Rock glacier dynamics and paleoclimatic implications. *Geology*, 27: 1131-1134.
- Lambiel C., 2005 - Rock glacier acceleration: a case study in the Mont Gelè area (Swiss Alps). Abstract, 2<sup>nd</sup> European Conference on Permafrost, Potsdam. *Terra Nostra*, 2: 98.
- Lambiel C. & Reynard E., 2001 - Regional modelling of present, past and future potential distribution of discontinuous permafrost based on a rock glacier inventory in the Bagnes-Hérémence area (Western Swiss Alps). *Norsk Geog. Tidsskrift-Norwegian Journ. Geogr.*, 55: 219-223.
- Mihajlovic D., Kölbinger D., Kunz I., Schwab S., Kienholz H., Budmiger K., Imhof M. & Krummenacher B., 2003 - Developing new methods for monitoring periglacial phenomena. In: *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Permafrost*. Zürich, Switzerland: 765-770.
- Ødegård R.S., Isaksen K., Eiken T., Sollid J.L., 2003 - Terrain analyses and surface velocity measurements of the Hiorthfjellet rock glacier, Svalbard. *Permafrost Periglac. Process.*, 14: 359-365.
- Roer I., 2003 - Rock glacier kinematics in the turtmantal, Valais, Switzerland-observational concept, first results and research perspectives. In: *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Permafrost*. Zürich, Switzerland: 971-975.
- Roer I., Kääb A. & Dikau R., 2005 - Rockglacier acceleration in the Turtmann Valley (Swiss Alps): probable controls. *Norsk Geog. Tidsskrift-Norwegian Journ. Geogr.*, 59: 157-163.
- Seppi R., 2006 - *I rock glaciers delle Alpi Centrali come indicatori ambientali (Gruppo Adamello-Presanella e settore orientale del Gruppo Ortles-Cevedale*. Tesi di dottorato non pubblicata, Università di Pavia: 199 pp.
- Seppi R., Baroni C. & Carton A., 2002 - *Catasto dei Rock*

- Glaciers del Parco Adamello Brenta*. Relazione Tecnica, Trento, non pubblicata: 125 pp.
- Sloan V.F. & Dyke L.D., 1998 - Decadal and millennial velocities of rock glaciers, Selwin Mountains, Canada. *Geogr. Ann.*, 80A: 237-249.
- Smiraglia C., 1989 - Misure di velocità superficiali al rock glacier orientale di Val Pisella (Gruppo del Cevedale, Alta Valtellina). *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 12: 41-44.
- Wahrhafting C. & Cox A., 1959 - Rock glaciers in the Alaska Range. *Bull. Geol. Soc. America*, 70: 383-436.

