

Le fluttuazioni dei ghiacciai durante e dopo la Piccola Età Glaciale

Glacier fluctuations during and after the Little Ice Age

Riassunto

In questo lavoro l'autore intende formulare alcune riflessioni per meglio comprendere l'informazione climatica espressa dalle fluttuazioni glaciali avvenute nella Piccola Età Glaciale e nella successiva deglaciazione del XX secolo.

Abstract

In this work the author carries through some investigations to better understand climate information expressed by glacial fluctuations occurred in the Little Ice Age and in the subsequent de-glaciation of the 20th century.

Il punto di partenza: la Piccola Età Glaciale

Nell'Olocene (11.000 anni BP – attuale) le oscillazioni di temperatura, pur di modesta ampiezza rispetto alla media del XX secolo (meno di 2 °C), hanno prodotto significative fluttuazioni dei ghiacciai montani. La Piccola Età Glaciale (PEG, XIV – XX secolo) è uno dei periodi di maggior crescita del nostro interglaciale (Matthews et al., 2005). Essa ha condotto i ghiacciai, talvolta a più riprese nei sei secoli della sua durata, su posizioni nettamente più avanzate rispetto a quelle assunte alla fine del XX secolo. Nelle Alpi Svizzere si stima ad esempio che i ghiacciai occupassero durante la loro massima espansione una superficie del 40 % superiore a quella dell'anno 2000 (Paul et al., 2004). Più queste fluttuazioni all'interno della PEG risultano documentate, più si scopre che esse sono state vigorose e non hanno seguito uno schema monolitico, da una crescita a una decrescita finale. Nelle Alpi il grande Ghiacciaio di Aletsch, un apparato noto per la sua capacità di non evidenziare le piccole pulsazioni, ma di registrare quelle maggiori (della durata di numerosi decenni), ha prodotto tre grandi avanzate di uguale ampiezza: la prima attorno al 1350, le altre nei periodi 1580-1653 e 1820-1856 (Holzhauser, 1997). Tra queste grandi avanzate la sua fronte è arretrata da uno a due chilometri.

Anche in Norvegia le avanzate sembrano aver avuto inizio nel XIV secolo, ma le successive appaiono inferiori a quelle delle Alpi, con un secondo massimo

The starting point: the Little Ice Age

In Holocene (11,000 BP to present) the temperature oscillations, though of modest entities with respect to 20th century average (less than 2 °C), caused significant fluctuations in mountain glaciers. The Little Ice Age (LIA, 14th-20th century) is one of the major expansion periods that our interglacial has ever known (Matthews et al., 2005). It caused the glaciers to advance, sometimes in various episodes along its evolution, to definitely more advanced positions as compared to those reached at the end of 20th century. For instance, it is believed that the glaciers of the Swiss Alps have attained, in their maximum expansion, an area 40 % larger than the one of year 2000 (Paul et al., 2004). The more accurately such fluctuations within the Little Ice Age have been recorded, the more we realize that they have been substantial and have not followed a monolithic scheme with an initial expansion and a final shrinking. In the Alps, the Aletsch Glacier, known as having never undergone small fluctuations but major ones only (of several decennials duration), evidenced three great expansions of equivalent amplitude: the first around 1350, the others in 1580-1653 and 1820-1856 periods (Holzhauser, 1997). Within these great expansions its front has withdrawn one to two kilometers.

In Norway as well, the expansions apparently have started in the 14th century, but subsequent ones turned out to be smaller than those occurring in the Alps,

(*) IRD - Institut de Recherche pour le Développement, Paris, France.

molto marcato a metà del XVIII secolo, ossia con un secolo di anticipo rispetto alle grandi "crescite" alpine (Nesje e Dahl, 2003). I progressi del XIX secolo, 1815–1820 e 1850–1860, appaiono al contrario più attenuati, in quanto questi ghiacciai si orientano verso una riduzione nel XVIII secolo, cioè in piena PEG. Uno schema simile si osserva nelle Ande tropicali, in particolare in Bolivia, dove i principali incrementi si sviluppano fra la metà del XVII (il più intenso) e quella del XVIII secolo, con una successiva tendenza al ritiro per tutto il XIX secolo, appena interrotto nei suoi primi due decenni (Rabatel et al., 2005).

In America settentrionale grandi espansioni glaciali si sono avute nel XIV, alla fine del XVI, alla fine del XVII, alla fine del XVIII e nel corso del XIX secolo, soprattutto all'inizio e alla fine di quest'ultimo. La dispersione delle grandi avanzate glaciali in tempi diversi della PEG non contraddice quanto verificatosi sulle Alpi. Dai primi decenni del XIV secolo e sino al 1935 (Holzhauser, 1997) il Ghiacciaio dell'Aletsch è rimasto nettamente più esteso, e la sua fronte almeno 1,5 km più a valle, rispetto all'intervallo 1950–2000. È la dimensione che i ghiacciai hanno conservato nel tempo, piuttosto che la posizione più avanzata, che deve essere presa in considerazione per definire la durata della PEG. Da questo punto di vista, essa si è sviluppata dal 1300 circa fino al 1930.

Le prime ricostruzioni indirette delle temperature dell'ultimo millennio nell'emisfero Nord mostravano una curva declinante e regolare dopo il Periodo Caldo Medievale e fino al termine del XIX secolo, seguita da un aumento esponenziale e dalla curvatura degli anni post-1930 (il famoso *hockey-stick* degli anglosassoni); recenti analisi forniscono però una visione più contrastata (Moberg et al., 2005). Cali termici, infatti, si sono avuti a più riprese nell'emisfero Nord attorno al 1300, al 1450, in modo quasi continuo tra 1500 e 1720 (il più importante e lungo raffreddamento) e durante i due primi decenni del XIX secolo.

È tuttavia improprio porre in relazione sistematica crescite glaciali e minimi termici. Ad esempio, i ghiacciai alpini hanno raggiunto il loro massimo prima del periodo più freddo (1650–1715); allo stesso modo, quelli scandinavi hanno conosciuto il loro picco a metà '700, in un periodo di temperature elevate, simili in estate a quelle della seconda metà del '900.

Poiché i ghiacciai risentono sia delle precipitazioni invernali che delle temperature, e dato che a scala multidecennale queste ultime mostrano una distribuzione spaziale più omogenea, si può ritenere, *a priori*, che gli scostamenti osservati a livello mondiale tra avanzate e ritiri glaciali possano associarsi, rispettivamente, ad aumenti e a significativi minimi nelle precipitazioni. Secondo un recente studio (Vincent et al., 2005), le grandi avanzate alpine del 1820 ca. sono state favorite da un forte aumento delle precipitazioni invernali, mentre la riduzione quasi costante dei ghiacciai boli-

with a marked second peak in mid 18th century, leading by over one century the great Alpine expansions (Nesje and Dahl, 2003). The 19th century expansions (1815-1820, 1850-1860) are however more limited, influenced by the 18th century shrinkage, within the Little Ice Age. A similar scheme is observed in the Tropical Andes, particularly in Bolivia, where the main increments develop from mid 17th (the most intense) to mid 18th centuries, followed by a shrinking trend throughout the 19th century with the exception of the first twenty years (Rabatel et al., 2005).

In North America great glacial expansions have occurred in the 14th century, at the end of 16th and of 18th, and throughout 19th (with peaks at the start and at the end) centuries. The distribution of the great glacial expansions at different times within the Little Ice Age is not conflicting with what recorded in the Alps. Indeed, taking the period 1950-2000 as a reference, the Aletsch Glacier has maintained its extension from the 14th century first decades until 1935 (Holzhauser, 1997) and its forefront extended at least 1.5 Km into the valley. Thus the glacier extensions, rather than their forefront positions, should be considered to frame the Little Ice Age. In this frame its duration is from approximately 1300 to 1930.

The first indirect reconstruction of last millennium temperatures for the Northern Hemisphere showed a regular declining curve from the Medieval Warm Period till the end of the 19th century followed by an exponential increase and the stange bend of the post-'30s (the famous *hockey stick* of the British). A more recent reconstruction presents a more contrasted situation (Moberg et al., 2005). Several low temperature oscillations occurred in north hemisphere around 1300, 1450, more continuously from 1500 to 1720 (the longest and mostly marked) and in first two decades of 19th century.

One must not however systematically correlate glacier expansions with thermal minima. Indeed, Alpine glaciers have attained their maximum extensions in the period preceding the coldest 1650-1715 period; similarly, Scandinavian glaciers reached their peak extension in mid 18th century, in a high temperature situation similar to that of the 20th century second half.

Since glaciers are influenced by both winter precipitations and temperatures and since long term temperatures have a homogeneous spatial distribution, the deviations, on a world basis, between great expansions and great withdrawals may be associated with precipitation increments and decrements. According to a recent research by Vincent et al. (2005), the great Alpine expansions around 1820 were favored by plentiful winter precipitations, similarly the steady 19th century glacier withdrawal in Bolivian Andes were caused by scarce winter precipitations, as also indicated by other data: glacial carrots, lake sediments, dendrochronological data.

viani nell'Ottocento è da attribuirsi a un minimo di precipitazioni, indicato dalle carote glaciali, dai sedimenti lacustri e dai dati dendrocronologici.

Pertanto, prima di affrontare lo studio della deglaciazione contemporanea seguita alla PEG, tre importanti questioni meritano di essere segnalate:

- 1) Il periodo freddo che caratterizza la PEG comprende fluttuazioni glaciali importanti, evidenziate da studi recenti, e in molti casi provocate da significativi cambiamenti nelle precipitazioni.
- 2) Non deve stupire che a livello mondiale le massime avanzate risultino scalate nel tempo, tenendo anche conto dei tempi di risposta dei ghiacciai che variano in funzione delle loro dimensioni, della pendenza e di altre caratteristiche.
- 3) La successiva deglaciazione è avvenuta a partire da ghiacciai con dimensioni poco comuni in tutto l'Olocene. In effetti, in Svizzera e in Norvegia, per le quali sono note le dimensioni raggiunte dai ghiacciai negli ultimi 11.000 anni, le crescite paragonabili per ampiezza a quelle della PEG sono state poco frequenti rispetto a periodi di espansione simile o inferiore a quella del XX secolo.

Hence, before studying the present deglaciation following the Little Ice Age, three important questions should be kept in mind:

- 1) The cold period characterizing the Little Ice Age has undergone appreciable fluctuations evidenced by recent studies, in most cases influenced by precipitation changes.
- 2) It should then come to no surprise that greatest expansions are shifted in time, also as a consequence of glacier reaction time depending on their size, their slope and other characteristics.
- 3) Latest deglaciation started when glaciers had reached uncommon size throughout Holocene. Indeed, in Switzerland and in Norway, whose glaciers sizes of last 11.000 years are known, glacial expansions comparable to those of Little Ice Age were uncommon as compared to the periods when glacier sizes were the same or less than those of 20th century.



Figura 1 - I ghiacciai del settore di Serkho Kkhota (Cordillera Real, Bolivia). Sono visibili le morene della PEG, le più esterne risalenti al periodo 1650-1760. Questi ghiacciai, situati a meno di 5600 m, conoscono attualmente perdite annue di 400-600 mm di equivalente in acqua (valore negativo del bilancio netto specifico). (B. Francou).

Figure 1 - The glaciers of the Serkho Kkhota sector (Cordillera Real, Bolivia). Well visible are the LIA moraines, the outer ones dated 1650-1760. These glaciers, set below 5,600 m of altitude, are presently losing between 400 and 600 mm/yr w.e. (B. Francou).



Figura 2 - Il Ghiacciaio Charquini Oeste (Cordillera Real). Ghiacciai come questo, posti sotto i 5300 m, sono prossimi all'estinzione. La morena esterna della PEG (sin.) è datata tramite lichenometria alla 2^a metà del Seicento. (B. Francou).

Figure 2 - West Charquini Glacier (Cordillera Real). Glaciers set below 5,300 m, such as the Charquini, are about to disappear. Lichenometric analyses have dated the LIA external moraine (left) to the second-half of the XVII cent. (B. Francou).

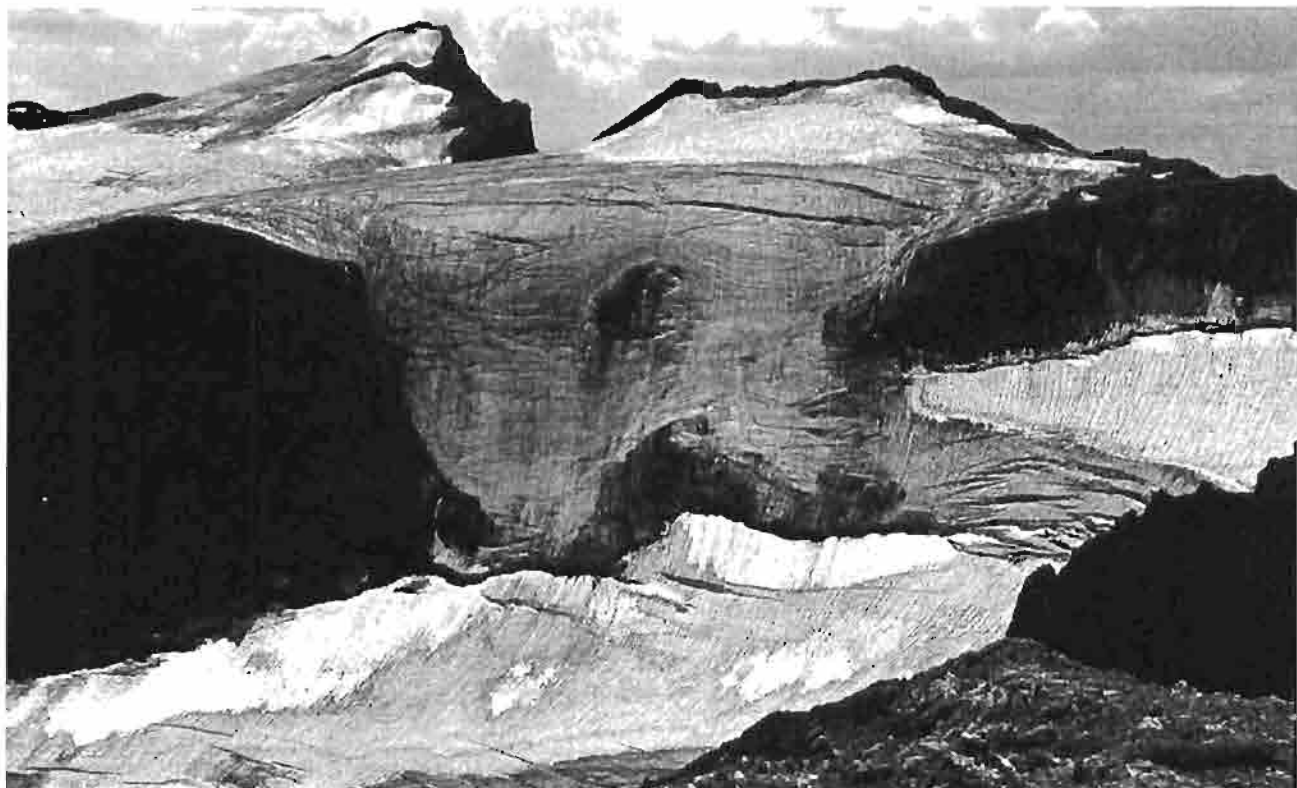


Figura 3 - I ghiacciai del Dôme du Monêtier e della Pointe des Arcas (Ecrins, Alpi francesi). Nella torrida estate 2003 i ghiacciai hanno subito un'ablazione fino a 3400 m e di 2-4 volte superiore a quella della media trentennale. (B. Francou).

Figure 3 - Dôme du Monêtier and Pointe des Arcas glaciers (Ecrins, French Alps). In the torrid 2003 summer, Alpine glaciers suffered an intense ablation up to 3,400 m, 2-4 times more than the average of the last 30 years. (B. Francou).

Le fluttuazioni dei ghiacciai nel XX secolo

Da quanto esposto, si evince come la fine della PEG non si sia realizzata ovunque con le stesse modalità. A seconda delle zone montuose essa si è manifestata come accelerazione di una tendenza al ritiro in corso già nel XIX secolo, o come un brutale cambiamento dopo una fase di crescita. Così, nelle Alpi, il ritiro, già decifrabile prima del 1850 in alcuni massicci, come quello del Monte Bianco, si estende alla maggior parte dei ghiacciai dopo il 1860-70. I ghiacciai di Bossons, Argentière e Mer de Glace si ritirano oltre i limiti di fluttuazione della PEG. Tuttavia, non per tutti gli apparati il ritiro è continuo. In Svizzera, i ghiacciai, quaranta dei quali misurati annualmente dopo il 1880, entrano in una nuova fase positiva a partire dal 1890. Per l'Aletsch il 1892 non rappresenta però che un piccolo sussulto, l'ultimo prima di un ininterrotto ritiro. Durante il XX secolo, una parte dei ghiacciai svizzeri, come l'Aletsch appunto, si contrae senza sosta, ma circa la metà manifesta avanzate nei periodi 1910-30 e 1960-90. Intervalli di forte ripiegamento dei ghiacciai alpini si osservano tra 1935 e 1955 e dopo il 1990; secondariamente tra 1900 e 1910.

In Norvegia, la fine del XIX secolo e i primi tre decenni del XX vedono ghiacciai stabili o in progresso; è solo dal 1935-40 che le effluenze delle calotte, come quelle dello Jostedalbreen, segnano un marcato ritiro. Una stabilizzazione si realizza negli anni '60, talora dopo, e molti ghiacciai, in particolare quelli delle regioni marittime, registrano spettacolari avanzate alla fine degli anni '80.

Il comportamento dei ghiacciai neozelandesi è simile a quello degli omologhi norvegesi: talvolta vicini ai massimi della PEG fino al 1930 ca., subiscono poi un declino negli anni '30-'40 e sino al 1976 quando la tendenza si inverte e si assiste a una crescita notevolissima durante la quale alcuni guadagnano circa il 40 % del terreno perso dopo la PEG.

In Nord America, Alaska compresa, pur se le informazioni precedenti al 1960 sono frammentarie, si realizza un massimo tardivo alla fine del XIX secolo; i ghiacciai mantengono volumi notevoli sino al 1920, prima del ritiro del 1930-50; tra il '55 e il '60 le perdite sono limitate. Contrariamente a quanto accade in Nuova Zelanda, Alpi e Scandinavia, si osserva qui un aumento talora drammatico del regresso a partire dal 1976 (Montagne Rocciose) e dopo il 1990 (Alaska).

Il 1976 è una data *clou* nella storia recente dei ghiacciai, con una decrescita che passa da ritmi deboli a moderati nell'Artico canadese o nel Tibet centrale, o più violenta in Tien Shan, Pamir e Ande tropicali.

Analoghe la vicenda dell'Africa tropicale: ritiro da debole a moderato prima del 1930, accelerato nei decenni '30 e '40, più attenuato negli anni '50-'70 e di nuovo intenso dopo il 1975. In certi casi, il ritiro non lascia respiro ai ghiacciai, come sulla sommità del Kibo, nel Kilimangiaro, ove la calotta glaciale si contrae costantemente dagli anni '30-'40 al punto che la

Glacier fluctuations through 20th century

From the above it is evident that the end of the Little Ice Age did not occur everywhere with the same characteristics. Depending on the mountain districts it resulted either in an accelerated shrinking already in place in the 19th century or in an abrupt inversion following an expansion period. Thus in the Alps, the withdrawal already evident before 1850 in some mountain sites such as Mount Blanc, extended to the major part of glaciers after 1860-70. In this period, Bossons, Argentière and Mer de Glace glaciers withdraw beyond the fluctuation limits of Little Ice Age. Nevertheless, glaciers do not withdraw in a linear continuous fashion. In Switzerland, the glaciers, 40 of which have been measured every year starting 1880, enter again an expanding phase from 1890. In Aletsch Glacier this is just a small ripple leading a continuous withdrawal till present. Along 20th century, while part of Swiss glaciers shrink constantly, approximately one half expand in 1910-1930 period and again in 1960-1990. Marked shrinking periods are 1935-1955 and after 1990, and so, at a reduced rate, 1900-1910.

In Norway the end of 19th century and the first three decades of 20th are a stable, or somewhat expanding period, but starting 1935-1940 the cap drains, such as in Jostedalbreen, enter a marked withdrawal period. This slows down in the sixties or a little later and many glaciers, particularly in the maritime areas, show a spectacular progress around the end of the eighties.

New Zealand glaciers perform similarly as Norwegian ones: sometimes close to Little Ice Age limits until 1930, then declining in 1930-1940 till 1976. From this moment on the trend is definitely positive leading for some of them to a 40 % recover of the losses following the Little Ice Age.

In North America, including Alaska, a late maximum is recorded at 19th century end, even if data before 1960 are fragmentary, then the glaciers maintain high volumes till 1920, they withdraw in 1930-1950 and, at a slower rate, in 1955-1960. Differently from New Zealand, Alps and Scandinavia, dramatic losses are recorded in the years following 1976 (Rocky Mountains) and 1990 (Alaska).

1976 is a key date in the world glacier oscillations: the glaciers enter a withdrawal phase at a low or moderate rate, such as in Canadian Arctic and Center Tibet, or at a dramatic rate, such as in Tien Shan, in Pamir or in Tropical Andes.

Similar features are found in Tropical Africa: low to moderate withdrawal before 1930, high rate in 1930-1940, lower rate in 1950-1970, again high rate after 1975 to present time, such that their survival is threatened. There are instances where the withdrawal is threatening whole glaciers, such as those on Kibo and Kilimangiaro summits where the ice is on a constant recession since the '30s-'40s

sua sopravvivenza appare minacciata. Al termine di questo veloce giro del mondo, la deglaciazione del XX secolo può essere così sintetizzata:

- 1) La transizione dalla PEG verso la continua riduzione attuale si è realizzata con modalità differenti a seconda dei massicci montuosi: in alcuni le crescite di fine Ottocento si sono prolungate nei due-tre decenni seguenti, con volumi di ghiaccio in pieno XX secolo vicini a quelli della PEG; in altri, come nelle Alpi, i ghiacciai sono usciti dalla PEG nella seconda metà del XIX secolo e le loro fluttuazioni nel corso del XX sono avvenute con volumi di ghiaccio già ridotti.
- 2) Con poche eccezioni, la fase 1930-40 ha visto il declino della maggior parte dei ghiacciai del Pianeta, per lo meno di quelli già allora osservati, così come i periodi 1910-25 e 1955-75 sono stati testimoni di riprese frequenti, o almeno di perdite limitate.
- 3) Gli ultimi decenni del XX secolo (1970-2000), meglio documentati, segnalano perdite accentuate, in tempi differenti a seconda delle regioni e dei ghiacciai: a partire dal 1976 per Pacifico, Tropici e Asia Centrale, dopo il 1990 per Alpi ed Alaska.
- 4) Il recupero di molti ghiacciai neozelandesi dopo il 1976 e di quelli della Norvegia meridionale dopo il 1989 diventa quindi un fatto eccezionale.

This rapid roundup can be summarized as follows:

- 1) The transition from the Little Ice Age to the present steady withdrawal occurred in different modes depending on the mountain area: in some cases, the glacial gains developed at the end of 19th century extended into the following two or three decades, preserving in the 20th century the ice volumes close to the Little Ice Age. In other sites such as in the Alps, the glaciers quit the Little Ice Age in full 19th century and their 20th century fluctuations occurred with already reduced ice volumes.
- 2) Except a few cases, in 1930-1940 period most part of the glaciers withdrew all over the world, at least as far as available data show in a substantial observation series; some upturns have been recorded in 1910-1925 and 1955-1975 periods.
- 3) The last 20th century decades (1970-2000), the best documented, have exhibited increased losses at different times depending on the different regions: from 1976 in Pacific, Tropics, Center Asia; from 1990 in the Alps and Alaska.
- 4) Some occasional recovering in most New Zealand Alps after 1976 and in South Norway after 1989.



Figura 4 - Il Ghiacciaio di Zongo (Cordillera Real) nel luglio 2006. È il ghiacciaio meglio studiato delle Ande centrali. Dal 1991, grazie all'IRD e ai suoi partner boliviani, vi si realizzano bilancio di massa, bilancio idrologico e bilancio energetico. Situato tra 6000 e 4900 m, nell'ultimo quindicennio ha perduto in media circa 500 mm di acqua all'anno. (B. Franco).

Figure 4 - The Zongo Glacier (Cordillera Real) in July 2006. This is the best studied glacier in the Central Andes. Thanks to IRD and its Bolivian partners, net mass balances, hydrologic accounts and energy balances are regularly carried out. This glacier, set between 6,000 and 4,900 m, has lost an average of 500 mm/yr w.e. for the last 15 years. (B. Franco).



Figura 5 - Misure di bilancio energetico sul Ghiacciaio di Zongo (Bolivia) per mezzo di una stazione automatica mobile d'altitudine. I dati raccolti sono comparati con quelli di una stazione fissa, che presenta sensori a diverse altezze dal suolo, situata alla stessa altitudine sulla morena laterale. (B. Francou).

Figure 5 - Energy balance measures on the Zongo Glacier (Bolivia) with an automated, mobile, high-altitude station. Data are compared with those gathered by a fixed station set at the same altitude on the lateral moraine and using a string of sensors placed at different heights. (B. Francou).



Figura 6 (a sinistra) - Misurazione degli accumuli a 5600 m sul Ghiacciaio 15 dell'Antizana ($0^{\circ}28'S$). Questo ghiacciaio, studiato dal '95 dall'IRD e dai partner ecuadoriani, è l'unico apparato equatoriale oggetto di osservazioni (bilancio di massa, bilancio idrologico, bilancio energetico). Perde in media quasi 600 mm d'acqua all'anno. (B. Francou).

Figura 7 (destra) - Stazione meteorologica sulla morena laterale dx del Ghiacciaio di Zongo (Bolivia); posta a 5050 m, fornisce dati sul bilancio energetico e sulle precipitazioni. Si tratta di una stazione standardizzata presente su diversi ghiacciai della rete GLACIOCLIM (Francia): Ande tropicali (Bolivia, Ecuador), Alpi francesi e Terra di Adélie (Antartico). (B. Francou).

Figure 6 (left) - Antizana's Glacier n° 15 (Ecuador, $0^{\circ}28'S$): snowfall measurements at 5,600 m a.s.l. This glacier is the only equatorial unit studied by IRD and its Bolivian partners by means of net mass balance, hydrological account and energy balance. On average, the glacier has been losing almost 600 mm/yr we. (B. Francou).

Figure 7 (right) - Meteo station installed on the right lateral moraine of the Zongo Glacier (Bolivia). The station, at 5,050 m a.s.l., provides energy balance and solid/liquid precipitation data. Such stations are replicated at several glaciers of the GLACIOCLIM network (France): tropical Andes (Bolivia, Ecuador), French Alps, and Adélie Land (Antarctica). (B. Francou).

Variazioni glaciali: quale informazione climatica?

Non è nei propositi di questa breve sintesi esaminare le cause di queste variazioni. Al contrario, i problemi che esse pongono permettono di orientare la riflessione e le analisi sulle loro origini, qui riassunte.

1) Le fluttuazioni glaciali forniscono solo una parte delle informazioni derivanti dalla variabilità climatica

È dimostrato che le avanzate e i ritiri di un ghiacciaio sono una risposta dinamica del ghiaccio a modificazioni durature del bilancio di massa⁽¹⁾. Se l'accumulo prevale per alcuni anni sull'ablazione il ghiacciaio trasferisce l'eccesso di massa secondo tempi di risposta e con modalità tipiche di ciascun apparato e dipendenti da fattori diversi (topografia del letto roccioso, pendenza, copertura morenica, quantità di acqua al contatto ghiaccio-roccia). Non stupisce quindi che ghiacciai vicini mostrino oscillazioni frontali sfasate. Alcuni reagiscono ai cambiamenti di bilancio in meno di un decennio, altri annullano le brevi oscillazioni del clima e manifestano solo le tendenze secolari. Il bilancio di massa è il dato che meglio rispecchia in tempo reale gli effetti degli sbalzi del clima, mentre le fluttuazioni delle fronti sono annullate nel tempo e non sono significative di una tendenza con scala superiore al decennio, una volta integrato il trend medio di bilancio. Gli esempi di "risposte annullate" abbondano: le più note sono quelle dei ghiacciai della valle di Chamonix, studiate dal LGGE⁽²⁾. Quelle dei ghiacciai di Bossons, Argentière e Mer de Glace raggiungono i 15 anni, mentre i ghiacciai più vasti, come l'Aletsch o il Gorner distribuiscono queste variazioni su tempi più lunghi. Cosa controlla i bilanci di massa?

2) La risposta dei ghiacciai alle variazioni climatiche è complessa e mette in gioco numerose variabili.

L'accumulo netto è la somma delle precipitazioni solide ricevute dal ghiacciaio e dell'ablazione. È responsabile di un bilancio positivo nella parte alta del ghiacciaio, ove la neve si conserva tutto l'anno. In basso domina l'ablazione, esercitata a spese degli accumuli *in situ* e della massa di ghiaccio che scende per scorrimento. L'intensità dell'ablazione è collegata alla temperatura estiva, ma quest'ultima integra i flussi scambiati in modo complesso tra atmosfera e superficie glaciale: flussi radiativi di differente lunghezza d'onda, flussi legati alla turbolenza dell'atmosfera e ai cambiamenti di fase dell'acqua (fase gassosa/fase solida), scambi legati alla conduzione del ghiaccio.

La temperatura interviene direttamente sulle precipitazioni (liquide/solide), cosa che amplifica la sua importanza per effetto dell'albedo (potere riflettente della superficie glaciale): più le precipitazioni solide coprono la superficie con un manto bianco, meno essa assorbe energia dall'irraggiamento e minore è la fusione. Temperatura e precipitazioni (quantità, periodo) agiscono quindi in modo combinato sull'ablazione.

Glacial fluctuations: which climate information?

The analysis of these fluctuations is outside the scope of this short study. Their consequences however allow to investigate on their origins, some aspects of which are summarized in the following.

1) Glacial fluctuations supply but part of the information on climate variability

It has been shown that glacial expansions and withdrawals are a dynamic ice reaction to a long term modification of mass balance⁽¹⁾. If accumulation prevails over ablation for some years (positive mass balance), a glacier reacts to this mass excess in times and modes characteristic of each single glacier, depending on different factors such as rocky bed configuration, its average slope, moraine surface cover, liquid water quantity at the ice-rock contact. It is then quite possible that glaciers close to one another exhibit front oscillations displaced in time. Some glaciers react to a mass balance change within a decade, others smooth out short climate oscillations and show secular trends only. Mass balance is the parameter that best reflects in real time the consequences of climate changes, while front fluctuations are not significant on a scale higher than a decade. There are plenty of examples of fluctuations smoothed out in time, such as the glaciers in Chamonix valley studied by LGGE⁽²⁾, Bossons, Argentière, Mer de Glace extending through a fifteen year period, while larger glaciers such as Aletsch and Gorner, average out these variations over a much longer period. What controls mass balances?

2) Glacier reactions to climate variations are complex depending on many parameters.

The net balance is the algebraic sum of solid precipitations on the glacier through the whole year, particularly winter, and the summer ablation. It results in a positive mass balance in the upper part of the glacier, where the snow can survive as such all year. In the lower part ablation predominates, acting upon the ice mass sliding down from the upper part. Its consistence is strictly related to the summer air temperature, which in turn is the result of the flux intensity between atmosphere and the glacier surface: radiation at different wavelengths, atmospheric turbulence, physical states of water (solid, liquid, vapor), ice heat conduction.

Temperature has a direct role in the precipitations phase (liquid or solid), its importance being magnified by albedo effect, i.e. the reflecting ratio of the ice surface: the more the solid precipitations cover the ice surface with a reflecting white layer, the less the radiating energy is absorbed. In this way the glacier avoids a too rapid fusion. Thus temperature and precipitations combined act upon ablation.

3) *La variabilità climatica è complessa e bisogna distinguere ciò che appartiene al globale da ciò che attiene al regionale.*

Soffermandoci sulla variabilità climatica regionale, è necessario analizzare le variazioni congiunte delle precipitazioni e delle temperature. Stabilire intanto se sono più importanti per i ghiacciai le precipitazioni invernali o quelle estive. Alle latitudini alte e medie, le precipitazioni invernali giocano un ruolo fondamentale, non solo perché apportano massa al ghiacciaio, ma anche perché assicurano (oppure no) il mantenimento, in primavera e a inizio estate, del nevato, che possiede un'albedo più elevata di quella del ghiaccio e che ne ritarda la fusione. In estate l'ablazione è influenzata dagli apporti radiativi e dalla temperatura atmosferica; per la conservazione dei ghiacciai servono estati con nevicate a bassa quota.

Ai tropici, dove l'intensità dell'irraggiamento è forte tutto l'anno (e ancor più in estate, quando i raggi solari colpiscono verticalmente il ghiacciaio), la presenza del manto nevoso durante l'estate, periodo di forti precipitazioni, è cruciale per il bilancio di massa.

In area extratropicale, in particolare nei settori oceanici, sono le abbondanti precipitazioni invernali che rendono positivi i bilanci di massa, come nel caso dei ghiacciai scandinavi. A esse si ascrivono le spettacolari avanzate degli anni '90. Tale aumento delle precipitazioni invernali non è stato osservato nelle Alpi, a manifestare una significativa diversità fra i ghiacciai del Nord e del Sud Europa, i primi in crescita, i secondi in ritiro. Questa anomalia a scala continentale è attribuita a una fluttuazione della NAO (Nord Atlantic Oscillation)⁽³⁾. All'aumento delle precipitazioni, e secondariamente a basse temperature estive, si deve la ripresa dei ghiacciai neozelandesi dopo il 1976, ben più rilevante che in Norvegia.

Al contrario, il decremento cronico dei ghiacciai delle Ande Centrali (Ecuador, Bolivia, Perù), a partire dallo stesso anno, si spiega con precipitazioni estive deficitarie e un limite più elevato delle nevicate a causa di frequenti anomalie termiche positive. Una modalità climatica oscillatoria nel Pacifico è ugualmente responsabile delle evoluzioni opposte descritte in Nuova Zelanda e nelle Ande Centrali: è il fenomeno de El Niño. Esso contribuisce ad attivare le depressioni del fronte polare nel Pacifico meridionale, indebolisce il monzone proveniente dall'Atlantico e mantiene temperature anormalmente elevate in tutta la cintura tropicale. Queste modalità regionali, risultato di scambi complessi fra atmosfera e oceano, si traducono in discordanze nell'evoluzione dei ghiacciai. Tuttavia, il globale non è cancellato. Negli ultimi trent'anni l'ablazione estiva è aumentata su tutti i ghiacciai (eccetto le calotte polari) a ritmi di quasi 30 mm/anno. Questo aumento si osserva sia sui ghiacciai in ritiro sia su quelli a recente bilancio positivo del versante atlantico norvegese. Pur in presenza di ghiacciai in avanzata (sempre meno numerosi), l'aumento generale dell'ablazione è indiscutibile e rispecchia il riscaldamento del Pianeta.

3) *Climate variability is complex and global factors should be distinguished from regional ones.*

Turning to regional climate variability, precipitations and temperature variations should be jointly considered, clarifying at first which is the predominant factor: winter or summer precipitations. At high and medium latitudes winter precipitations play a fundamental role, as not only they add mass to the glacier, but they may contribute to maintain through springtime and initial summer the snow mass, whose higher albedo delays ice fusion. In summertime ablation is influenced by radiation and air temperature, hence for glacier preservation "bad" summers, with snowfalls at low altitudes, are required.

At tropics latitudes, where radiation intensity is high all year round, but highest in summertime when sun-rays hit the glacier vertically, the presence or the absence of snow layer in summertime, the period of the most frequent precipitations, is crucial to the overall mass balance.

In extratropical regions, particularly in oceanic sectors like Scandinavia, it has been proved that plentiful winter precipitations result in positive mass balances, which made possible the spectacular advances of the 90's. In the same period an equivalent increase in winter precipitations was not recorded in the Alps, which stands for a definite difference between North and South Europe glaciers, the former expanding, the latter withdrawing. This continental anomaly is to be assigned to a fluctuation of the North Atlantic Oscillation (NAO)⁽³⁾. In the same way the even more spectacular expansion after 1976 of New Zealand glaciers is due primarily to increased precipitations in all seasons, and secondarily to low summer temperatures.

At the opposite, the now chronic losses of the Center Andes glaciers (Ecuador, Bolivia, Peru) after 1976 are due to the opposite reasons: scarce summer precipitations, higher freezing level on a positive temperature anomaly. An oscillatory climate mode in Pacific is also responsible for the above described evolutions in New Zealand and Central Andes: El Niño. In South Pacific it contributes to the polar front depression, to the weakening of Amazon monsoons from the Atlantic and to maintaining abnormally high temperatures in the whole tropical belt. This regional mode, resulting from a complex exchange between atmosphere and ocean, causes numerous conflicts in the pluri-decennial glaciers evolution. Nevertheless the overall trend is not preempted: in the last thirty years summer ablation is increased in all glaciers worldwide (except in the polar caps) by a 30 mm/year rate. This increase is clearly observed both in withdrawing glaciers and in Norwegian Atlantic glaciers with recently positive mass balance. In the same way, if random expanding glaciers can be found (fewer and fewer each year), the general ablation increase is unquestionable, reflecting the overall heating of our planet.

4) *La prosecuzione del riscaldamento nel futuro, ai ritmi previsti dai modelli di circolazione generale, metterà in pericolo moltissimi ghiacciai di montagna nel mondo.*

Il clima è variato naturalmente fino alla metà del XIX sec. e forse fino agli anni '30 del XX. Tra i fattori responsabili delle oscillazioni naturali (senza che se ne conosca l'esatto contributo individuale): i mutamenti della radiazione solare, che si manifesta, fra l'altro, con una variazione del numero di macchie solari; gli aerosol di composti di zolfo immessi nell'alta atmosfera dalle eruzioni vulcaniche; fattori di variabilità interna del sistema climatico (El Niño, circolazione profonda oceanica, calotte polari ecc.) che possono avere una funzione amplificatrice.

Grazie fra l'altro alla documentazione raccolta dall'IPCC (IPCC, 2007), è dimostrato che i gas serra rilasciati dalle attività umane dalla prima rivoluzione industriale sono divenuti così abbondanti da indurre modificazioni del clima. Il loro impatto sul clima degli ultimi trent'anni è indubbio, mentre resta ipotetico per il periodo precedente agli anni '30. Introdotti in modelli che simulano la risposta del sistema "atmosfera-oceani-continenti", i gas-serra dimostrano di poter modificare in modo decisivo il clima. Come reagiranno i ghiacciai a aumenti di 1,5, 3,5 o 6 °C? Come si comporteranno con precipitazioni variabili, in alcune zone in aumento, altrove in diminuzione?

I glaciologi si sono esercitati in simulazioni a partire da uno scenario conservatore, ossia mantenendo per il futuro le condizioni esistenti da una trentina di anni a questa parte, per poi passare a uno scenario di crescita delle temperature considerando le variazioni previste. Cosa si ottiene?

Quando le masse di ghiaccio sono residuali significa che l'ELA⁽⁴⁾ è posta a quote superiori a quella del ghiacciaio (cioè è assente dalla sua superficie): questo è condannato alla scomparsa in tempi che sono in funzione dello spessore massimo del ghiaccio e della media dei deficit annuali che sopporta. Il Ghiacciaio di Chacaltaya (studiato dal IRD) in Bolivia, e che per le sue dimensioni modeste è rappresentativo di numerosi ghiacciai tropicali⁽⁵⁾, si trova in questo stadio (Franco et al, 2003) (figg. 1 e 2). Quando invece il ghiacciaio conserva una certa dimensione, con una zona di accumulo estesa, la risalita dell'ELA lo costringe ad adattarsi alle nuove condizioni climatiche. Se il clima non evolve ulteriormente, il ghiacciaio troverà un nuovo equilibrio grazie alla riduzione di area. Nel caso in cui l'innalzamento dell'ELA si prolunghi senza sosta, il ghiacciaio, "condannato" a inseguire un irraggiungibile equilibrio, si estingue. Simulazioni con modelli numerici mostrano che l'agonia può durare decenni e che l'evoluzione dipende anche dall'assetto della superficie glaciale oltre che dal clima regionale.

Così, i bacini con grandi superfici poste ad alte quote conserveranno a lungo le loro zone di accu-

4) *Prosecution of the planet warm up according to the general circulation models endangers the survival of mountain glaciers worldwide.*

Climate has evolved in a natural way until mid 19th century and to some extent through the first thirty years of the 20th. Among possible causes of natural oscillations are the solar radiation changes - an evidence of which could be the fluctuations in the number of solar spots -, sulfur aerosol ejected by volcanic explosive eruptions, possibly amplified by factors originated by internal climate variations (El Niño, deep ocean circulation, polar caps, etc.).

The bulky documentation produced by IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), has demonstrated that greenhouse gas emitted by man activity since the first industrial revolution is so much over impending as to cause climate change. Its impact in the last 30 years, possibly even before, is out of question. The models simulating the global system - atmosphere, oceans, continents - show that greenhouse gas has definitely changed the climate starting from 21st century. How will glaciers react to a 1.5 - 3.5 - 6 °C increase in the present century? How will they behave on variable precipitations, somewhere increasing, somewhere else diminishing? Some simple replies are needed.

Glaciologists have developed simulations to describe possible climate scenarios: a conservative scenario that maintains the same conditions of last 30 years, another with increasing temperatures. Which is the result?

If glacier mass is residual (i.e. the equilibrium line altitude⁽⁴⁾ is at higher level with respect to the glacier), the latter is bound to disappear in a time depending on the maximum ice thickness and on annual mass deficit. Chacaltaya glacier in Bolivia (studied by IRD), a valid example for many small tropical glaciers⁽⁵⁾, is in this situation (Franco et al, 2003) (figs. 1 and 2). If on the contrary the size is large enough with an extended accumulation area, its equilibrium line forces it to adjust to the new conditions. If climate changes are limited a new equilibrium is found with a reduced size. If however the equilibrium line continues to rise, a new equilibrium cannot be reached and the glacier is bound to disappear. Numerical simulations show that such agonizing state may last may last tens of years, depending not only on regional climate, but on surface conditions as well.

Large high altitude glaciers will keep for long their accumulation basins, while caps with steep borders and large slightly convex tops will be influenced by equilibrium line rise and larger and larger surface subject to ablation.

For all the above, simulation models must not only include mass balance evolution, but also the way the ice slides down. Therefore one cannot simply say that a given fraction of glacier masses will be lost on a

mulo che continueranno a inviare flussi di ghiaccio verso il basso; al contrario, le calotte con bordi ripidi e ampie sommità lievemente convesse saranno più sensibili alla risalita dell'ELA, con superfici sempre maggiori guadagnate dalla zona di ablazione.

Ciò mostra come le simulazioni devono tener conto non solo dell'evoluzione del bilancio di massa, ma anche delle modalità con le quali il ghiaccio fluisce. Pertanto affermare che un massiccio perderà una determinata percentuale dei suoi ghiacciai se la temperatura salirà di una determinata frazione di grado, è un esercizio semplicistico e poco credibile dove non corredato da questo genere di considerazioni.

given temperature rise: all this must be complemented by the above considerations.



Figura 8 - Carotaggio "al bedrock" su una delle cime del Chimborazo a 6240 m (Ecuador). Il programma "Great Ice" dell'IRD effettua carotaggi, in cooperazione o meno con altre istituzioni, lungo le Ande, ad alta quota, per l'estrazione di ghiaccio freddo. (B. Francou).

Figure 8 - Drilling "down-to-bedrock" on one of Chimborazo's peaks (6,240 m, Ecuador). IRD's Great Ice program is aimed at extracting "cold-ice" cores from the highest points of the Andes, often in cooperation with other institutions. (B. Francou).



Figura 9 - Massiccio dell'Anuzana, in Ecuador (5752 m s.l.m., 0°28'S). Su questo vulcano attivo, due apparati sono osservati dall'IRD e dai partner ecuadoriani, i Ghiacciai 15 e 12. Le acque di fusione di questi ghiacciai alimentano la città di Quito, tramite il loro trasferimento dal versante amazzonico a quello del Pacifico (B. Francou)

Figure 9 - Anzuzana Massif (5,752 m a.s.l., 0°28'S, Ecuador). Two glaciers (n° 15 and n° 12) of this active volcano are being monitored by IRD and its local partners. Meltwaters from these glaciers supply the city of Quito, once transferred from the Amazonian slope to the Pacific one. (B. Francou).

Note

⁽¹⁾ Il bilancio di massa della superficie di un ghiacciaio è la somma algebrica dell'accumulo dato dalle precipitazioni solide e dell'ablazione, cioè delle perdite derivanti dalla fusione e dall'evaporazione (sublimazione) del ghiaccio.

⁽²⁾ Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement (CNRS).

⁽³⁾ È possibile che "l'effetto NAO" abbia svolto un ruolo nel determinare "picchi glaciali" durante la PEG, in Scandinavia e nelle Alpi, sfasati di circa un secolo.

⁽⁴⁾ La linea di equilibrio unisce i punti ove l'accumulo è annullato dall'ablazione nel corso dell'anno. Se il bilancio di massa è in equilibrio, questa linea si mantiene fra il 50 % ed il 70 % circa della superficie del ghiacciaio nella zona di accumulo. Un bilancio negativo tende a ridurre la zona di accumulo, che può scomparire allorché tutto il ghiacciaio è, in media, in regime di ablazione.

⁽⁵⁾ (nota del curatore). A tal proposito si veda in questo volume il contributo di Mendoza Rodriguez sui ghiacciai della Cordillera Real boliviana.

Notes

⁽¹⁾ The mass balance of a glacier surface is the algebraic sum of the accumulation from solid precipitations on the glacier and the summer ablation, the losses from ice fusion and evaporation, or sublimation.

⁽²⁾ Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement (CNRS).

⁽³⁾ NAO effects may have played a role in delaying by almost one century the so called "glacial peaks" of Scandinavian and Alpine glaciers in the Little Ice Age.

⁽⁴⁾ The **equilibrium line** of a glacier is the line joining the spots where accumulation and ablation have compensated each other in the course of the year. If mass balance adds up to zero, this line rests between 50 % and 70 % of the glacier surface in the accumulation zone. A more and more negative balance reduces the accumulation zone, that may disappear when the whole glacier is in ablation regime.

⁽⁵⁾ (editor's note). To this effect, please refer to the work of Mendoza Rodriguez on the glaciers of Cordillera Real, Bolivia.

Italian translation: Guido Catasta
English translation: Francesco Serracchioli

Corresponding author address:


Bernard Francou, Directeur de Recherche à l'Unité de Recherche « Great Ice », Institut de Recherche pour le Développement, IRD, AP 17 12 857, Quito, Ecuador. E.mail: bernard.francou@ird.fr

Bibliografia / References

- Francou B., Vuille M., Favier V. and Cáceres B. (2004) - *New evidences of ENSO impacts on glaciers at low latitude: Antizana 15, Andes of Ecuador, 0°28'*. Journal of Geophysical Research, 109.
- Francou B., Vuille M., Wagnon P., Mendoza J. and Sicart J.E. (2003) - *Tropical climate change recorded by a glacier of the central Andes during the last decades of the 20th century: Chacaltaya, Bolivia, 16°S*. Journal of Geophysical Research, 108.
- Holzhauser H. (1997) - *Fluctuations of the Grosser Aletsch glacier and the Gorner glacier during the last 3200 years: new results*. In Frenzel B. (ed.), *Glacier fluctuations during the Holocene*. Paläoklimaforschung/Paleoclimate Research, 24.
- IPCC (2007) - *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers*.
- IPCC (2007) - *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 10th Session of Working Group I of the IPCC, Paris, February 2007. WMO-UNEP, <http://www.ipcc.ch>.
- Matthews J.A. and Briffa K.R. (2005) - *The "Little Ice Age": re-evaluation of an evolving concept*. Geografiska Annaler, 87A.
- Nesje A. and Dahl S. (2003) - *The "Little Ice Age" – only temperature?* The Holocene, 13.
- Paul F., Kääb A., Kellenberger T. and Haeberli W. (2004) - *Rapid disintegration of Alpine glaciers observed with satellite data*. Geophysical Research Letters, 31.
- Rabatel A., Jomelli V., Naveau P., Francou B. and Grancher D. (2005) - *Dating the Little Ice Age glacier fluctuations in the tropical Andes: Charquini glaciers, Bolivia, 16°S*. C.R.Geosciences, 337.
- Six D., Reynaud L. and Letreguilly A. (2001) - *Bilans de masse des glaciers alpins et scandinaves, leurs relations avec l'oscillation du climat de l'Atlantique nord*. C.R. Acad. des Sci., Sciences de la Terre et des planètes, 333.
- Vincent C., Kappenberger G., Valla F., Bauder A., Funk M. and Le Meur E. (2004) - *Ice ablation evidence of climate change in the Alps over the 20th century*. Journal of Geophysical Research, 109.
- Vincent C., Le Meur E., Six D. and Funk M. (2005) - *Solving the paradox of the end of the Little Ice Age in the Alps*. Geophysical Research Letters, 32.
- This text has been largely based on: Francou B. and Vincent C. (2007) - *Les glaciers a l'épreuve du climat*. IRD Editions - Editions Belin, Paris.

Terra glaciālis

edizione speciale • special issue



**Ghiacciai montani e cambiamenti climatici
nell'ultimo secolo**

*Mountain glaciers and climate changes
in the last century*

Luca Bonardi
(a cura di / edited by)

Servizio Glaciologico Lombardo