

SEVERINO BELLONI (\*), GUGLIELMINA DIOLAIUTI (\*), GIOVANNI PERETTI (\*\*),  
GIANCARLO ROSSI (\*\*\*), CLAUDIO SMIRAGLIA (\*) & NICOLA TOSI (\*\*\*\*)

## UN NUOVO METODO PER LA VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DELLE CONDIZIONI TERMICHE E PLUVIOMETRICHE SULLE OSCILLAZIONI FRONTALI RECENTI DEI GHIACCIAI ALPINI (APPLICATO AL GHIACCIAIO DEL DOSEGÙ, ALTA VALTELLINA)

**ABSTRACT:** BELLONI S., DIOLAIUTI G., PERETTI G., ROSSI GC., SMIRAGLIA C. & TOSI N., *A new method for the evaluation of the effects of temperature and precipitation conditions on recent front variations of Alpine glaciers (applied to the Ghiacciaio del Dosegù, Alta Valtellina)*. (IT ISSN 0391-9838, 2001).

A new methodology is proposed for the study of the relations between glaciers and climate, and applied to a sample glacier in the Lombardy Alps, the Ghiacciaio del Dosegù in Alta Valtellina. The temperature data from the Bormio station for the 1926-1995 period were adjusted with a vertical rate ( $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ) to the glacier front altitude and then transformed into the sum of the annual degree days. The data series degree days at the specified altitude was then correlated with the corresponding historical data series regarding front variation, which were reconstructed for the years in which data were lacking by means of a specially calculated  $\text{m}/\text{degree day}$  coefficient. The two temperature and front historical data series were then compared, with a synchronic analysis and a time-shifting analysis in order to obtain the «reaction time» of the glacier examined. As regards precipitation, the Bormio station data were used for the comparison without any adjustment. Two types of correlations were used for the quantitative definition of the front variations and the climatic parameters, the traditional Bravais-Pearson correlation and the so-called cross-correlation. The two statistical correlation methods used yielded slightly different results, although both revealed a greater influence of temperature factors on the glacier front dynamics, compared to precipitation. With the Bravais-Pearson correlations, the highest coefficients (exceeding  $-0.6$ ) were reached with the net and positive degree days and they indicate that the temperature factors manifest their greatest efficacy after 20-25 years. On the other hand, the cross-correlations suggest that the impact of temperatures is not manifested through a well-defined and temporally-localized reaction time, but that frontal re-

sponse to temperature stimuli is prolonged continuously and homogeneously over a long period of time ranging from 0 to 20 years.

**KEY WORDS:** Glacier reaction time, Degree days, Ghiacciaio del Dosegù, Lombardy Alps.

**RIASSUNTO:** BELLONI S., DIOLAIUTI G., PERETTI G., ROSSI GC., SMIRAGLIA C. & TOSI N., *Un nuovo metodo per la valutazione degli effetti delle condizioni termiche e pluviometriche sulle oscillazioni frontali recenti dei ghiacciai alpini (applicato al Ghiacciaio del Dosegù, Alta Valtellina)*. (IT ISSN 0391-9838, 2001).

Si propone una nuova metodologia per lo studio delle relazioni tra clima e ghiacciai applicata ad un ghiacciaio campione delle Alpi Lombarde, quello del Dosegù in Alta Valtellina. I dati di temperatura della stazione di Bormio nel periodo 1926-1995 sono stati portati con un gradiente alla quota della fronte glaciale e poi trasformati nella somma dei gradi giorno annuali. La serie dei gradi giorno in quota è stata poi correlata con la corrispondente serie storica delle variazioni frontali, ricostruita per gli anni di assenza di dati tramite un coefficiente  $\text{m}/\text{gradi giorno}$  appositamente calcolato. Sono quindi state messe a confronto le due serie storiche, termica e della fronte, esaminandole sia in sincronismo sia sfasandole temporalmente per ricavare il «tempo di risposta frontale» (*reaction time*) del ghiacciaio esaminato. Per quanto riguarda le precipitazioni, non essendo stato possibile portarle in quota, vista la mancanza di dati utili al calcolo di un gradiente verticale, si sono utilizzati per il confronto i valori della stazione di Bormio senza alcuna trasformazione. Per la definizione quantitativa delle relazioni fra le variazioni frontali e i parametri climatici si sono utilizzate due tipi di correlazioni, quella classica di Bravais-Pearson e quella definita *cross correlation*. I due metodi di correlazioni statistiche usate danno risultati lievemente diversi, pur evidenziando entrambi la maggiore influenza dei fattori termici rispetto a quelli pluviometrici sulla dinamica della fronte del ghiacciaio. Con le correlazioni di Bravais-Pearson i coefficienti più elevati (superiori a  $-0,6$ ) si raggiungono con i gradi giorno positivi e netti e indicano che i fattori termici manifestano la loro maggiore efficacia dopo 20-25 anni; le *cross correlazioni* invece suggeriscono che l'effetto delle temperature non si manifesta con un tempo di risposta ben definito e localizzato temporalmente, ma che la risposta frontale alle sollecitazioni termiche si prolunga in modo continuo e omogeneo per un lungo periodo di tempo, da 0 a 20 anni.

**TERMINI CHIAVE:** Tempo di risposta, Gradi giorno, Ghiacciaio del Dosegù, Alpi Lombarde.

(\*) Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Milano, Via Mangiagalli 34, 20133 Milano.

(\*\*) Centro Nivometeorologico, Regione Lombardia, Bormio (SO), Via Milano 16, 23032 Bormio (SO).

(\*\*\*) , Via Montello 8, 30033 Noale (VE).

(\*\*\*\*) Dipartimento di Scienze Geologiche e Geotecnologie Università degli Studi di Milano-Bicocca, Piazza della Scienza, Milano.

Lavoro svolto con cofinanziamento MURST 1999, Progetto di ricerca: «Il glacialismo alpino in rapporto alle variazioni ambientali» (Resp. naz. prof. A. Biancotti, Resp. locale prof. A. Bini).

## 1. INTRODUZIONE

Il tema delle relazioni fra dinamica dei ghiacciai montani e variazioni climatiche ha da tempo costituito uno degli argomenti di più larga diffusione nella ricerca glaciologica e climatologica. Anche in Italia, soprattutto a partire dagli anni ottanta, numerosi sono stati i lavori dedicati a questo complesso problema. Per una sintesi critica dei lavori italiani precedenti si rimanda a Belloni (1992) e Belloni & Pelfini (1996). Il lavoro qui presentato vuole essere una continuazione e un approfondimento, a livello metodologico, delle ricerche precedenti ed affronta quantitativamente le relazioni fra variazioni frontali (parametro questo per il quale si dispone di serie storiche secolari) e variazioni climatiche di breve periodo, anche per fini previsionali. Per quanto riguarda la dinamica dei ghiacciai si sono utilizzati i dati delle variazioni delle fronti pubblicati nelle riviste del Comitato Glaciologico Italiano (*Bollettino del Comitato Glaciologico Italiano* dal 1913 fino al 1977 e *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria* dal 1978), mentre i dati climatici, in particolare temperature e precipitazioni, sono stati tratti dalle registrazioni effettuate dall'ENEL, dall'AEM, dall'Ufficio Idrografico e Mareografico del Po, dal Centro Nivometeorologico della Regione Lombardia.

Fra i numerosi ghiacciai italiani per i quali si dispone di serie storiche di dati di variazioni frontali, è stato scelto quello del Dosegù nelle Alpi Lombarde. La scelta trova motivazioni sia nell'estensione e continuità temporale dei dati di variazione frontale (risalenti ai primi decenni del XX secolo) sia nella disponibilità di serie storiche di dati

meteorologici di stazioni ubicate in aree limitrofe al ghiacciaio. È inoltre motivo d'interesse la possibilità di confronto con altri lavori che già avevano preso in considerazione il Ghiacciaio del Dosegù.

## 2. IL GHIACCIAIO DEL DOSEGÙ E LE SUE VARIAZIONI FRONTALI

Si tratta di un apparato vallivo situato in Valfurva, presso il Passo Gavia, che occupa l'esteso bacino posto tra la Punta Pedranzini e la Punta S. Matteo; l'esposizione è a SW, la quota è compresa tra i 3600 ed i 2700 m, la lunghezza massima è di 3150 m, mentre la superficie totale raggiunge 271,5 ha. (fig. 1).

Utilizzando i dati delle variazioni frontali tratti dalle fonti sopra indicate si è costruita una curva delle variazioni cumulate da cui risulta che tra il 1925 ed il 1962 il ghiacciaio è continuamente arretrato per un totale di 1118 m, con un ritiro che è stato più intenso dal 1935 al 1949 (-800 m), mentre dal 1949 al 1962 il ritiro è stato di 169 m (quest'ultimo valore è però reso scarsamente attendibile dal crollo di una vasta porzione frontale che ha senza dubbio aumentato l'entità del ritiro registrato). A partire dal 1962 si registra un'inversione di tendenza: le prime pulsazioni positive si sono alternate a fasi di regresso fino al 1971, quando l'apparato ha iniziato ad avanzare in modo sensibile con una progressione, terminata nel 1985, di 145 m. Da quell'anno al 1995 si è manifestata una nuova inversione di tendenza che ha portato la fronte glaciale a perdere 143 m (fig. 2).

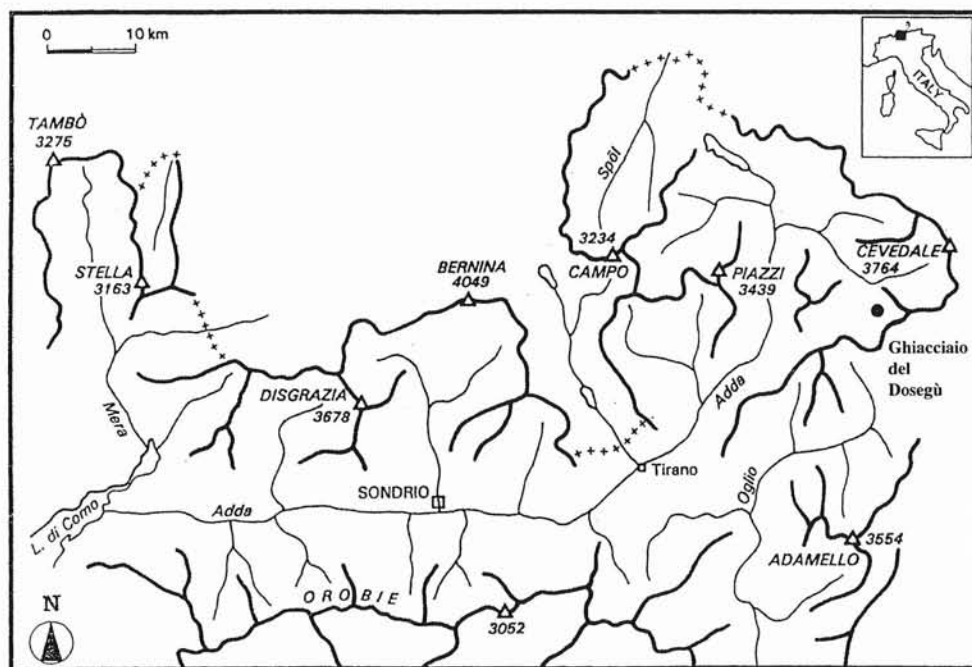
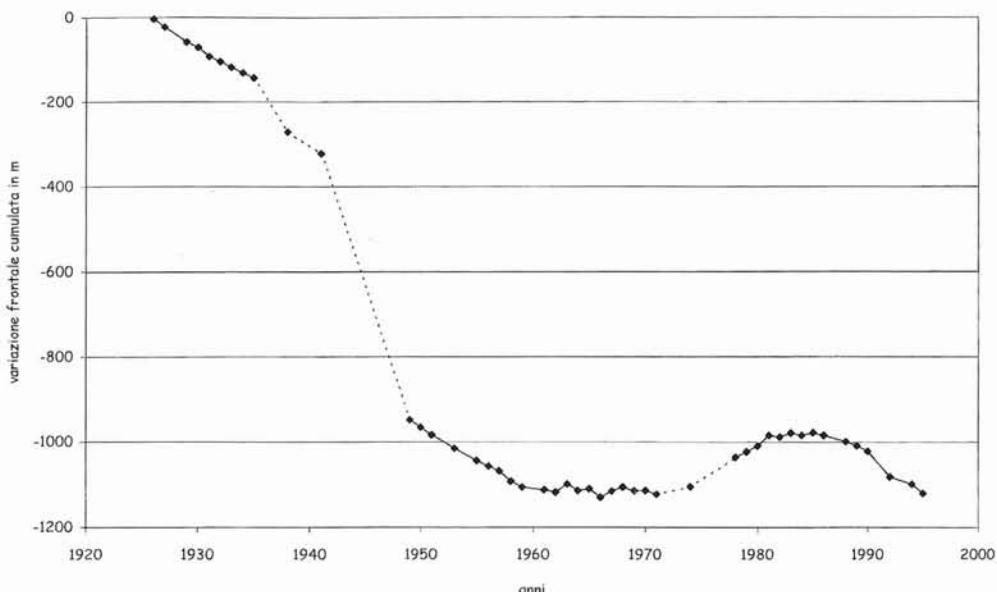


FIG. 1 - Ubicazione geografica del Ghiacciaio del Dosegù.

FIG. 1 - The studied area: Ghiacciaio del Dosegù, Lombardy Alps, Italy.

FIG. 2 - Variazioni frontali cumulate del Ghiacciaio del Dosegù (espresse in m/anno); sono riportati con tratteggio gli anni per i quali non si dispone di letture dirette alle fronti ma solo valori riguardanti più anni.

FIG. 2 - Frontal cumulated variations of Ghiacciaio del Dosegù (in m/year); the marked line is used for the years in which data were lacking.



### 3. METODOLOGIA

Allo scopo di identificare le relazioni tra alcuni parametri climatici e variazioni frontali si è dapprima cercato di evidenziare le relazioni tra dinamica frontale e dati termici, poi si è focalizzata l'attenzione sulle precipitazioni. Per quanto riguarda i dati termici, al posto delle tradizionali medie, utilizzate nei lavori italiani precedentemente citati, si è preferito usare il metodo dei «gradi giorno».

Autori precedenti (ad esempio, Finsterwalder & Schunk, 1887; Arnold & Mc Kay, 1964; Boyd, 1975; Braithwaite, 1984) hanno evidenziato l'utilità di questo metodo per individuare le correlazioni fra oscillazioni climatiche e variazioni glaciali. Questo parametro dovrebbe correlarsi alle variazioni frontali e volumetriche glaciali meglio delle classiche serie storiche di temperatura, poiché consente di meglio quantificare l'energia termica in gioco che può determinare una risposta del ghiacciaio (gradi efficaci). In questo lavoro si è voluto verificare questo approccio, cercando di quantificare le relazioni tra gradi giorno (positivi, negativi, netti) e le variazioni frontali del ghiacciaio in oggetto, nonché di evidenziarne la significatività.

#### 3.1 Calcolo dei gradi giorno

Si sono inizialmente calcolati i gradi giorno positivi. Il metodo convenzionale consiste nel sommare tutti i gradi sopra un valore soglia, qui assunto pari a 0 °C, della temperatura media d'ogni giorno dell'anno (dove la temperatura media di un giorno viene approssimata con la media aritmetica delle temperature massima e minima giornaliera). Il considerare le temperature giornaliere per il calcolo dei gradi giorno comporta ovviamente un ingente impegno sia nella raccolta dei dati che nella loro successiva elab-

borazione; inoltre per quasi nessun ghiacciaio italiano sono disponibili serie di dati termici giornaliere complete in quota per più di un ventennio. Uno studio precedente (Braithwaite, 1984) ha mostrato, in un caso specifico ma rappresentativo, l'esistenza di una relazione tra la temperatura media mensile ed il totale dei gradi giorno positivi mensili. Questo offre la possibilità di sostituire il calcolo dei gradi giorno, a partire da valori termici giornalieri, con una funzione basata sulla temperatura media mensile.

In questo lavoro per verificare la possibilità di sostituire i gradi giorno mensili calcolati a partire dalle temperature medie giornaliere con i gradi giorno mensili calcolati a partire dalle temperature medie mensili, sono state presi in considerazione i dati termici giornalieri e mensili relativi a due stazioni site in Alta Valtellina e precisamente S. Caterina Valfurva, ubicata a 1740 m d'altitudine, nel periodo compreso tra il 1973 ed il 1994, e Bormio, ubicata a 1225 m d'altitudine, nel periodo compreso tra il 1960 ed il 1972. Sono stati calcolati i gradi giorno positivi a partire dai valori di temperatura medi giornalieri (sommando i gradi superiori allo zero termico d'ogni giorno del mese) ed i valori risultanti sono stati sommati ottenendo il totale mensile dei gradi giorno positivi. In un secondo tempo, sempre per calcolare il totale mensile dei gradi giorno positivi, si sono utilizzate le temperature medie mensili maggiori di 0 °C, moltiplicate per il numero di giorni del mese di riferimento e si è constatato che i risultati erano altamente correlati con quelli ottenuti con il metodo precedente. Questo è stato evidenziato riportando in diagrammi cartesiani i totali mensili dei gradi giorno positivi calcolati sulla base delle temperature medie giornaliere (Y) insieme ai gradi giorno positivi mensili stimati moltiplicando la temperatura media mensile, qualora maggiore di 0 °C, per il numero di giorni d'ogni mese (X).

I punti del diagramma possono essere interpolati, col metodo dei minimi quadrati delle distanze in verticale, con precisione molto alta ( $r^2 = 0,996$ ), per S. Caterina Valfurva, dalla retta d'equazione  $y = 0,9553x + 15,19$ . Un'ulteriore interpolazione con una curva parabolica ha fornito la curva di equazione  $y = 0,0002x^2 + 0,8506x + 24,238$  con  $r^2 = 0,997$ . Il piccolo coefficiente del termine in  $x^2$  e il valore sostanzialmente uguale di  $r^2$  nei due casi fanno propendere per l'utilizzo della relazione lineare.

Per Bormio i punti risultano essere ben interpolati dalla retta di equazione  $y = 0,9624x + 15$ , con  $r^2 = 0,997$ . L'interpolazione con curva quadratica dà la parabola  $y = 0,0002x^2 + 0,8492x + 25,801$  con  $r^2 = 0,998$ . Anche in questo caso la relazione più opportuna è quindi la lineare.

Successivamente con la stessa metodologia sono stati calcolati i gradi giorno negativi mensili. Con questo termine s'intendono tutti i gradi sotto un valore soglia, qui assunto pari a 0 °C, della temperatura media d'ogni giorno dell'anno. Sono stati così ottenuti punti che possono essere interpolati, per S. Caterina Valfurva, con elevata precisione ( $r^2 = 0,992$ ), dalla retta d'equazione  $y = 0,9169x - 19,009$ ; per Bormio, con serie termiche comprese tra il 1960 ed il 1972, i punti sono stati interpolati con una retta, con  $r^2 = 0,993$ , di equazione  $y = 0,9192x - 18,128$ . Anche in questi due casi l'unica polinomiale accettabile per l'interpolazione dei dati è risultata la linea retta.

A titolo di esempio si riporta in fig. 3 il diagramma della dispersione dei punti relativa ai gradi giorno positivi mensili di Bormio calcolati con i due metodi e la relativa interpolante lineare.

### 3.2 Tipi di gradi giorno utilizzati nel presente lavoro

Sulla base delle elevate correlazioni ottenute è sicuramente accettabile sostituire il calcolo dei gradi giorno

mensili, sia positivi che negativi, computati a partire dai dati termici medi giornalieri, con la stima dei gradi giorno mensili a partire dalla temperatura media mensile moltiplicata per il numero di giorni del mese considerato e corretta con le equazioni lineari interpolanti sopra riportate.

Per la stazione di Bormio (Alta Valtellina, Lombardia) si dispone di una serie continua di valori termici medi mensili dal 1924 al 1995, mentre i dati di temperatura giornalieri a disposizione sono limitati al periodo 1960-1996, con il 1973, 1975, 1976 e 1977 mancanti. Per ovviare a questo problema si è applicato il metodo sopra esposto, che ha permesso il calcolo dei gradi giorno mensili a partire dai soli valori termici medi mensili; si è così potuto disporre di una serie di valori completa e temporalmente più estesa di quella che si sarebbe ottenuta dai valori di temperatura giornalieri.

Nel calcolare la correlazione tra i gradi giorno e le variazioni frontali del Ghiacciaio Dosegù, dapprima sono state estrapolate le temperature medie mensili della stazione di Bormio alla quota attuale della fronte del Dosegù (2700 m) e all'altitudine media dello stesso ghiacciaio (3250 m), utilizzando degli opportuni valori di gradiente termico mensile della temperatura, calcolati sulla base delle temperature medie mensili dal 1955 al 1999 di trentasette stazioni della Valtellina (comunicazione Belloni).

Una volta ottenute le temperature medie mensili in quota, sono stati calcolati, utilizzando il metodo sopra esposto, i gradi giorno positivi e negativi e si sono identificate le nuove relazioni analitiche per i valori termici in quota. Per la relazione fra i gradi giorno positivi mensili calcolati dalla temperatura media mensile a 2700 m di quota e i gradi giorno positivi mensili calcolati dalle tem-

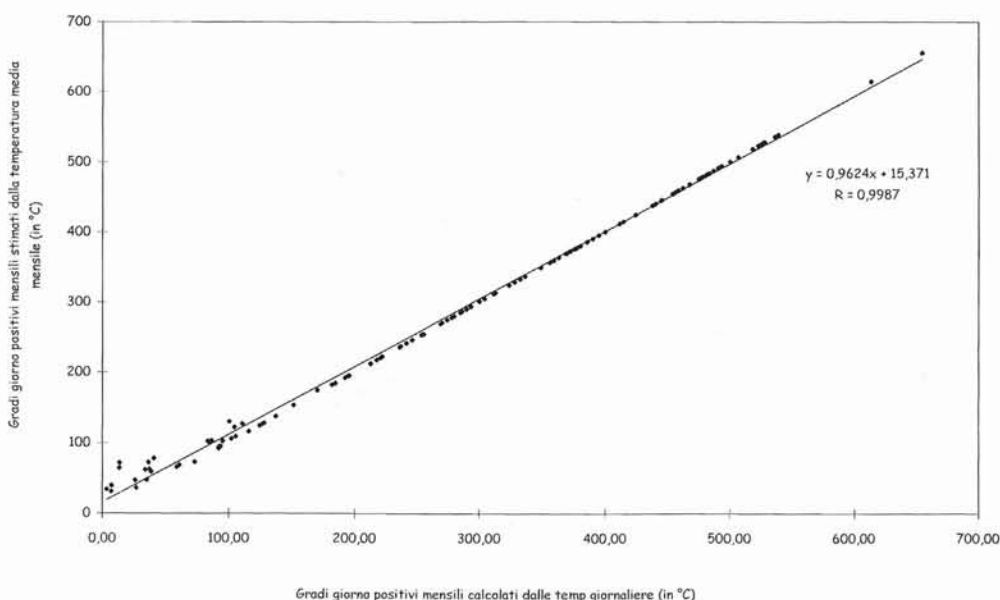


FIG. 3 - Relazione fra gradi giorno positivi mensili (espressi in °C) calcolati dalle temperature giornaliere di Bormio dal 1960 al 1972 e gradi giorno positivi mensili (espressi in °C) stimati partendo dalla temperatura media mensile dello stesso periodo.

FIG. 3 - Relationship between monthly positive degree-days (in °C) calculated from daily temperature data measured at Bormio station from 1960 to 1972 and monthly positive degree-days (in °C) calculated from monthly mean temperature data measured at same station in the same temporal range.

perature giornaliere a 2700 m di quota, si è ottenuto un insieme di punti tale da essere interpolato, con  $r^2 = 0,993$ , dalla retta  $y = 0,9153x + 19,925$ . Lo stesso procedimento per le temperature riportate a una quota di 3250 m ha fornito un insieme di punti tale da essere interpolato, con  $r^2 = 0,977$ , dalla retta di equazione  $y = 0,8777x + 28,128$ .

Similmente per i gradi giorno negativi mensili, per le temperature riportate a quota 2700 m si è ottenuto un insieme di punti tale da essere interpolato, con  $r^2 = 0,993$ , dalla retta di equazione  $y = 0,9175x - 18,914$ , e con le temperature riportate a 3250 m si è ottenuto un insieme di punti tale da essere interpolato, con  $r^2 = 0,993$ , dalla retta di equazione  $y = 0,9306x - 18,693$ .

### 3.3 Il completamento della serie delle variazioni frontali

Un limite che si incontra nell'individuare una funzione che correli le serie di dati di variazioni frontali d'un ghiacciaio con le serie di dati dei parametri climatici è costituito dalla ridotta continuità nel tempo dei monitoraggi glaciali. Per il Dosegù, come per la quasi totalità degli apparati alpini, le misure di variazione frontale non sono state eseguite con regolarità ogni anno e vi sono dunque alcuni anni di assenza di dati.

Correlazioni tra serie di variazioni frontali e serie climatiche calcolate in lavori precedenti (Belloni & alii, 1991; Pelfini & Smiraglia, 1992), sono state il più delle volte eseguite utilizzando, per gli anni di mancata lettura del valore di variazione frontale, il valore medio del dato disponibile su un più ampio intervallo.

In questo lavoro si è scelto di procedere alla ricostruzione, mediante interpolazione pesata, degli anni mancanti utilizzando i gradi giorno positivi e/o i gradi giorno

negativi. Questi, infatti, sono noti anche in quegli anni per i quali non si dispone di informazioni relative alle variazioni frontali. Si è divisa la variazione frontale, misurata tra le due letture estreme di un intervallo d'assenza di dati (ovvero la variazione relativa ad un intervallo temporale pluriennale), per la somma dei gradi giorno positivi a 2700 m del corrispondente intervallo temporale; analogamente si è proceduto per i gradi giorno negativi. In questo modo si è ottenuto un coefficiente «m/gradi giorno» mediante il quale è stato possibile attribuire un peso differente ai diversi anni d'assenza di lettura sulla base delle variazioni annuali dei gradi giorno, sia positivi che negativi. Tenendo conto dei valori così calcolati si è suddivisa la variazione frontale di più anni nei diversi anni componenti in quantità proporzionale ai gradi giorno dei rispettivi anni. La serie di dati di variazioni frontali ottenuta è riportata nella tabella 1, dove sono indicati i valori reali misurati e quelli ricostruiti con la metodologia sopra esposta; si veda anche la fig. 4.

### 3.4 Tipi di correlazioni utilizzate

Ricostruite integralmente le variazioni frontali annuali del Dosegù e verificato che la curva ottenuta con l'ausilio dei gradi giorno positivi non differisce in misura sensibile da quella derivata dai gradi giorno negativi, si sono utilizzati, per la stima dei tempi di risposta frontali (reaction times) alle sollecitazioni climatiche, solo i dati di variazione frontale ricavati dai gradi giorno positivi.

Per quantificare il tempo di risposta frontale (reaction time) si è ricorsi sia alla correlazione di Bravais-Pearson (metodologia già impiegata da Belloni & alii, 1985a; Belloni & alii, 1985b; Smiraglia, 1986; Belloni & alii, 1990)

FIG. 4 - Variazioni del Ghiacciaio del Dosegù misurate direttamente alla fronte e ricostruite, negli anni di assenza di misura, per mezzo dei coefficienti calcolati dai gradi giorno positivi, i triangoli rappresentano i dati effettivamente letti alla fronte, con linea sono invece rappresentati i dati ricostruiti.

FIG. 4 - Frontal variations of Ghiacciaio del Dosegù directly measured at the glacier terminus (triangular points) and reconstructed (line), for the years in which data were lacking, by means a m/degree-day coefficient calculated from positive degree-days.

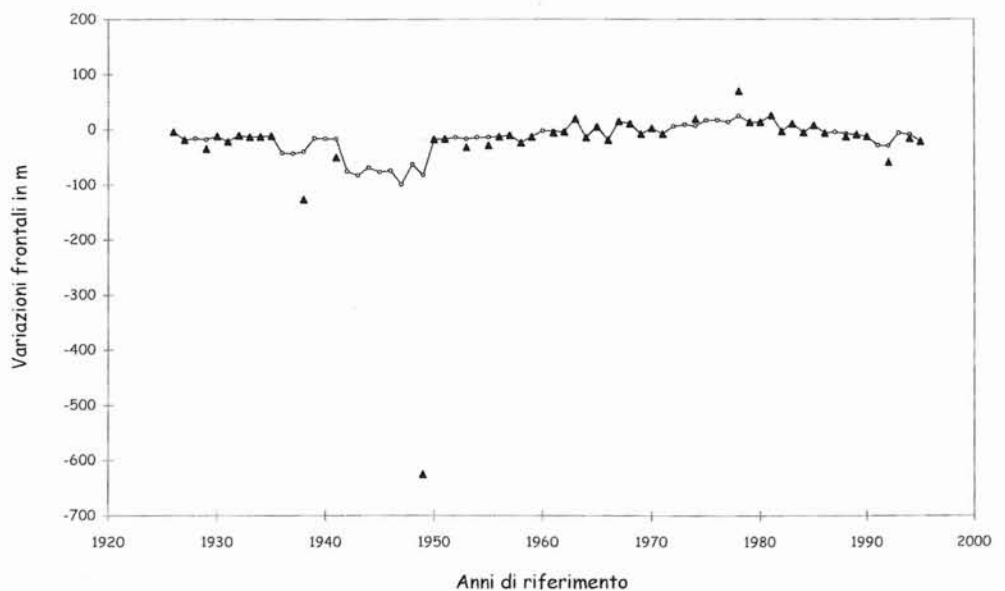


TABELLA 1 - Variazioni frontali annuali del Ghiacciaio del Dosegù misurate (prima colonna) e ricostruite per gli anni di assenza di lettura mediante gradi giorno positivi (seconda colonna) e gradi giorno negativi (terza colonna)

TABLE 1 - Frontal annual variations of Ghiacciaio del Dosegù measured (first column) and reconstructed for the years in which data were lacking by means the m/degree-day coefficient calculated from positive degree-days (second column) and the m/degree-day coefficient calculated from negative degree-days (third column).

anno di rilevamento	variaz. frontale in m rilevata direttamente	variaz. frontale in m ricostruita con i gradi giorno positivi	variaz. frontale in m ricostruita con i gradi giorno negativi	anno di rilevamento	variaz. frontale in m rilevata direttamente	variaz. frontale in m ricostruita con i gradi giorno positivi	variaz. frontale in m ricostruita con i gradi giorno negativi
1926	-4,7	—	—	1961	*	-3,6	-2,7
1927	-19,5	—	—	1962	-5,0	—	—
1928	*	-17,0	-16,1	1963	19,0	—	—
1929	*	-18,5	-19,4	1964	-15,0	—	—
1930	-12,4	—	—	1965	4,0	—	—
1931	-22,4	—	—	1966	-20,0	—	—
1932	-11,4	—	—	1967	14,0	—	—
1933	-14,1	—	—	1968	10,0	—	—
1934	-13,0	—	—	1969	-9,0	—	—
1935	-11,9	—	—	1970	1,0	—	—
1936	*	-42,5	-39,7	1971	-9,0	—	—
1937	*	-43,8	-47,2	1972	*	4,7	5,2
1938	*	-40,6	-40,0	1973	*	7,7	7,3
1939	*	-16,3	-15,6	1974	*	5,6	5,4
1940	*	-16,8	-18,7	1975	*	15,9	19,2
1941	*	-17,4	-16,2	1976	*	16,2	19,1
1942	*	-76,1	-77,3	1977	*	13,0	19,9
1943	*	-83,3	-69,8	1978	*	23,9	10,8
1944	*	-69,3	-89,3	1979	13,0	—	—
1945	*	-77,3	-79,6	1980	13,0	—	—
1946	*	-75,0	-84,1	1981	25,0	—	—
1947	*	-99,7	-95,8	1982	-4,0	—	—
1948	*	-63,1	-64,1	1983	10,0	—	—
1949	*	-82,5	-66,1	1984	-6,0	—	—
1950	-17,8	—	—	1985	7,0	—	—
1951	-17,2	—	—	1986	-7,0	—	—
1952	*	-14,7	-19,7	1987	*	-5,4	-7,7
1953	*	-17,3	-12,3	1988	*	-8,1	-5,2
1954	*	-14,4	-13,6	1989	-10,0	—	—
1955	*	-14,4	-15,2	1990	-13,0	—	—
1956	-13,0	—	—	1991	*	-29,7	-35,3
1957	-11,0	—	—	1992	*	-30,3	-24,7
1958	-24,0	—	—	1993	*	-7,5	-10,2
1959	-13,7	—	—	1994	*	-9,5	-6,8
1960	*	-3,2	-4,1	1995	-22,0	—	—

sia alla cross correlation. Quest'ultima viene utilizzata in molti temi scientifici e applicativi per valutare la «somi-glianza» fra due segnali e/o fra due funzioni, (Chen, 1982; Childers,1982; Kearey & Brooks,1990; Telford & alii, 1992).

$$C_{\text{correlazione}}(N,M) = \frac{\sum_{i=1}^{N-M} [f(i+M) - \langle f_{i+M} \rangle][g(i) - \langle g_i \rangle]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N-M} ((g(i) - \langle g \rangle)^2) \sum_{i=1}^{N-M} (f(i+M) - \langle f_{i+M} \rangle)^2}}$$

Questi stimatori sono definiti nel modo seguente: correlazione di Bravais Pearson (funzione discreta) ove f e g sono le due funzioni costituite dai dati, ove  $\langle f \rangle_{i+M}$  e  $\langle g \rangle_i$  sono il valor medio di f(i+M) e di

g(i) nell'intervallo di termini 1→(N-M), N è il numero di dati campionati considerati e M è lo slittamento temporale discreto.

$$C_{\text{crosscor norm}}(N,M) = \frac{N}{N-M} \frac{\sum_{i=1}^{N-M} g(i)f(i+M)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (g(i))^2 \sum_{i=1}^N (f(i))^2}}$$

cross-correlation normalizzata (funzione discreta)

La differenza sostanziale fra i due tipi è che nella correlazione di Bravais-Pearson viene sottratto sia al numeratore che al denominatore il valore medio del segnale nell'intervallo temporale considerato, mentre nella cross-correlazione questo non viene fatto.

#### 4. PARAMETRI CLIMATICI, VARIAZIONI FRONTALI E TEMPI DI RISPOSTA

##### 4.1 Stima dei «tempi di risposta frontali»

I dati di variazione frontale sono stati messi a confronto con le serie di gradi giorno annuali estrapolati in quota positivi, negativi e netti (questi ultimi derivano dalla somma algebrica dei gradi giorno negativi e positivi) e con le serie di precipitazioni invernali, estive e nette (queste ultime derivano dalla differenza tra le precipitazioni invernali e quelle estive di ogni anno). Per determinare l'eventuale evidenza di un «tempo di risposta frontale» (*reaction time*) in tutti i confronti si è proceduto ad inserire uno sfasamento temporale da 0 a 30 anni con passo di un anno fra i dati climatici e le variazioni frontali.

Si è così ottenuta una serie di coefficienti di correlazione e di cross-correlazione per i diversi anni di sfasamento. Lo studio dell'andamento temporale dei coefficienti e l'individuazione di eventuali picchi significativi dovrebbe evidenziare lo sfasamento (o gli sfasamenti) misurato in anni, più rappresentativo degli effetti termici e pluviometrici sulle variazioni frontali del ghiacciaio. Tale sfasamento, se riconosciuto in modo sicuro ed univoco, può quindi essere definito come il «tempo di risposta frontale» (*reaction time*) del ghiacciaio a quel tipo di sollecitazione.

##### 4.2 Stima dei «tempi di risposta frontali» alle sollecitazioni termiche

Nel diagramma di fig. 5 è indicato l'andamento dei coefficienti di correlazione (ottenuti correlando i gradi giorno annuali positivi, negativi a 2700 m di quota ed a 3250 m di quota con le variazioni frontali del Ghiacciaio Dosegù rilevate direttamente alla fronte e ricostruite per

gli anni di assenza di lettura seguendo la metodologia sopra esposta) in funzione dello sfasamento temporale misurato in anni; nella fig. 6 è invece indicato l'andamento dei coefficienti di cross-correlazione, sempre in funzione dello sfasamento temporale, tra le stesse serie di dati.

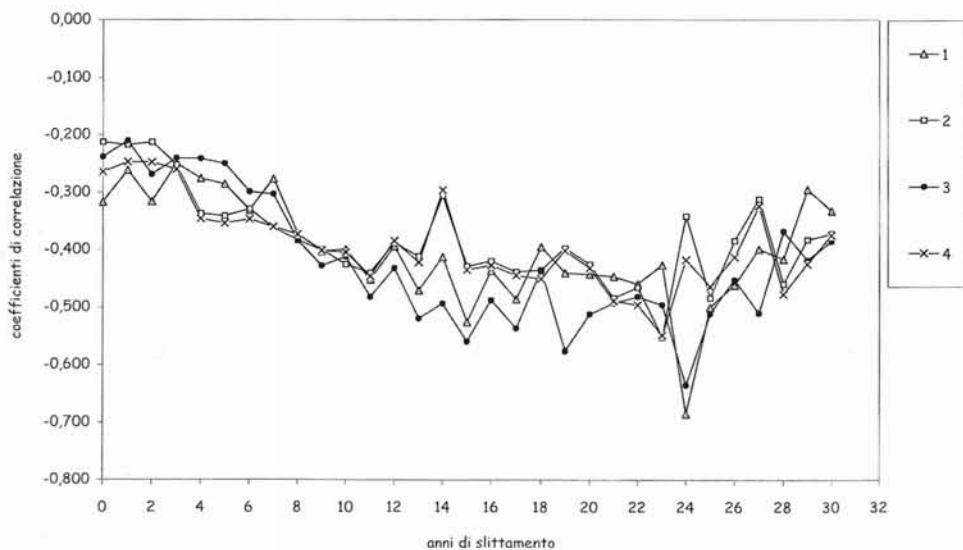
Le correlazioni con i gradi giorno positivi, calcolate con entrambi i metodi (correlazione classica e cross-correlazione), sono tutte negative, e si accordano con l'interpretazione che un aumento dei gradi giorno positivi annuali provochi un arretramento della fronte glaciale; tuttavia, mentre con la metodologia tradizionale i valori massimi di correlazione sono concentrati in pochi anni e si ottengono con uno sfasamento compreso tra i 20 ed i 26 anni (valore massimo  $-0,69$  con gradi giorno a 2700 m e sfasamento di 24 anni), impiegando il metodo della cross-correlazione i coefficienti calcolati rimangono costantemente elevati per un periodo compreso tra 0 e 20 anni al termine del quale i valori diventano scarsamente significativi. Questo secondo risultato, se da una parte si accorda con quello della metodologia tradizionale che indica una risposta frontale dopo vent'anni, d'altro canto testimonierebbe una risposta del ghiacciaio alle sollecitazioni termiche prolungata per un ventennio.

Le correlazioni con i gradi giorno negativi sono invece negative, se calcolate con il metodo di Bravais-Pearson, e positive, se calcolate con il metodo della cross correlazione. Solo questo secondo risultato sembra adeguato ai processi fisici in gioco, suggerendo che all'aumentare dei gradi giorno negativi annuali (quindi alla diminuzione dell'energia termica disponibile), si creano le condizioni favorevoli per un' avanzata della fronte glaciale.

Le correlazioni con i gradi giorno netti, invece, calcolate con entrambi i metodi forniscono risultati assai diversi. Con il metodo Bravais-Pearson i coefficienti calcolati sia con i gradi giorno annui netti a 2700 m sia con quelli a 3250 sono sempre negativi, mentre con il metodo della

FIG. 5 - Andamento dei coefficienti di correlazione tra gradi giorno positivi e negativi a 2700 m e 3250 m di quota e variazioni frontali Ghiacciaio del Dosegù. Con 1 sono indicati i gradi giorno positivi calcolati a 2700 m di quota, con 2 sono indicati i gradi giorno negativi a 2700 m di quota, con 3 sono rappresentati i gradi giorno positivi a 3250 m di quota e con 4 i gradi giorno negativi a 3250 m di quota.

FIG. 5 - Relationship between positive and negative degree-days (at 2700 m asl and at 3250 m asl) and frontal variations of Ghiacciaio del Dosegù (in the diagram is reported the correlation coefficient trend). Symbol 1 is used for positive degree-days at 2700 m asl, symbol 2 is used to indicate negative degree-days at 2700 m asl, symbol 3 is used for positive degree-days at 3250 m asl and symbol 4 is used to indicate negative degree-days at 3250 m asl.



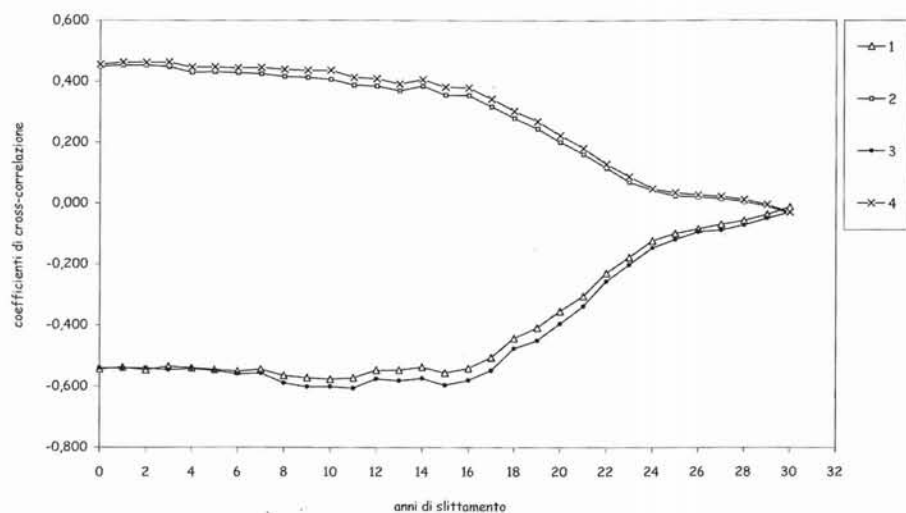


FIG. 6 - Andamento dei coefficienti di cross-correlazione tra gradi giorno positivi e negativi a 2700 m e 3250 m di quota e variazioni frontali Ghiacciaio Dosegù. Con 1 sono indicati i gradi giorno positivi calcolati a 2700 m di quota, con 2 sono indicati i gradi giorno negativi a 2700 m di quota, con 3 sono rappresentati i gradi giorno positivi a 3250 m di quota e con 4 i gradi giorno negativi a 3250 m di quota.

FIG. 6 - Relationship between positive and negative degree-days (at 2700 m asl and at 3250 m asl) and frontal variations of Ghiacciaio Dosegù (in the diagram is reported the cross-correlation coefficient trend). Symbol 1 is used for positive degree-days at 2700 m asl, symbol 2 is used to indicate negative degree-days at 2700 m asl, symbol 3 is used for positive degree-days at 3250 m asl and symbol 4 is used to indicate negative degree-days at 3250 m asl.

cross-correlazione i coefficienti calcolati sono negativi se riferiti ai gradi giorno netti a 2700 m di quota e positivi se si utilizzano i gradi giorno annui netti a 3250 m di quota. Questo risultato può essere spiegato osservando che a 2700 m di quota la somma algebrica dei gradi giorno positivi e di quelli negativi dà nella maggior parte degli anni un valore positivo; vi è quindi una certa quantità di energia termica che può essere fornita al ghiacciaio, creando una situazione favorevole al ritiro frontale. A 3250 m di quota, invece, i gradi giorno netti sono sempre negativi; vi sarebbe quindi una riduzione dell'energia termica disponibile per la fusione e si creerebbero condizioni favorevoli ad un'espansione frontale glaciale.

Anche le correlazioni con i gradi giorno negativi e netti, inoltre, calcolate con la metodologia della cross correlazione, sembrano indicare una risposta della fronte glaciale alle sollecitazioni termiche che si prolunga per un ventennio, mentre quelle calcolate con il metodo Bravais Pearson vedono i coefficienti più elevati concentrati fra 20 e 26 anni (per i gradi giorno netti, massimo di -0,63 con uno sfasamento di 23 anni).

#### 4.3 Stima dei «tempi di risposta frontali» alle sollecitazioni delle precipitazioni

Anche per le precipitazioni si è cercato di ricostruire l'andamento in quota; tuttavia le difficoltà di individuare un gradiente pluviometrico con l'utilizzo delle stazioni disponibili hanno suggerito di utilizzare semplicemente i dati della stazione di Bormio. Con questi dati (precipitazioni mensili in millimetri dal 1926 al 1990) si è proceduto alla stima del «tempo di risposta frontale» (*reaction time*) glaciale. Come per i gradi giorno, si è proceduto all'utilizzo dei due tipi di correlazione. Per ogni anno dal 1926 al 1990 sono stati calcolati gli importi invernali e quelli estivi, con due diverse definizioni d'estate (e conseguentemente d'inverno), una comprendente il mese di Maggio e l'altra a

partire dal mese di Giugno, e quelli netti, derivanti dalla differenza fra le precipitazioni invernali e quelle estive. Se infatti si parte dal presupposto che le precipitazioni invernali costituiscono la principale forma di accumulo glaciale, favorevole ad un'espansione frontale, mentre le precipitazioni estive, prevalentemente liquide, rappresentano un ulteriore processo di ablazione, i valori netti dovrebbero rappresentare il contributo efficace nel determinare la risposta positiva o negativa del ghiacciaio.

L'analisi dei risultati presenta maggiori difficoltà rispetto a quelli riguardanti i gradi giorno, sia per i valori molto bassi dei coefficienti, sia per l'interpretazione delle relazioni a livello di sistema fisico. Con le correlazioni classiche, ad esempio, le precipitazioni invernali appaiono correlate alle variazioni frontali con valori positivi ma estremamente ridotti (massimo 0,35) con lo scarto di un lustro, dopo di che i valori diventano costantemente negativi, il che sembra difficilmente spiegabile a livello di sistema fisico. Coefficienti lievemente più elevati (0,41), sempre con scarti di 5-6 anni, si sono trovati utilizzando le precipitazioni nette annuali.

Se si utilizzano le *cross correlations* i coefficienti sono costantemente negativi anche con sfasamenti limitati con tutti i tipi di precipitazioni e tendono a zero su lunghi periodi.

Il significato di questi risultati non è chiaramente interpretabile. Si può pensare che le precipitazioni siano un fenomeno di peso secondario nella dinamica frontale del Ghiacciaio del Dosegù rispetto ai parametri termici e che quindi il ghiacciaio sia più sensibile a questi ultimi oppure che la stazione di Bormio non sia rappresentativa delle condizioni pluviometriche caratteristiche dell'area dove è localizzato il ghiacciaio; si potrebbe ancora ritenere che i gradi giorno siano segnalatori più significativi ed efficaci dell'entità dell'ablazione di quanto non siano le precipitazioni per l'entità dell'accumulo.

Tenendo conto dei dati e delle osservazioni sopra riportate, si può concludere che, almeno per il caso in oggetto, i gradi giorno costituiscono uno strumento altrettanto valido quanto i valori termici medi mensili per l'analisi delle relazioni fra la dinamica frontale e fattori termici forzanti. È risultato inoltre che il calcolo dei gradi giorno mensili e annuali può in ogni caso essere effettuato utilizzando le temperature medie mensili invece dei singoli valori giornalieri con snellimento nelle procedure di elaborazione. I gradi giorno si sono anche rivelati un utile strumento per la ricostruzione dei valori degli anni mancanti nelle serie delle variazioni frontali lacunose mediante il calcolo di un coefficiente m/gradi giorno.

Per quanto riguarda i due metodi di correlazioni statistiche usate va sottolineato che essi danno risultati lievemente diversi, pur evidenziando entrambi la maggiore influenza dei fattori termici rispetto a quelli pluviometrici sulla dinamica della fronte del ghiacciaio. Con le correlazioni di Bravais-Pearson i coefficienti più elevati (superiori a -0,6) si raggiungono con i gradi giorno positivi e netti e indicano che i fattori termici manifestano la loro maggiore efficacia dopo 20-25 anni. Questo valore è maggiore di quello già ottenuto da Belloni & alii (1985a e 1985b); questi autori hanno però usato una stazione meteorologica più lontana dal ghiacciaio (Sondrio) ed una serie di dati frontali e di dati climatici molto più breve. Le *cross correlations* invece suggeriscono che l'effetto delle temperature non si manifesta con un tempo di risposta ben definito e localizzato temporalmente, ma che la risposta frontale alle sollecitazioni termiche si prolunga in modo continuo e omogeneo un lungo periodo di tempo, da 0 a 20 anni.

Per quanto riguarda le precipitazioni, come già sottolineato, le elaborazioni sui dati della stazione di Bormio non forniscono informazioni chiare e ben delineabili, volte a identificare le possibili relazioni con la dinamica frontale del Dosegù. Si conferma quindi da un lato quanto già emerso per questo stesso ghiacciaio nei lavori di Belloni & alii (1985a; 1985b; 1990), dall'altro quanto evidenziato a proposito di altri apparati glaciali nei lavori di Rabaglia ti & Serandrei Barbero (1982), di Smiraglia (1986), Barsanti & alii (1995) sul tempo di risposta frontale dei ghiacciai e sulla maggiore rappresentatività dei parametri termici nei riguardi della dinamica frontale rispetto a quelli pluviometrici.

- ARNOLD K.C. & MC KAY D.K. (1964) - *Different methods of calculating mean daily temperatures, their effects on degree-day totals in the high arctic and their significance to glaciology*. Geogr. Bull., 21, 123-129.
- BARSANTI M., PELFINI M. & SMIRAGLIA C. (1995) - *Glacier mass balance: some results from Central Italian Alps*. Zeit. Gletscherk. Glazialgeol., 31, 1-9.
- BELLONI S. (1992) - *Oscillazioni frontali dei ghiacciai italiani e clima: un sessantennio di ricerche*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 8, 43-57.
- BELLONI S., CATASTA G. & SMIRAGLIA C. (1985a) - *Parametri climatici e variazioni glaciali nel periodo 1950-1982*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 8, 97-123.
- BELLONI S., CATASTA G. & SMIRAGLIA C. (1985b) - *Parametri climatici e oscillazioni frontali dei ghiacciai italiani nell'ultimo sessantennio*. Mem. Soc. Geogr. It., 39, 169-193.
- BELLONI S. & PELFINI M. (1996) - *I ghiacciai alpini come indicatori climatici*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 18, 185-189.
- BELLONI S., PELFINI M. & SMIRAGLIA C. (1990) - *Parametri climatici e variazioni glaciali*. Mem. Soc. Geol. It., 45, 867-875.
- BELLONI S., PELFINI M. & SMIRAGLIA C. (1991) - *Oscillazioni frontali recenti dei ghiacciai e variazioni climatiche in Valtellina: un approccio metodologico*. Mem. Soc. Geogr. It., 46, 167-182.
- BOYD D.W. (1975) - *Computing freezing and thawing degree-days from monthly temperatures*. Division of Building Research, National Research Council of Canada, Technical Paper 444, 20 pp.
- BRAITHWAITE R. (1984) - *Calculation of degree days for glacier climate research*. Zeit. Gletscherk. Glazialgeol., 20, 1-8.
- CHEN C. (1982) - *Statistical pattern recognition*. In: Chen C. (ed.), *Digital waveform processing and recognition*, CRC Press 1982, 59-74.
- CHILDERS R.K. (1982) - *Digital spectral analysis*. In: Chen C. (ed.), *Digital waveform processing and recognition*, CRC Press, 23-59.
- FINSTERWALDER S. & SCHUNK H. (1887) - *Der Suldenferner*. Zeit. Deutsch. Vest. Alpenvereins, 18, 72-89.
- KEAREY P. & BROOKS M. (1990) - *An introduction to Geophysical exploration*. Blackwell, Oxford, 272 pp.
- RABAGLIATI R. & SERANDREI BARBERO R. (1982) - *I Ghiacciai delle Alpi Giulie dal 1920 al 1979. Spostamenti delle fronti e variazioni climatiche*. Studi Trent. Sc. Nat., Acta Geol., 59, 105-126.
- SMIRAGLIA C. (1986) - *Il Ghiacciaio della Ventina (Val Malenco Alpi Centrali): contributo alla conoscenza del tempo di risposta*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 9, 49-55.
- TELFORD W., GÉLARD L. & SHERIFF R. (1992) - *Applied Geophysics*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.