

ROSSANA SERANDREI BARBERO (*), RICCARDO RABAGLIATI (*) & STEFANO ZECCHETTO (**)

ANALISI DELLE MISURE ALLE FRONTI DEI GHIACCIAI DELLE ALPI GIULIE E CORRELAZIONI CON I DATI CLIMATICI (**)

Abstract: SERANDREI BARBERO R., RABAGLIATI R., & ZECCHETTO S., *Statistical analysis of historical data at the Giulie Alps glacier terminus and their correlation to climatic data* (ISSN 0084-8948, 1989).

Some specific statistical analyses were carried out on data recorded since 1921 at the terminus of the «Occidentale di Montasio», «Occidentale del Canin» and «Orientale del Canin» glaciers. Their frequency distribution, standard deviation and squared coefficient of variation indicate the statistical homogeneity of the data once subtracted their mean values. The linear correlation among the values of glacier terminus variations measured at different stations identifies the series of data representative of the frontal dynamics.

The presence of climatic stations at different altitudes permitted to compute the winter and summer thermal gradient to extrapolate climatic data at the mean elevation of the glaciers, thus making it possible to verify the approximate duration of ablation and accumulation periods. The climatic parameters described are mean summer and annual temperature, total winter and annual precipitations, and snow depth.

Their long term trend is represented by a polynomial regression curve; the value of deviations from this curve is made evident by filtering out components of the signal of less than a five-year period. Summer temperature and winter precipitations, normalized and filtered, are correlated to the curve of the variation of position of the single glacier terminus and to that of the total variation of all three glaciers. Information obtained is that the use of mean curves will increase the theoretical time lag of the glacier terminus to climatic parameters due to the undifferentiated contribution of different information on the glacier dynamics. This result is confirmed by the correlation between climate and variations in the position of the glacier terminus with respect to each measuring station, from which it generally results a one year time lag.

KEY WORDS: Glacier, Temperature, Precipitations, Multivariate analysis, Giulie Alps.

Riassunto: SERANDREI BARBERO R., RABAGLIATI R. & ZECCHETTO S., *Analisi delle misure alle fronti dei ghiacciai delle Alpi Giulie e correlazioni con i dati climatici* (ISSN 0084-8948, 1989).

Sono state analizzate alcune caratteristiche statistiche delle misure alle fronti dei ghiacciai Occidentale di Montasio, Occidentale del Ca-

nin e Orientale del Canin, in corso dal 1921. La loro distribuzione di frequenza, lo scarto quadratico medio e il coefficiente rappresentativo della funzione di distribuzione indicano la necessità di sottrarre alle misure il valore medio per rendere i dati statisticamente omogenei. La correlazione lineare tra i valori delle variazioni frontali misurate da differenti punti di misura individua le serie di dati rappresentative della dinamica frontale.

La presenza di stazioni climatiche a quote diverse ha permesso di calcolare il gradiente termico estivo ed invernale per estrapolare i dati climatici alla quota dei ghiacciai; è stato così possibile verificare la durata dei periodi di ablazione e di accumulo. I parametri climatici descritti sono la temperatura media annua ed estiva, le precipitazioni totali annue ed invernali e l'altezza della precipitazione nevosa. La loro tendenza a lungo termine è rappresentata da una curva di regressione polinomiale; l'entità degli scarti rispetto alla curva di regressione viene meglio evidenziata filtrando il segnale dalle oscillazioni di periodo inferiore a cinque anni.

Le variabili climatiche temperatura estiva e precipitazioni invernali, normalizzate e filtrate, sono state correlate con la curva della variazione frontale di ciascun ghiacciaio e con quella della variazione frontale media dei tre ghiacciai; le correlazioni indicano che l'utilizzo di curve medie, per il contributo indifferenziato di informazioni diverse sulla dinamica del ghiacciaio, allunga i tempi di risposta teorici della fronte ai parametri climatici. Il risultato è confermato dalla correlazione tra clima e variazione frontale rispetto ai singoli punti di misura, che evidenzia un tempo di risposta medio di un anno.

TERMINI CHIAVE: Ghiacciaio, Temperatura, Precipitazioni, Analisi multivariata, Alpi Giulie.

INTRODUZIONE

Sui ghiacciai delle Alpi da numerosi decenni viene sistematicamente misurata la distanza della fronte da alcuni punti fissi mentre sono poco frequenti le misure di bilancio di massa. Le fronti osservate sono situate normalmente entro un raggio di pochi chilometri da una stazione climatica; per questo motivo, numerose indagini si sono rivolte allo studio del tempo di risposta della fronte di un ghiacciaio agli impulsi climatici, anche se questo (REYNAUD, 1977), rispetto al bilancio di massa, è un dato mediato da fattori propri di ogni ghiacciaio. Malgrado questi deter-

(*) Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse - CNR, S. Polo, 1364 - 30125 Venezia.

(**) Un particolare ringraziamento a Gioacchino Cerrato e Carlo Po-har, entrambi di Cave del Predil, che, con la loro costanza, hanno costruito le serie storiche di dati climatici e glaciologici utilizzate in questa nota.

TABELLA 1 - Dati relativi ai Ghiacciai delle Alpi Giulie aggiornati al 1985 ⁽¹⁾

| N. (CNR-CGI, 1959-1962) | Ghiacciai | Superficie (km ²) | Esp. | Quota più alta | Quota fronte | Altitudine mediana | Periodo di osservazione della fronte |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|------|----------------|--------------|--------------------|--------------------------------------|
| 979 | Minore di Montasio | 0,01 | N | 1870 | 1820 | 1850 | 1949 - 65 |
| 980 | Orientale di Montasio | 0,07 | N | 1985 | 1880 | 1920 | dal 1958 |
| 981 | Occidentale di Montasio | 0,08 | N | 2105 | 1880 | 1940 | dal 1921 |
| 982 | Prestreleng | 0,03 | N | 2260 | 2150 | 2200 | 1949 - 64 |
| 983 | Ursic | 0,09 | N | 2320 | 2190 | 2240 | 1901 - 68 |
| 984 | Orientale del Canin | 0,15 | N | 2335 | 2120 | 2220 | dal 1896 |
| 985 | Occidentale del Canin | 0,27 | N | 2400 | 2120 | 2250 | dal 1880 |

⁽¹⁾ Misure di campagna del Settembre 1985 di SERANDREI BARBERO.

minimo tempi di risposta diversi che riducono (REYNAUD, 1982) il valore di ogni confronto con il clima nel quale siano trattati insieme diversi ghiacciai, in una precedente indagine (RABAGLIATI & SERANDREI BARBERO, 1982) i ghiacciai delle Alpi Giulie, per la loro uniformità morfologica e l'uguale esposizione, sono stati considerati complessivamente per mezzo di una curva media delle variazioni frontali, dalla cui correlazione con i dati climatici, data da una regressione lineare multipla, si è ottenuto un tempo di risposta di cinque anni. La correlazione migliore è stata ottenuta introducendo, accanto ai valori annui, i valori della temperatura estiva e delle precipitazioni invernali che rappresentano (LIBOULTRY, 1965, p. 837) i parametri che più direttamente influenzano il bilancio di un ghiacciaio.

Altri confronti con il clima ottenuti con regressioni lineari multiple hanno indicato un tempo di risposta medio di 8,5 anni per i ghiacciai dell'arco alpino italiano (BELLONI & *alii*, 1985) e un tempo di risposta di dieci anni per il Ghiacciaio della Ventina (SMIRAGLIA, 1986). Per i ghiacciai delle Alpi austriache, POSAMENTIER (1977) ha legato le variazioni frontali ai parametri climatici dell'anno in corso e dei sette anni precedenti.

Visto il diffuso impiego della curva media della variazione frontale per definire il grado di correlabilità tra ghiacciai e clima, ci si è chiesti la rappresentatività di una curva che medi dati relativi a diversi ghiacciai o a diversi punti di misura di uno stesso ghiacciaio; e si è sviluppata la presente indagine per individuare i segnali più rappresentativi della variazione frontale e definire la curva più adatta a rappresentarne l'andamento per un confronto con i dati climatici.

GHIACCIAI

I dati sperimentali

Secondo il catasto dei Ghiacciai Italiani (CNR-CGI, 1959-1962), nelle Alpi Giulie sono compresi 7 ghiacciai (tab. 1), tutti di secondo ordine.

Le prime misure di distanza delle loro fronti da alcuni punti fissi furono compiute nel 1880 e continuano ancora. Da tutti questi dati, per la cui storia si rimanda ad un precedente lavoro (RABAGLIATI & SERANDREI BARBERO,

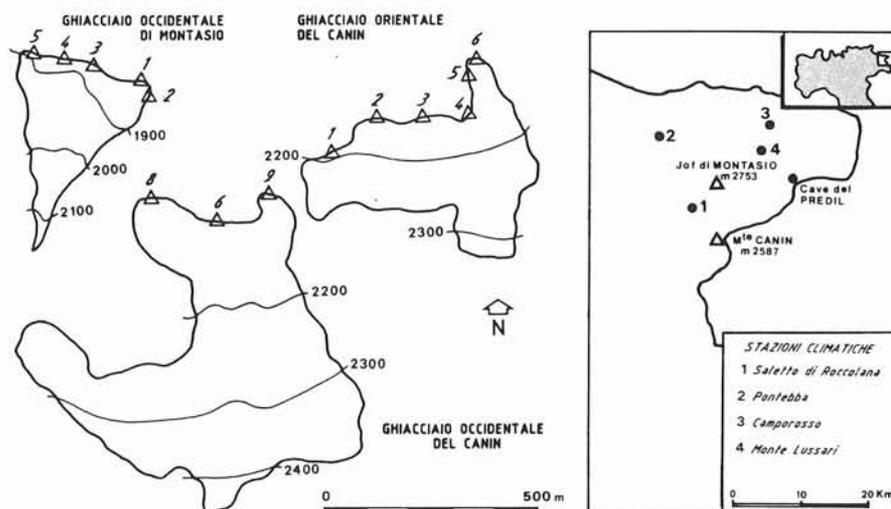


FIG. 1 - Mappa approssimata dei ghiacciai con la posizione degli attuali punti di misura (vedi anche allegato 1).

1982), sono state scelte le serie temporali che più a lungo si sovrappongono ai dati climatici, registrati a Cave del Predil (fig. 1) dal 1921; esse interessano i ghiacciai Occidentale e Orientale del Canin e Occidentale di Montasio.

I punti fissi utilizzati nel corso del tempo per le misure alle fronti di questi tre ghiacciai sono così distribuiti: 6 alla fronte del Ghiacciaio Occidentale di Montasio, 9 alla fronte del Ghiacciaio Occidentale del Canin e 7 a quella del Ghiacciaio Orientale del Canin. La posizione degli attuali punti di misura è indicata in fig. 1; la corrispondenza tra simboli nel testo e sul terreno, è riportata nell'allegato 1.

Caratterizzazione statistica delle misure alle fronti

Nel tentativo di caratterizzare i singoli ghiacciai attraverso le variazioni annuali di posizione delle loro fronti, si sono confrontate (fig. 2) le distribuzioni di frequenza delle misure di distanza dalla fronte dei vari punti di misura dal 1921 al 1986 riducendole, per evidenziare la forma, alla stessa scala orizzontale.

La forma della distribuzione di frequenza delle misure sperimentali (tratto marcato in fig. 2) appare dissimile per i 3 ghiacciai. Ciò è dovuto all'arbitrarietà dell'origine rispetto alla quale è misurata la distanza della fronte⁽¹⁾, come è dimostrato dalle distribuzioni di frequenza di forma più simile per i 3 ghiacciai (area punteggiata in fig. 2) ottenute sottraendo alle misure il loro valore medio. Ciò indica l'opportunità di lavorare con le curve delle differenze rispetto alla media piuttosto che con quelle delle misure sperimentali.

Una stima del grado di omogeneità delle curve della variazione frontale rispetto ai vari punti di misura può essere ricavata dal confronto dei rispettivi scarti quadratici medi σ_x (fig. 3).

Come criterio di valutazione, si è stabilito di considerare omogenee tra loro quelle serie di misure il cui σ_x cade nell'intervallo

$$\bar{\sigma}_x \pm \sigma_x [\sigma_x]$$

dove $\bar{\sigma}_x$ è la media delle σ_x .

La maggior parte dei punti di misura cade nell'intervallo stabilito (5 su 6 per il Ghiacciaio Occidentale di Montasio, 5 su 9 per il Ghiacciaio Occidentale del Canin e 5 su 7 per il Ghiacciaio Orientale del Canin).

Una ulteriore verifica del grado di omogeneità dei dati sperimentali è stata ottenuta stimando il coefficiente C_x^2 rappresentativo della funzione di distribuzione di frequenza dei valori osservati (ALLEN, 1978)

$$(1) \quad C_x^2 = \frac{E [\sigma_x^2]}{(E [\bar{x}])^2}$$

⁽¹⁾ Arbitrarietà accentuata dalla diversa evoluzione di ciascun settore della fronte.

dove $E [\quad]$ sono i valori attesi di σ_x^2 e \bar{x} che possono essere approssimati a

$$E [\sigma_x^2] = \sigma_x^2$$

$$E [\bar{x}] = \bar{x}$$

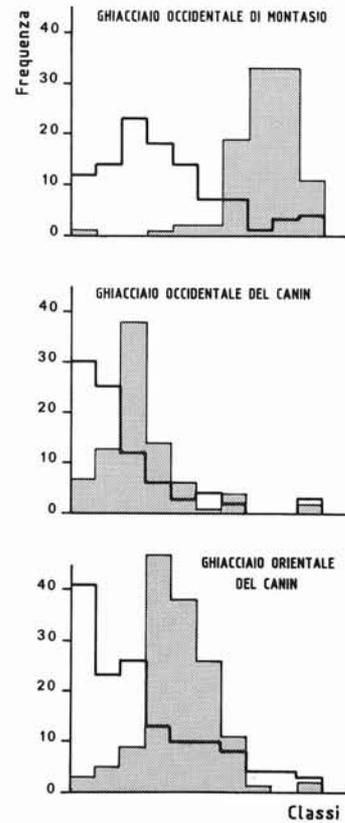


Fig. 2 - Istogrammi delle distribuzioni di frequenza delle misure alle fronti. Le differenti forme delle distribuzioni di frequenza delle distanze misurate (tratto marcato) diventano simili sottraendo alle misure il loro valore medio (area punteggiata).

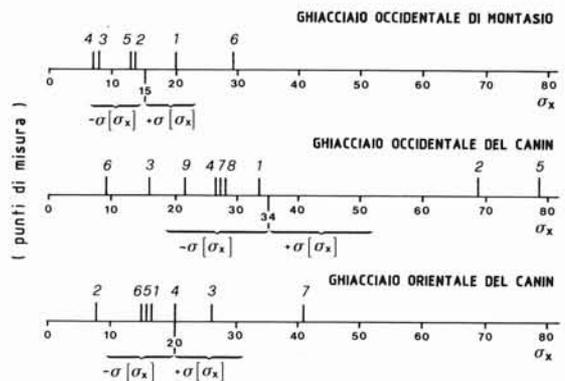


Fig. 3 - Scarto quadratico medio delle misure alle fronti.

In fig. 4 sono riportati i valori di C_x^2 relativi alle misure di distanza osservate rispetto ad ogni punto di misura per i tre ghiacciai. Essi indicano l'appartenenza delle misure a distribuzioni statistiche differenti. Ciò è imputabile all'uso nella (1) del valore medio di ciascuna serie di misure; che pertanto, in questa indagine, verrà sempre sottratto ai dati sperimentali.

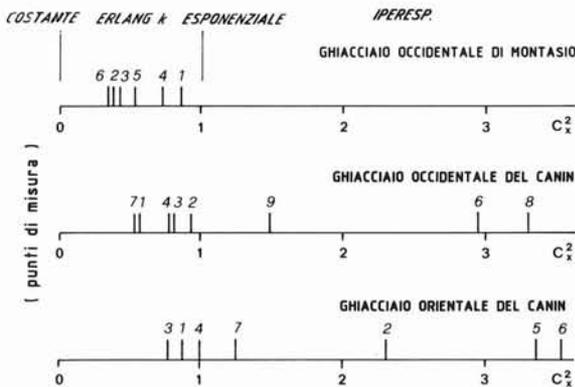


Fig. 4 - Coefficiente rappresentativo della funzione di distribuzione di frequenza delle misure alle fronti.

CLIMA

Verifica dei periodi di ablazione e di accumulo

Cave del Predil (m 901) è stazione pluviometrica del Servizio Idrografico del Ministero dei Lavori Pubblici dal 1921 e termometrica dal 1934 ed appartiene, come i ghiacciai delle Alpi Giulie, alla regione climatica delle Valli del Fella (GENTILI, 1964). Essa dista circa 12 km dai ghiacciai qui considerati, dalla cui altitudine mediana (2 137 m) la separano 1 236 m di dislivello.

La quota di 2 137 m è particolarmente bassa per i ghiacciai dell'arco alpino e si è voluto verificare se la durata delle stagioni d'accumulo e di ablazione ne risultasse influenzata.

L'estrapolazione dei dati climatici alla quota di interesse può essere affrontata (CA' ZORZI & alii, 1984) se si individuano i gradienti opportuni, che risultano stabili solo se calcolati per periodi pluriennali. A questo scopo si sono prese in esame, all'interno della stessa regione climatica, serie pluriennali di dati registrati a stazioni di misura appartenenti a due fasce altimetriche: per quella inferiore a 806 m (Pontebba: 562 m, Saletto di Raccolana: 517 m e Camporosso: 806 m), è stato calcolato un gradiente termico compreso tra 1,4 e 1,6°C ogni 100 m di dislivello per il semestre Maggio Ottobre e tra 0,9 e 1°C per il semestre Novembre Aprile. Per quella da 806 a 1 726 m (Camporosso: 806 m e Monte Lussari: 1 726 m), un decremento di 0,4°C ogni 100 m per i mesi da Maggio a Settembre.

Non esistono nella regione stazioni climatiche a quota superiore e poiché la fascia altimetrica da m 806 a 1 726 è parzialmente coincidente con quella compresa tra la stazione di Cave del Predil e l'altitudine mediana dei ghiacciai considerati, il decremento di 0,4°C/100 m è stato utilizzato per calcolare la riduzione di temperatura alla quota dei ghiacciai nei mesi di Aprile e Maggio e quello di

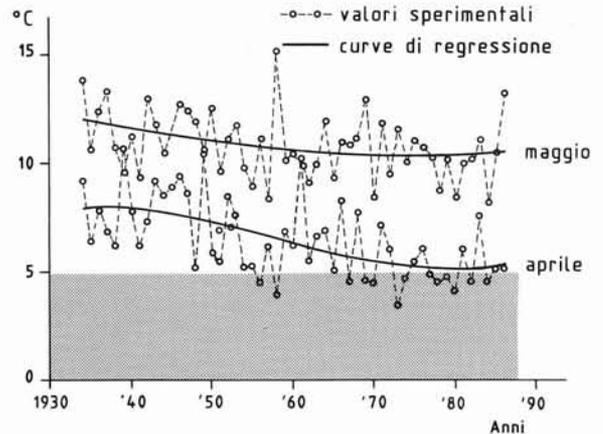


Fig. 5 - Temperatura media di Aprile e Maggio (Cave del Predil, 1934-1986). L'area oscurata segna la riduzione della temperatura all'altitudine mediana dei ghiacciai.

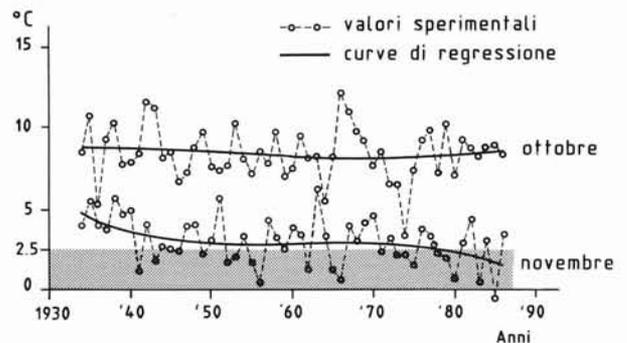


Fig. 6 - Temperatura media di Ottobre e Novembre (Cave del Predil, 1934-1986). L'area oscurata segna la riduzione della temperatura all'altitudine mediana dei ghiacciai.

0,2°C/100 m⁽²⁾ per i mesi di Ottobre e Novembre. Nelle figure 5 e 6 sono riportate le temperature medie dal 1934 al 1986 rispettivamente in Aprile e Maggio, Ottobre e Novembre; come risulta dalle curve di regressione, esse appaiono pressoché stazionarie⁽³⁾ in Maggio e Ottobre e non stazionarie in Novembre e, specialmente, in Aprile.

⁽²⁾ 2,7 e 2,8 gradi ogni 1 000 metri sono i gradienti invernali delle temperature minime e massime nel vicino bacino del Cordevole, compreso tra 279 e 2 350 m (CA' ZORZI & alii, 1984).

⁽³⁾ Si considera stazionario un fenomeno quando la sua media non cambia nel tempo e non mostra quindi tendenze significative (DAVIS, 1986, p. 194).

Una riduzione approssimata per difetto di 5 gradi in Aprile e di 2,5 gradi in Novembre ne porta i valori a cavallo dello zero e le rispettive curve di regressione molto vicine al valore critico. Le stesse riduzioni nei mesi di Maggio e Ottobre sono ininfluenti sulla posizione della curva di regressione rispetto allo zero.

Il semestre Novembre-Aprile può quindi essere preso come periodo di accumulo, ma la sua durata sembra un fatto recente, legato alla diminuita temperatura di Novembre e, specialmente, di Aprile.

Temperatura

A Cave del Predil l'anno medio 1934-1986 ha temperature minima in Gennaio ($-2,8^{\circ}\text{C}$) e massima in Luglio ($+16,5^{\circ}\text{C}$) con inversione di segno nei mesi di Marzo e Dicembre. L'andamento della temperatura media annua del periodo 1934-1986 è riportato in fig. 7a; dalla relativa curva di regressione, il fenomeno risulta non stazionario con una diminuzione, più accentuata dal 1934 al 1950, di complessivi $2,4^{\circ}\text{C}$.

La temperatura media registrata a Cave del Predil dal 1934 al 1986 nel semestre Maggio-Ottobre, che rappresenta, come si è visto, la stagione di ablazione, è riportata in fig. 7b; la curva di regressione mostra una diminuzione di $1,7^{\circ}\text{C}$ dal 1934 al 1970 e un lieve recupero dal '70 ad oggi. La sensibile diminuzione della temperatura media sembra indicare l'instaurarsi, a partire dal 1950 circa, di un periodo favorevole al glacialismo.

Precipitazioni

Il regime pluviometrico della regione delle Valli del Fella è caratterizzato da due massimi (primaverile ed autunnale) e due minimi (invernale ed estivo); e si differenzia ulteriormente, per avere Giugno più piovoso di Maggio, dalla regione carnica a Ovest e, per la sua minore piovosità, dalle Prealpi resiane a Sud, dove si raggiungono i massimi pluviometrici dell'arco alpino con oltre 3 000 mm di precipitazioni annue (MIN. LAV. PUBBL. SERV. IDROGR., 1957).

A cave del Predil l'anno pluviometrico medio 1921-1986 ha il massimo principale in Novembre (257,7 mm) e il massimo secondario in Giugno (204,3 mm) con una precipitazione media annua di 2 103,7 mm.

I valori annui delle precipitazioni dal 1921 al 1986 sono riportati nel grafico di fig. 8a. Il fenomeno appare periodico e non stazionario, come mostra la curva di regressione, che indica una oscillazione completa di periodo attorno ai sessant'anni, con minimo attorno al 1940 e massimo attorno al 1970. I maggiori scarti positivi cadono tra il 1920 e il 1940 che, in contrasto con quanto indicato dai dati termometrici, sembra essere un ventennio favorevole al glacialismo, cui fa seguito un periodo sfavorevole attorno al 1945. Dal 1950 ad oggi si sono verificate numerose oscillazioni tutte decisamente meno ampie.

Gli scarti positivi attorno al 1965, in analogia con quanto segnalato anche sulle Alpi Svizzere (AELLEN, 1985) do-

ve la recente crescita dei ghiacciai viene attribuita all'aumento delle precipitazioni piuttosto che a scarti negativi delle temperature, appaiono seguiti da una diminuzione delle precipitazioni in atto a tutt'oggi.

L'aumento delle precipitazioni del periodo 1965-1979 è più accentuato in periodo di accumulo (semestre Novembre-Aprile). La fig. 8b riporta i valori delle precipitazioni del semestre Novembre-Aprile e la relativa curva di regressione.

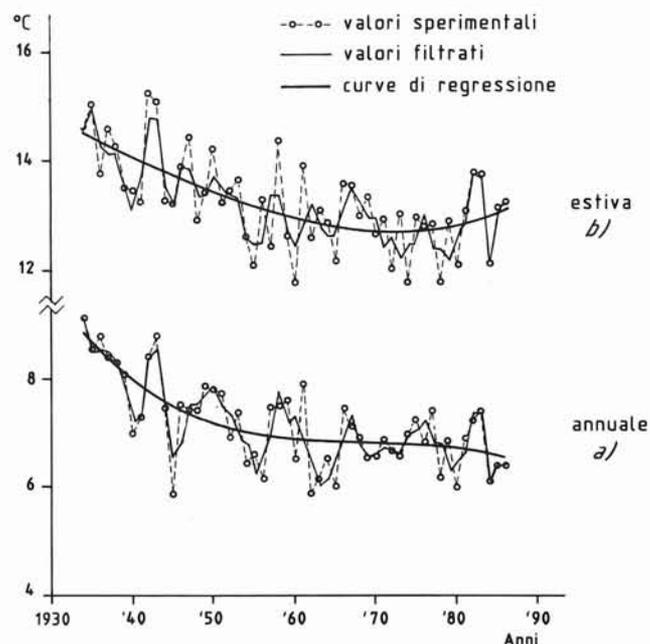


FIG. 7 - Temperatura media annua e del semestre Maggio-Ottobre, curve di regressione e segnale filtrato (Cave del Predil, 1934-1986).

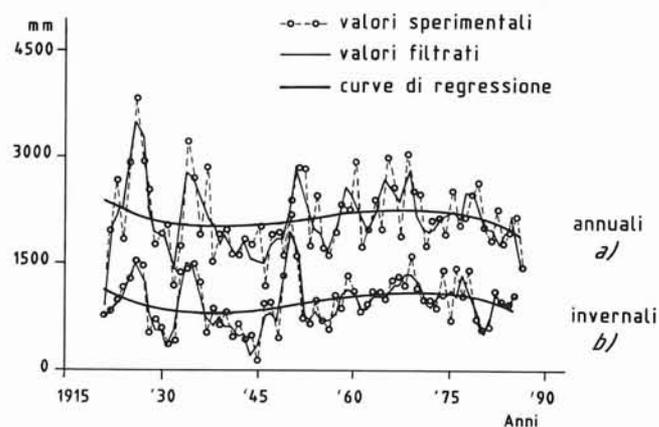


FIG. 8 - Precipitazioni annue e del semestre Novembre-Aprile, curve di regressione e segnale filtrato (Cave del Predil, 1921-1986).

Una informazione aggiuntiva è fornita dai dati nivometrici registrati a Cave del Predil dal 1934 come altezza della precipitazione nevosa giornaliera espressa in centimetri. I totali annui, riportati in fig. 9, mostrano un andamento caratterizzato da picchi molto accentuati con scarse precipitazioni nevose attorno al 1960. La curva di regressione evidenzia una sostanziale stazionarietà della precipitazione nevosa; la lieve tendenza all'aumento dell'ultimo decennio appare legata alla variazione negativa della temperatura che determinerebbe un aumento della precipitazione nevosa a scapito della pioggia.

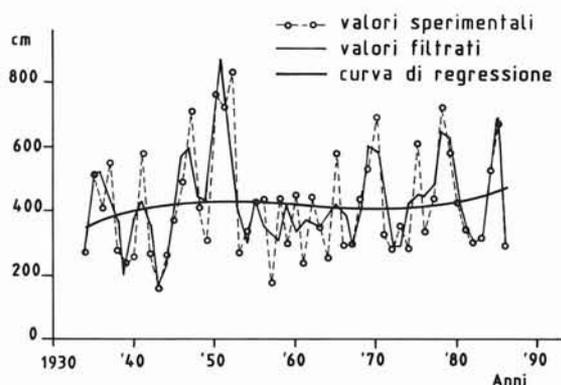


Fig. 9 - Precipitazione nevosa annua, curva di regressione e segnale filtrato (Cave del Predil, 1934-1986).

TRATTAMENTO DEI DATI

Metodi di correlazione

Date due variabili $x(t)$, $y(t)$, dove t è il tempo, la funzione di correlazione

$$(2) \quad R_{xy}(T) = \frac{\int x(t) y(t+T) dt}{\sigma_x \sigma_y}$$

dove σ_x e σ_y rappresentano lo scarto quadratico medio di $x(t)$ e $y(t)$, descritte, al variare dello sfasamento temporale T , il grado di relazione lineare tra di esse. $R_{xy}(T)$ non dipende dai valori medi di $x(t)$ e $y(t)$.

Se si presume che $x(t)$ e $y(t)$ siano legate ad una terza variabile $z(t)$, è possibile (DOWNIE & HEATH, 1970) calcolare sia la funzione di correlazione parziale

$$(3) \quad R_{xy,z}(T) = \frac{R_{xy} - (R_{xz} \cdot R_{yz})}{(1 - R_{xz}^2)(1 - R_{yz}^2)}$$

che fornisce il grado di correlazione in funzione di T tra le variabili $x(t)$ e $y(t)$ escludendo l'influenza di $z(t)$, sia la funzione di correlazione multipla

$$(4) \quad R_{mxyz}(T) = \left(\frac{R_{xy}^2 + R_{xz}^2 - (2 - R_{xy} R_{xz} R_{yz})}{(1 - R_{yz}^2)} \right)^{1/2}$$

che stima invece la correlazione tra $x(t)$ e l'insieme delle variabili $y(t)$, $z(t)$.

Per calcolare $R_{xy}(T)$ per $T \neq 0$, è necessario che le variabili $x(t)$ e $y(t)$ siano uniformemente campionate nel tempo. Diversamente sorge il problema di come sostituire i dati mancanti nelle serie originali e di sapere come la sostituzione influenzi $R_{xy}(T)$. In fig. 10 sono confrontati $R_{xy}(T)$, con $T = 0$ ottenuti dai soli dati di $x(t)$ e $y(t)$ coincidenti nel tempo (ascisse) e gli stessi calcolati interpolando linearmente i dati mancanti (ordinate). L'accordo è buono ($R = 0.8$) malgrado talune differenze attribuibili a motivi non sistematici. Perciò l'interpolazione lineare, troppo spesso ritenuta ovvia, risulta accettabile in questo contesto e sarà usata nel calcolo dello sfasamento temporale tra le variabili, cioè $R_{xy}(T)$ con $T \neq 0$. Saranno usati invece solo i dati di $x(t)$ e $y(t)$ coincidenti nel tempo, cioè senza alcuna interpolazione, nel calcolo di $R_{xy}(T)$ per $T = 0$. Si è infine proceduto, nel calcolo di $R_{xy}(T)$, per $T \neq 0$, a rimuovere le componenti ad alta frequenza delle variabili $x(t)$ e $y(t)$ che, secondo la teoria dei segnali (MARSHALL, 1965), sono considerate rumore casuale. Ciò è stato fatto usando un filtro di convoluzione (SAVITZKY & GOLAY, 1965, STEINER & alii, 1972) che elimina tutte le oscillazioni con periodo inferiore a 5 anni (filtro di ordine 5). Rispetto alle medie mobili, normalmente usate, questo metodo non modifica la posizione dei massimi e dei minimi

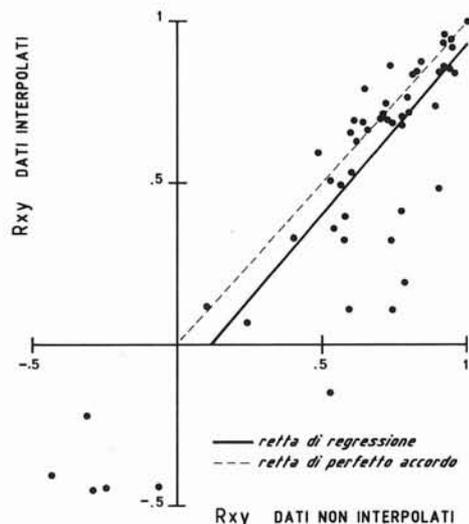


Fig. 10 - Confronto tra coefficienti di correlazione ottenuti dai dati non interpolati (ascisse) e interpolati linearmente (ordinate).

della serie temporale. Ciò è particolarmente importante nella determinazione dello sfasamento temporale tra due variabili $x(t)$, $y(t)$ che viene individuato in corrispondenza del massimo della funzione di correlazione $R_{xy}(T)$.

Scelta della serie di misure rappresentative dello spostamento frontale

Sui dati sperimentali registrati alle fronti pesano dei limiti così riassumibili:

- in vari anni alcuni punti di misura, o tutti, sono inutilizzabili per l'innevamento;
- alcuni punti di misura sono stati utilizzati solo per un periodo limitato;
- il significato fisico dei punti di misura è diverso secondo la loro posizione rispetto alla fronte e secondo la morfologia del ghiacciaio.

Questo ha reso necessaria la scelta delle serie di misure più rappresentative effettuata calcolando la (2) per $T = 0$ e un numero di dati $n \geq 5$.

R è in genere alto tra punti di misura contigui. In base al suo valore (tab. 2a, b, c) e al numero di dati utilizzati per il calcolo, si considerano rappresentativi della variazione delle fronti i punti di misura 1 e 2 del Ghiacciaio Occidentale di Montasio, 6, 8 e 9 dell'Occidentale del Canin e 1, 3, 4 dell'Oriente del Canin da cui sono state ottenute (fig. 11) le rispettive curve della variazione media frontale.

In seguito a quanto rilevato alla fine del paragrafo *Caratterizzazione statistica delle misure alle fronti* esse hanno media nulla e devono quindi essere intese in senso differenziale: settori della curva con derivata prima positiva indicano regresso e viceversa.

I ghiacciai Occidentale di Montasio e Orientale del Canin, evidenziano alcuni tratti con andamento comune; in particolare il regresso tra il 1920 e il 1950, seguito da una avanzata negli anni cinquanta. Il Ghiacciaio Occidentale del Canin, pur presentando anch'esso una forte avanzata all'inizio degli anni cinquanta, mostra un andamento dissimile.

TABELLA 2a - Ghiacciaio Occidentale di Montasio: coefficienti di correlazione tra punti di misura ($n \geq 5$).

| Punti di misura | Numero n di dati correlati | Coefficiente di correlazione |
|-----------------|----------------------------|------------------------------|
| 2 | 1 | 0.72 |
| 3 | 1 | 0.57 |
| 3 | 2 | 0.54 |
| 4 | 1 | 0.77 |
| 4 | 2 | 0.58 |
| 4 | 3 | 0.90 |
| 5 | 2 | 0.59 |
| 5 | 3 | 0.70 |
| 5 | 4 | 0.78 |
| 6 | 1 | 0.71 |
| 6 | 2 | 0.62 |
| 6 | 3 | 0.10 |

TABELLA 2b - Ghiacciaio Occidentale del Canin: coefficienti di correlazione tra punti di misura ($n \geq 5$).

| Punti di misura | Numero n di dati correlati | Coefficiente di correlazione |
|-----------------|----------------------------|------------------------------|
| 1 | 4 | 0.73 |
| 3 | 4 | 0.92 |
| 3 | 6 | 0.94 |
| 3 | 9 | 0.92 |
| 4 | 6 | 0.79 |
| 6 | 8 | 0.96 |
| 6 | 9 | 0.88 |
| 8 | 9 | 0.94 |

TABELLA 2c - Ghiacciaio Orientale del Canin: coefficienti di correlazione tra punti di misura ($n \geq 5$).

| Punti di misura | Numero n di dati correlati | Coefficiente di correlazione |
|-----------------|----------------------------|------------------------------|
| 1 | 2 | 0.73 |
| 1 | 3 | 0.80 |
| 1 | 4 | 0.81 |
| 1 | 5 | 0.53 |
| 1 | 6 | 0.74 |
| 1 | 7 | 0.92 |
| 2 | 3 | 0.56 |
| 2 | 4 | 0.66 |
| 2 | 5 | 0.64 |
| 2 | 6 | 0.77 |
| 2 | 7 | 0.70 |
| 3 | 4 | 0.82 |
| 3 | 5 | 0.40 |
| 3 | 6 | 0.24 |
| 3 | 7 | 0.84 |
| 4 | 5 | 0.61 |
| 4 | 6 | 0.60 |
| 4 | 7 | 0.95 |
| 5 | 6 | 0.90 |
| 5 | 7 | 0.77 |
| 6 | 7 | 0.60 |

Il risultato della correlazione lineare tra le variazioni medie della posizione delle fronti dei tre ghiacciai (tab. 3) conferma le osservazioni sull'andamento delle tre curve; la correlazione maggiore (0,73) si verifica tra i ghiacciai Occidentale di Montasio e Orientale del Canin, mentre il ghiacciaio Occidentale del Canin si correla ad un livello inferiore, nell'ordine, con l'Oriente del Canin (0,57) e con l'occidentale di Montasio (0,41).

Malgrado l'apparente uniformità morfologica, i tre ghiacciai in esame appaiono tra loro diversi per quanto riguarda le variazioni frontali e verranno quindi considerati singolarmente per il calcolo delle correlazioni con i parametri climatici.

CORRELAZIONI TRA VARIAZIONI FRONTALI E PARAMETRI CLIMATICI

Precisazioni sul metodo statistico utilizzato

Nei paragrafi seguenti vengono discussi i risultati delle correlazioni tra i dati climatici e le variazioni della posizione delle fronti. Sono state calcolate le correlazioni parziale e multipla definite da (3) e (4), dove x rappresenta la temperatura media della stagione di ablazione, y la variazione frontale e z le precipitazioni della stagione di accumulo, rese adimensionali (fig. 12) con la normalizzazione

$$(5) \quad \frac{x - \bar{x}}{\sigma_x}$$

Prima di procedere all'analisi dei risultati è necessario fare alcune precisazioni sulle correlazioni e sulla loro valenza.

Infatti:

- 1) essendo R un parametro statistico, bisogna disporre di un sufficiente numero di dati perché la sua stima sia

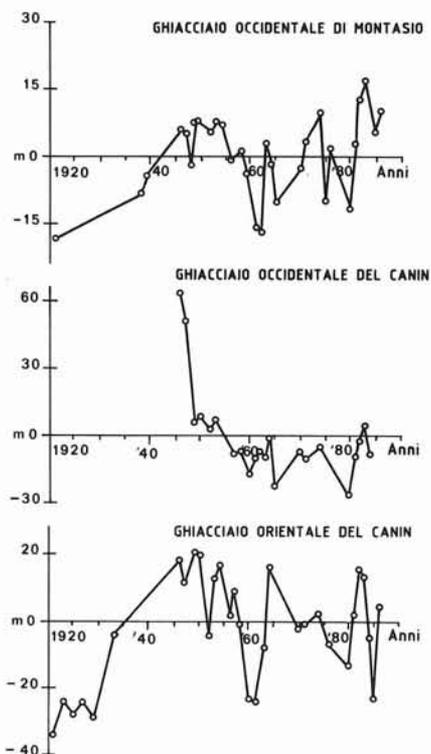


FIG. 11 - Curve medie della variazione frontale ottenute utilizzando le sole serie di dati ben correlate tra loro. (Ghiacciaio Occidentale di Montasio: 1, 2; Ghiacciaio Occidentale del Canin: 6, 8, 9; Ghiacciaio Orientale del Canin: 1, 3, 4). Tratti di curva a derivata positiva indicano regresso e viceversa.

TABELLA 3 - Coefficienti di correlazione tra ghiacciai, ottenuti dai punti di misura 1, 2 (Ghiacciaio Occ. di Montasio), 6, 8, 9 (Ghiacciaio Occ. del Canin) e 1, 3, 4 (Ghiacciaio Orient. del Canin) (cf. tab. 2a, b, c).

| Ghiacciaio | | Numero n di dati correlati | Coefficiente di correlazione |
|-------------------|-------------------|----------------------------|------------------------------|
| Occ. di Montasio | Occ. del Canin | 18 | 0,41 |
| Occ. del Canin | Orient. del Canin | 20 | 0,57 |
| Orient. del Canin | Occ. di Montasio | 22 | 0,73 |

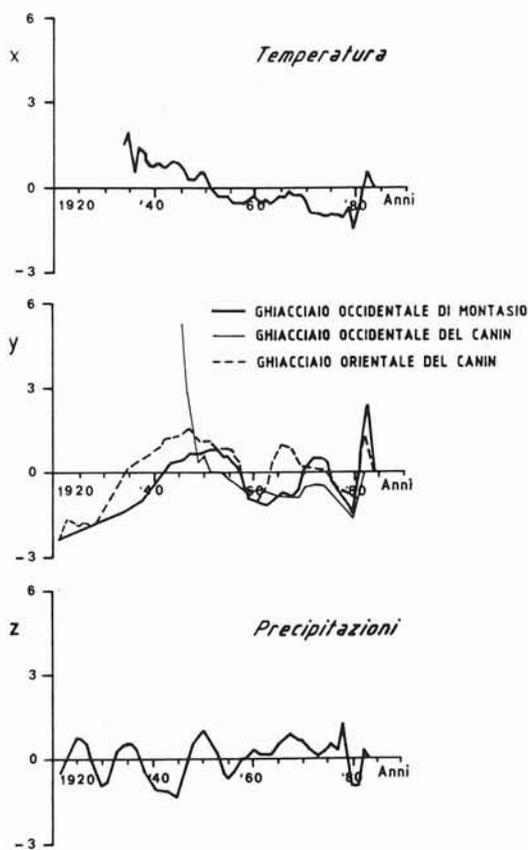


FIG. 12 - Curve normalizzate della temperatura estiva, delle precipitazioni invernali e delle variazioni frontali ottenute dai punti di misura ben correlati. La mancanza dei primi e degli ultimi due valori di ogni serie rispetto alle curve rappresentate nelle figg. 7, 8 e 11 è dovuta al filtraggio.

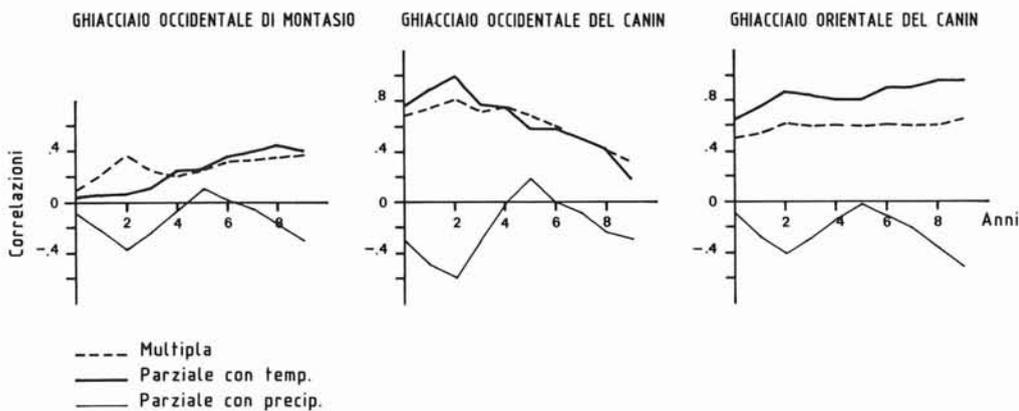


FIG. 13 - Risultati delle correlazioni tra la temperatura estiva, le precipitazioni invernali e la variazione frontale dei tre ghiacciai ottenuta dai punti di misura ben correlati (curve di fig. 12) in funzione del ritardo in anni. Per il ghiacciaio Occidentale e Orientale del Canin, si evidenzia la marcata dipendenza delle variazioni frontali dalla temperatura con un tempo di risposta di 2 anni.

attendibile. L'ordine di grandezza minimo può essere posto attorno a 30. Nel presente studio si è lavorato ai limiti disponendo raramente di un numero di dati superiore a 40 e, più spesso, inferiore a 30. I valori di R possono quindi non essere pienamente rappresentativi in quanto statisticamente non stabili.

- 2) Nel capitolo 3 sono stati individuati, per ogni singolo ghiacciaio, alcuni punti di misura che sono stati definiti «rappresentativi della variazione frontale» in base alla durata delle relative misure e al valore delle correlazioni tra esse. La scelta è stata perciò autoconsistente: essa non ha tenuto conto se, e come, queste serie di misure dipendano dai parametri climatici.
- 3) La mancanza di correlazione tra la variazione frontale di un ghiacciaio e i parametri climatici non significa che la curva scelta non descriva il fenomeno; ma evidenzia, piuttosto l'influenza sulla variazione frontale anche di altri fattori, tra cui quelli morfologici e topografici.

Correlazioni tra parametri climatici e variazioni frontali medie

Si è visto che alcuni punti di misura sembrano assumere un peso determinante nella definizione della curva che rappresenta la variazione media della fronte.

Le correlazioni parziale e multipla tra le curve medie della variazione frontale ottenute da questa serie di misure ben correlate, la temperatura media del semestre Maggio-Ottobre e le precipitazioni del semestre Novembre-Aprile sono riportate in fig. 13 in funzione del tempo di risposta.

Il Ghiacciaio Occidentale di Montasio non sembra dipendere dai parametri climatici essendo la correlazione sempre inferiore a 0,5. Per i Ghiacciai Occidentale e Orientale del Canin, le correlazioni parziale e multipla mostrano invece una marcata dipendenza della temperatura e un tempo di risposta, in genere, di 2 anni.

La correlazione tra le variabili climatiche e la curva della variazione globale dei tre ghiacciai ricavata dai punti di misura selezionati, dà (fig. 14) dei risultati così riassumi-

bili: la correlazione parziale con la temperatura estiva evidenzia una ben marcata influenza fino a 2 anni di ritardo; quella con le precipitazioni invernali, di valore circa la metà, mostra anch'essa un massimo a 2 anni.

I risultati cambiano utilizzando una curva media della variazione frontale ottenuta mediando tutti i punti di mi-

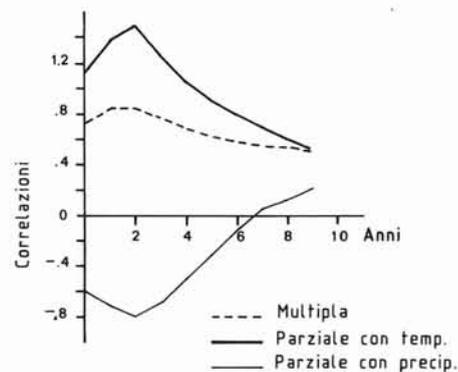


FIG. 14 - Risultati delle correlazioni tra la temperatura estiva, le precipitazioni invernali e la media della variazione frontale dei tre ghiacciai, ottenuta dai soli punti di misura ben correlati, in funzione del ritardo in anni. Il massimo della correlazione si ottiene per la temperatura in corrispondenza ad un tempo di risposta di 2 anni.

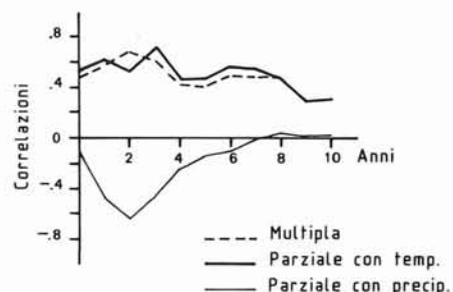


FIG. 15 - Risultati delle correlazioni tra la temperatura estiva, le precipitazioni invernali e la media della variazione frontale dei tre ghiacciai, ottenuta da tutti i punti di misura, in funzione del tempo di risposta. La correlazione con la temperatura è modesta e pressoché costante fino ad oltre 6 anni.

sura anziché solo quelli ben correlati. In questo caso (fig. 15) la correlazione parziale mostra l'influenza della temperatura fino ad oltre 6 anni, la correlazione multipla un massimo attorno ai 2 anni ed entrambe valori più bassi.

Scegliendo quindi i punti di misura più significativi, i tempi di risposta si riducono e i coefficienti di correlazione aumentano.

Correlazioni tra parametri climatici e variazioni della fronte rispetto a ciascun punto di misura.

Procedendo nel senso di correlare i parametri climatici ad un segnale il più vicino possibile alla misura reale, è stata utilizzata la curva delle variazioni frontali misurate rispetto a ciascuno dei punti di misura scelti. I risultati delle correlazioni parziali con i parametri climatici in funzione del tempo di risposta sono riportati in fig. 16.

Le variazioni frontali dei ghiacciai Occidentale e Orientale del Canin mostrano una marcata dipendenza dalla temperatura dell'anno e, (Ghiacciaio Orientale del Canin, punti di misura 1 e 3) di uno o due anni precedenti. Le variazioni frontali del Ghiacciaio Occidentale di Montasio non sono invece significativamente influenzate dalla temperatura in quanto la correlazione è sempre inferiore a 0,5.

Le precipitazioni influiscono sulle variazioni delle fronti con 1 o 2 anni di ritardo e più marcatamente per il Ghiacciaio Occidentale di Montasio.

Avendo utilizzato la curva sperimentale delle variazioni frontali, i risultati sono confrontabili con le osservazioni sul terreno.

Per quanto riguarda i valori della correlazione con il clima, viene confermata la prevista dipendenza da fattori morfologici e topografici:

a) i settori frontali la cui avanzata, se non accompagnata da un sensibile aumento di volume, è impedita da una

morena frontale, sono correlati esclusivamente con la temperatura.

b) i settori che si affacciano su un pendio privo di ostacoli, che ne permette le variazioni sia positive che negative, sono correlati con entrambe le variabili climatiche.

c) l'unico settore frontale posto in un canalone, in posizione affatto particolare, in cui è particolarmente favorita la persistenza del nevato, è controllato prevalentemente dalle precipitazioni.

Per quanto riguarda il tempo di risposta, la correlazione evidenzia che le fronti dei ghiacciai rispondono in genere alle sollecitazioni climatiche dell'anno precedente e a quelle dell'anno in corso e i due effetti determinano insieme la posizione della fronte al termine della stagione di ablazione.

CONCLUSIONI

Nella presente indagine si è dimostrato che l'utilizzo di una curva media delle variazioni frontali, per più ghiacciai o per diversi punti di misura di uno stesso ghiacciaio, introduce nei tempi di risposta rispetto ai parametri climatici dei ritardi fittizi ed altera il valore delle correlazioni. Infatti considerando i tre ghiacciai separatamente e selezionando i punti di misura si è ottenuto un tempo di risposta di 2 anni mentre utilizzando la curva sperimentale della variazione frontale rispetto ad ogni singolo punto di misura si è evidenziato, rispetto ai parametri climatici, un ritardo di uno o di zero anni.

Questo risultato si contrappone a quello dato dall'utilizzo della curva media della variazione frontale ottenuta da tutti i punti di misura, che indicava l'influenza fino ad oltre 6 anni del parametro temperatura sulla dinamica frontale con più bassi valori di correlazione, e che appariva poco

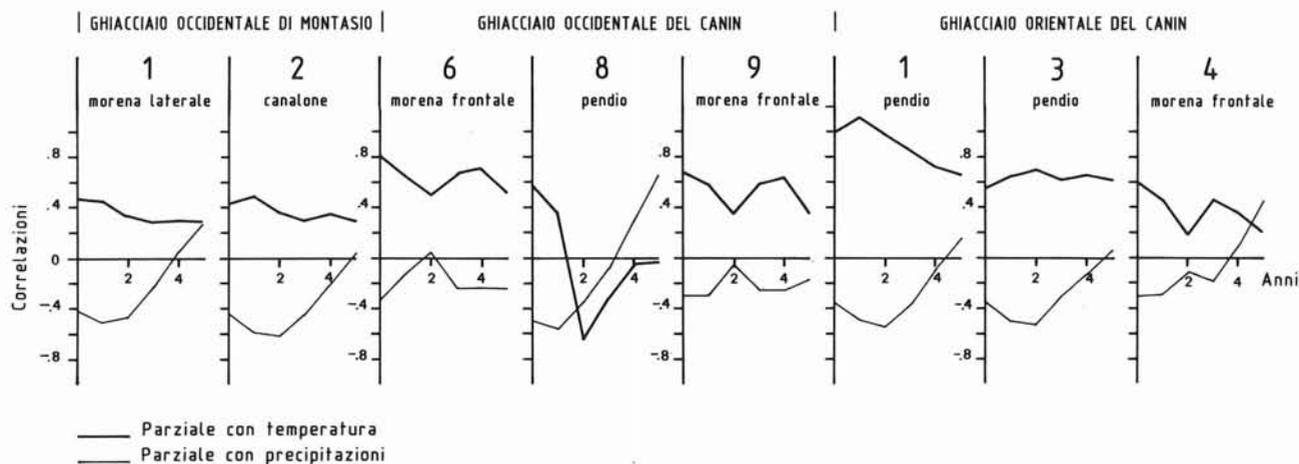


Fig. 16 - Risultati delle correlazioni tra la temperatura estiva, le precipitazioni invernali e il valore sperimentale della variazione frontale rispetto a ciascun punto di misura in funzione del ritardo in anni. Il valore della correlazione ed il tempo di risposta appaiono diversi secondo la morfologia del terreno.

realistico date le ridotte dimensioni e la tipologia dei ghiacciai considerati.

La curva media trascura il carattere proprio di ciascun punto di misura, dato dall'esposizione, pendenza e morfologia del terreno e questo si traduce in una apparente dilatazione dei tempi di risposta. La curva rappresentativa della dinamica frontale che meglio si presta ad evidenziare la correlazione con il clima è quella ottenuta dai dati sperimentali in un dato punto della fronte.

Per i piccoli ghiacciai di secondo ordine delle Alpi Giulie, il tempo di risposta reale risulta contenuto entro 1 o al massimo 2 anni; e controllato più spesso dalla temperatura estiva e talvolta dalle precipitazioni invernali, secondo il settore frontale.

BIBLIOGRAFIA

- AELLEN M. (1985) - *Les variations recentes des glaciers des Alpes suisses*. Atti 5° Conv. Glac. It., Geogr. Fis. Dinam. Quat., 8, 73-82.
- ALLEN A.O. (1978) - *Probability statistics and queueing theory*, Academic Press, Orlando, Florida, 390 pp.
- BELLONI S., CATASTA G. & SMIRAGLIA C. (1985) - *Parametri climatici e variazioni glaciali nel periodo 1950-1982*. Atti 5° Conv. Glac. It., Geogr. Fis. Dinam. Quat., 8, 97-123.
- CA' ZORZI F., DALLA FONTANA G. & FATTORELLI S. (1984) - *Simulazione idrologica del bacino del Cordevole*. Regione Veneto. Dip. Foreste, Cent. Sper. Valanghe. Quaderni di ricerca, 106 pp.
- CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE, COMITATO GLACIOLOGICO ITALIANO (1959-1962) - *Catasto dei Ghiacciai Italiani*, 4 voll., Torino.
- DAVIS J.C. (1986) - *Statistics and Data Analysis in Geology*. Wiley & Sons, New York, 2° Ed., 646 pp.
- DOWNIE N.M. & HEATH R.W. (1970) - *Basic statistical methods*. Harper International, London, 543 pp.
- GENTILI J. (1964) - *Il Friuli. I Climi*. Camera di Commercio, Industria e Agricoltura. Udine 595 pp.
- LLIBOUTRY L. (1965) - *Traité de glaciologie*. Masson & C., Paris, 2 voll., 1040 pp.
- MARSHALL J.L. (1965) - *Introduction to signal theory*. International Textbook Company. Scranton, Pennsylvania.
- MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI, SERVIZIO IDROGRAFICO (1957) - *Precipitazioni medie mensili e numero dei giorni piovosi per il trentennio 1921-1950*. Uff. Idrogr. Magistrato alle Acque, Venezia. Pubbl., 24, VII, 529 pp.
- POSAMENTIER H.W. (1977) - *A new climatic model for glacier behaviour of the Austrian Alps*. Journ. Glaciol., 18, 57-65.
- RABAGLIATI R. & SERANDREI BARBERO R. (1982) - *I ghiacciai delle Alpi Giulie dal 1920 al 1979. Spostamenti delle fronti e variazioni climatiche*. St. Trentini Sc. Nat., 59, Acta Geol., 105-126.

ALLEGATO 1 - Corrispondenza tra simboli utilizzati nel testo e contrassegni rintracciabili sul terreno.

| | Punti di misura | |
|------------------------------------|-------------------|---------------------|
| | Simboli nel testo | Simboli sul terreno |
| Ghiacciaio Occidentale di Montasio | 1 | B |
| | 2 | A |
| | 3 | H |
| | 4 | D |
| | 5 | C |
| | 6 | 1. |
| Ghiacciaio Occidentale del Canin | 1 | α |
| | 2 | f' |
| | 3 | DdC |
| | 4 | β . |
| | 5 | IV |
| | 6 | DdC |
| | 7 | 2 |
| | 8 | 8 |
| | 9 | λ |
| Ghiacciaio Orientale del Canin | 1 | A |
| | 2 | DdC |
| | 3 | ϵ |
| | 4 | η |
| | 5 | M |
| | 6 | θ |
| | 7 | C |

- REYNAUD L. (1977) - *Glaciers fluctuations in the Mont Blanc area (French Alps)*. Zeit. Gletscherk. Glazialgeol., 13, 1-2, 155-166.
- REYNAUD L. (1982) - *Analysis of glacier mass balance as a climatic survey for the whole Alps*. Commission European Communities, Climatology, «Climate Models» II Meeting Brussels 11th May 1982.
- SAVITZKY A. & GOLAY, M.J.E. (1964) - *Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures*. Anal. Chem. 36, 1627-1638.
- 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.
- STEINER J., TERMONIA Y & DELTOUR J. (1972) - *Comments on smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures*. Anal. Chem. 44, 1906-1909.