

SEVERINO BELLONI (\*), GUIDO CATASTA (\*\*), & CLAUDIO SMIRAGLIA (\*\*\*)

## PARAMETRI CLIMATICI E VARIAZIONI GLACIALI NEL PERIODO 1950 - 1982 (\*\*\*\*)

ABSTRACT: BELLONI S., CATASTA G. & SMIRAGLIA C., *Climatic parameters and glacial fluctuations in the period 1950-1982* (IT ISSN 0084-8948, 1985).

The present work analyses the data of snout fluctuations of about 60 Italian glaciers, among about 150 checked every year.

Data processing allowed calculation and analysis of the linear regressions of 28 glaciers which have shown a higher level of reliability. These regressions give the annual average advancements, related to some morphological and climatic parameters of the glaciers themselves. Consequently, glacier advance mainly depends on the altitude of their highest point, on the differences in altitude between this point and the snout, and on the glacier surface.

In order to compare climatic parameters, the number of glaciers was further reduced to 20, on the basis of the significance levels of the correlations existing among the snout displacements.

Numerical analysis was then carried out of the variations in average temperatures in the period May-September of every year and of the amount of precipitation in the period October-May between every two years, in relation to the average values of a period preceding the 30 years considered. Data came from 12 meteorological stations distributed all over the Italian Alps.

Correlations among three variables were then determined by calculating the linear multiple regressions of snout fluctuations depending on thermic and pluviometric differences.

The delay between superimposed climatic factors and snout fluctuations was thus determined, turning out to be 8 years on average. It was also ascertained that the delay due to thermic causes was 6 years on average and that due to pluviometric causes 11 years on average.

The contemporaneous effect of the decrease by 1 °C of the average temperature in the period May-September and of the increase by 100 mm of precipitation in the period October-May was then calculated, and an average value of 16 m advance was found.

(\*) Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Milano.

(\*\*) Operatore glaciologico del Comitato Glaciologico Italiano, Settore Alpi Centrali.

(\*\*\*) Istituto di Geografia dell'Università Cattolica del Sacro Cuore di Milano.

(\*\*\*\*) Ricerca eseguita con contributi del Ministero della Pubblica Istruzione (60 % 1981-82) e del Consiglio Nazionale delle Ricerche (anno 1982), del Centro di Studio per la Stratigrafia e la Petrografia delle Alpi Centrali del CNR (anno 1983) e del Comitato Glaciologico Italiano. Gli scriventi ringraziano la sig.ra VERGNANO MINOLI M. che ha disegnato le figure che illustrano il presente lavoro e il geom. ANTICO S. che ha composto le tabelle.

Lastly, numerical analysis showed that advancement for climatic reasons was related to the glacier surface and that it increases according to a linear regression. Instead, it decreases, again according to a linear regression, in relation to orientation evaluated anti-clockwise from North to North-East.

RASSUNTO: BELLONI S., CATASTA G. & SMIRAGLIA C., *Parametri climatici e variazioni glaciali nel periodo 1950-1982* (IT ISSN 0084-8948, 1985).

Il lavoro inizia con l'analisi numerica dei dati delle variazioni frontali di una sessantina di ghiacciai italiani fra i circa cento-cinquanta controllati ogni anno.

L'elaborazione di questi dati ha permesso di calcolare e di analizzare le regressioni lineari relative a ventotto ghiacciai che hanno presentato un livello di affidabilità più elevato. Da queste regressioni sono stati ricavati gli avanzamenti medi annui, che sono stati messi in relazione con alcuni parametri morfologici e climatici dei ghiacciai stessi. Ne è derivato che l'avanzamento dei ghiacciai dipende principalmente dall'altitudine del loro punto più elevato, dal dislivello fra questo e la fronte e dalla superficie del ghiacciaio.

Per effettuare il confronto con i parametri climatici si è ulteriormente ristretto a venti il numero dei ghiacciai, sulla base dei livelli di significatività delle correlazioni dei loro spostamenti frontali.

Segue l'analisi numerica delle variazioni della temperatura media del periodo Maggio-Settembre di ogni anno e dell'importo delle precipitazioni dei periodi di Ottobre-Maggio entro ogni biennio, in relazione ai valori medi di un periodo precedente al trentennio in esame, per dodici stazioni meteorologiche ben distribuite nell'arco alpino.

Sono poi state determinate le correlazioni fra tre variabili, calcolando le regressioni lineari multiple degli spostamenti frontali in funzione degli scarti termici e di quelli pluviometrici.

È stato così determinato il ritardo fra fattori climatici sovrapposti e spostamenti frontali (che è risultato in media di otto anni); si è inoltre constatato che lo sfasamento per cause termiche è in media di sei anni, mentre quello per cause pluviometriche è in media di undici anni.

È stato poi calcolato l'effetto contemporaneo della diminuzione di 1 °C della temperatura media di Maggio-Settembre e dell'aumento di 100 mm delle precipitazioni di Ottobre-Maggio ed è risultato un valore medio di 16 m di avanzamento.

Si è infine constatato, mediante l'analisi numerica, che l'avanzamento per cause climatiche è funzione dell'area dei ghiacciai e aumenta in relazione a quest'ultima secondo una regressione lineare, mentre diminuisce, sempre secondo una regressione lineare, in relazione all'esposizione misurata in senso antiorario da N a NE.

TERMINI CHIAVE: Climatologia, Glaciologia, Statistica, Alpi italiane.

## 1. INTRODUZIONE

La presente comunicazione ha per tema lo studio delle correlazioni fra parametri climatici e posizione delle fronti dei ghiacciai italiani nel periodo 1950-1982.

A questo scopo, dopo una breve introduzione sugli studi degli Autori precedenti, saranno analizzate dapprima le oscillazioni frontali dei ghiacciai, quindi i parametri termici e pluviometrici ed infine saranno stabilite le relazioni intercorrenti fra le prime e questi ultimi.

## 2. LE PRINCIPALI RICERCHE DEGLI AUTORI PRECEDENTI

I principali Autori che studiarono le relazioni fra clima e variazioni glaciali sono i seguenti.

MONTERIN (1932) mise in relazione le variazioni secolari del clima del Gran San Bernardo dal 1818 al 1931 con le oscillazioni del Ghiacciaio del Lys dal 1789 al 1931. L'Autore mostrò come ad ogni gruppo di anni con oscillazione positiva delle precipitazioni nevose corrispondesse un'oscillazione negativa della temperatura media del semestre estivo (Maggio-Ottobre) e viceversa e come ai periodi freddo-umidi e caldo-asciutti caratterizzati da condizioni climatiche opposte corrispondessero, con perfetta regolarità, periodi di progresso e di regresso del Ghiacciaio del Lys.

TONINI (1963) propose l'impiego dell'indice di glaciazione per mettere in relazione i parametri climatici con le oscillazioni frontali del Ghiacciaio del Calderone. Questo indice è espresso dal rapporto fra le precipitazioni  $P$  di un dato periodo e la temperatura  $t$  dello stesso periodo, espresse entrambe, a loro volta, come rapporto fra il valore assoluto del periodo esaminato e il valore medio di un periodo pluriennale di osservazione. La successione di anni con indici stagionali favorevoli all'accumulo glaciale produrrà fasi di avanzata della fronte e viceversa per la successione degli anni con indici stagionali sfavorevoli.

BELLONI (in DESIO, 1967) esaminò le variazioni delle precipitazioni annue, della temperatura media estiva e dell'altezza del manto nevoso alla stazione di Bormio nel periodo 1930-1963. Riconobbe in questo intervallo di tempo gli anni favorevoli all'accumulo nivale, caratterizzati cioè da elevato importo delle precipitazioni e da bassa temperatura media estiva e gli anni sfavorevoli per il minor importo delle precipitazioni ed un'elevata temperatura estiva. Applicò il principio della sovrapposizione degli effetti dei fenomeni favorevoli e sfavorevoli all'accumulo nivale, assumendo come riferimento zero quello corrispondente al valore medio delle precipitazioni annue e delle temperature medie estive nel periodo considerato. Il confronto del diagramma relativo con i diagrammi delle oscillazioni frontali di dieci ghiacciai opportunamente scelti permise di riconoscere che esiste sempre un ritardo fra causa climatica e variazione della fronte di un ghiacciaio e che questo ritardo, nonché l'ampiezza delle oscillazioni frontali, è in relazione con il tipo morfologico di ghiacciaio.

CERUTTI (1971) mise in relazione le variazioni climatiche al Colle del Gran San Bernardo con le oscillazioni frontali dei ghiacciai del Monte Bianco riconoscendo un ritardo fra causa ed effetto di tre-quattro anni per il regresso delle fronti legato all'aumento della temperatura media annua e fino a dieci anni per l'avanzata delle fronti legato ad un aumento delle precipitazioni. Osservò inoltre come l'avanzata dei ghiacciai del Monte Bianco nel periodo 1962-1971 fosse da mettere in relazione con una fase climatica caratterizzata da temperature medie notevolmente basse e, per le zone sottoposte alle precipitazioni portate dai venti di provenienza atlantica, da un aumento di queste ultime nel periodo 1951-1960.

CERUTTI (1975), sulla base delle temperature diurne alle stazioni di Courmayeur e del Colle del Gigante, ricavò le quote mensili medie dell'isoterma 0 °C sul versante italiano del Monte Bianco. Con questo dato determinò l'altitudine di separazione fra le precipitazioni liquide e solide sulla base dei dati forniti dalle stazioni pluviometriche di Courmayeur e del Colle del Gigante. Calcolò quindi i volumi delle precipitazioni nevose sugli apparati glaciali del versante meridionale del Monte Bianco dal 1936 al 1970 ed individuò i periodi 1936-1940 e 1950-1951 come favorevoli allo sviluppo del glacialismo per la formazione di sovraccarichi nevosi nelle coltri alimentatrici.

CERUTTI (1977), sulla base dell'analisi quantitativa dell'alimentazione dei ghiacciai della Lex Blanche, di Toulva e di Prè de Bar nel periodo 1936-1973, ritenne che le oscillazioni frontali dei ghiacciai non fossero da mettere in relazione con il clima delle valli dove si trovano le fronti dei ghiacciai stessi, ma con il clima dei bacini collettori al momento della costituzione degli accumuli nivali. Riconobbe un intervallo di tempo fra causa ed effetto diverso per i ghiacciai studiati e in relazione con le caratteristiche morfologiche degli stessi.

RABAGLIATI & SERANDREI (1982) analizzarono le relazioni fra le oscillazioni delle fronti dei ghiacciai delle Alpi Giulie nel periodo 1920-1976, i dati termici, le precipitazioni totali e le precipitazioni nevose alla stazione di Cave del Predil. La correlazione portò al riconoscimento che lo spostamento medio delle fronti dei ghiacciai fu determinato dalla temperatura degli anni precedenti con un intervallo di risposta di 5 anni e, in minor misura, dalle precipitazioni degli anni precedenti con un intervallo di risposta più breve.

## 3. LE OSCILLAZIONI FRONTALI DEI GHIACCIAI ITALIANI

Gli Operatori glaciologici del Comitato Glaciologico Italiano hanno osservato le fronti di  $95 \div 186$  ghiacciai, durante ogni anno del periodo 1950-1982, con una media di 131 ghiacciai all'anno. I ghiacciai che hanno mostrato una maggior continuità di osservazioni sono risultati 64; per 63 di questi è stato possibile disegnare, su diagrammi cartesiani aventi in ascissa gli anni e in ordinata gli spostamenti annui delle fronti in metri, i

grafici degli spostamenti frontali. Per 61 di questi ghiacciai sono state calcolate le medie mobili d'ordine 5 degli spostamenti annuali delle fronti. Con i dati di queste medie mobili sono state calcolate per 58 ghiacciai le regressioni lineari degli spostamenti annuali delle fronti, espresse in metri, rispetto agli anni per il periodo 1950-1982, assumendo come ascissa zero l'anno 1950. Di queste regressioni 30 sono risultate significative ad un li-

TABELLA 1

REGRESSIONI LINEARI DEGLI SPOSTAMENTI FRONTALI

N° cat.	nome	coeff. det.	liv. signif.	equazione	anno inizio avanz.
1	Clapier	0,46	0,1%	$y = -2,47 + 0,14 x$	1969
6	Gelas	0,71	0,1%	$y = -2,60 + 0,16 x$	1966
26	Galambra Or.	0,66	0,1%	$y = -6,43 + 0,29 x$	1973
189	Rutor	0,87	0,1%	$y = -14,50 + 0,53 x$	1978
213	Miage	0,64	0,1%	$y = -4,32 + 0,16 x$	1978
221	Toula	0,52	0,1%	$y = -3,70 + 0,56 x$	1957
235	Prè De Bar	0,55	0,1%	$y = -9,38 + 0,77 x$	1963
298	Picc. di Verra	0,63	0,1%	$y = -32,52 + 1,41 x$	1974
304	Lys	0,68	0,1%	$y = -19,60 + 0,80 x$	1975
325	Belvedere	0,90	0,1%	$y = -34,62 + 1,62 x$	1972
439	Fellaria Occ.	0,89	0,1%	$y = -27,02 + 0,98 x$	1978
483	Vitelli	0,48	0,1%	$y = -26,02 + 0,85 x$	1981
503	Cedech	0,37	0,1%	$y = -3,71 + 0,26 x$	1965
507	Forni	0,46	0,1%	$y = -33,01 + 1,80 x$	1969
512	Dosegù	0,93	0,1%	$y = -25,26 + 1,44 x$	1968
516	Sforzellina	0,44	0,1%	$y = -13,91 + 0,87 x$	1966
577	Pisgana Occ.	0,72	0,1%	$y = -19,41 + 0,57 x$	1985
639	Mandrone	0,62	0,1%	$y = -19,20 + 0,87 x$	1973
644	Amola	0,60	0,1%	$y = -17,92 + 0,54 x$	1984
657	Lágol	0,76	0,1%	$y = -12,93 + 0,52 x$	1975
678	Presanella	0,86	0,1%	$y = -15,39 + 0,66 x$	1974
731	Forcola	0,91	0,1%	$y = -74,12 + 3,43 x$	1972
732	Cevedale	0,54	0,1%	$y = -3,65 + 0,62 x$	1956
778	Barbadorso D.	0,89	0,1%	$y = -21,22 + 1,53 x$	1964
780	Fontana Occ.	0,44	0,1%	$y = -29,75 + 1,44 x$	1971
937	Cristallo	0,74	0,1%	$y = -7,96 + 0,39 x$	1971
941	Marmolada	0,49	0,1%	$y = -15,75 + 0,48 x$	1983
1006	Calderone	0,64	0,1%	$y = -4,23 + 0,23 x$	1969

vello superiore allo 0,1 %, a causa della non completa serie dei dati annuali. Le equazioni delle rimanenti 28 regressioni ad un livello di significatività inferiore allo 0,1 % sono state riportate nella tab. 1, nella quale sono indicati: il numero di catasto del ghiacciaio, il nome, il coefficiente di determinazione, il livello di significatività, l'equazione della regressione e l'anno d'inizio dell'avanzata della fronte.

Prima di esaminare le regressioni della tab. 1, si mostrano, a titolo di esempio, i diagrammi delle figg. 1, 2, 3 e 4 che portano in ascissa gli anni dal 1950 al 1982 e in ordinata gli arretramenti e gli avanzamenti delle fronti dei ghiacciai Pré de Bar, Lys, Fellaria occidentale, Dosegù e Barbadorso di Dentro, rappresentati sia con i singoli valori annuali, sia con i valori ricavati dalle medie mobili d'ordine 5, sia con la regressione lineare relativa ai singoli dati annuali, sia, infine, con la regressione lineare relativa ai dati delle medie mobili.

Dall'esame di questi diagrammi si osserva in primo luogo come le equazioni delle regressioni ricavate con i

dati dei singoli valori annuali siano praticamente uguali a quelle calcolate con i dati delle medie mobili, giustificando così la possibilità di sostituzione di queste ultime ai dati annuali. Inoltre si nota come dall'anno 1950 all'anno 1982 i cinque ghiacciai abbiano mostrato la tendenza dapprima ad arretrare sempre di meno, quindi ad avanzare, perciò in definitiva una tendenza all'avanzamento con uno o due cicli di oscillazione attorno ai valori medi della retta di regressione.

L'esame dei dati della tab. 1 mostra come, in media, nell'anno 1950 il regresso annuo sia stato compreso fra -2,47 m e -74,12 m, con 19 ghiacciai aventi un ritiro inferiore a 20 m all'anno, con 8 ghiacciai aventi un ritiro compreso fra 20 e 40 m all'anno e soltanto un ghiacciaio con un ritiro superiore ai 70 m all'anno.

L'avanzamento medio annuo è risultato compreso fra 0,14 m all'anno e 3,43 m all'anno. Per i 19 ghiacciai con regresso annuo nel 1950 minore di 20 m l'avanzamento medio annuo è risultato compreso fra 0,14 m e 0,87 m, per gli 8 ghiacciai con ritiro compreso fra 20 e 40 m l'avanzamento medio annuo è risultato compreso fra 0,85 m e 1,80 m, infine per il ghiacciaio con ritiro

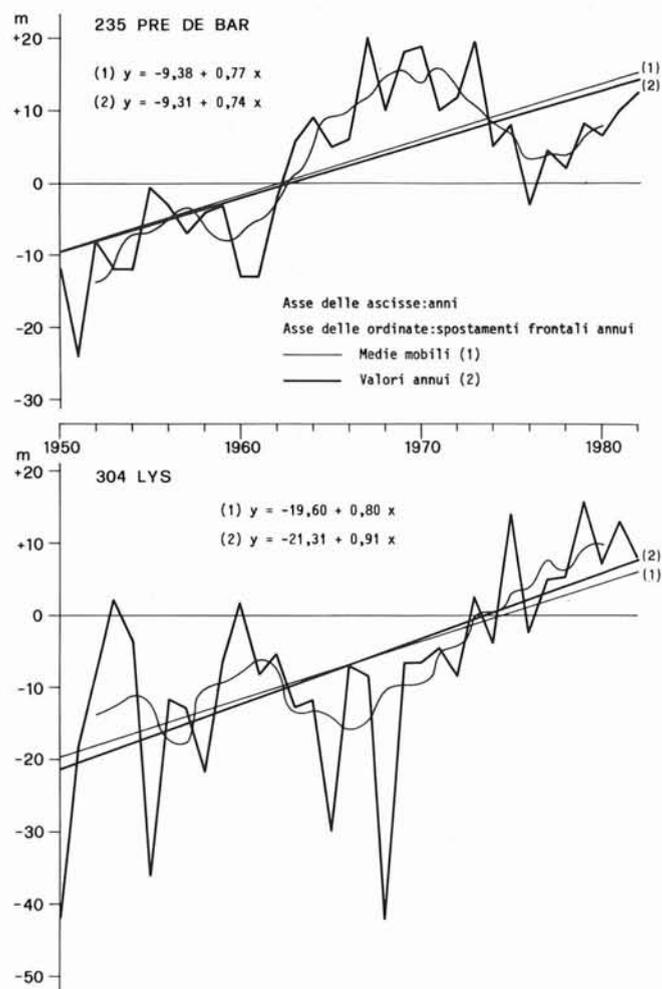


FIG. 1 - Oscillazioni frontali dall'anno 1950 all'anno 1982: sopra, del Ghiacciaio Pré de Bar; sotto, del Ghiacciaio Lys.

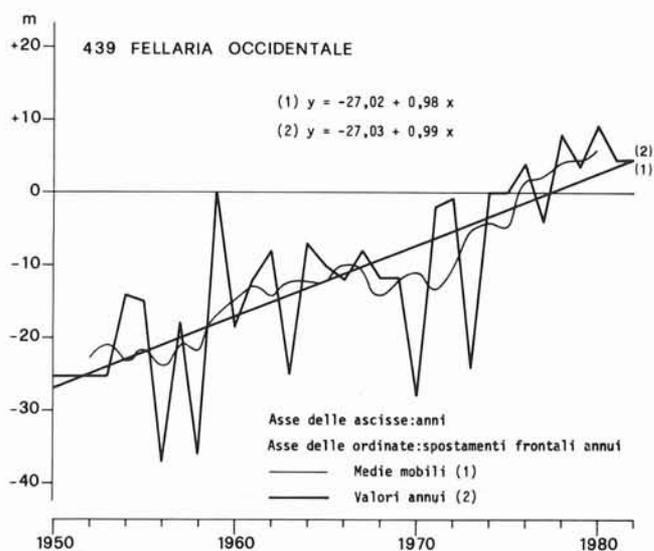


FIG. 2 - Oscillazioni frontali del Ghiacciaio Fellaria occidentale dall'anno 1950 all'anno 1982.

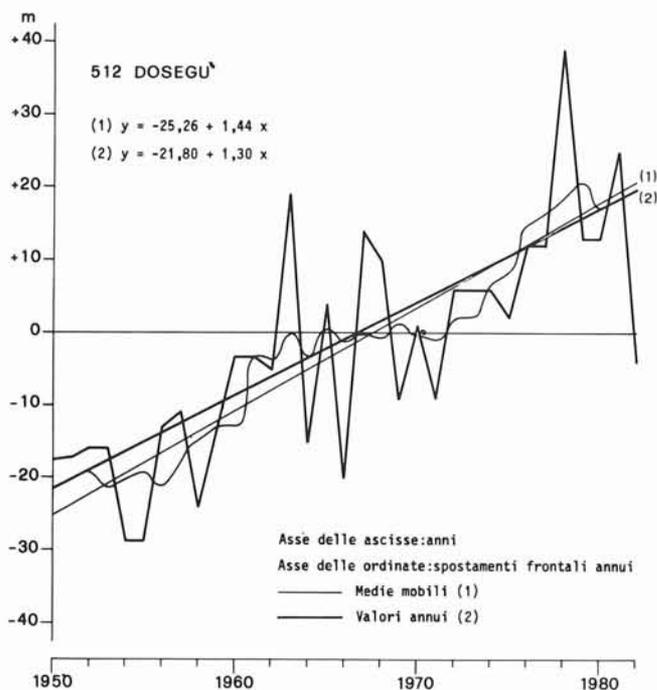


FIG. 3 - Oscillazioni frontali del Ghiacciaio Dosegù dall'anno 1950 all'anno 1982.

superiore a 70 m all'anno l'avanzamento medio annuo è stato di 3,43 m.

Infine, l'anno di inizio della fase di avanzamento è compreso fra il 1956 e il 1985 con 2 ghiacciai che avanzano nel biennio 1956-1957, 5 ghiacciai nel periodo 1963-1966, 14 ghiacciai nel periodo 1968-1975, 3 ghiacciai nel 1978 e 4 ghiacciai fra il 1981 e il 1985.

La correlazione fra il ritiro medio annuo nel 1950 e l'avanzamento medio annuo nel periodo 1950-1982 ha dato un coefficiente  $r = -0,94$  altamente significativo

ad un livello assai inferiore allo 0,1 %, il che dimostra come i ghiacciai con un maggior ritiro medio annuo nel 1950 abbiano presentato un maggior avanzamento medio annuo nel periodo considerato e viceversa.

Allo scopo di mettere in relazione l'avanzamento medio annuo, riportato nella tab. 1, con le caratteristiche morfologiche dei ghiacciai è stata predisposta la tab. 2 nella quale sono riportati: il numero di catasto del ghiacciaio, l'avanzamento medio annuo in metri, l'ordine del tipo morfologico, la superficie in ettari, l'inclinazione superficiale in gradi sessagesimali, l'altitudine massima del ghiacciaio in metri, l'altitudine della fronte in metri, il dislivello fra le due altitudini in metri, l'esposizione e il tipo di alimentazione distinta in: diretta (d.), da valanghe (v.), da trasfluenza (tr.) e da vento (vt.). Dall'esame della tabella si osserva che i ghiacciai di 1° ordine hanno avuto un avanzamento medio annuo compreso fra 0,16 m e 3,43 m, con valore medio di 1,09 m, mentre quelli di 2° ordine hanno avuto un avanzamento medio annuo compreso fra 0,14 m e 1,44 m, con un valore medio di 0,58 m. Da quanto sopra si deduce quindi che gli avanzamenti frontali annui dei ghiacciai di primo ordine sono in media maggiori di quelli dei ghiacciai di secondo ordine. Il confronto fra le avanzate medie annue e la superficie dei singoli ghiacciai ha dato un coefficiente di correlazione piuttosto basso ( $r = 0,16$ ), ciò nonostante si può osservare come i ghiacciai con superficie fino a 200 ha siano avanzati in media di 0,67 m/anno, quelli con superficie compresa fra 201 e 600 ha siano avanzati in media di 1,06 m/anno e quelli con superficie maggiore di 601 ha siano avanzati in media di 0,83 m/anno. Quindi i ghiacciai più piccoli sembrano avere avanzamenti frontali medi annui minori dei ghiacciai di maggiori dimensioni.

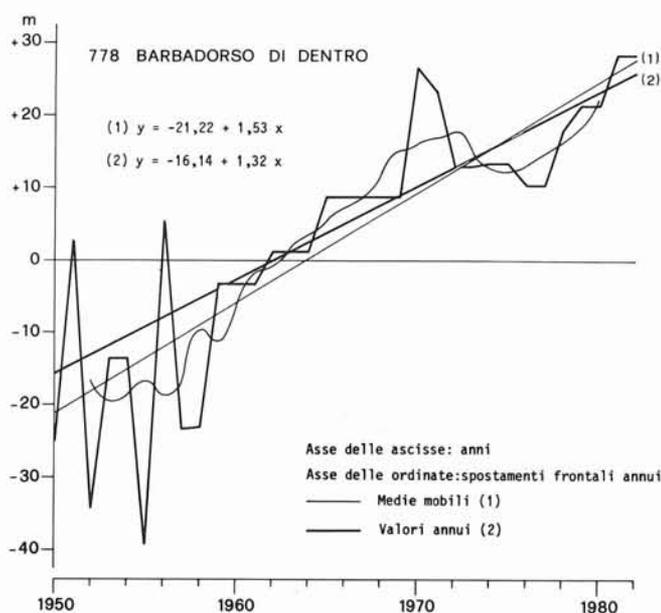


FIG. 4 - Oscillazioni frontali del Ghiacciaio Barbadorso di Dentro dall'anno 1950 all'anno 1982.

TABELLA 2

AVANZAMENTO MEDIO ANNUO E CARATTERI MORFOLOGICI  
DEI GHIACCIAI

num. gh.	av.med. annuo	ord.	sup. ha	incl.	altitudine		disl.	esp.	alim.
					max	min			
1	+0.14	2°	30	16°	2750	2586	164	NE	d.
6	+0.16	2°	20	18°	2800	2590	210	N	d.
26	+0.29	2°	50	10°	3100	2800	300	NE	d.
189	+0.53	2°	953	6°	3480	2523	957	NO	d.
213	+0.16	1°	1129	16°	4306	1775	2531	SE	v.
221	+0.56	2°	81	24°	3500	2650	850	SE	d.+v.
235	+0.77	1°	342	23°	3700	2200	1500	SE	d.+v.
298	+1.41	2°	141	21°	4000	2735	1265	SO	d.
304	+0.80	1°	1078	20°	4350	2344	2006	SO	d.
325	+1.62	1°	511	10°	4560	1756	2804	NE	d.
439	+0.98	1°	500	20°	3600	2600	1000	SSE	d.+v.+tr.
483	+0.85	1°	200	11°	3460	2510	950	O	d.
503	+0.26	1°	250	18°	3778	2710	1068	O	d.
507	+1.80	1°	2000	15°	3684	2320	1364	NNO	d.
512	+1.44	1°	215	16°	3500	2800	700	SO	d.
516	+0.87	2°	29	14°	2900	2770	130	NO	d.
577	+0.57	1°	344	16°	3285	2505	780	N	d.
639	+0.87	1°	1193	9°	3441	2445	996	NE	d.
644	+0.54	2°	120	13°	3081	2665	416	SE	d.+v.
657	+0.52	2°	34	19°	2920	2577	343	O	d.
678	+0.66	1°	392	22°	3465	2435	1030	N	d.
731	+3.43	1°	210	15°	3764	2630	1134	NE	d.
732	+0.62	1°	339	9°	3600	2650	950	NE	d.
778	+1.53	1°	186	23°	3561	2652	909	N	d.
780	+1.44	2°	114	23°	3350	2592	758	N	d.
937	+0.39	2°	35	25°	2822	2300	522	N	d.
941	+0.48	2°	305	23°	3290	2500	790	N	d.
1006	+0.23	2°	6	26°	2867	2676	191	NNE	d.+vt.

Il confronto fra le avanzate medie annue e l'inclinazione dei singoli ghiacciai ha dato un coefficiente di correlazione non significativo che fa supporre che l'avanzamento medio annuo sia indipendente dall'inclinazione della superficie del ghiacciaio.

Il confronto fra le avanzate medie annue e l'altitudine del punto più alto dei ghiacciai ha dato un coefficiente di correlazione  $r = 0,40$  con un livello di significatività inferiore al 5%. La retta di regressione relativa è la seguente:  $y = -1,17 + 5,86 \times 10^{-4} x$ , dove  $y$  è l'avanzamento medio annuo in metri e  $x$  è l'altitudine del punto più alto del ghiacciaio in metri. Da quanto

sopra si deduce che l'avanzamento medio annuo è stato tanto più elevato quanto maggiore era l'altitudine del punto più alto del ghiacciaio.

Il confronto fra le avanzate medie annue e l'altitudine della fronte dei ghiacciai ha dato un coefficiente di correlazione non significativo che fa supporre che i due parametri siano indipendenti fra di loro.

Il confronto fra le avanzate medie annue e i dislivelli fra il punto più elevato e la fronte dei ghiacciai ha dato un coefficiente di correlazione  $r = 0,29$  poco significativo. Ciò nonostante i ghiacciai con dislivello fra il punto più elevato e la fronte compreso fra 130 e 500 m sono avanzati in media di 0,39 m all'anno, mentre i ghiacciai con dislivelli superiori sono avanzati in media di 1,01 m all'anno. Da quanto sopra si deduce che l'avanzamento medio annuo sembra crescere al crescere del dislivello fra il punto più elevato e la fronte del ghiacciaio.

Il confronto fra le avanzate medie annue e l'esposizione dei ghiacciai ha dato i seguenti valori di avanzate medie annue in funzione dell'esposizione: ghiacciai con componente Ovest 0,94 m/anno, con componente Nord 0,92 m/anno, con componente Est 0,85 m/anno, con componente Sud 0,83 m/anno, il che fa pensare che i due parametri siano indipendenti fra di loro.

Infine, il confronto fra le avanzate medie annue e il tipo di alimentazione ha mostrato valori di avanzamento assai diversi per i ghiacciai ad alimentazione diretta o diretta con vento (da 0,14 m/anno a 3,43 m/anno), un valore modesto per l'unico ghiacciaio alimentato da valanghe (0,16 m/anno), valori poco diversi fra loro per i ghiacciai ad alimentazione mista (da 0,54 m/anno a 0,98 m/anno).

In conclusione l'esame della tabella fa ritenere che l'avanzamento annuo dei ghiacciai esaminati sia dipendente dall'altitudine del loro punto più elevato, dal dislivello fra questo punto e la fronte, dalla loro superficie e subordinatamente dal tipo morfologico e dall'alimentazione, mentre sembra essere indipendente dalla loro inclinazione superficiale, dall'altitudine della fronte e dall'esposizione.

Per avere un quadro d'insieme delle oscillazioni fron-

Parametro(y)	Parametro(x)	n° ghiacc.	equazione	r	livello signif.
Quota front.	Quota cima	40	$y = 2663,6882 + 0,0504x + 0,09$		non signific.
Quota front.	Quota cima	36	$y = 2219,0210 + 0,1910x + 0,46$		< 1,0%
Quota front.	Quota max gh.	40	$y = 3119,2723 - 0,0877x - 0,15$		non signific.
Quota front.	Quota max gh.	36	$y = 2414,0585 + 0,1402x + 0,31$		< 10,0%
Largh. max	Lunghezza	40	$y = -58,7022 + 0,8639x + 0,64$		< 0,1%
Largh. max	Lunghezza	36	$y = 368,5953 + 0,4176x + 0,61$		< 0,1%
Superficie	Quota cima	40	$y = -1252,8358 + 0,4000x + 0,31$		< 5,0%
Superficie	Quota cima	36	$y = -314,3232 + 0,1065x + 0,62$		< 0,1%
Superficie	Quota max gh.	40	$y = -1714,1027 + 0,5619x + 0,43$		< 1,0%
Superficie	Quota max gh.	36	$y = -354,3024 + 0,1247x + 0,66$		< 0,1%
Superficie	Quota front.	40	$y = 4260,2423 - 1,4651x - 0,65$		< 0,1%
Superficie	Quota front.	36	$y = 16,3935 + 0,0099x + 0,02$		non signific.
Superficie	Lunghezza	40	$y = -134,8336 + 0,1887x + 0,67$		< 0,1
Superficie	Lunghezza	36	$y = -10,0982 + 0,0552x + 0,86$		< 0,1%
Inclinazione	Quota front.	40	$y = 12,7896 + 0,0023x + 0,03$		non signific.
Inclinazione	Quota front.	36	$y = 55,3240 - 0,0124x - 0,13$		non signific.
Inclinazione	Lunghezza	40	$y = 22,9972 - 0,0028x - 0,34$		< 5,0%
Inclinazione	Lunghezza	36	$y = 25,4894 - 0,0057x - 0,37$		< 5,0%

TABELLA 3

RELAZIONI FRA LE COPPIE DI PARAMETRI DEL CATASTO DEI GHIACCIAI ITALIANI

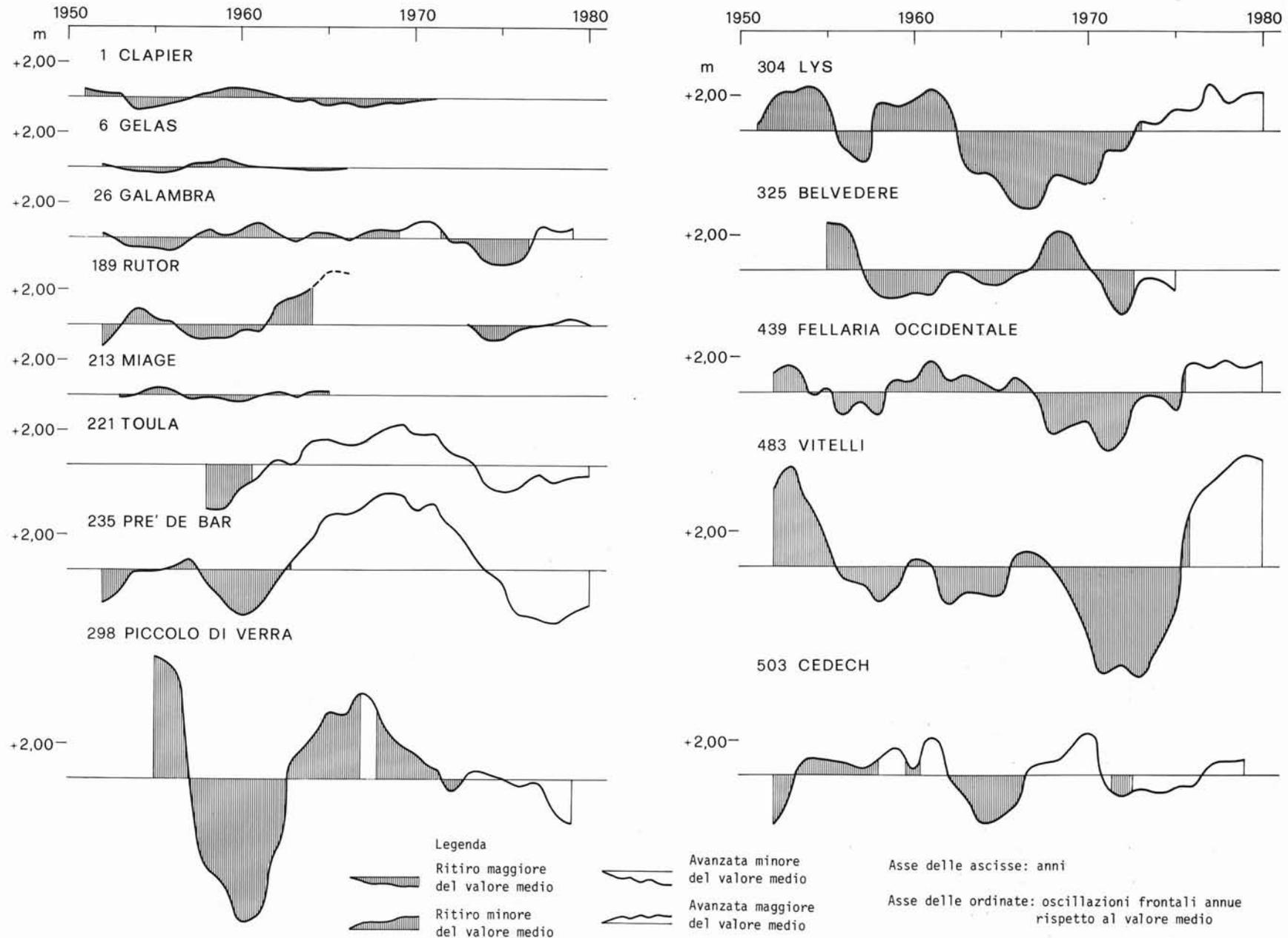


FIG. 5 - Oscillazioni frontali dei ghiacciai 1 - 6 - 26 - 189 - 213 - 221 - 235 - 293 - 304 - 325 - 439 - 483 e 503 rispetto alla retta di regressione calcolata.

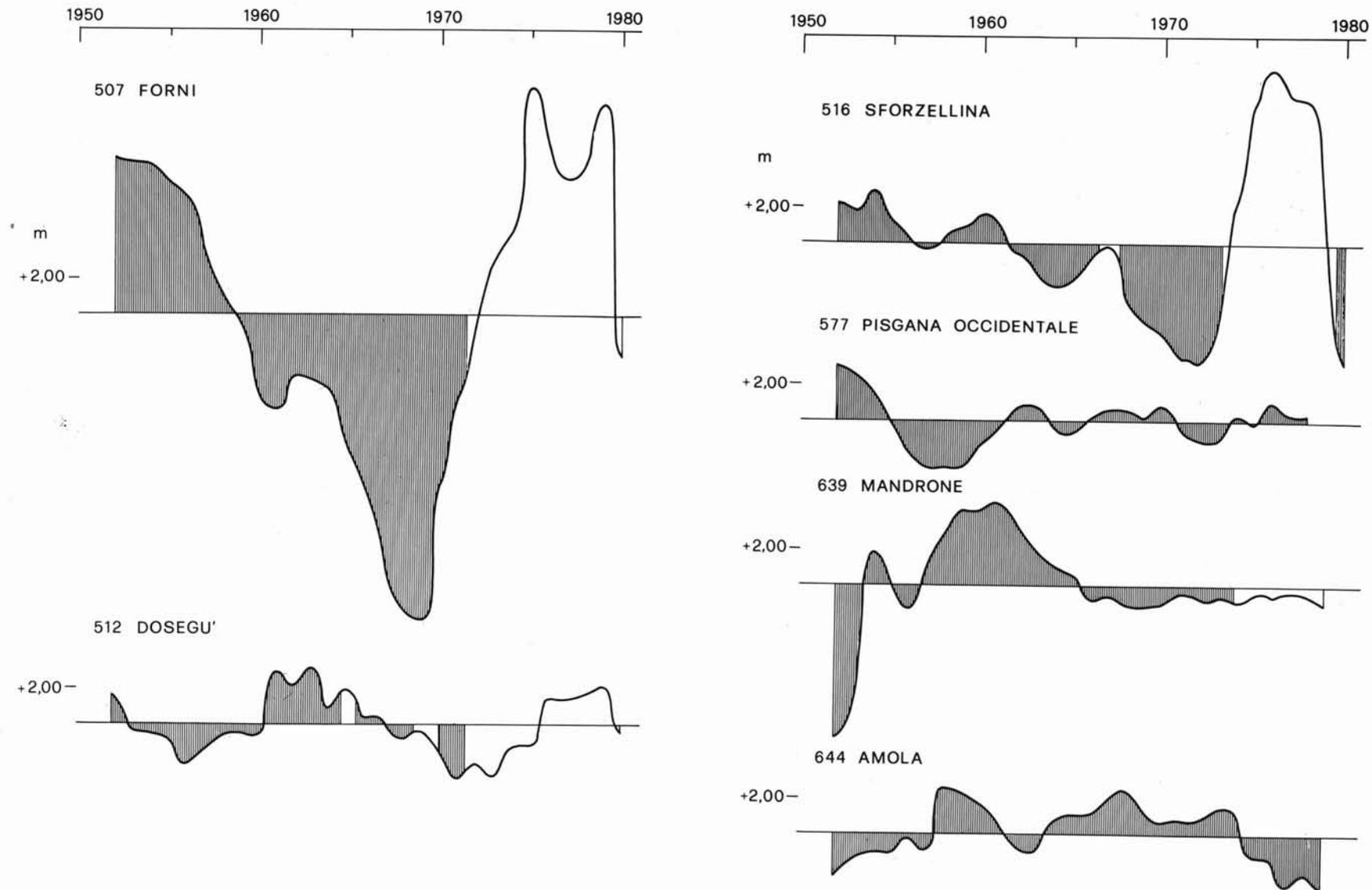


FIG. 6 - Oscillazioni frontali dei ghiacciai 507 - 512 - 516 - 577 - 630 e 644 rispetto alla retta di regressione calcolata. Per la legenda vedi fig. 5.

tali dei ventotto ghiacciai in istudio sono stati costruiti i diagrammi di figg. 5, 6 e 7 che portano in ascissa gli anni. Assumendo come asse di riferimento la retta di regressione di ciascun ghiacciaio, sono state riportate in ordinata le oscillazioni frontali annue (ritiri e avanzamenti) ricavate dai valori delle medie mobili d'ordine 5 ed espresse in metri. Dall'esame delle figure suddette si osserva come i massimi scarti dal valore medio si sono verificati per il Ghiacciaio dei Forni ed i minimi per il Ghiacciaio del Miage, come alcuni ghiacciai (1, 6, 213) non presentano dati posteriori all'anno 1971, altri ghiacciai non abbiano ancora iniziato la fase di avanzamento frontale, per altri ghiacciai infine questa abbia avuto inizio in anni diversi, talora in modo netto e continuo (ghiacciai 221, 235, 304, 325, 439, 483, 507, 639, 657, 678, 731, 778, 780, 1006), talora in modo discontinuo (ghiacciai 26, 189, 298, 503, 512, 516, 732, 937, 941). Da quanto sopra si deduce l'opportunità di un'analisi numerica comparata dei dati delle oscillazioni frontali dei ventotto ghiacciai in esame. A questo scopo sono stati calcolati sia i coefficienti di correlazione fra i dati delle medie mobili dei ghiacciai esaminati a coppie, sia i livelli di significatività di questi coefficienti.

La tab. 3 riporta, nel settore in basso a sinistra, i coefficienti di correlazione delle singole coppie di ghiacciai e, nel settore in alto a destra, i corrispondenti livelli di significatività con diversi coefficienti di correlazione, indicati con numeri da 1 a 10, secondo quanto riportato in calce alla tabella stessa.

Con riferimento ad un livello di significatività minore o uguale allo 0,1 % ed a coefficienti di correlazione maggiori o uguali a 0,60 i ghiacciai a maggiore correlabilità reciproca sono risultati in ordine decrescente i seguenti, indicati qui di seguito con il loro numero di casto e col loro nome:

num.	denominazione	num.	denominazione
189	Gh. Rutor	577	Gh. Pisgana occidentale
778	Gh. Barbadorso di dentro	639	Gh. Mandrone
512	Gh. Dosegù	644	Gh. Amola
937	Gh. Cristallo	298	Gh. Piccolo di Verra
657	Gh. Lagol	6	Gh. Gelas
439	Gh. Fellaria occid.	213	Gh. Miage
678	Gh. Presanella	516	Gh. Sforzellina
780	Gh. Fontana occid.	507	Gh. Forni
325	Gh. Belvedere	941	Gh. Marmolada orientale
26	Gh. Galambra orientale	1	Gh. Clapier
221	Gh. Toulà	483	Gh. Vitelli
235	Gh. Prè de Bar	732	Gh. Cevedale
731	Gh. Forcola	1006	Gh. Calderone
304	Gh. Lys	503	Gh. Cedech

Sulla base della successione sopra indicata e delle motivazioni qui di seguito esposte, le oscillazioni frontali dei seguenti ghiacciai non saranno correlate con i parametri climatici.

– Ghiacciaio Rutor n. 189, per la serie incompleta

dei dati annuali (20) e discontinua (dal 1952 al 1964 e dal 1974 al 1980).

– Ghiacciaio Cristallo n. 937, per la serie incompleta dei dati annuali (19) e discontinua (dal 1953 al 1963 e dal 1973 al 1980).

– Ghiacciaio Gelas n. 6, per la serie incompleta dei dati annuali (16) dal 1952 al 1967.

– Ghiacciaio Calderone n. 1006, per la serie incompleta dei dati (15) dal 1963 al 1977 e la non correlabilità col clima alpino.

– Ghiacciaio Clapier n. 1, per la serie incompleta dei dati (21) dal 1951 al 1971 e la scarsa correlabilità (24<sup>a</sup> posizione) con i ghiacciai vicini.

– Ghiacciaio Cevedale n. 732, per la serie incompleta dei dati (19) dal 1961 al 1979 e la scarsa correlabilità (26<sup>a</sup> posizione) con i ghiacciai vicini.

– Ghiacciaio Miage n. 213, per la serie incompleta dei dati (14) dal 1953 al 1966 e la scarsa correlatività (20<sup>a</sup> posizione) con i ghiacciai vicini.

– Ghiacciaio Cedech n. 503, per la scarsa correlabilità (28<sup>a</sup> posizione) con i ghiacciai vicini.

Da quanto sopra si deduce che i ghiacciai per i quali le correlazioni con i parametri climatici saranno presumibilmente più attendibili sono ridotti al numero di venti.

Si ritiene comunque che i venti ghiacciai presi in esame rappresentino un campione significativo per tutto l'arco alpino (versante italiano). La loro distribuzione rispetta infatti la distribuzione del glacialismo nell'intera catena. In effetti, mentre viene preso in considerazione un solo apparato glaciale per i gruppi montuosi delle Marittime e delle Cozie, dove il glacialismo attuale è estremamente limitato, sono stati analizzati cinque apparati per i grandi massicci del Bianco e del Rosa, sei per i gruppi dell'Ortles-Cevedale (che presenta la massima estensione del glacialismo nelle Alpi) e del Bernina, cinque per i gruppi dell'Adamello, della Presanella e del Brenta, due per le Alpi Venoste e uno per le Alpi Dolomitiche.

#### 4. PARAMETRI TERMICI E PLUVIOMETRICI

Sulla base dell'ubicazione dei venti ghiacciai, indicati nel paragrafo precedente come i più adatti per i confronti fra le loro oscillazioni frontali e i parametri climatici, sono state individuate nell'arco alpino dodici stazioni meteorologiche non troppo lontane dai ghiacciai in esame e ben distribuite nei vari settori delle Alpi, come risulta dalla fig. 8 nella quale sono riportate le ubicazioni sia dei ghiacciai, sia delle stazioni meteorologiche.

Per quanto riguarda la scelta delle stazioni si è soprattutto tenuto conto sia della disponibilità per ciascuna di esse di una serie di dati sufficientemente lunga sia di una distribuzione abbastanza significativa nell'ambito della catena alpina. Appare evidente dalla fig. 8 come siano state prese in considerazione cinque stazioni per le Alpi Occidentali, cinque per le Alpi Centrali e due per le Alpi Orientali. La distribuzione delle stazioni si mostra anche correlata all'entità del glacialismo dei

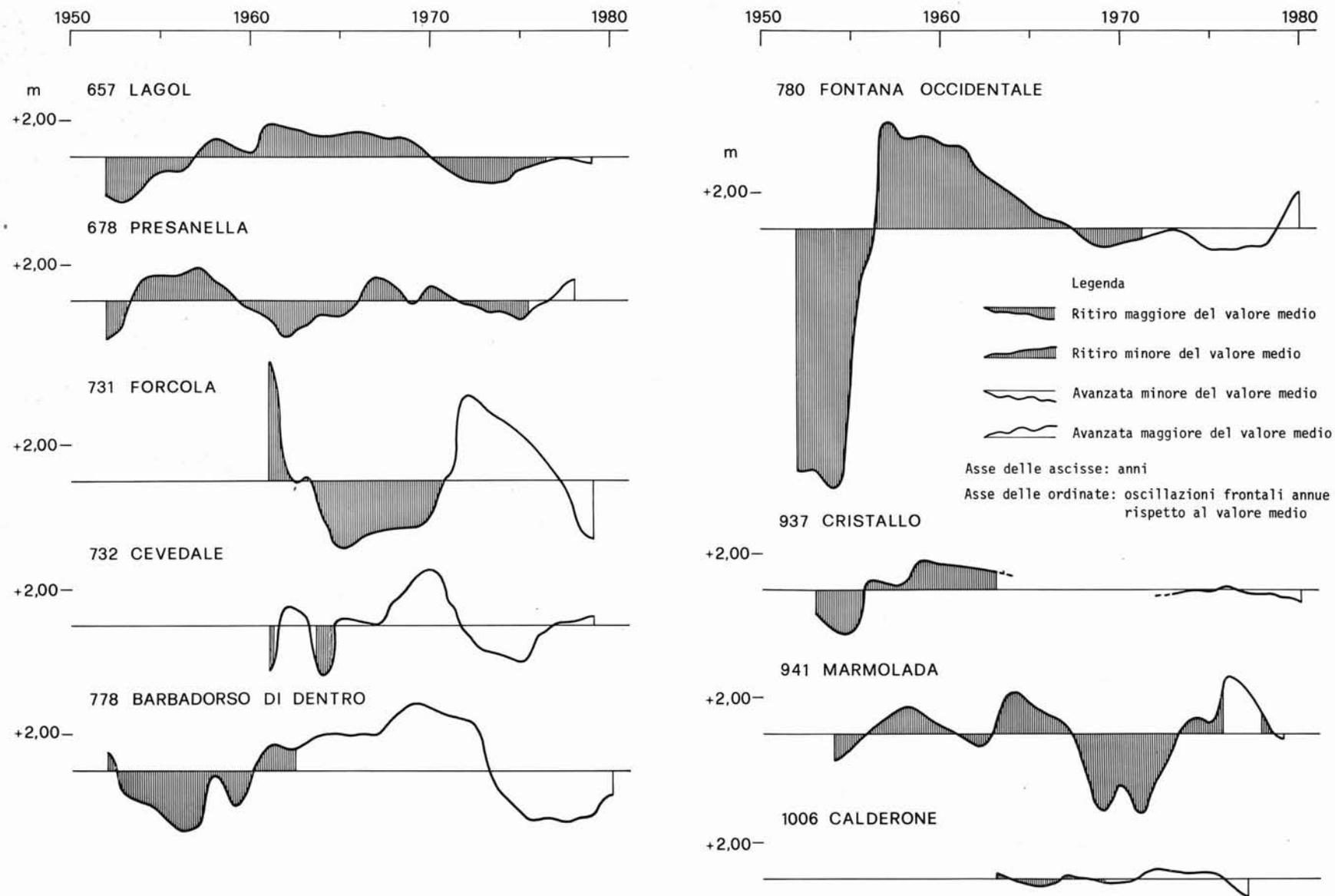


FIG. 7 - Oscillazioni frontali dei ghiacciai 657 - 678 - 731 - 732 - 778 - 780 - 937 - 941 e 1006 rispetto alla retta di regressione calcolata.

vari gruppi montuosi: si nota infatti come le stazioni meteorologiche appaiano più concentrate nelle vicinanze delle aree più glacializzate. Ad esempio per il Gran Paradiso, il Monte Bianco e il Monte Rosa si hanno quattro stazioni (Ceresole, Courmayeur, Aosta e Gressoney) e cinque per i gruppi del Bernina, del Cevedale e dell'Adamello (Sondrio, Aprica, Bormio, S. Valentino, Bolzano). Le restanti stazioni sono distribuite a maglie più larghe nei settori alpini dove il glacialismo appare meno diffuso (Combamala per le Alpi Cozie, Caprile per le Alpi Dolomitiche, Tarvisio per i settori più orientali). L'altitudine delle stazioni, come risulta dalla tab. 4, varia tra i 254 m di Bolzano e i 1 579 m di Ceresole.

Nella stessa tabella sono stati riportati: il numero d'ordine, il nome delle stazioni, il bacino di appartenenza, l'altitudine sul livello del mare, il tipo di strumento utilizzato ed il numero d'ordine, riportato in fig. 8, dei venti ghiacciai che, ad una prima analisi, dovrebbero presentare la possibilità di correlazioni fra oscillazioni frontali e parametri climatici.

L'accostamento fra stazioni meteorologiche e ghiacciai è stato suggerito da varie considerazioni: in primo luogo si è tenuto conto della semplice distanza lineare. Si sono

TABELLA 4

STAZIONI METEOROLOGICHE

n°	nome	bacino	altit.	strum.	ghiacciai
1	Combamala	Maira	915 m	Tm, Pr	1
2	Ceresole R.	Orco	1579 m	Tm, Pr	1; 2; 3
3	Courmayeur	Dora Baltea	1220 m	Tr, Pn	2; 3;
4	Aosta	Dora Baltea	583 m	Tm, Pr	2; 3; 4; 5
5	Gressoney S. J.	Dora Baltea	1400 m	Tm, Pn	4; 5; 6
6	Sondrio	Adda	298 m	Tm, Pr	7; 8; 9; 10; 11
7	Aprica	Adda	1181 m	Tm, P	7; 12; 13; 14; 15; 16
8	Bormio	Adda	1225 m	Tm, Pr	8; 9; 10; 11
9	S. Valentino Muta	Adige	1500 m	Tm, Pr	17; 18; 19
10	Bolzano	Adige	254 m	Tm, Pr	13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20
11	Caprile	Piave	1023 m	Tm, Pr	20
12	Tarvisio	Drava	941 m	Tm, Pr	20

Tm, termometro a massima e minima; Tr, termografo; P, pluviometro; Pn, pluviogramma; Pr, pluviografo

quindi correlate sia le stazioni con i ghiacciai più vicini (ad es. per Combamala il ghiacciaio più vicino è il Galambra) sia i ghiacciai con le stazioni più vicine (lo stesso Galambra ad es. è più vicino a Ceresole che a Com-

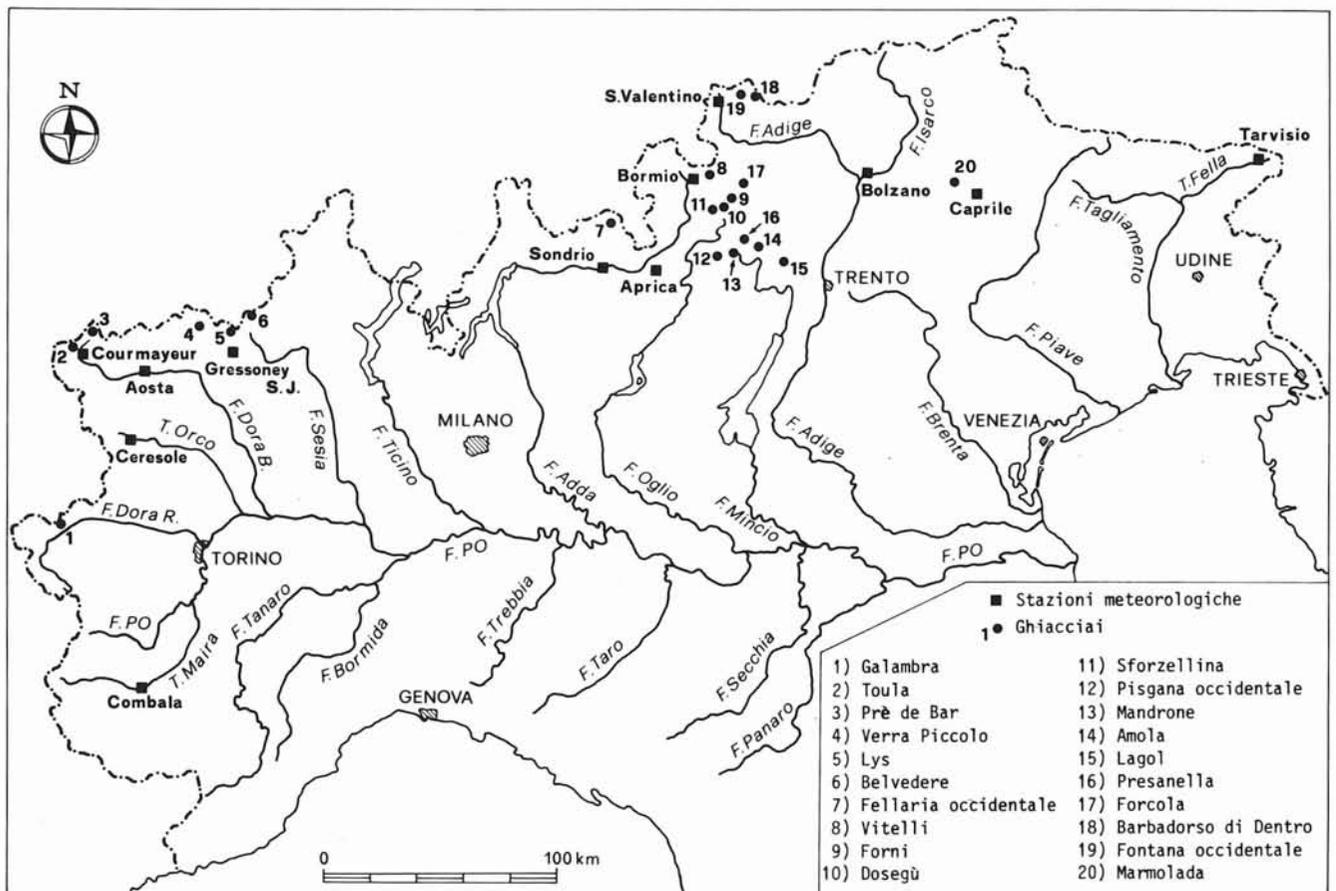


FIG. 8 - Ubicazione delle dodici stazioni meteorologiche e dei venti ghiacciai dell'arco alpino utilizzati per le correlazioni fra parametri climatici e oscillazioni frontali.

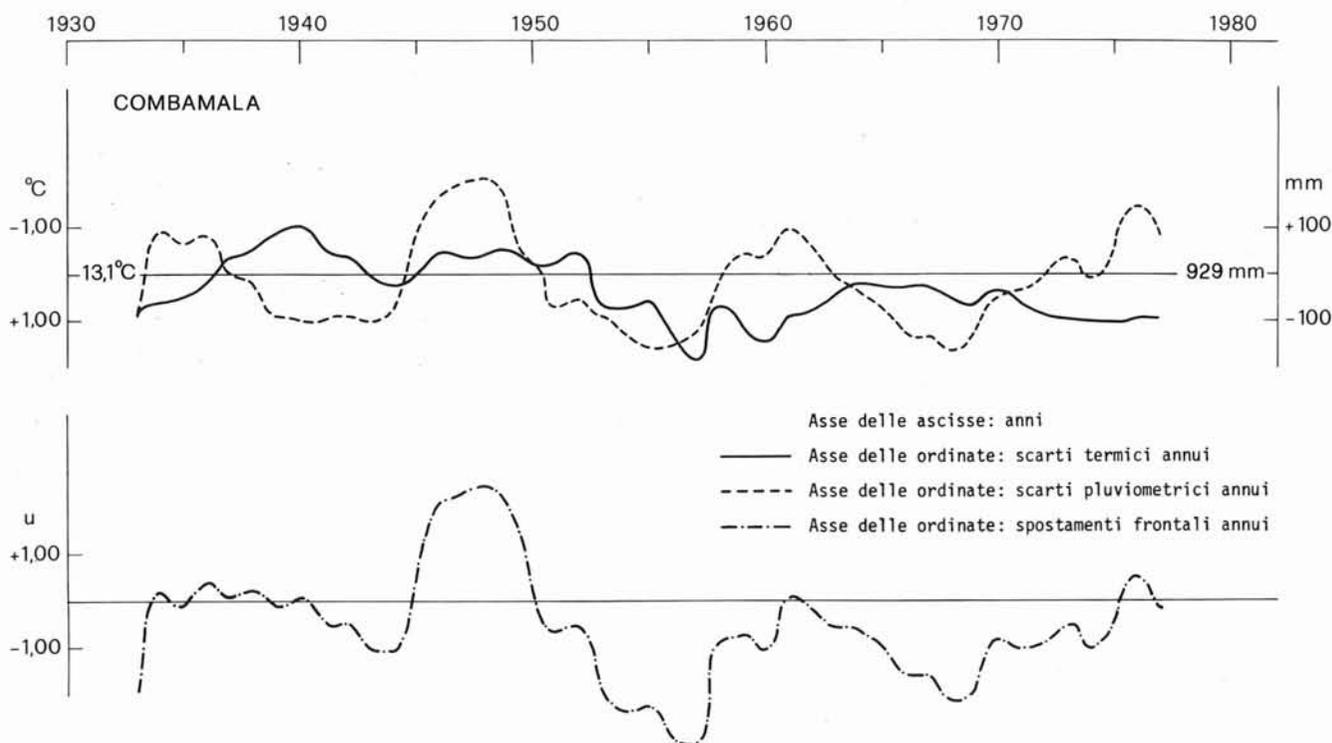


FIG. 9 - Diagrammi delle medie mobili degli scarti termici, degli scarti pluviometrici e della sovrapposizione degli effetti di entrambi, relativi alla stazione meteorologica di Combamala.

bamala ed è quindi stato correlato anche con questa stazione). Si è poi tenuto conto dell'appartenenza allo stesso bacino idrografico principale (Aosta ad es. è stata correlata con il Toulou, con il Prè de Bar, con il Verra e con il Lys), o eventualmente secondario (di ordine inferiore), come ad es. il Lys con Gressoney ed infine dell'appartenenza allo stesso gruppo montuoso (il Belvedere ad es. fa parte del Gruppo del Monte Rosa ed è stato correlato con Gressoney). Quindi dove vi sia la concomitanza di più fattori, maggiori dovrebbero essere le possibilità di correlazione fra stazioni e ghiacciai.

Le dodici stazioni meteorologiche riportate nella tabella hanno fornito con continuità le temperature medie mensili dal 1° Ottobre 1930 al 31 Dicembre 1979.

Si è ritenuto che la diminuzione della temperatura media del periodo da Maggio a Settembre di ogni anno fosse un parametro favorevole al mantenimento dell'accumulo nivale nel bacino di alimentazione dei ghiacciai e quindi al loro avanzamento frontale. A tale scopo è stata calcolata la temperatura media del periodo Maggio-Settembre durante il ventennio 1931-1950; sono stati poi calcolati, per ogni anno dal 1931 al 1979, gli scarti rispetto a questa temperatura media. Con gli scarti annuali sono state calcolate, per ognuna delle dodici stazioni, le medie mobili d'ordine 5 per il periodo 1933-1977.

Si è ritenuto poi che l'altro parametro climatico favorevole all'avanzata delle fronti dei ghiacciai fosse l'im-

porto annuo delle precipitazioni che, aumentando l'accumulo nivale del bacino di alimentazione dei ghiacciai, ne favorisce l'avanzamento frontale.

Poiché sui ghiacciai italiani le precipitazioni dei mesi di Giugno, Luglio, Agosto e Settembre non sono sempre solide, ma spesso sono liquide, sebbene la correlazione fra gli importi annuali delle precipitazioni e le precipitazioni del periodo Ottobre-Maggio di ogni biennio abbia presentato un livello di significatività inferiore allo 0,1% in tutte le dodici stazioni meteorologiche, si è preferito assumere come parametro di correlazione con le oscillazioni frontali l'importo delle precipitazioni del periodo da Ottobre a Maggio di ogni biennio. A questo scopo è stato calcolato l'importo medio del periodo Ottobre-Maggio del ventennio 1931-1950; sono stati poi calcolati, per ogni anno dal 1931 al 1979, gli scarti rispetto a questo importo medio. Con gli scarti annuali sono state calcolate, per ognuna delle dodici stazioni, le medie mobili d'ordine 5 per il periodo 1933-1977. Partendo dall'ipotesi che le oscillazioni delle fronti dei ghiacciai siano il risultato della sovrapposizione degli effetti termici e pluviometrici si è supposto che l'effetto della diminuzione di 1 °C nella temperatura da Maggio a Settembre coincidesse con l'effetto dell'aumento di 100 mm nell'importo delle precipitazioni da Ottobre e Maggio, come è stato poi confermato da alcune regressioni lineari multiple. È stato così possibile calcolare il risultato della sovrapposizione degli effetti termici e pluviometrici. La

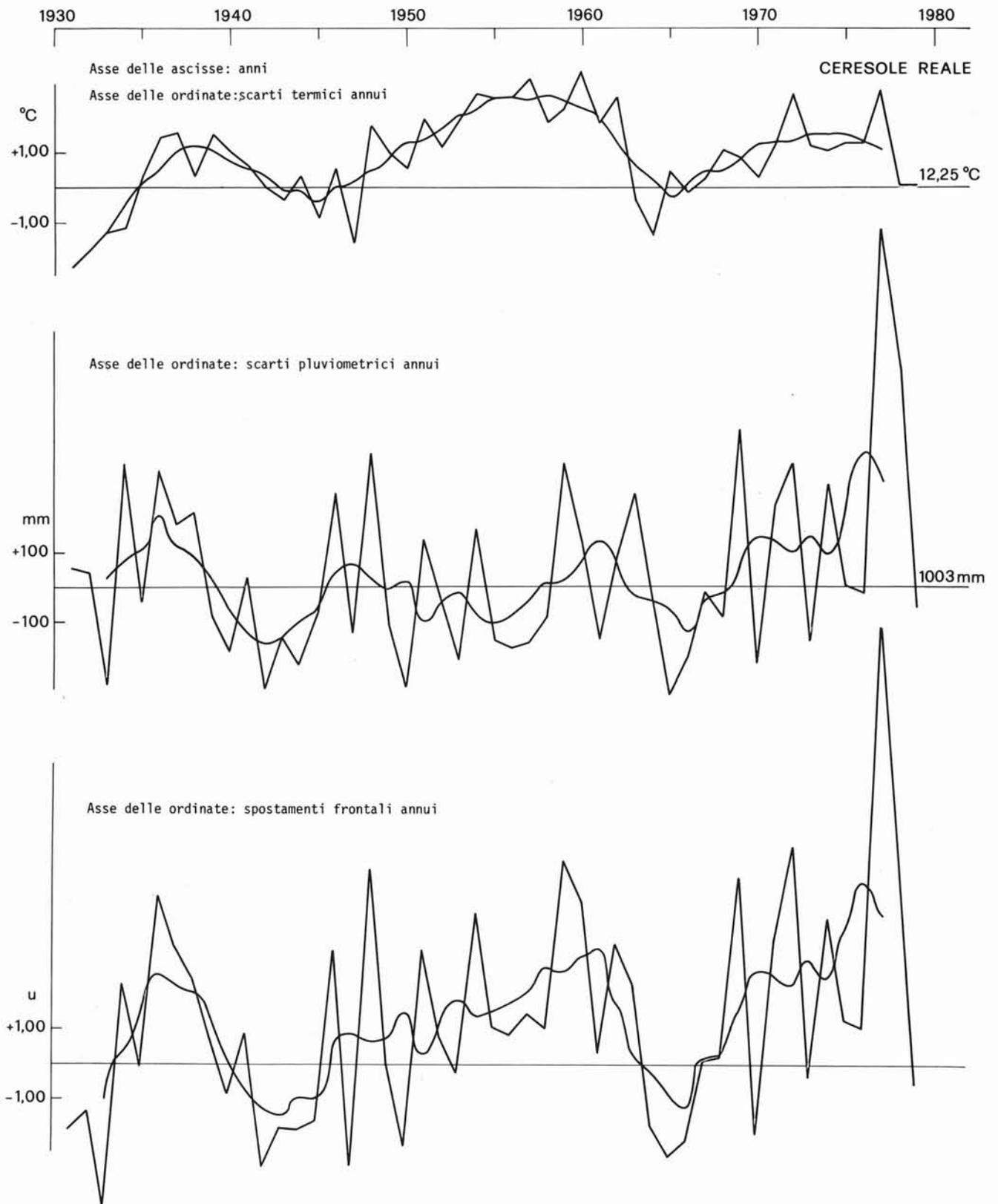


FIG. 10 - Diagrammi delle medie mobili degli scarti termici, degli scarti pluviometrici e della sovrapposizione degli effetti di entrambi, relativi alla stazione meteorologica di Ceresole Reale.

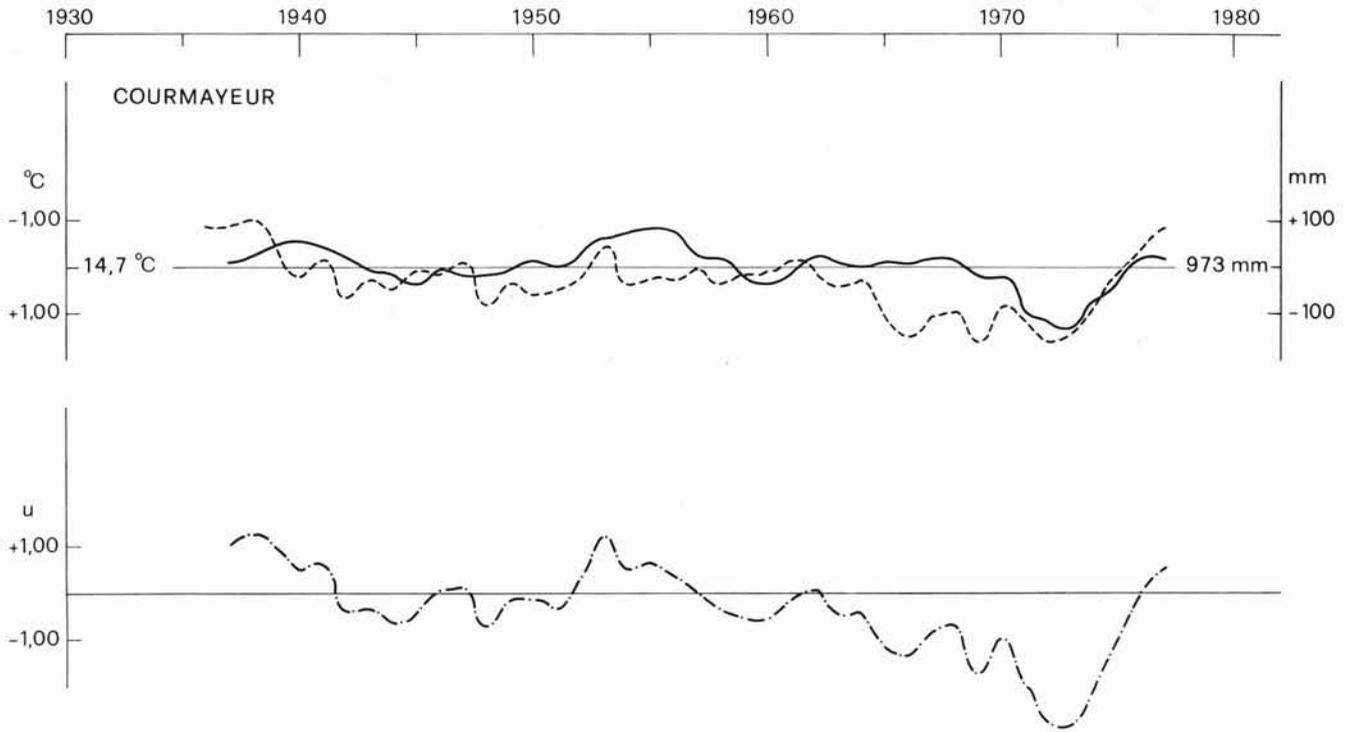


FIG. 11 - Diagrammi delle medie mobili degli scarti termici, degli scarti pluviometrici e della sovrapposizione degli effetti di entrambi, relativi alla stazione meteorologica di Courmayeur.

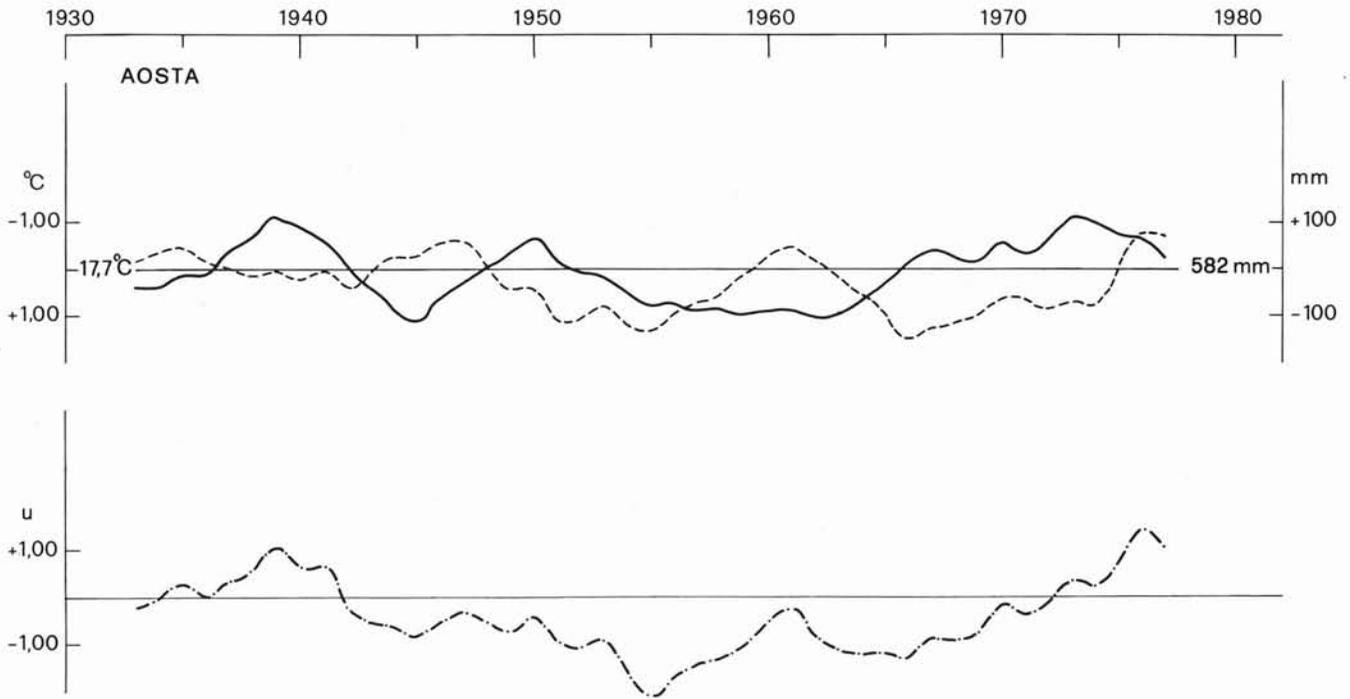


FIG. 12 - Diagrammi delle medie mobili degli scarti termici, degli scarti pluviometrici e della sovrapposizione degli effetti di entrambi, relativi alla stazione meteorologica di Aosta.

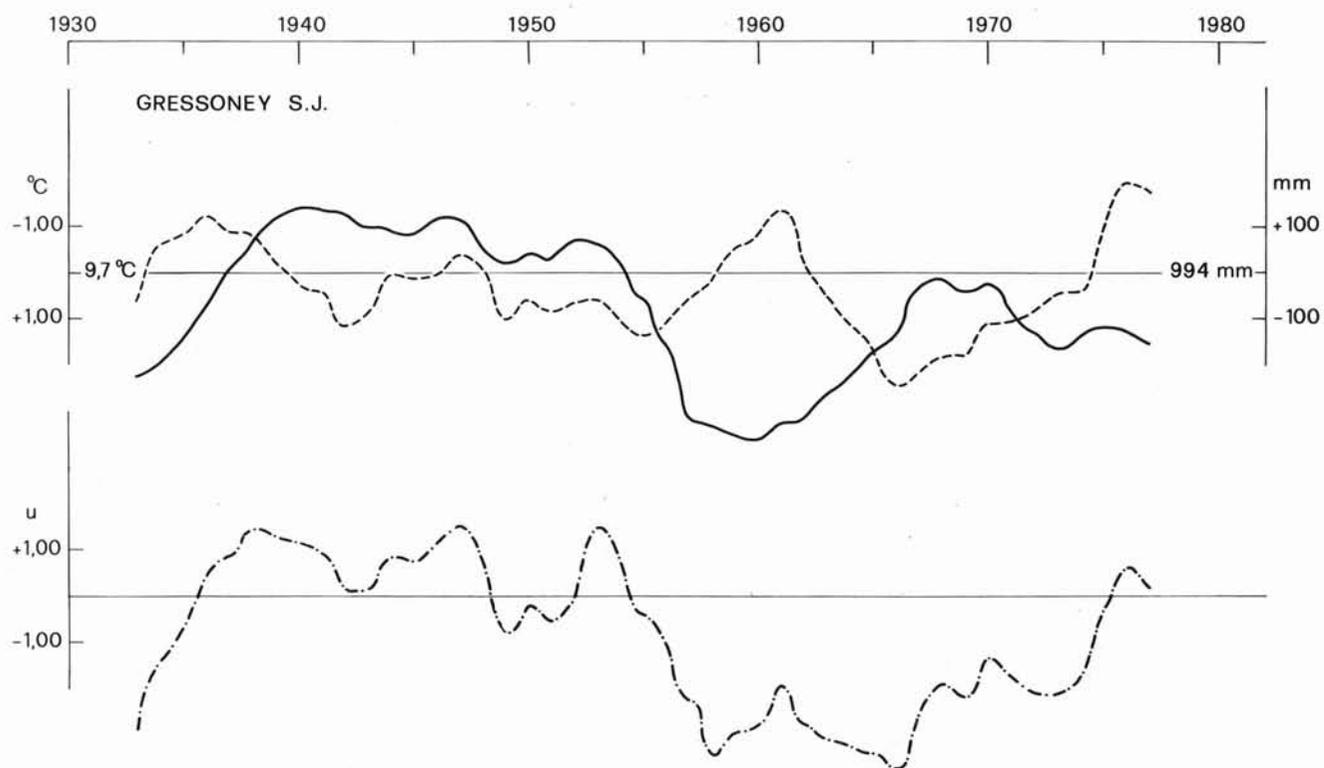


Fig. 13 - Diagrammi delle medie mobili degli scarti termici, degli scarti pluviometrici e della sovrapposizione degli effetti di entrambi, relativi alla stazione meteorologica di Gressoney Saint Jean.

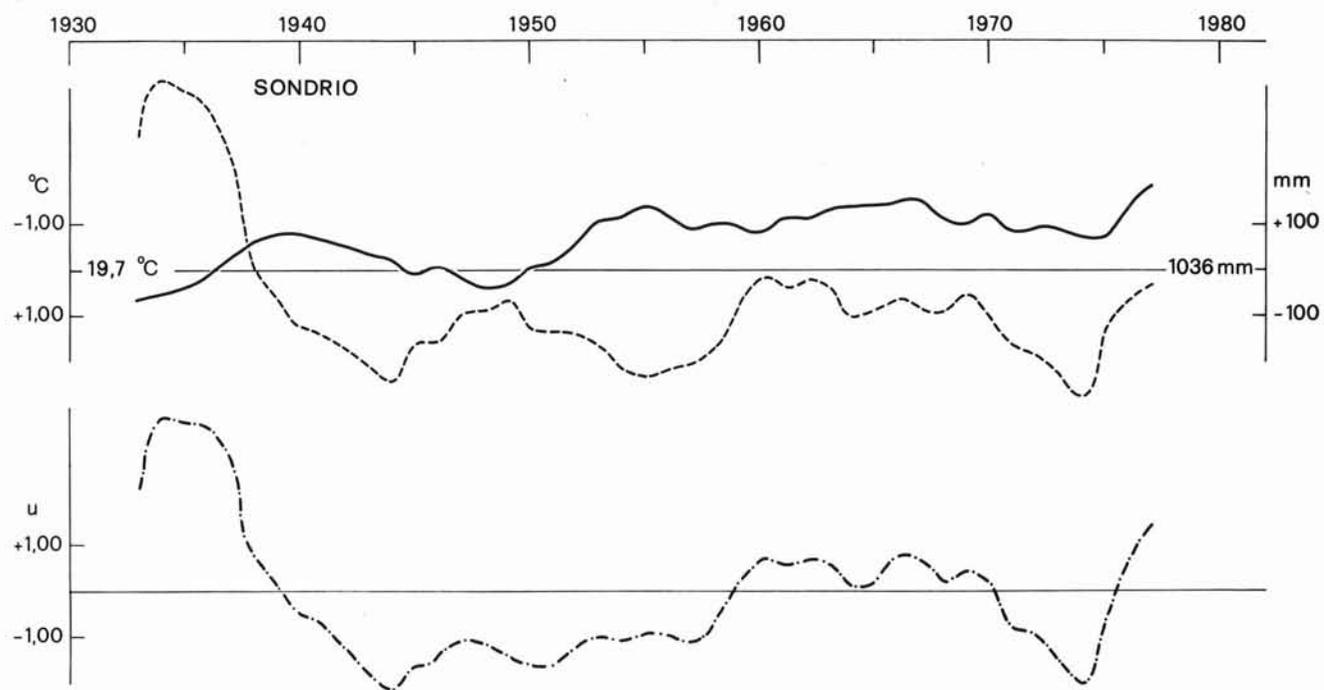


Fig. 14 - Diagrammi delle medie mobili degli scarti termici, degli scarti pluviometrici e della sovrapposizione degli effetti di entrambi, relativi alla stazione meteorologica di Sondrio.

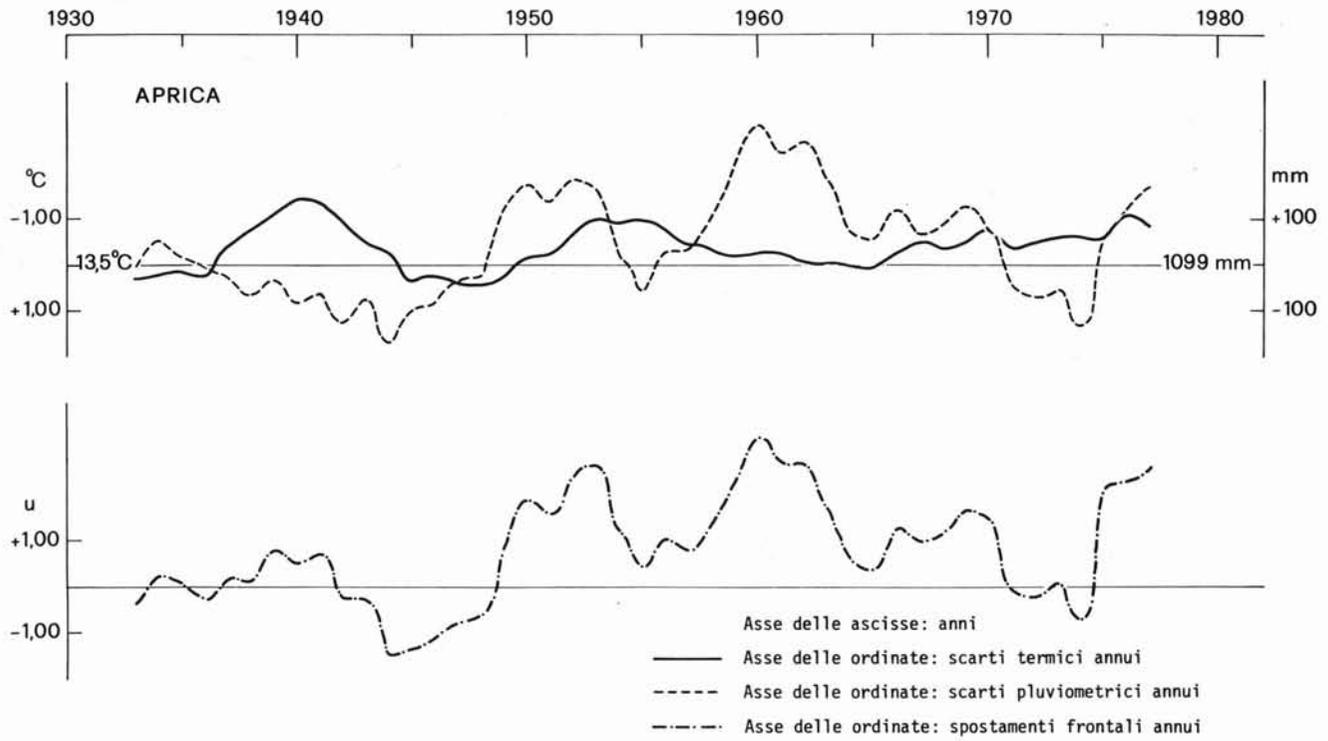


FIG. 15 - Diagrammi delle medie mobili degli scarti termici, degli scarti pluviometrici e della sovrapposizione degli effetti di entrambi, relativi alla stazione meteorologica dell'Aprica.

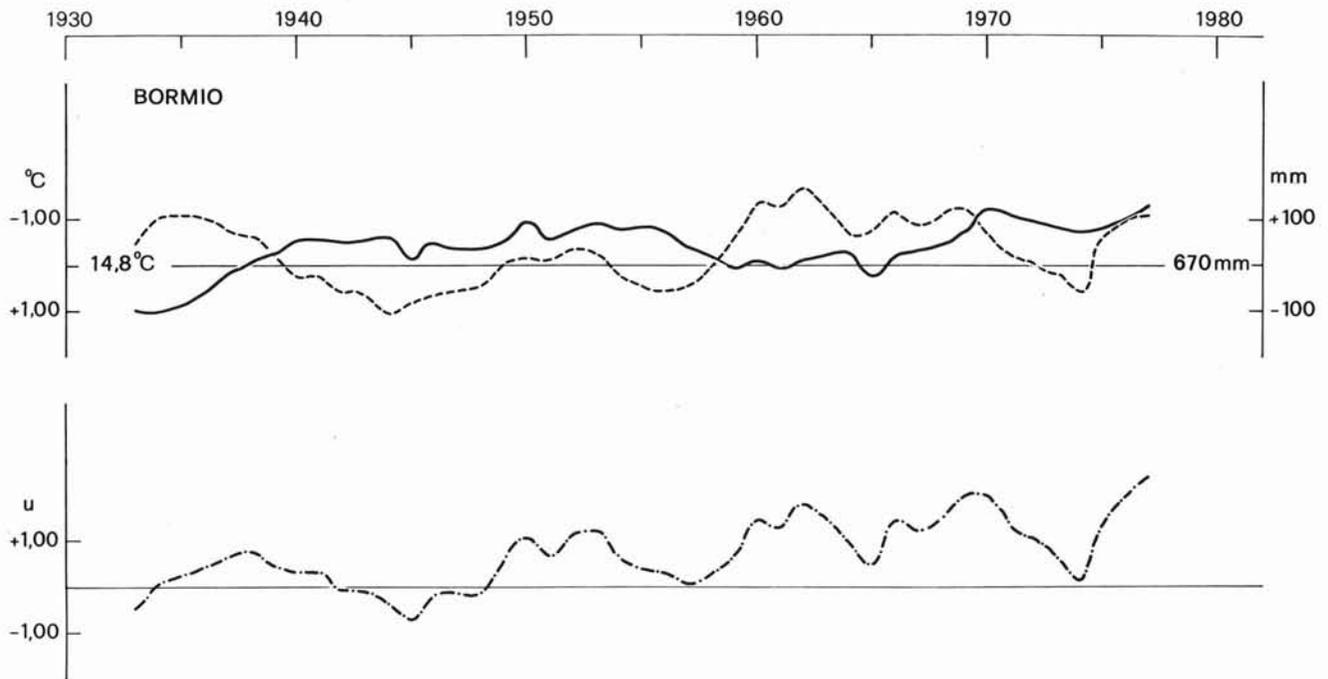


FIG. 16 - Diagrammi delle medie mobili degli scarti termici, degli scarti pluviometrici e della sovrapposizione degli effetti di entrambi, relativi alla stazione meteorologica di Bormio.

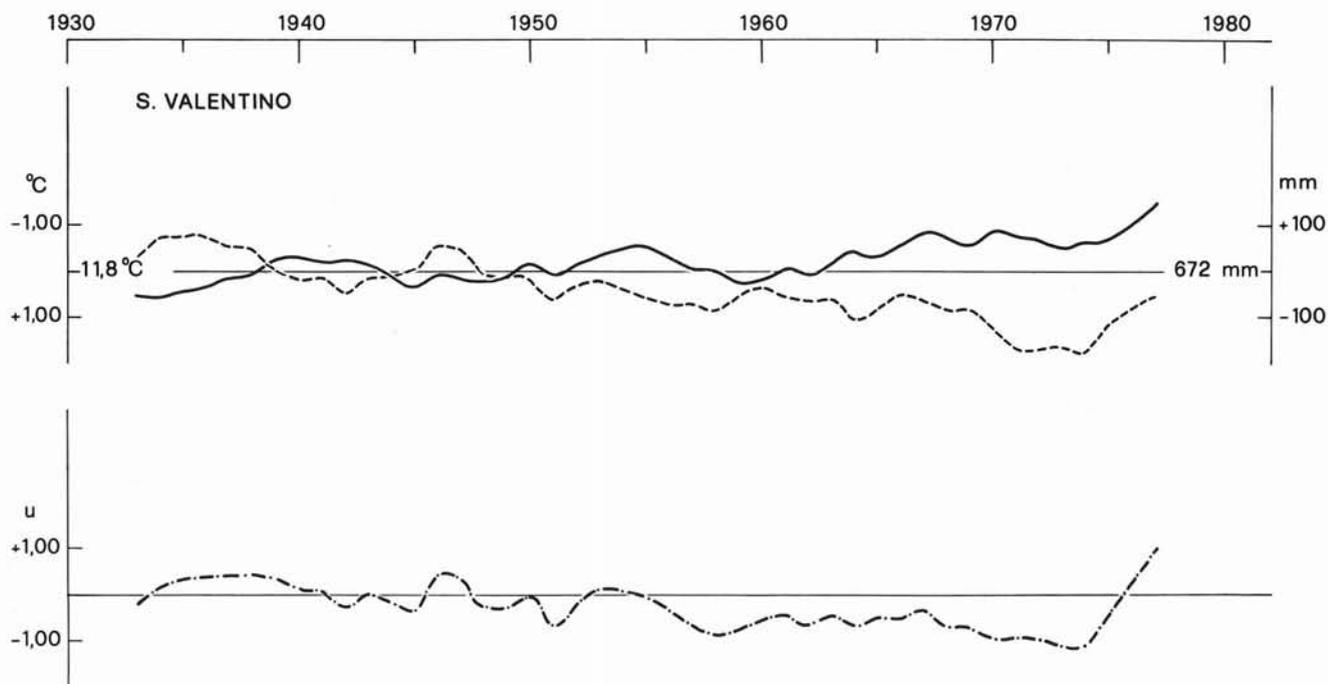


FIG. 17 - Diagrammi delle medie mobili degli scarti termici, degli scarti pluviometrici e della sovrapposizione degli effetti di entrambi, relativi alla stazione meteorologica di San Valentino.

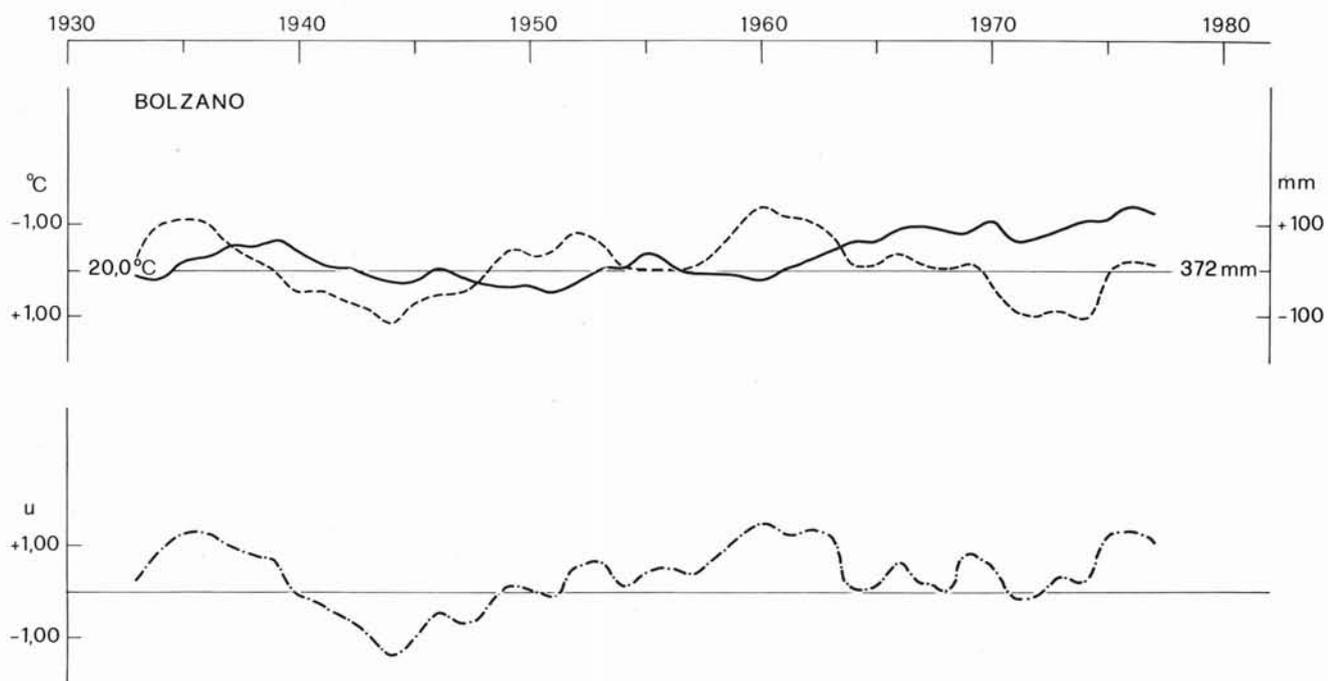


FIG. 18 - Diagrammi delle medie mobili degli scarti termici, degli scarti pluviometrici e della sovrapposizione degli effetti di entrambi, relativi alla stazione meteorologica di Bolzano.

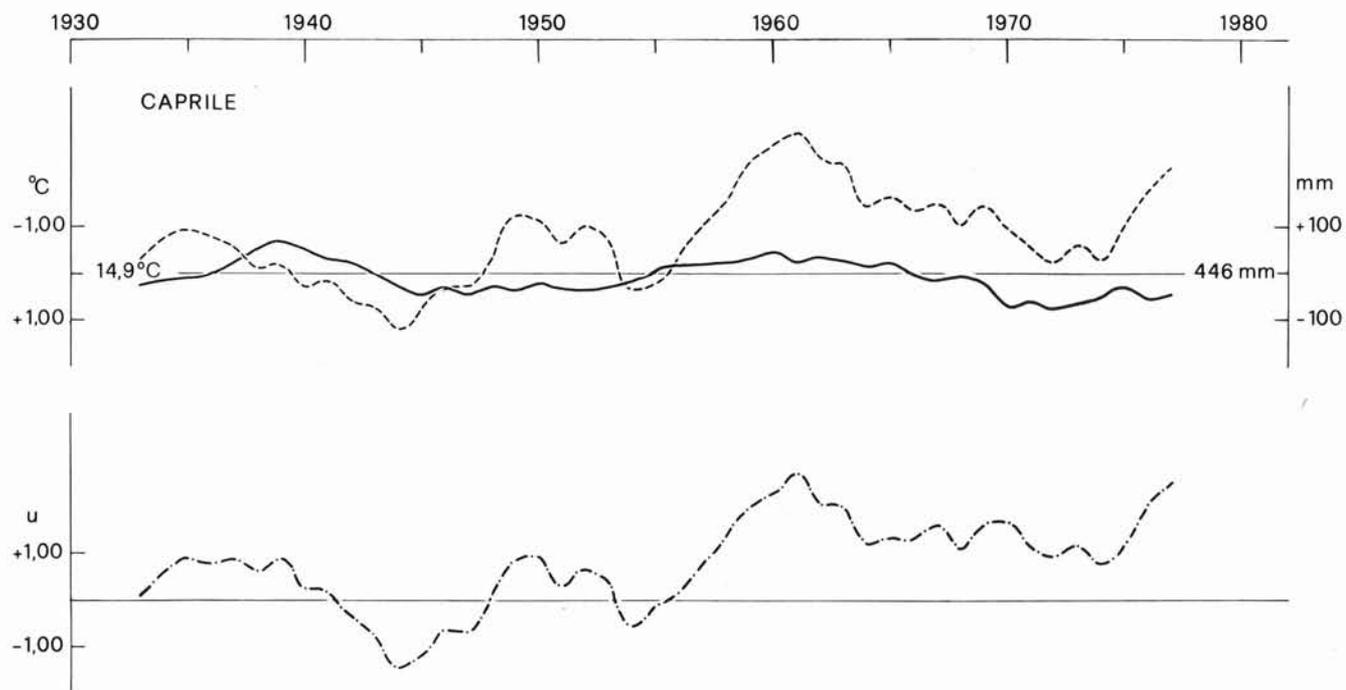


FIG. 19 - Diagrammi delle medie mobili degli scarti termici, degli scarti pluviometrici e della sovrapposizione degli effetti di entrambi, relativi alla stazione meteorologica di Caprile.

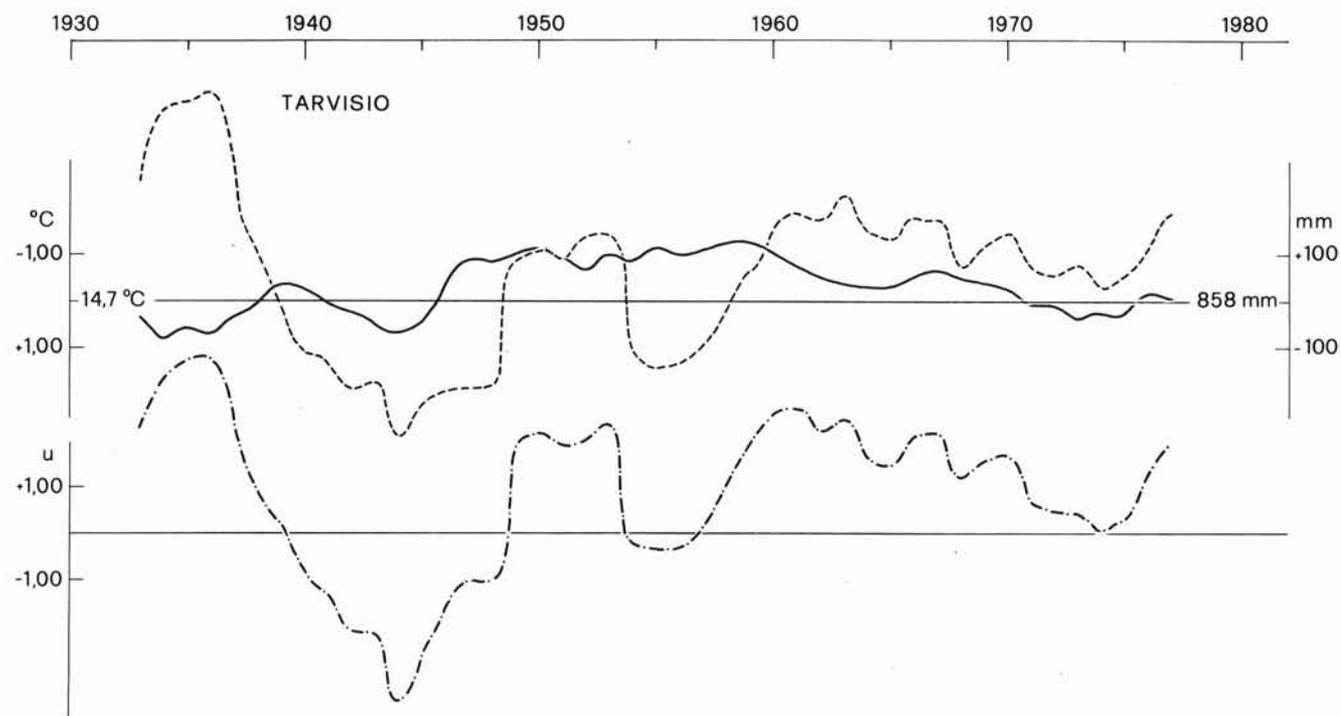


FIG. 20 - Diagrammi delle medie mobili degli scarti termici, degli scarti pluviometrici e della sovrapposizione degli effetti di entrambi, relativi alla stazione meteorologica di Tarvisio.

serie dei diagrammi delle figg. 9-20, relativi alle dodici stazioni meteorologiche studiate, porta in ascissa gli anni dal 1933 al 1977 e in ordinata le medie mobili degli scarti termici in gradi centigradi, riferiti alla temperatura media del ventennio 1931-1950, le medie mobili degli scarti degli importi pluviometrici in millimetri, riferiti alle precipitazioni medie del ventennio 1931-1950 ed infine le medie mobili della sovrapposizione degli effetti degli scarti termici e pluviometrici, espressi in unità di lunghezza da definire.

Poiché l'esame comparato dei diagrammi delle dodici stazioni meteorologiche delle figg. 9-20 mostra andamenti diversi nelle varie stazioni, sono stati calcolati, per le dodici stazioni, i coefficienti di correlazione fra le medie mobili degli scarti termici ed i coefficienti di correlazione fra le medie mobili degli scarti pluviometrici.

La tab. 5 riporta nel settore in basso a sinistra i coefficienti di correlazione delle singole coppie di stazioni meteorologiche, relativi agli scarti termici e nel settore in alto a destra i coefficienti di correlazione delle stesse coppie di stazioni meteorologiche, relativi agli scarti pluviometrici. Dall'esame della tabella si deduce, dalla somma dei dodici coefficienti di correlazione, relativi agli scarti termici, che le stazioni meteorologiche a maggiore correlabilità reciproca sono, in ordine decrescente: Apri-

ca, S. Valentino alla Muta, Sondrio, Bormio, Caprile, Bolzano, Aosta, Ceresole Reale, Gressoney S. J., Tarvisio, Combamala e Courmayeur.

La stazione dell'Aprica potrebbe perciò essere assunta come rappresentativa di tutte le dodici stazioni meteorologiche, escluse Combamala, Courmayeur, Gressoney S. J. e Tarvisio con le quali il coefficiente di correlazione è  $r \leq 0,32$ ; la stazione di S. Valentino alla Muta potrebbe essere rappresentativa delle stazioni di Ceresole Reale, Sondrio, Aprica, Bormio, Bolzano e Caprile con le quali il coefficiente di correlazione è  $r \geq 0,58$ .

Dall'esame della tab. 5 si deduce, dalla somma dei dodici coefficienti di correlazione relativi agli scarti pluviometrici, che le stazioni meteorologiche a maggiore correlabilità reciproca sono, in ordine decrescente: Bolzano, Sondrio, Gressoney S. J., Bormio, Tarvisio, Ceresole Reale, Aosta, Courmayeur, Combamala, Caprile, San Valentino alla Muta e Aprica.

La stazione di Bolzano potrebbe quindi essere assunta come rappresentativa di tutte le dodici stazioni meteorologiche, escluse Combamala, Ceresole Reale e Aosta con le quali il coefficiente di correlazione è  $r \leq 0,33$ ; la stazione di Sondrio potrebbe essere rappresentativa delle stazioni di Courmayeur, Gressoney S. J., Bormio, S. Valentino alla Muta, Bolzano e Tarvisio con le quali il coefficiente di correlazione è  $r \geq 0,53$ .

TABELLA 5

MATRICE DI CORRELAZIONE FRA LE STAZIONI METEOROLOGICHE

		coefficienti di correlazione scarti pluviometrici												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\Sigma$ cp
Coefficienti di correlaz. scarti termici	1		0,60	0,33	0,70	0,69	0,29	0,22	0,09	0,45	0,33	-0,23	0,15	3,62
	2	-0,42		0,27	0,48	0,66	0,36	0,42	0,46	-0,10	0,16	0,45	0,48	4,24
	3	0,27	0,17		0,78	0,81	0,53	-0,23	0,10	0,65	0,42	0,01	0,15	3,82
	4	0,30	-0,07	-0,20		0,86	0,46	0,03	0,04	0,53	0,10	-0,02	-0,01	3,95
	5	0,81	-0,52	0,18	0,70		0,63	-0,42	0,28	0,64	0,45	0,18	0,32	5,10
	6	-0,12	0,41	0,21	0,04	0,37		0,12	0,58	0,62	0,60	0,23	0,77	5,19
	7	-0,03	0,57	0,28	0,45	0,32	0,70		0,72	-0,11	0,67	0,89	0,51	2,82
	8	-0,35	0,62	-0,08	0,35	0,28	0,50	0,61		0,03	0,89	0,82	0,86	4,87
	9	-0,21	0,58	-0,10	0,37	0,01	0,77	0,63	0,68		0,36	-0,25	0,11	2,93
	10	-0,25	0,25	-0,18	0,53	-0,22	0,63	0,50	0,36	0,86		0,79	0,68	5,45
	11	0,54	0,03	-0,35	0,79	0,20	0,36	0,65	0,37	0,62	0,78		0,71	3,58
	12	-0,13	0,64	0,37	-0,26	-0,21	0,36	0,11	0,29	0,08	0,07	-0,43		4,73
	$\Sigma$ ct	0,41	2,26	-0,57	3,00	1,92	4,23	4,79	3,63	4,29	3,33	3,56	0,89	
	$\Sigma$ ct + $\Sigma$ cp	4,03	6,50	3,35	6,95	7,02	9,42	7,61	8,50	7,22	8,78	7,14	5,62	

1	Combamala	7	Aprica
2	Ceresole Reale	8	Bormio
3	Courmayeur	9	S.Valentino alla Muta
4	Aosta	10	Bolzano
5	Gressoney S. Jean	11	Caprile
6	Sondrio	12	Tarvisio

TABELLA 6

REGRESSIONI LINEARI MULTIPLE DEGLI SPOSTAMENTI FRONTALI RISPETTO AGLI SCARTI TERMICI E PLUVIOMETRICI

ghiacciaio	stazione	sfasam anni	r <sup>2</sup> temp.	r <sup>2</sup> prec.	equazione regressione multipla	-1°C+100mm	-1°C=+mm	r <sub>max</sub> t sf. a	r <sub>max</sub> p sf. a	r <sub>max</sub> t	equaz.regress. con temperatura
Galambra	Combamala	0	0,11	0,07	t = - 1,2193 - 1,1050x + 0,0105y	+2,155m	105,2mm	0	11		
Galambra	Ceresole	11	0,73	0,91	t = - 4,7252 - 2,0207x + 0,0141y	+3,431m	143,3mm	11	11		
Toula	Ceresole	12	0,71	0,71	t = + 0,4621 - 4,4271x + 0,0056y	+4,987m	790,6mm	11	15		
Prè de Bar	Ceresole	12	0,65	0,67	t = - 5,1072 - 7,0538x + 0,0153y	+8,584m	461,0mm	13	10		
Toula	Courmayeur	15	0,52	0,53	t = + 5,6047 - 10,3419x + 0,0204y	+12,382m	349,4mm	15	16		
Prè de Bar	Courmayeur	11	0,65	0,81	t = + 2,5178 - 6,5585x + 0,0296y	+9,519	221,6mm	11	10		
Toula	Aosta	3	0,27	0,31	t = + 9,1709 - 4,7216x + 0,0253y	+7,252m	186,6mm	0	9		
Prè de Bar	Aosta	non ci sono			correlazioni multiple valide						
Verra picc.	Aosta	2	0,55	0,56	t = - 5,0187 - 14,1560x + 0,0281y	+16,966m	503,8mm	0	6	r <sub>t</sub> = -0,68	t = 3,7489 - 8,8543x
Lys	Aosta	1	0,46	0,86	t = - 2,6014 - 7,7188x + 0,0758y	+15,299m	101,8mm	1	0		
Verra picc.	Gressoney S. J.	0	0,72	0,74	t = + 10,1249 - 10,7086x + 0,0164y	+12,349m	653,0mm	0	0		
Lys	Gressoney S. J.	1	0,36	0,30	t = - 3,7935 - 1,4188x + 0,0437y	+5,789m	32,5mm	1	14		
Belvedere	Gressoney S. J.	0	0,01	0,25	t = + 6,7416 - 8,2440x + 0,0365y	+11,874m	225,9mm	0	7		
Fellaria occ.	Sondrio	9	0,70	0,73	t = - 17,9426 - 9,9423x + 0,0204y	+11,983m	487,4mm	9	13		
Vitelli	Sondrio	13	0,39	0,47	t = - 16,5666 - 8,4723x + 0,0287y	+11,342m	295,2mm	11	14		
Forni	Sondrio	13	0,63	0,45	t = + 7,9917 - 16,0059x + 0,02012y	+36,126m	79,5mm	10	13		
Dosegù	Sondrio	9	0,77	0,83	t = - 11,0715 - 15,8752x + 0,0416y	+20,035m	381,6mm	9	12		
Sforzellina	Sondrio	14	0,51	0,34	t = + 5,1512 - 8,5021x + 0,0894y	+17,442m	95,1mm	10	14		
Fellaria occ.	Aprica	11	0,35	0,35	t = - 15,4788 - 0,3682x + 0,0331y	+ 3,678m	11,1mm	6	14		
Pisgana occ.	Aprica	10	0,01	0,18	t = - 12,8883 - 5,6472x + 0,0140y	+ 5,661m	403,4mm	8	16		
Mandrone	Aprica	7	0,45	0,57	t = - 12,6165 - 13,3633x + 0,0294y	+16,303m	454,5mm	7	11		
Amola	Aprica	8	0,61	0,57	t = - 13,5265 - 2,5924x + 0,0369y	+ 6,282m	70,3mm	6	8		
Lagol	Aprica	17	0,57	0,46	t = - 7,9867 - 3,3117x + 0,0321y	+ 6,522m	103,2mm	17	17		
Presanella	Aprica	7	0,08	0,30	t = - 7,8392 - 1,7691x + 0,0204y	+ 3,809m	86,7mm	6	8		
Vitelli	Bormio	15	0,68	0,67	t = - 16,3814 - 2,5498x + 0,0881y	+11,360m	28,9mm	6	15		
Forni	Bormio	5	0,32	0,40	t = - 30,044 - 35,8364x + 0,0933y	+45,166m	384,1mm	1	13		
Dosegù	Bormio	10	0,75	0,75	t = - 7,8823 - 3,4343x + 0,1133y	+14,764m	30,3mm	18	10		
Sforzellina	Bormio	5	0,33	0,45	t = - 13,6178 - 20,0054x + 0,0676y	+26,765m	295,9mm	5	14		
Forcola	S.Valentino	non ci sono			correlazioni multiple valide						
Barbadorso d. d.	S. Valentino	non ci sono			correlazioni multiple valide						
Fontana occ.	S. Valentino	non ci sono			correlazioni multiple valide						
Mandrone	Bolzano	5	0,46	0,04	t = - 10,6026 - 14,6185x + 0,0323y	+17,849m	452,6mm	5	9	r <sub>t</sub> = -0,94	t = -25,1504 - 51,1622x
Amola	Bolzano	4	0,68	0,76	t = - 13,9905 - 12,1579x + 0,0315y	+15,308m	386,0mm	4	9	r <sub>t</sub> = -0,56	t = - 4,2153 - 24,8772x
Lagol	Bolzano	8	0,10	0,19	t = - 6,8614 - 6,7412x + 0,0437y	+11,111m	154,3mm	7	10	r <sub>t</sub> = -0,64	t = -19,3428 - 36,7785x
Presanella	Bolzano	4	0,77	0,77	t = - 9,0389 - 10,1059x + 0,0076y	+10,866m	1329,7mm	2	8		
Forcola	Bolzano	7	0,84	0,88	t = - 31,6271 - 48,7895x + 0,0998y	+58,770m	488,9mm	5	14		
Barbadorso d. d.	Bolzano	3	0,76	0,81	t = - 9,3567 - 28,6046x + 0,0570y	+34,305m	501,8mm	3	11		
Fontana occ.	Bolzano	9	0,85	0,74	t = - 16,9565 - 18,9954x + 0,2041y	+39,405m	93,1mm	3	10		
Marmolada	Bolzano	11	0,64	0,66	t = - 8,9568 - 11,2492x + 0,0102y	+12,269m	1102,9mm	10	14		
Marmolada	Caprile	0	0,77	0,78	t = - 2,9042 - 26,0235x + 0,0057y	+26,594m	4565,5mm	0	6		
Marmolada	Tarvisio	10	0,14	0,14	t = - 8,7498 - 0,2315x + 0,0112y	+ 1,352m	20,7mm	10	14		

Asse delle x : temperatura

Asse delle y : precipitazioni

Asse delle t : avanzamento frontale

1 Marmolada - Tarvisio:  $t = -8,7498 - 0,2315 x + 0,0112 y$

2 Forcola - Bolzano:  $t = -31,6271 - 48,7895 x + 0,0998 y$

3 Toulà - Ceresole Reale:  $t = +0,4621 - 4,4271 x + 0,0056 y$

4 Fontana occ. - Bolzano :  $t = -16,9565 - 18,9954 x + 0,2041 y$

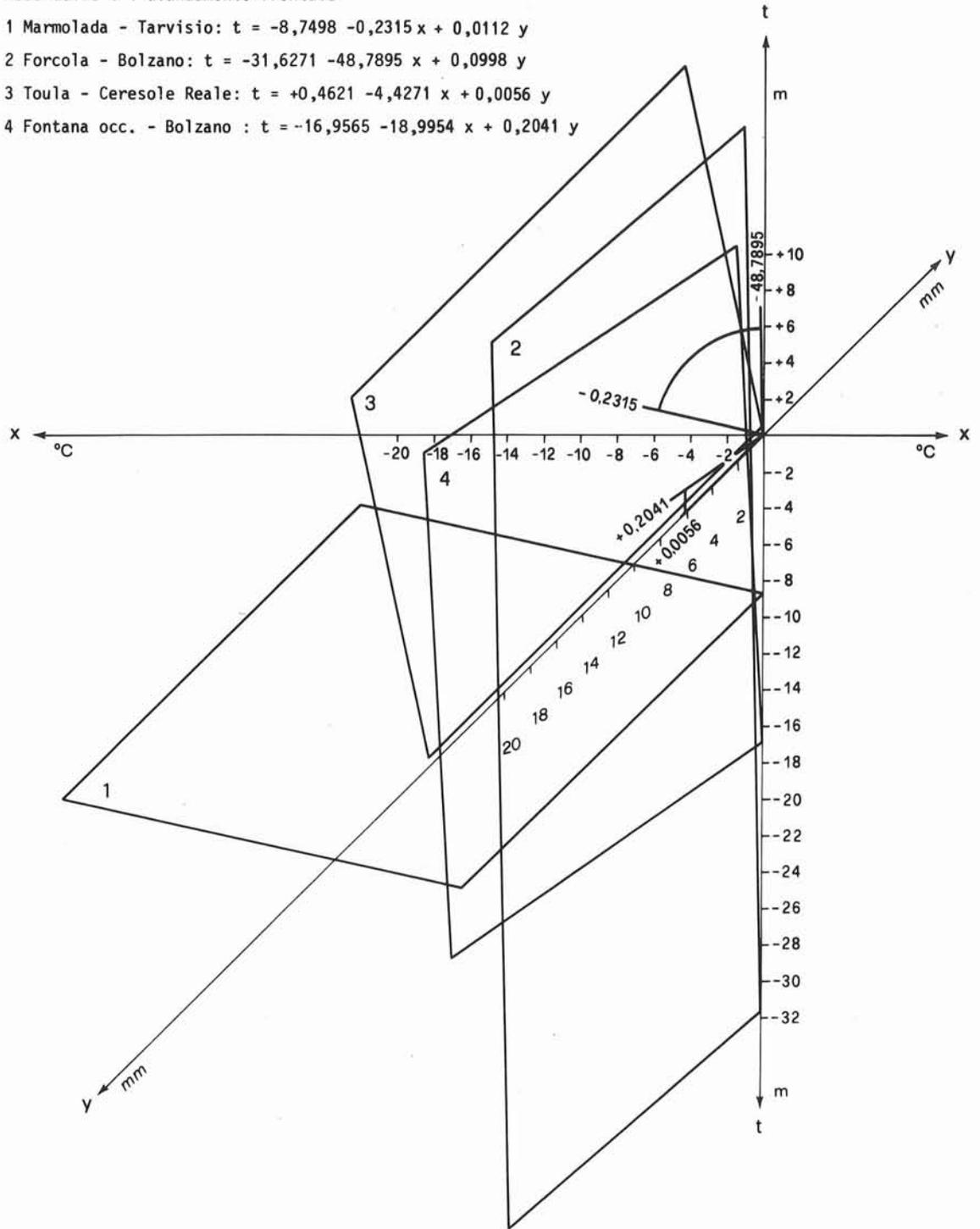


FIG. 21 - Piani limiti delle regressioni multiple a tre variabili per i minimi e i massimi coefficienti della temperatura e delle precipitazioni.

Infine, sempre dalla tab. 5, facendo la somma dei ventiquattro coefficienti di correlazione (termici e pluviometrici), si deduce che le stazioni a maggiore correlabilità reciproca globale sono, in ordine decrescente: Sondrio, Bolzano, Bormio, Aprica, San Valentino alla Muta, Caprile, Gressoney S. J., Aosta, Ceresole Reale, Tarvisio, Combamala e Courmayeur.

## 5. RELAZIONI FRA OSCILLAZIONI FRONTALI DEI GHIACCIAI E PARAMETRI TERMICI E PLUVIOMETRICI

Dopo quanto visto fin qui, per poter studiare le relazioni intercorrenti fra le oscillazioni frontali dei venti ghiacciai studiati e i parametri climatici delle dodici stazioni meteorologiche esaminate, sono stati confrontati i diagrammi delle figg. 9-20 relativi alla sovrapposizione degli effetti degli scarti termici e pluviometrici con i diagrammi delle medie mobili d'ordine 5 delle variazioni frontali dei ghiacciai. Dal confronto visuale si è dedotto lo sfasamento fra cause climatiche globali e oscillazioni frontali, cercando la posizione di migliore correlazione fra i dati delle coppie di diagrammi. L'incertezza di alcuni risultati e la lentezza del metodo di ricerca hanno

consigliato il ricorso all'elaboratore Sperry Univac 1100 e all'ausilio del sig. BERTOLINI Alfredo, che ha eseguito tutto il lavoro di elaborazione al calcolatore ed al quale gli scriventi porgono i più vivi ringraziamenti.

I risultati del confronto fra parametri climatici ed oscillazioni frontali dei ghiacciai sono riportati nella tab. 6, nella quale sono indicati: il nome del ghiacciaio; la stazione meteorologica di confronto; lo sfasamento in anni corrispondente alla migliore correlazione multipla; il massimo coefficiente di determinazione  $r^2$  per gli scarti termici; il massimo coefficiente di determinazione  $r^2$  per gli scarti pluviometrici; l'equazione della regressione lineare multipla nella quale la variabile  $t$  rappresenta la variazione frontale annua in metri, la variabile  $x$  lo scarto termico in gradi centigradi e la variabile  $y$  lo scarto pluviometrico in millimetri; l'avanzamento frontale annuo per la sovrapposizione degli effetti della diminuzione di 1 °C e dell'aumento di 100 mm di precipitazione; l'equivalenza fra la diminuzione di 1 °C e l'aumento delle precipitazioni in millimetri; lo sfasamento in anni che dà il massimo coefficiente di correlazione per cause termiche; lo sfasamento in anni che dà il massimo coefficiente di correlazione per cause pluviometriche, il massimo coefficiente di correlazione per cause termiche in assenza di correlazioni multiple valide e infine la regres-

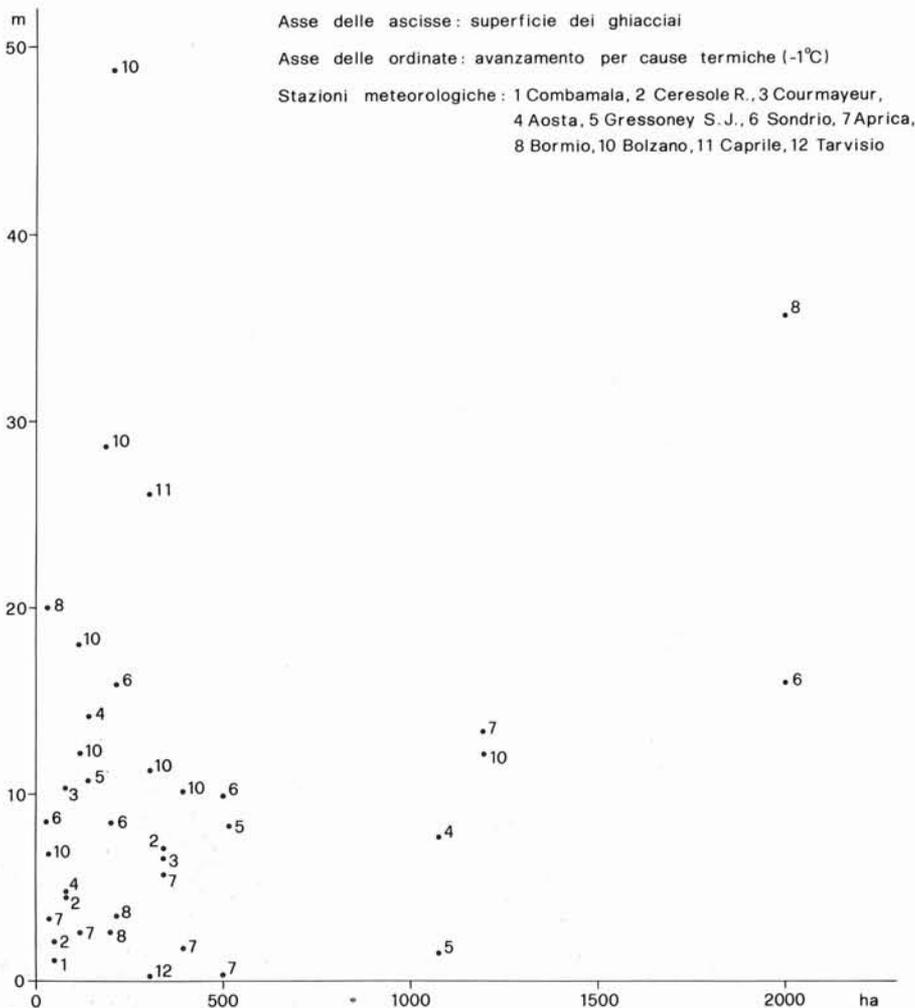
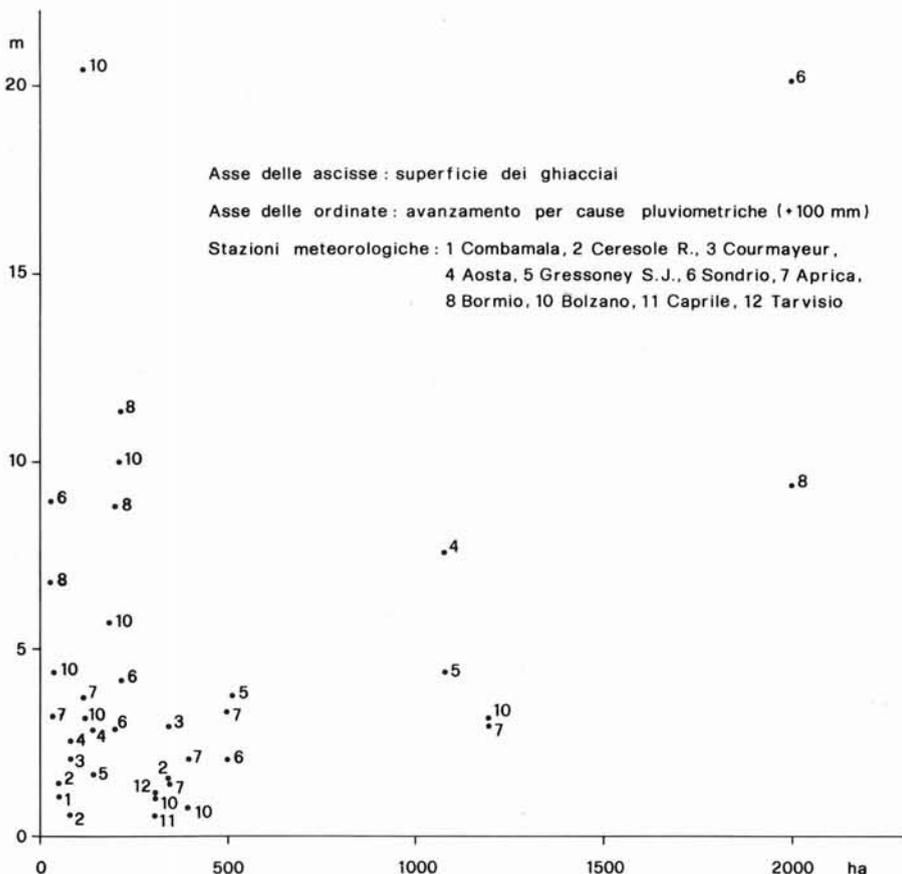


FIG. 22 - Rappresentazione grafica delle coppie di valori corrispondenti all'avanzamento frontale dei ghiacciai per cause termiche e alla loro superficie.

FIG. 23 - Rappresentazione grafica delle coppie di valori corrispondenti all'avanzamento frontale dei ghiacciai per cause pluviometriche e alla loro superficie.



sione lineare relativa dello spostamento frontale rispetto allo scarto termico.

Con i dati della sesta colonna della tab. 6 sono stati costruiti i diagrammi di fig. 21 dei piani limiti delle regressioni multiple a tre variabili relative alle seguenti coppie di stazioni e di ghiacciai: Ghiacciaio della Marmolada - Stazione di Tarvisio per il minimo coefficiente della temperatura, Ghiacciaio della Forcola e Stazione di Bolzano per il massimo coefficiente della temperatura, Ghiacciaio di Toulà - Stazione di Ceresole Reale per il minimo coefficiente delle precipitazioni e Ghiacciaio della Fontana occidentale e Stazione di Bolzano per il massimo coefficiente delle precipitazioni.

L'esame della tab. 6 che rappresenta il risultato della presente relazione verrà fatto nel paragrafo seguente. Qui si ritiene opportuno osservare come non tutte le stazioni meteorologiche esaminate abbiano fornito regressioni lineari multiple valide, nelle quali cioè un avanzamento della fronte del ghiacciaio studiato fosse il risultato di una diminuzione della temperatura del periodo Maggio-Settembre e di un aumento delle precipitazioni del periodo Ottobre-Maggio. Il confronto di queste stazioni meteorologiche, che sono le stazioni di San Valentino alla Muta e di Aosta, con i dati della tab. 5, relativa alle correlazioni fra le dodici stazioni meteorologiche, giustifica solo in parte (5<sup>a</sup> posizione per San Valentino alla Muta e 8<sup>a</sup> posizione per Aosta) la mancata

correlazione con le variazioni frontali dei ghiacciai confrontati.

## 6. CONCLUSIONI

A conclusione della presente relazione si passa all'esame della tab. 6 dalla quale risulta quanto segue:

- lo sfasamento per cause termiche è risultato compreso fra 0 e 18 anni con valore medio di 6,51 anni e distribuzione bimodale con mode nelle classi 0-3 anni (32,43 %) e 9-12 anni (27,03 %);

- lo sfasamento per cause pluviometriche è risultato compreso fra 0 e 17 anni con valore medio di 10,97 anni e distribuzione unimodale con moda nella classe 13-17 anni (43,24 %);

- lo sfasamento per cause climatiche globali (termiche e pluviometriche contemporanee) è risultato compreso fra 0 e 17 anni con valore medio di 7,62 anni, assai prossimo a quello per cause termiche e distribuzione bimodale con mode nelle classi 0-4 (29,73 %) e 10-14 (32,43 %).

Da quanto sopra si deduce che lo sfasamento fra oscillazione delle fronti e cause termiche è minore dello sfasamento fra oscillazione delle fronti e cause pluviometriche di circa 5 anni, in media.

Lo sfasamento globale fra causa ed effetto per i

ghiacciai di primo ordine è risultato compreso fra 0 e 15 anni con valore medio di 6,95 anni, mentre per i ghiacciai di secondo ordine è risultato compreso fra 0 e 17 anni con valore medio di 7,59 anni.

Non sembra quindi esserci differenza, sotto questo punto di vista, fra ghiacciai di primo e di secondo ordine.

La correlazione fra lo sfasamento globale ( $y$ ) in anni ed area dei ghiacciai ( $x$ ) in ettari ha dato la seguente regressione lineare della  $y$  rispetto alla  $x$ :

$$y = 8,1550 - 0,0013 x$$

con coefficiente di correlazione  $r = -0,14$  assai poco significativo. Se ne può comunque dedurre che lo sfasa-

mento medio è di 8,16 anni e che diminuisce al crescere dell'area del ghiacciaio.

La correlazione fra lo sfasamento globale ( $y$ ) in anni e l'esposizione dei ghiacciai ( $x$ ) in radianti ha dato la seguente regressione lineare della  $y$  rispetto alla  $x$ :  $y = 8,2926 - 0,5497 x$  coefficiente di correlazione  $r = -0,11$ , poco significativo. Tenendo conto del coefficiente di correlazione se ne può dedurre che lo sfasamento è indipendente dall'esposizione del ghiacciaio, mentre tenendo conto del segno della variabile  $x$  si potrebbe dedurre che lo sfasamento è maggiore nei ghiacciai ad esposizione con componente Ovest e minore in quelli ad esposizione con componente Est.

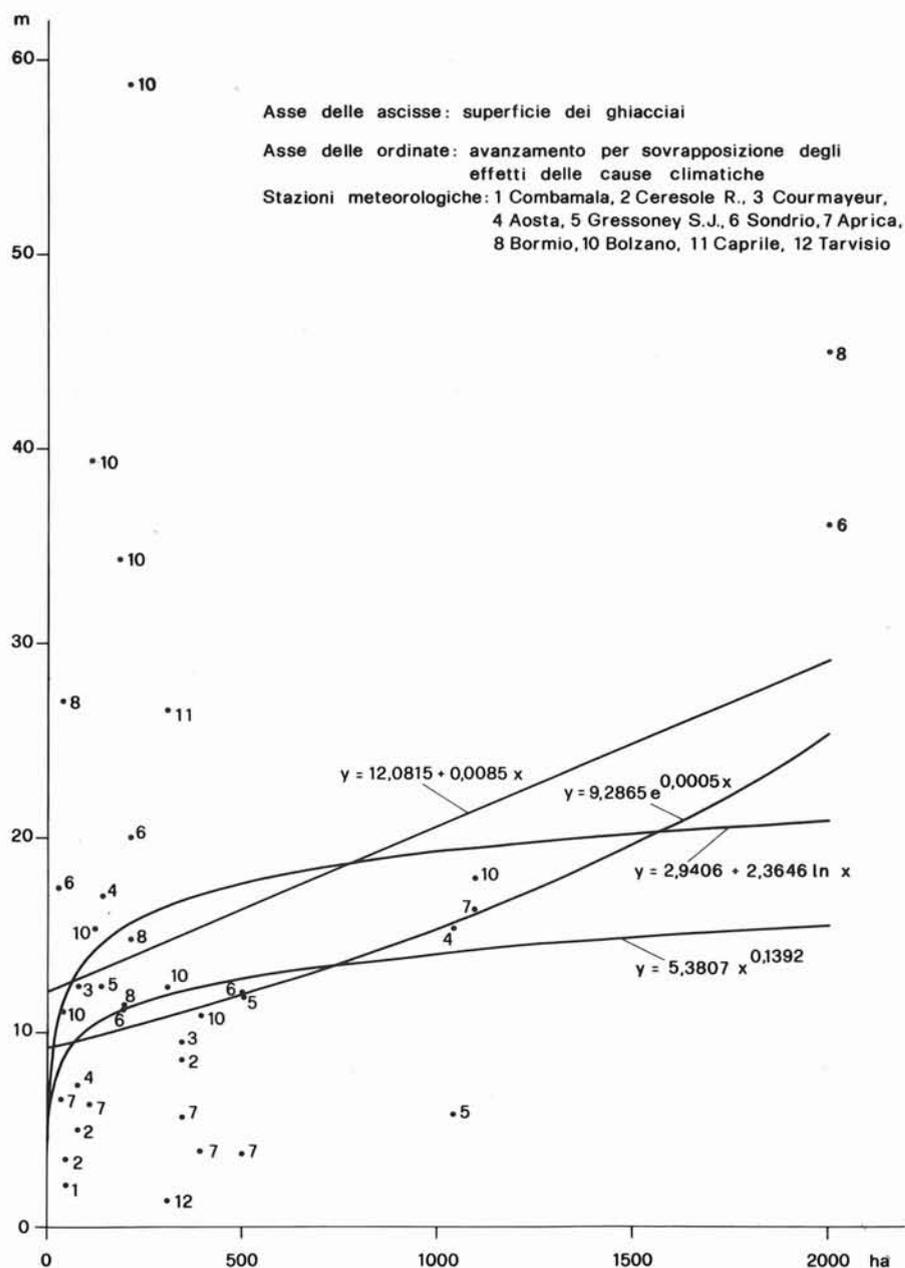
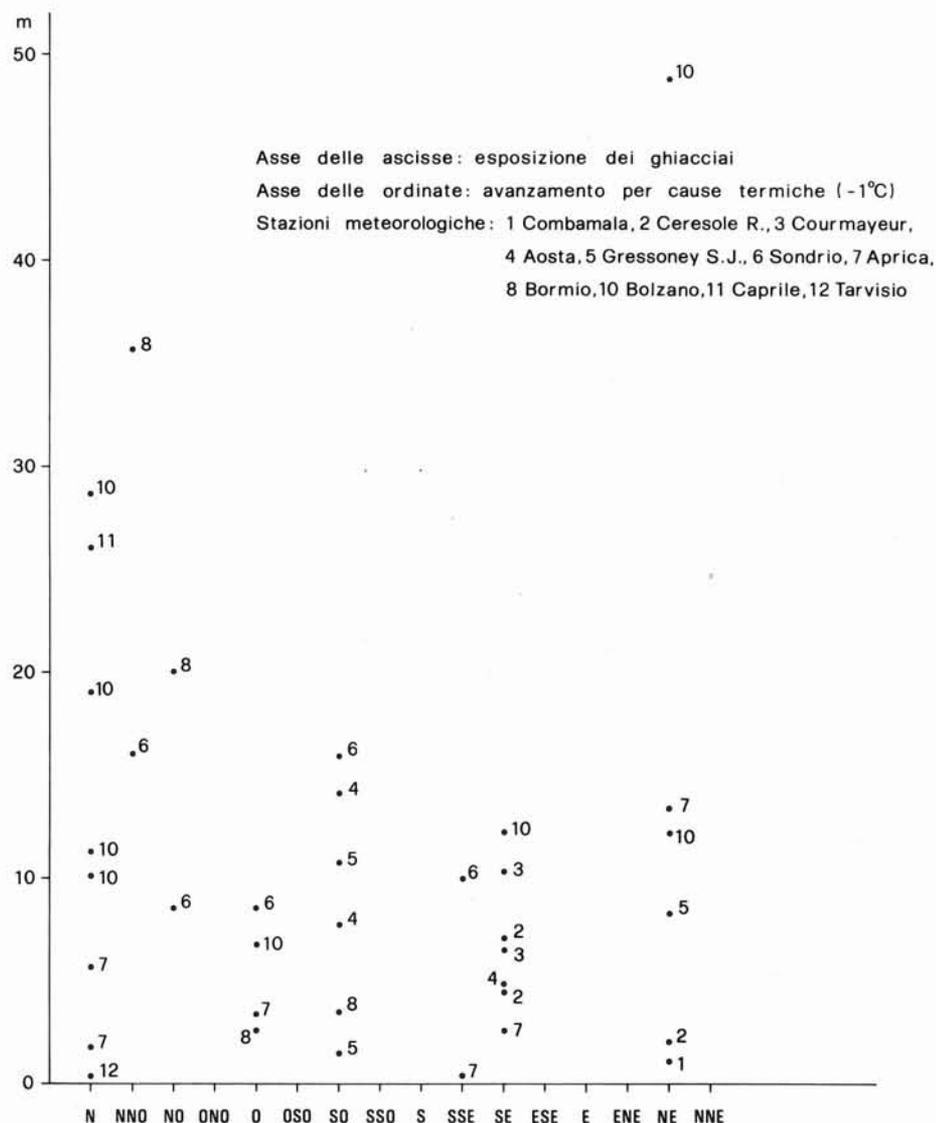


FIG. 24 - Rappresentazione grafica delle regressioni dell'avanzamento globale dei ghiacciai rispetto alla loro superficie.

FIG. 25 - Rappresentazione grafica delle coppie di valori corrispondenti all'avanzamento frontale dei ghiacciai per cause termiche e alla loro esposizione.



Esaminando i dati della settima colonna della tab. 6 si ricava che la sovrapposizione dell'effetto della diminuzione della temperatura media estiva da Maggio a Settembre di 1 °C e dell'aumento delle precipitazioni da Ottobre a Maggio di 100 mm è risultato compreso fra 1,352 m e 58,770 m con valore medio di 15,558 m e distribuzione unimodale con moda nella classe 9,51-17,70 (43,24 %).

Esaminando i dati dell'ottava colonna della tab. 6 si ricava che il numero di millimetri di precipitazione in aumento da Ottobre a Maggio che produce lo stesso effetto della diminuzione della temperatura di 1 °C da Maggio a Settembre varia da 11,1 mm a 4 565 mm con valore medio di 434,52 mm e distribuzione unimodale con moda nella classe 254-541 mm (37,84 %).

L'avanzamento globale per i ghiacciai di primo ordine è risultato compreso fra 3,678 m e 58,770 m con

valore medio di 15,351 m, mentre per i ghiacciai di secondo ordine è risultato compreso fra 1,352 m e 39,405 m con valore medio di 13,093 m. Se ne deduce che in media i ghiacciai di secondo ordine sono meno sensibili alle cause climatiche di quelli di primo ordine.

Per studiare le relazioni che intercorrono fra la sensibilità dei ghiacciai alle variazioni climatiche e la loro superficie, sono stati costruiti i diagrammi delle figg. 22, 23 e 24 che portano in ascissa la superficie dei ghiacciai in ettari e in ordinata rispettivamente l'avanzamento per cause termiche, l'avanzamento per cause pluviometriche e l'avanzamento per la sovrapposizione degli effetti delle due cause, in metri. I due diagrammi di fig. 22 e di fig. 23 permettono soltanto di vedere come sia l'avanzamento per cause termiche che l'avanzamento per cause pluviometriche aumentino al crescere della superficie dei ghiacciai. Con i dati della settima colonna della tab. 6

è stato possibile calcolare le seguenti regressioni della  $y$  (avanzamento globale) rispetto alla  $x$  (superficie dei ghiacciai), rappresentate nel diagramma di fig. 24:

- 1) regressione di potenza:  $y = 5,3807 x^{0,1392}$ ,  $r = 0,19$  significatività maggiore del 10 %, quindi scarsa;
- 2) regressione logaritmica:  $y = 2,9406 + 2,3646 \ln x$ ,  $r = 0,22$ , significatività maggiore del 10 %, quindi scarsa;
- 3) regressione esponenziale:  $y = 9,2865 e^{0,0005 x}$ ,  $r = 0,30$ , significatività minore del 10 %;
- 4) regressione lineare:  $y = 12,0815 + 0,0085 x$ ,  $r = 0,33$ , significatività minore del 5 %.

Da quanto sopra si deduce che la sensibilità dei ghiacciai alle cause climatiche delle variazioni frontali cresce al crescere della loro superficie secondo una legge lineare.

Infine per studiare le relazioni che intercorrono fra la sensibilità dei ghiacciai alle variazioni climatiche e la loro esposizione sono stati costruiti i diagrammi delle figg. 25, 26 e 27 che portano in ascissa l'esposizione dei

ghiacciai in radianti, partendo da N in senso antiorario e in ordinata rispettivamente l'avanzamento per cause termiche, l'avanzamento per cause pluviometriche e l'avanzamento per la sovrapposizione degli effetti delle due cause, in metri. I due diagrammi di fig. 25 e di fig. 26 permettono solamente di vedere come sia l'avanzamento per cause termiche che l'avanzamento per cause pluviometriche diminuiscono variando l'esposizione da N verso W, S, E fino a NE. Con i dati della settima colonna della tab. 6 è stato possibile calcolare le seguenti regressioni della  $y$  (avanzamento globale) rispetto alla  $x$  (esposizione dei ghiacciai) rappresentate nel diagramma di fig. 27:

- 1) regressione di potenza:  $y = 11,6670 x^{-0,0005}$ ,  $r = 0,05$ , non significativa;
- 2) regressione logaritmica:  $y = 15,2056 - 0,0072 \ln x$ ,  $r = 0,05$ , non significativa;
- 3) regressione esponenziale:  $y = 13,6861 e^{-0,1498 x}$ ,  $r = 0,18$ , significatività maggiore del 10 %;
- 4) regressione lineare:  $y = 18,4101 - 2,3406 x$ ,  $r = 0,18$ , significatività maggiore del 10 %.

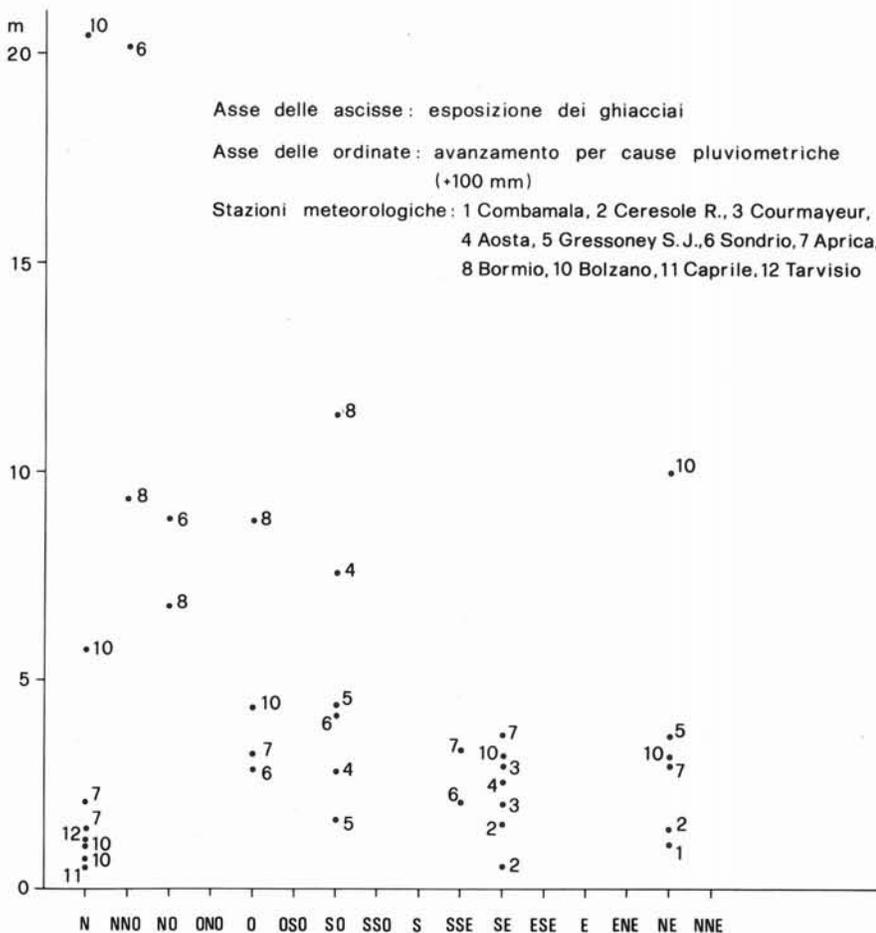
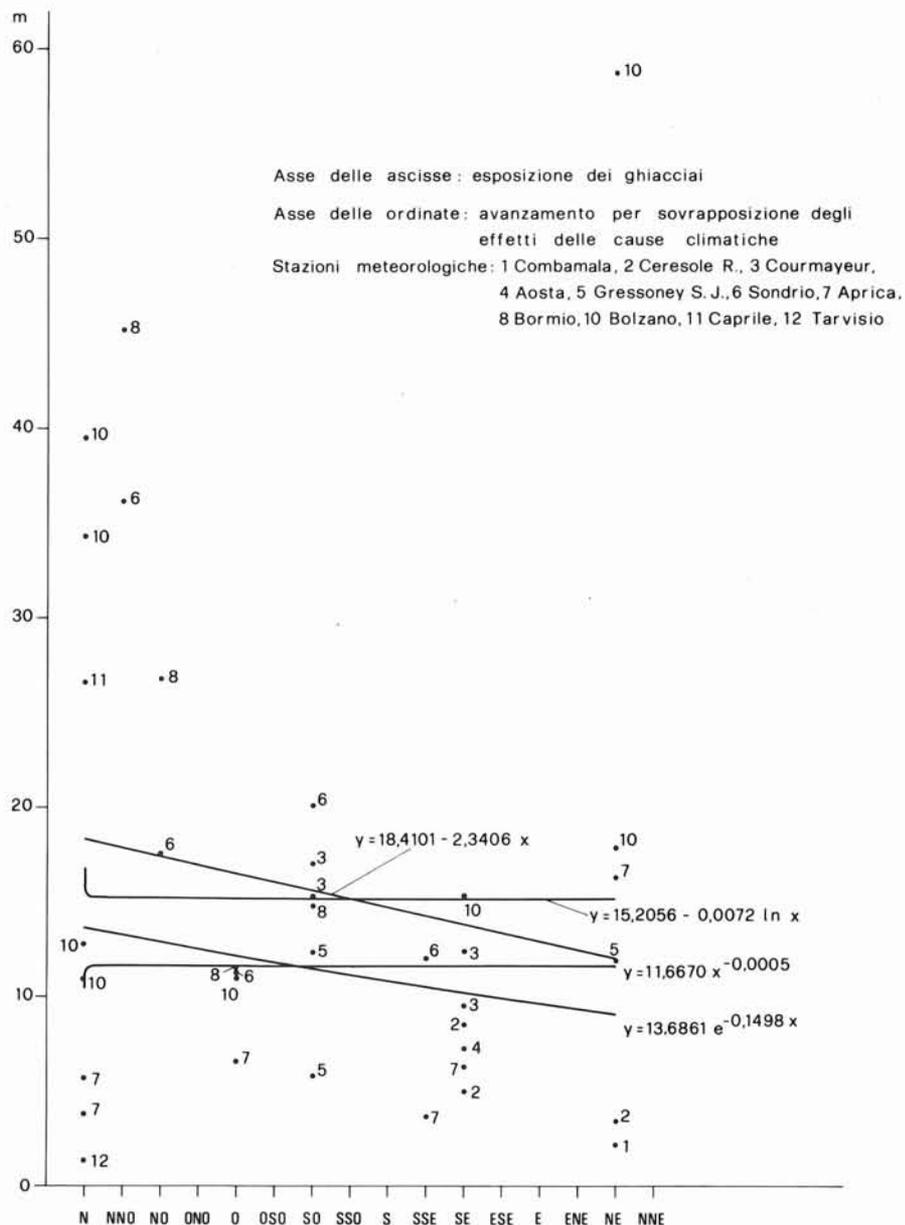


FIG. 26 - Rappresentazione grafica delle coppie di valori corrispondenti all'avanzamento frontale dei ghiacciai per cause pluviometriche e alla loro esposizione.

FIG. 27 - Rappresentazione grafica dell'avanzamento globale dei ghiacciai rispetto alla loro esposizione.



Da quanto sopra si deduce che la sensibilità dei ghiacciai alle cause climatiche delle variazioni frontali varia al variare della loro esposizione, procedendo in senso antiorario da N verso NE, secondo una legge lineare, assumendo i valori più elevati per i ghiacciai ad esposizione con componente W ed i valori più bassi per i ghiacciai ad esposizione con componente E, probabilmente in relazione con le direzioni dei venti apportatori di precipitazioni.

#### BIBLIOGRAFIA

CERUTTI A. V. (1971) - Osservazioni sul progresso dei ghiacciai del Monte Bianco nell'ultimo decennio. Boll. CGI, ser. 2, 19, 251-271, 7 ff.

CERUTTI A. V. (1975) - Le condizioni termometriche e nivometriche del periodo 1936-70 sul versante meridionale del Monte Bianco e le variazioni di volume delle precipitazioni nevose nei bacini glaciali. Boll. CGI, ser. 2, 23, 31-50, 1 f.

CERUTTI A. V. (1977) - Variazioni climatiche, alimentazione ed oscillazioni glaciali sul Massiccio del Monte Bianco. Boll. CGI, ser. 2, 25, 53-88, 11 ff., 2 tabb.

CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE - COMITATO GLACIOLOGICO ITALIANO (1959-1962) - Catasto dei ghiacciai italiani: anno geofisico 1957-58; v. I, Elenco generale e bibliografia dei ghiacciai italiani; v. II, Ghiacciai del Piemonte; v. III, Ghiacciai della Lombardia e dell'Ortles-Cevedale; v. IV, Ghiacciai delle Tre Venezie (escluso Ortles-Cevedale) e dell'Appennino, Torino.

DESIO A. (con la collaborazione di BELLONI S. & GIORCELLI A.) (1967) - Ghiacciai del Gruppo Ortles-Cevedale (Alpi Centrali). xxii + 875 pp., 130 ff., 207 tt., 1 carta glaciologica, Consiglio Nazionale delle Ricerche - Comitato Glaciologico Italiano.

I.S.T.A.T. (1960-1980) - Annuario di statistiche meteorologiche. Poligrafico dello Stato, Roma.

- LESCA C. (1973) - *La campagna glaciologica 1973 e il nuovo trattamento statistico delle variazioni*. Boll. CGI, ser. 2, 21, 37-42.
- MINISTERO LL.PP. - SERVIZIO IDROGRAFICO (1951-1971) - *Annali Idrologici*. Poligrafico dello Stato, Roma.
- MINISTERO LL.PP. - CONSIGLIO SUPERIORE (1959) - *Precipitazioni medie mensili ed annue e numero dei giorni piovosi per il trentennio 1921-1950*. Poligrafico dello Stato, Roma.
- MINISTERO LL.PP. - CONSIGLIO SUPERIORE (1966) - *Distribuzione della temperatura dell'aria in Italia nel trentennio 1926-1955*. Pubbl. n. 25, II ed., fasc. 1 - *Italia Settentrionale*. Poligrafico dello Stato, Roma.
- MONTERIN U. (1932) - *Le variazioni secolari del clima del Gran San Bernardo: 1818-1931 e le oscillazioni del Ghiacciaio del Lys al Monte Rosa: 1789-1931*. Boll. CGI, 12, 59-187, 35 ff., 2 tt.
- PROVINCIA AUTONOMA DI BOLZANO - UFFICIO IDROGRAFICO (1980) - *Precipitazioni medie mensili ed annue e numero dei giorni piovosi per il cinquantennio 1921-1970*. Bolzano.
- 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 Geologica, 59, 105-126, 15 ff.
- TONINI D. (1963) - *Il Ghiacciaio del Calderone del Gran Sasso d'Italia*. Boll. CGI, ser. 2, 10, 71-135, 31 ff.