

MANUELA PELFINI (\*) & CLAUDIO SMIRAGLIA (\*\*)

## FATTORE AAR (ACCUMULATION AREA RATIO), VARIAZIONI FRONTALI E RELAZIONI CON IL CLIMA SUI GHIACCIAI DELLE ALPI LOMBARDE (\*\*\*)

**ABSTRACT:** PELFINI M. & SMIRAGLIA C., *AAR Factor, snout variations and climatic fluctuations on the glaciers in the Alps of Lombardy (Italy)* (IT ISSN 0391-9838, 1995).

The AAR factor (Accumulation Area Ratio) represents a good synthetic glacier balance indicator. The AAR factors for a sample of glaciers in the Lombard Alps are compared. This sample was selected from the World Glacier Inventory (unpublished data referring from 1981-82) and from the Catasto dei Ghiacciai Lombardi, published in 1992 by the Servizio Glaciologico Lombardo. The AAR changed from a mean of 0,62 to 0,27, and therefore, from a small positive or zero balance to a negative balance. We think that the two situations are indicative of the evolution of glaciation in Lombardy over recent decades. As is demonstrated through the examination of the snout variations of several glaciers, this period saw a phase of expansion that culminated in the latter part of the 1970's, followed by a recession phase that is still on-going.

The analysis of the data from the Sondrio and S. Caterina Valfurva stations has afforded the identification of a cold phase, after a warm and wet period up until the beginning of the 1950's, which continued until the mid 1980's, when there was another rise in temperatures.

**KEY WORDS:** Glaciology, Glaciers and climate fluctuations, Italian Alps.

**RIASSUNTO:** PELFINI M. & SMIRAGLIA C., *Fattore AAR (Accumulation Area Ratio), variazioni frontali e relazioni con il clima sui ghiacciai delle Alpi Lombarde* (IT ISSN 0391-9838, 1995).

Il Fattore AAR (*Accumulation Area Ratio*) rappresenta un buon indicatore sintetico del bilancio glaciale. Vengono confrontati i fattori AAR di un campione di ghiacciai delle Alpi Lombarde tratti dal *World Glacier Inventory* (dati inediti del 1981-82) e dal Catasto dei Ghiacciai Lombardi, pubblicato nel 1992 dal Servizio Glaciologico Lombardo. I valori di AAR sono passati da un valore medio di 0,62 a 0,27, quindi da un bilancio in pareggio o positivo a un bilancio negativo. Si ritiene che le due situazioni siano indicative dell'evoluzione del glacialismo lombardo degli ultimi de-

cenni che ha visto, come viene dimostrato esaminando le variazioni frontali di alcuni ghiacciai, una fase di espansione culminata nella seconda metà degli Anni Settanta, seguita da una fase di regresso tuttora perdurante. L'analisi dei dati delle stazioni di Sondrio e di S. Caterina Valfurva permette di individuare, dopo un periodo caldo e umido fino all'inizio degli Anni Cinquanta, una fase fredda che si prolunga fino alla metà degli Anni Ottanta, quando si verifica un ulteriore rialzo termico.

**TERMINI CHIAVE:** Glaciologia, Fluttuazioni glaciali e climatiche, Alpi Italiane.

### 1. INTRODUZIONE

Numerose sono le metodologie per determinare la dinamica di un apparato glaciale; fra quelle tradizionalmente più usate vi è sicuramente il monitoraggio delle variazioni di lunghezza, in pratica la misura dell'arretramento o dell'avanzamento della fronte. Le variazioni frontali rappresentano però l'ultima fase di una complessa catena di scambi di massa e di energia e implicano quindi un tempo di risposta molto variabile, che ne rende difficile il raccordo con le situazioni climatiche.

Il «bilancio di massa», derivante per ogni anno idrologico dalla differenza fra l'entità dell'accumulo e dell'ablazione, dovrebbe invece essere più facilmente correlabile con i parametri meteorologici e costituire soprattutto per il breve periodo un indicatore efficace della tendenza del clima. La determinazione del bilancio di massa per un numero notevole di ghiacciai implica però un impegno logistico ed economico notevolmente superiore a quello necessario per il monitoraggio delle variazioni frontali sullo stesso campione. In tempi recenti si sono dunque sviluppati tentativi di individuare un parametro sintetico che lo potesse sostituire e che potesse anche giovare delle foto aeree.

Le misure dirette del bilancio di massa consentono di determinare la linea di equilibrio (ELA, *Equilibrium Line Altitude*), l'isoipsa cioè che divide la zona del ghiacciaio dove prevale l'accumulo da quella dove prevale l'ablazione. Tale linea si abbassa negli anni in cui il bilancio tende alla

(\*) Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio dell'Università di Milano.

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

(\*\*\*) Lavoro eseguito nell'ambito della convenzione 1993 fra il Comitato Glaciologico Italiano e l'Azienda Energetica Municipale di Milano e pubblicato con fondi MURST 40% (Resp. prof. S. Belloni). Gli autori ringraziano i sigg. V. e D. Vitalini che hanno cortesemente fornito i dati meteorologici di S. Caterina Valfurva. Il lavoro è stato elaborato congiuntamente dai due autori; per quanto riguarda la stesura del testo si precisa che M. Pelfini è autore dei paragrafi 1 e 2, C. Smiraglia dei paragrafi 3 e 4.

Tabella 1 - Fattore AAR secondo il WGI  
Table 1 - AAR Factor according to the WGI

gruppo montuoso	numero ghiacciai	AAR medio	AAR max	AAR min.	$\epsilon$
Tambò-Stella	2	0,50	0,52	0,41	0,02
Bernina-Disgrazia	10	0,53	0,79	0,21	0,17
Piazzzi-Campo	5	0,69	0,83	0,50	0,15
Cevedale	16	0,74	0,85	0,65	0,05
Adamello	5	0,49	0,67	0,42	0,08
Orobìe	3	0,53	0,67	0,45	0,12
Lombardia	41	0,62	0,85	0,21	0,15

positività, mentre si innalza quando il bilancio tende ad essere negativo. La linea di equilibrio rappresenta dunque un buon indicatore delle variazioni del bilancio di massa netto annuo. La sua posizione si colloca ad un'altitudine variabile in funzione del rapporto esistente fra l'estensione del bacino di accumulo e quella del bacino di ablazione. Numerosi autori, tra i quali LA CHAPELLE (1962) e MEIER & POST (1962), hanno sottolineato la stretta correlazione fra bilancio di massa e percentuale della superficie del ghiacciaio in accumulo rispetto alla superficie totale alla fine dell'estate. È stato così proposto il Fattore AAR (*Accumulation Area Ratio*), che si ricava dalla formula

$$AAR = \left( 1 - \frac{\text{area di ablazione}}{\text{area totale}} \right) \times 100$$

e può essere espresso con un numero decimale come rapporto fra l'area di accumulo e l'area totale di un ghiacciaio oppure con un numero intero come semplice percentuale dell'area di accumulo rispetto all'area totale.

Secondo MEIER & POST (1962) un fattore AAR compreso fra 0,5 e 0,7 indicherebbe un ghiacciaio in equilibrio, con un bilancio netto cioè uguale a zero, mentre valori superiori a 0,8 corrisponderebbero a un bilancio positivo. Per HOINKES (1971) il bilancio in equilibrio sarebbe indicato da un AAR = 0,7, mentre MÜLLER *et Alii* (1976) nel Catasto dei Ghiacciai Svizzeri hanno proposto un valore di 0,67. Attualmente è quest'ultimo il valore più accettato per i ghiacciai alpini, che indica un rapporto 2:1 fra l'estensione del bacino collettore e quella del bacino ablatore (GROSS & Alii, 1977; BRAITHWAITE & MÜLLER, 1980)<sup>1</sup>.

(<sup>1</sup>) Qualora non si disponga di dati rilevati direttamente sui ghiacciai, ma si possa ricostruire attraverso la cartografia e attraverso metodi geomorfologici l'estensione degli apparati glaciali in diverse epoche, è possibile, utilizzando un AAR = 0,67 e costruendo la curva ipsografica di un ghiacciaio, determinare le variazioni altimetriche della linea di equilibrio nell'intervallo di tempo corrispondente e ricavare indicazioni anche sulle variazioni climatiche che hanno determinato la risalita o l'abbassamento della linea di equilibrio. Il metodo è usato soprattutto per il confronto fra la situazione attuale e la Piccola Età Glaciale. A titolo di esempio, nel settore lombardo dell'Ortles-Cevedale, applicando un AAR = 0,67  $\pm$  0,05 alla cartografia IGM recente, la linea di equilibrio varierebbe fra i 2915 m della Valle dei Vitelli e i 3136 m della Val Cedech. La ricostruzione dell'estensione dei ghiacciai durante la PEG e l'applicazione di un AAR = 0,67 porterebbe la linea di equilibrio da un minimo di 2779 per la Valle dei Vitelli a un massimo di 3014 per la Valle di Rosole. L'innalzamento della ELA sarebbe mediamente di poco superiore ai 100 m (PELFINI, 1992).

Per i ghiacciai di minori dimensioni, che in particolari situazioni possono trovarsi totalmente al di sopra del limite delle nevi, LLIBOUTRY (1965) suggerisce per un bilancio in equilibrio un AAR di 0,5.

## 2. IL FATTORE AAR PER I GHIACCIAI DELLE ALPI LOMBARDE

Per i ghiacciai delle Alpi Lombarde sono disponibili due catasti recenti. Il primo è stato realizzato all'inizio degli Anni Ottanta in occasione della partecipazione italiana al *World Glacier Inventory* (a cura di SMIRAGLIA & CATASTA, inedito), mentre il secondo è stato pubblicato all'inizio degli Anni Novanta (SERVIZIO GLACIOLOGICO LOMBARDO, 1992). I dati sui vari ghiacciai sono stati raccolti con metodologie alquanto diverse; per il WGI si è operato soprattutto su foto aeree a colori del 1981 e 1982 con alcuni controlli sul terreno, mentre per il SGL i dati provengono essenzialmente da rilievi di campagna. Si ritiene tuttavia che i due lavori presentino possibilità di confronto e soprattutto permettano di individuare due fasi diverse della dinamica recente del glacialismo lombardo.

Fra i vari parametri presentati nei due catasti si è scelto il fattore AAR che, come detto più sopra, offre con buona approssimazione indicazioni sul bilancio glaciale.

Sul WGI il fattore AAR non è presentato direttamente; è tuttavia ricavabile da altri parametri quali l'area del bacino di ablazione e l'area totale. Sui 305 ghiacciai e glacionevati elencati nel WGI, è possibile ricavare il fattore AAR per una quarantina di apparati. Il campione, seppur limitato, può considerarsi sufficientemente significativo. Vi sono comprese infatti tutte le tipologie dei ghiacciai lombardi, se si eccettua il ghiacciaio di altopiano dell'Adamello con le sue lingue radiali, e la distribuzione del campione è confrontabile con quella dell'intero universo (il Gruppo del Cevedale, ad esempio, che conta il maggior numero di ghiacciai e la superficie glacializzata complessiva più vasta delle Alpi Lombarde, è il più rappresentato anche nel campione del WGI).

Il numero di ghiacciai-campione distribuito per gruppi montuosi è indicato nella tab. 1 insieme al valore medio dell'AAR, al valore massimo, al valore minimo e allo scarto quadratico medio.

Pur tenendo conto che ogni ghiacciaio costituisce per tipologia, alimentazione, morfologia, un individuo a sé stan-

Tabella 2 - Fattore AAR secondo il SGL (campione completo)  
Table 2 - AAR Factor according to the SGL (whole sample)

gruppo montuoso	numero ghiacciai	AAR medio	AAR max	AAR min.	ϵ
Tambò-Stella	2	0,28	0,36	0,20	0,11
Bernina-Disgrazia	20	0,29	0,44	0,15	0,11
Piazzì-Campo	15	0,47	0,91	0,17	0,24
Cevedale	26	0,23	0,53	0,01	0,23
Adamello	10	0,29	0,45	0,16	0,10
Orobic	6	0,24	0,28	0,20	0,03
Lombardia	79	0,30	0,91	0,01	0,16

Tabella 3 - Fattore AAR secondo il SGL (campione confrontabile con il WGI)  
Table 3 - AAR Factor according to the SGL (only the sample wich can be compared to the WGI)

gruppo montuoso	numero ghiacciai	AAR medio	AAR max	AAR min.	ϵ
Tambò-Stella	2	0,28	0,36	0,20	0,11
Bernina-Disgrazia	10	0,23	0,43	0,17	0,08
Piazzì-Campo	5	0,58	0,91	0,31	0,25
Cevedale	16	0,23	0,53	0,03	0,14
Adamello	5	0,25	0,37	0,16	0,10
Orobic	3	0,23	0,28	0,20	0,04
Lombardia	41	0,27	0,91	0,03	0,15

te e che la dinamica dei grandi ghiacciai vallivi è sensibilmente differente rispetto a quella dei piccoli apparati di circo, i dati medi della tabella si prestano ad alcune considerazioni generali.

È possibile, ad esempio, constatare che i valori medi dei singoli settori montuosi sono pari o superiori a 0,50, con l'unica eccezione del Gruppo dell'Adamello, dove comunque il valore è di poco inferiore (0,49), mentre per l'intera Lombardia la media è di 0,62. Nonostante la scarsa dispersione dei valori, come è indicato dal limitato scarto quadratico, si osservano settori montuosi dove la percentuale dell'area di accumulo è elevata. Si distingue a questo proposito il Gruppo del Cevedale con un AAR medio di 0,74; se si esaminano i singoli apparati si arriva a valori superiori a 0,80 come il Ghiacciaio del Palon della Mare (0,82) e il Ghiacciaio della Sforzellina, dove è stato registrato l'AAR in assoluto più elevato (0,85). Lievemente più bassi sono i valori medi dei gruppi montuosi più esterni, sia meridionali, come le Orobic (AAR = 0,53), sia orientali, come l'Adamello (AAR = 0,49), sia occidentali, come il Tambò-Stella (AAR = 0,50).

La quasi totalità dei ghiacciai lombardi all'inizio degli Anni Ottanta presentava dunque un fattore AAR non inferiore a 0,50, per cui si può ipotizzare un bilancio in equilibrio o, in molti casi, positivo, in particolar modo nel Gruppo del Cevedale. Le uniche eccezioni riguardano tre ghiacciai del Gruppo Bernina-Disgrazia, in particolare il Preda Rossa, che presenta il fattore AAR più basso della Lombardia (0,21). Si tratta di un ghiacciaio vallivo nettamente esposto a Sud, stretto e allungato e soprattutto con un bacino superiore le cui dimensioni (in particolare la larghezza) non superano quelle del settore inferiore.

Va ricordato che sulle foto aeree utilizzate per il WGI, riprese nel 1981 e 1982, il limite inferiore dei bacini collettori appariva caratterizzato dalla classica zebraatura, con almeno tre fasce via via più scure verso valle, dovuta alla progressiva risalita annuale del limite delle nevi (e quindi della linea di equilibrio). Il fattore AAR è stato calcolato tenendo conto sia del limite inferiore del nevato (*firn-line*), sia della neve residua (*snow-line*); i suoi valori riflettono quindi una situazione media di poco antecedente all'anno della ripresa aerofotografica.

Nelle tabb. 2 e 3 viene invece indicata la distribuzione del fattore AAR secondo il Catasto SGL, i cui rilievi sono stati compiuti fra il 1989 e il 1991. In particolare la tabella 2 comprende tutti i ghiacciai per i quali viene presentato il fattore AAR, mentre nella tab. 3 ci si limita agli apparati per i quali è possibile un confronto con i valori del WGI della tab. 1. Come si vede, il campione di ghiacciai è quasi raddoppiato, mentre il fattore AAR medio per tutta la Regione è praticamente dimezzato (da 0,62 a 0,30).

È tuttavia dal confronto delle tabb. 1 e 3, dove sono stati considerati gli stessi ghiacciai, e dalla tab. 4, che si possono trarre le osservazioni più interessanti. Si constata innanzitutto la radicale e globale diminuzione del fattore AAR, il cui valore medio passa da 0,62 a 0,27; la zona di accumulo sarebbe dunque diminuita mediamente del 56,5% in circa un decennio. Si confermano inoltre i risultati della tab. 2 e la validità del campione del WGI.

È anche mutata la gerarchia fra i vari gruppi montuosi. Il valore medio più elevato dell'AAR si colloca nel Gruppo Piazzì-Campo (0,58), un'anomalia nelle intere montagne

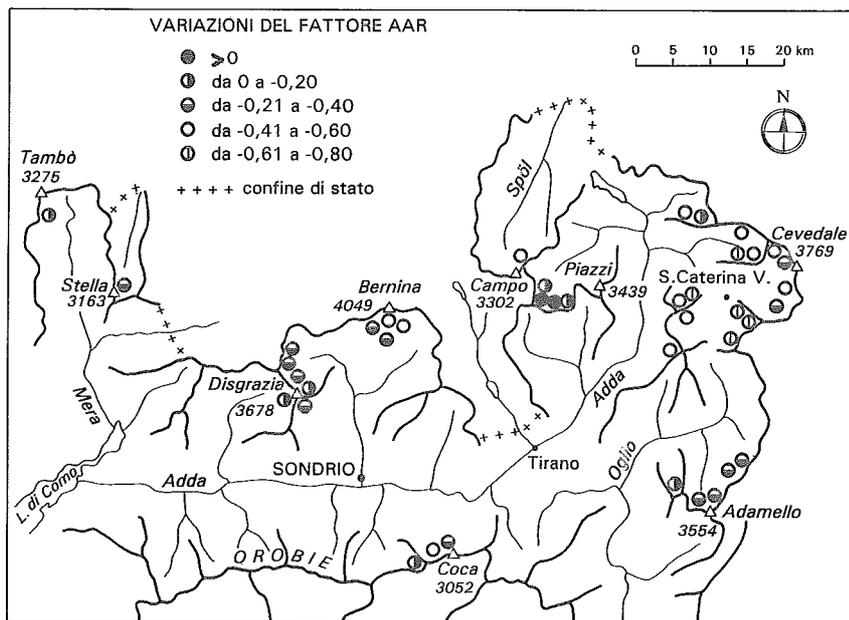


Fig. 1 - Le variazioni del Fattore AAR fra il 1980 e il 1990 sui ghiacciai lombardi. I cerchi indicano la localizzazione dei singoli apparati; sono indicate anche le stazioni meteorologiche utilizzate.

Fig. 1 - Variations of the AAR Factor between 1980 and 1990 on the glaciers of Lombardy. The circles correspond to the glaciers; the meteorological stations are also indicated.

Tabella 4 - Variazioni del fattore AAR fra il WGI e il SGL  
Table 4 - AAR Factor variations between the WGI and the SGL

gruppo montuoso	$\Delta$ medio AAR	$\Delta$ max AAR	$\Delta$ min. AAR	$\zeta$
Tambò-Stella	- 0,22	- 0,32	- 0,13	0,13
Bernina-Disgrazia	- 0,29	- 0,59	- 0,04	0,15
Piazzzi-Campo	- 0,13	- 0,54	- 0,16	0,27
Cevedale	- 0,51	- 0,80	- 0,17	0,16
Adamello	- 0,27	- 0,37	- 0,05	0,13
Orobie	- 0,29	- 0,47	- 0,17	0,16
Lombardia	- 0,35	- 0,80	- 0,16	0,21

lombarde. In questo settore i valori, che sono più dispersi rispetto agli altri gruppi ( $\zeta = 0,25$ ), vanno da un «normale» 0,31 per il Dosdè Orientale (un classico apparato dotato di un vasto bacino superiore e di una lingua che scende per circa 1 km) ad un «anomalo» 0,91 per il Dosdè Occidentale. Il bacino alimentatore di quest'ultimo occupa un pianalto posto al di sopra di 3000 m, da cui scende uno stretto scivolo di ghiaccio che alimenta il settore inferiore.

Per tutti gli altri settori delle montagne lombarde si hanno valori al di sotto di 0,30 con i minimi (0,23) nel Cevedale e nelle Orobie. Se si esaminano i dati dei singoli apparati, si osservano valori estremamente bassi, specialmente nel Cevedale, dove i Ghiacciai del Dosegù, della Sforzellina, del Tresero hanno rispettivamente valori di 0,09; 0,05; 0,03; ciò in pratica significa che la superficie dei bacini collettori è ridottissima e che la neve invernale residua è quasi inesistente. Ne consegue che il limite delle nevi è confinato nel settore più elevato del ghiacciaio o addirittura che la sua altezza supera la quota massima del ghiacciaio stesso.

Le variazioni del fattore AAR fra il WGI e il SGL sono indicate nella tab. 4 e nella fig. 1.

Appare evidente che la quasi totalità delle variazioni è di segno negativo con un valore medio per tutta la Lombardia di - 0,35. Anche in questo caso spicca la variazione limitata del Gruppo Piazzzi-Campo (- 0,13), cui si contrappone quella del Gruppo del Cevedale con - 0,51; per quest'ultimo la riduzione della zona di accumulo è stata dunque di quasi il 70%. L'indicazione che ne deriva è quindi di una sensibile modificazione globale in senso negativo dei bilanci glaciali fra la fine Anni Settanta-inizio Anni Ottanta e la fine Anni Ottanta-inizio Anni Novanta, una vera e propria transizione di fase del glacialismo lombardo. Sulle motivazioni estrinseche di questo fenomeno, in particolare sulle relazioni con i parametri climatici, si farà cenno più avanti.

Può invece essere opportuno a questo punto una riflessione sulle motivazioni intrinseche, sulle relazioni cioè con le caratteristiche dei singoli ghiacciai, in particolare per quanto riguarda i loro parametri morfometrici.

Sempre utilizzando le due fonti sopra indicate, in particolare il WGI, che rappresenta la situazione di partenza, per i 41 ghiacciai-campione si sono scelte alcune variabili

Tabella 5 - Correlazioni fra  $\Delta$  AAR e variabili morfometriche  
 Table 5 - Correlations between  $\Delta$  AAR and morphometrical parameters

	area totale	lunghezza max	quota max	quota min	quota mediana	AAR WGI
$\Delta$ AAR	- 0,07	0,04	- 0,21	- 0,41	- 0,11	- 0,59

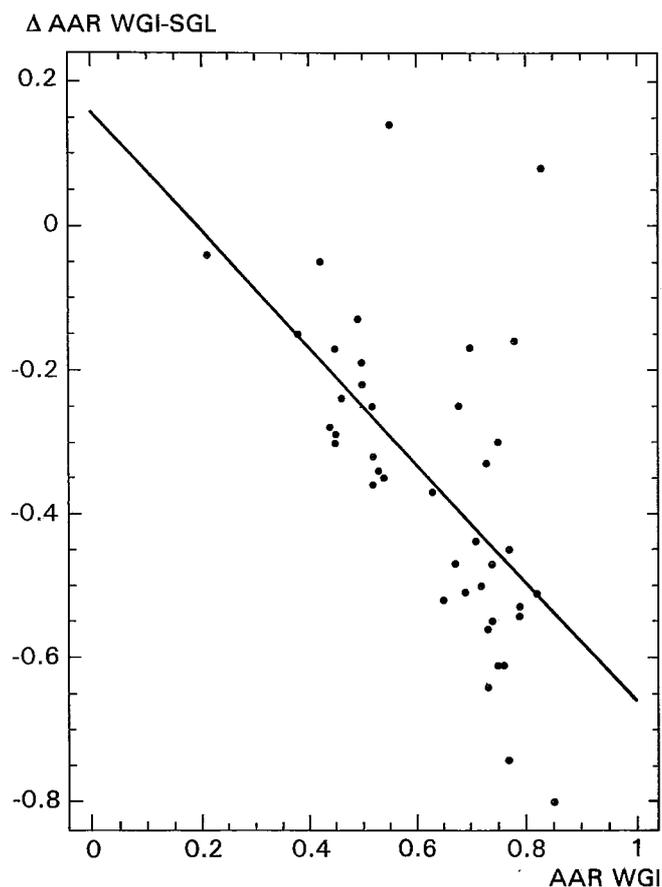


FIG. 2 - Correlazione fra Fattore AAR del *World Glacier Inventory* (AAR WGI) e variazione del Fattore AAR fra il *World Glacier Inventory* e il catasto del *Servizio Glaciologico Lombardo* ( $\Delta$  WGI-SGL).

FIG. 2 - Correlation between the *World Glacier Inventory* (WGI) AAR Factor and the AAR Factor variation between the WGI and the *Servizio Glaciologico Lombardo Inventory* ( $\Delta$  WGI-SGL).

da correlare con la variazione del fattore AAR, considerata variabile dipendente; si tratta dell'area totale, della lunghezza massima, della quota massima, della quota minima, dell'altezza mediana, del fattore AAR del WGI. Si è inoltre presa in considerazione l'esposizione del bacino collettore. Per quest'ultima si è proceduto a una correlazione qualitativa, di per sé poco significativa tenendo conto dell'anomala distribuzione in ottanti del campione; 29 ghiacciai (70,7%) sono infatti raccolti negli ottanti settentrionali, in particolare 14 nel settore NW, 9 in quello N e 6 in

quello NE. Ne risulterebbe una variazione dell'AAR medio rispettivamente di -0,48; -0,33; -0,21, contro un -0,45 per il settore SE (tre apparati), -0,34 per il settore SW (due apparati) e -0,59 per quello Sud (un apparato).

Per le altre variabili si è proceduto agli usuali calcoli di regressione lineare, che hanno dato i risultati presentati nella tab. 5. Come appare dalla tabella, le correlazioni sono tutte molto basse; alcune come quelle fra AAR e area totale o lunghezza massima, sono del tutto insignificanti, almeno dal punto di vista statistico. Più elevate sono quelle che legano la variazione del fattore AAR con la quota minima dei ghiacciai e con il fattore AAR di partenza (per quest'ultima  $r = 0,59$  e l'equazione corrispondente è  $y = 0,1594 - 0,8178 x$ ) (fig. 2).

Pur tenendo conto che si tratta di fenomeni complessi e che la loro evoluzione dipende da un sistema di variabili, si potrebbe ricavarne che in una fase di riduzione del glacialismo le variazioni del bacino collettore sono particolarmente influenzate dalle dimensioni iniziali del bacino stesso e dalla quota della fronte dei ghiacciai. Esempi probanti ai due estremi del campione possono essere rappresentati dai Ghiacciai della Sforzellina e di Preda Rossa. Per il primo, che aveva un AAR di partenza di 0,85, si ha una riduzione di 0,80; per il secondo, che partiva da 0,21, la riduzione è stata di 0,04.

### 3. LE CONDIZIONI CLIMATICHE

Una ipotesi di relazione fra le variazioni del fattore AAR e le variazioni meteorologiche si scontra con gli usuali problemi di raccolta dati in aree alpine (stazioni meteorologiche a basse quote e lontane dalle aree montuose glacializzate, serie di dati brevi oppure lacunose, metodologie non standardizzate di raccolta, etc.), oltre che, naturalmente, con le difficoltà intrinseche del problema.

In questo lavoro, dopo avere constatato un dato di fatto, cioè la riduzione massiccia delle percentuali delle zone di accumulo dei ghiacciai approssimativamente nell'arco del decennio 1980-1990, si è tentato di verificare in modo qualitativo se questo fenomeno trovasse una rispondenza nell'evoluzione climatica di breve e di lungo periodo. Si è operato su due sole stazioni, quella di S. Caterina Valfurva e quella di Sondrio. Entrambe sono situate in Valtellina, la prima nell'alta valle a 1740 m di quota nel cuore del Massiccio del Cevedale, la seconda nella media valle, a 298 m di quota, quasi nel centro geometrico delle Alpi Lombarde. Per S. Caterina Valfurva si è utilizzata la serie 1970-1993, mentre la serie storica di Sondrio copre quasi un ottantennio (1915-1993); entrambe hanno già fornito soddi-

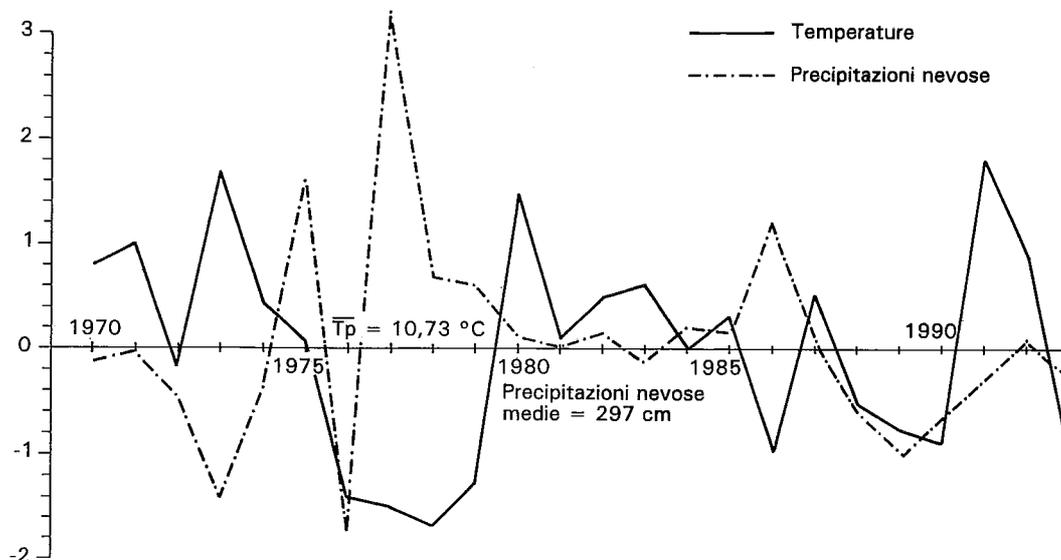


FIG. 3 - Stazione di S. Caterina Valfurva. Temperature medie estive (Giugno-Settembre) e precipitazioni nevose invernali (Ottobre-Maggio): scarti annui normalizzati dalla media 1970-1993.

FIG. 3 - Meteorological station of S. Caterina Valfurva. Mean summer temperatures (June to September) and snow winter precipitations (October to May): yearly normalized differences from the 1970-1993 average.

sfacenti risultati in altri lavori (BELLONI & Alii, 1986; PELFINI & SMIRAGLIA, 1992).

Si è ritenuto che i parametri maggiormente influenti sulle variazioni areali delle zone di accumulo dei ghiacciai e sui loro bilanci di massa fossero le temperature estive (Giugno-Settembre) per quanto riguarda l'ablazione e le precipitazioni invernali da Novembre ad Aprile per quanto riguarda l'accumulo (per S. Caterina Valfurva si è utilizzata l'entità delle precipitazioni solide da Ottobre a Maggio espresse in centimetri).

Per mettere in evidenza gli eventi meteo-climatici che hanno determinato dapprima l'incremento e successivamente il decremento areale delle zone di accumulo, sono state calcolate per S. Caterina Valfurva dal 1970 al 1993 anno per anno le medie delle temperature da Giugno a Settembre e successivamente la media Giugno-Settembre dell'intero periodo; per ogni anno sono stati poi calcolati gli scarti rispetto alla media. Nello stesso modo si è proceduto per l'entità delle precipitazioni invernali.

Per rendere confrontabili le due serie di dati, gli scarti sono stati normalizzati con la formula

$$\text{scarto} = \left( \frac{x_i - \bar{x}}{\zeta} \right)$$

dove  $x_i$  è il valore annuale,  $\bar{x}$  la media di tutto il periodo e  $\zeta$  lo scarto quadratico medio, e poi presentati nel grafico della fig. 3.

Dal grafico appare chiaro come gli anni dal 1970 al 1975 compreso siano stati poco favorevoli all'accumulo e alla sua conservazione nei bacini superiori dei ghiacciai; particolarmente sfavorevole deve essere stato il 1973 con temperature estive notevolmente superiori alla media (+ 1,9 °C) e nevosità di molto inferiore (-117 cm). La si-

tuazione si modifica nel 1976, quando, pur in presenza di un sensibile deficit di accumulo, la temperatura resta piuttosto bassa. È soprattutto il triennio 1977-1979 (ed in particolare l'Inverno 1976-77 in cui con 574 cm, + 174 cm rispetto alla media, si ha la massima intensità delle precipitazioni nevose) ad alimentare in misura massiccia i bacini collettori. Le temperature estive restano costantemente basse (nel 1978 con 8,94 °C si raggiunge il valore più basso di tutto il periodo 1970-1993 con uno scarto negativo di 1,9 °C rispetto alla media) e sono accompagnate da intense precipitazioni nevose (il massimo, come si è detto, si raggiunge nell'inverno 1976-1977). È questo l'evento registrato nei dati del WGI, che ha comportato un abbassamento del limite delle nevi, un incremento delle zone di accumulo, un elevato fattore AAR e quindi un bilancio positivo o almeno in pareggio (si ricordi che solo 9 ghiacciai sui 41 del campione WGI hanno un AAR inferiore a 0,50).

Seguono alcuni anni (1980-1985) in cui le precipitazioni oscillano intorno alla media, mentre le temperature, anche se di poco, sono quasi costantemente superiori alla media; il 1986 sembra essere l'ultimo anno favorevole al glacialismo con basse temperature ed abbondanti precipitazioni nevose.

Gli anni successivi sono caratterizzati da una notevole carenza di precipitazioni nevose (variazione negativa massima di 89 cm nel 1989), mentre le temperature estive mostrano un andamento contrapposto; relativamente elevate nel 1987, piuttosto basse nel 1988-1990 e molto elevate nel 1991, quando si raggiungono i valori più alti di tutto il periodo considerato (22,9 °C con uno scarto di + 1,82 °C). È questa la situazione registrata dal Catasto SGL, che, mediata fra il 1989 e il 1991, costituisce nel complesso una

Tabella 6 - Variazioni medie lineari in m di alcuni ghiacciai delle Alpi Lombarde (+ = progressi, - = regressi)  
 Table 6 - Media linear variation (in m) of some glaciers in the Alps of Lombardy (+ = progress; - = regression)

	Ventina	Fellaria W	Vitelli	Forni	Dosegù
	1923	1946	1921	1925	1925
	1950	1953	1950	1950	1950
	- 337	- 176	- 483	- 745	- 957
Anni					
1951	- 21	—	- 12*	- 16	- 17
1952	0	—	- 12*	- 9*	- 16*
1953	- 36	—	- 12*	- 9*	- 16*
1954	- 20	- 14	- 12*	- 9*	- 29*
1955	- 9*	- 43	- 12*	- 9*	- 29*
1956	- 9*	- 37	- 29*	- 9*	- 13
1957	- 20	- 18	- 29*	- 9*	- 11
1958	- 30	- 36	- 29*	- 9*	- 24
1959	- 19	0	- 10	- 34	- 14
1960	- 20*	- 18	- 17,5*	- 21	- 3,5*
1961	- 20*	- 11	- 17,5*	- 17	- 3,5*
1962	- 11	- 8	- 8	- 17*	- 5
1963	- 8	- 25	- 27	- 17*	+ 19
1964	- 131	- 7	- 30	- 17*	- 15
1965	- 90	- 10	- 7	- 15*	+ 4
1966	- 81	- 12	- 14	- 15*	- 20
1967	- 22,5*	- 8	- 4	- 65	+ 14
1968	- 22,5*	- 8,5*	0	- 20	+ 10
1969	- 22,5*	- 8,5*	- 26	0	- 9
1970	- 22,5*	- 10*	- 12	- 60	+ 1
1971	0	- 10*	- 23	0*	- 9
1972	0	- 10*	- 25	0*	+ 6*
1973	- 10	- 24	- 16	0*	+ 6*
1974	+ 27	0	- 17	0*	+ 6*
1975	+ 15	0	- 14	+ 20	+ 2
1976	+ 9	0*	- 1,5*	0	+ 14*
1977	0	0*	- 1,5*	+ 111	+ 14*
1978	+ 16	+ 8	+ 50	+ 13	+ 39
1979	- 2	+ 3	0*	+ 13	+ 13
1980	+ 12	+ 9	0*	+ 34	+ 13
1981	+ 8	+ 4,5*	+ 10	+ 37	+ 25
1982	+ 3	+ 4,5*	- 1	- 6	- 4
1983	+ 5	0	+ 15	- 5	+ 10
1984	+ 2	0	+ 11	+ 11	- 6
1985	+ 5	+ 1	0	- 16	+ 7
1986	+ 2	- 3	0*	+ 13	0*
1987	0	- 25	0*	0	0*
1988	+ 7	- 10	0*	- 82	0*
1989	+ 1	- 7	- 9	- 14	- 9
1990	- 9	- 17	- 5	- 61,5*	- 13
1991	- 1	- 13	- 21*	- 61,5*	- 30*
1992	- 11	- 12	- 21*	- 25	- 30*
1993	- 15	- 9,5	- 7	- 22	- 8*
1994	- 10	- 9,5	0	- 95	- 8*

\* valori mediati su più anni.

I dati originali sono pubblicati sul *Bollettino del Comitato Glaciologico Italiano* e dal 1978 su *Geografica Fisica e Dinamica Quaternaria*.

The original data are published in the *Bollettino del Comitato Glaciologico Italiano* and from 1978 in *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*.

fase negativa per il glacialismo lombardo. Gli accumuli sono troppo esigui, anche in concomitanza di estati fresche, per mantenere ampie zone di alimentazione, che divengono arealmente ridottissime o addirittura inesistenti nel caso di estati molto calde; si verifica quindi una risalita del limite inferiore delle nevi, che comporta una notevole riduzione del fattore AAR, passato, come si è visto sopra, da un valore medio di 0,62 a 0,27 con il conseguente bilancio negativo degli apparati glaciali.

#### 4. LE VARIAZIONI DEL FATTORE AAR NEL QUADRO DELLA DINAMICA GLACIALE E CLIMATICA DI LUNGO PERIODO

I valori del Fattore AAR presentati nei due catasti, e le loro variazioni, assumono una particolare significatività; riteniamo infatti che non si limitino a segnalare due situazioni concernenti un numero ridotto di anni, ma si propongano come indicatori di due vere e proprie fasi con-

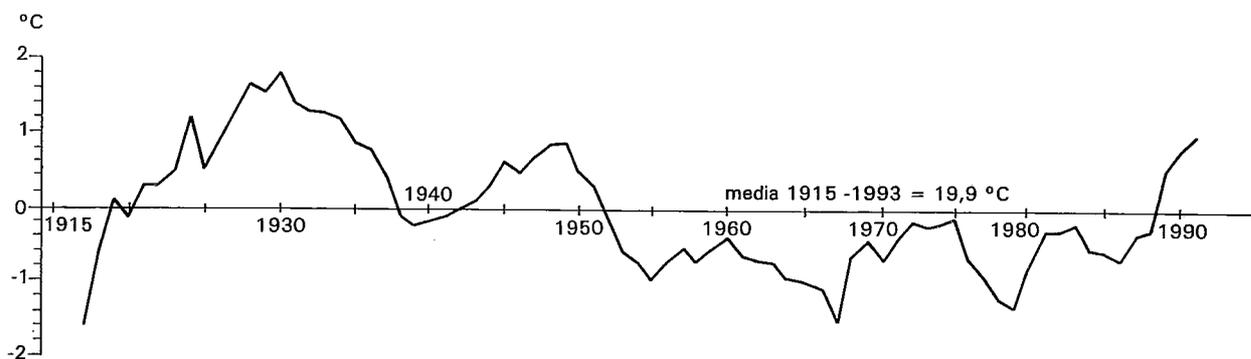


Fig. 4 - Stazione di Sondrio. Medie mobili di ordine cinque degli scarti dalla media 1915-1993 delle temperature medie estive (Giugno-Settembre).  
 Fig. 4 - Meteorological station of Sondrio. Mean summer temperatures (June to September): 5 year running means of the differences from the 1915-1993 average.

trapposte del glacialismo lombardo. Numerose altre evidenze di terreno permettono infatti di collocare i dati AAR in un contesto cronologico e glaciodinamico ben più vasto. Fattori AAR elevati sono indicatori, come si è accennato, di bilanci positivi, i quali a scadenza più o meno lunga devono portare ad un'espansione delle fronti glaciali; lo stesso fenomeno, evidentemente di verso contrario, deve verificarsi per fattori AAR piuttosto bassi.

Una conferma può derivare dal confronto con le serie delle oscillazioni frontali rilevate a partire dai primi decenni del nostro secolo a cura del Comitato Glaciologico Italiano. Nella tab. 6 sono presentate le variazioni frontali annuali di alcuni ghiacciai delle Alpi Lombarde a partire dall'inizio degli Anni Cinquanta, misurate da segnali fissi; nel caso vi siano più segnali per uno stesso ghiacciaio viene riportata la media delle varie misure. I valori medi di più anni sono riportati con asterisco. I dati originali sono pubblicati sul *Bollettino del Comitato Glaciologico Italiano* fino al 1978 e, successivamente, su *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*. Le variazioni si riferiscono a ghiacciai vallivi, dei quali il Ventina è situato nel Gruppo del Disgrazia, il Fellaria Occidentale nel Gruppo del Bernina, i Ghiacciai dei Vitelli, dei Forni e del Dosegù nel Gruppo del Cedevale.

Come appare dalla tabella, i ghiacciai delle Alpi Lombarde, della cui dinamica il campione proposto può essere considerato sufficientemente rappresentativo, erano già complessivamente in fase di regresso nei decenni precedenti il 1950. Dopo quest'anno essi mostrano tre fasi nettamente differenziate: 1) una fase di intenso e continuo ritiro dall'inizio degli Anni Cinquanta fino all'inizio degli Anni Settanta; 2) una fase di stasi e di progresso dall'inizio degli Anni Settanta alla fine degli Anni Ottanta (fa eccezione il Ghiacciaio del Dosegù, che comincia ad avanzare all'inizio degli Anni Sessanta); 3) una fase di regresso iniziata dai primi Anni Novanta e in corso tuttora.

Le differenze di morfologia e di esposizione degli oltre trecento ghiacciai delle Alpi Lombarde determinano differenze nella cronologia delle fasi, come appare chiaramente anche per i cinque ghiacciai della tab. 6. Si osservi ad esempio, oltre all'anticipo già citato del Dosegù, come

esistano solo due anni (1978 e 1981) in cui si registra un'avanzata per tutti e cinque gli apparati considerati e come la fase di progresso si smorzi prima per il Fellaria (la sequenza continua di regressi frontali inizia nel 1986) e più tardi per il Ventina (1990).

Al di là delle differenze temporali, la successione delle tre fasi può considerarsi in Valtellina e sulle intere Alpi Lombarde un fenomeno globale, come già evidenziato da PELFINI & SMIRAGLIA (1992). La fase di progresso e di stasi è dimostrata anche da evidenze morfologiche, in particolare da piccole morene frontali o latero-frontali presenti presso quasi tutti gli apparati. Tali morene che apparivano a contatto con la fronte o addirittura collocate sul limite estremo delle lingue, e quindi ancora attive, fra la metà degli Anni Settanta e la metà degli Anni Ottanta, sono attualmente situate a qualche decina di m dalle fronti. Si è quindi verificata la ripresa del generale regresso glaciale, come è dimostrato anche dai bilanci di massa realizzati sui ghiacciai lombardi, in particolare su quello della Sforzellina, che dal 1986/87 al 1992/93 ha perso una lama di equivalente in acqua di 5886 mm (BARSANTI & SMIRAGLIA, 1994).

L'analisi dei dati meteorologici della stazione di Sondrio, per la quale si dispone della serie storica 1915-1993, permette di correlare questa successione di eventi del glacialismo lombardo con i fenomeni climatici.

Nella fig. 4 sono presentate le medie mobili di ordine cinque degli scarti delle temperature medie estive (da Giugno a Settembre) rispetto alla media dell'intero periodo considerato (19,9 °C). È evidente come ci si trovi di fronte a due fasi termiche contrapposte. Un periodo caldo dal 1920 al 1950 (pur con una sensibile ondulazione verso temperature più basse nel 1940), che raggiunge i valori più elevati dell'intera sequenza verso il 1930, seguito da un periodo più fresco dall'inizio degli Anni Cinquanta fino alla fine degli Anni Ottanta (in questo secondo periodo le temperature più basse si registrano nella seconda metà degli Anni Sessanta e nella seconda metà degli Anni Settanta). Dal 1989 la temperatura tende a salire, con il massimo nel 1991, pur non raggiungendo i valori degli Anni Trenta. In estrema sintesi una pulsazione calda di circa un trentennio,

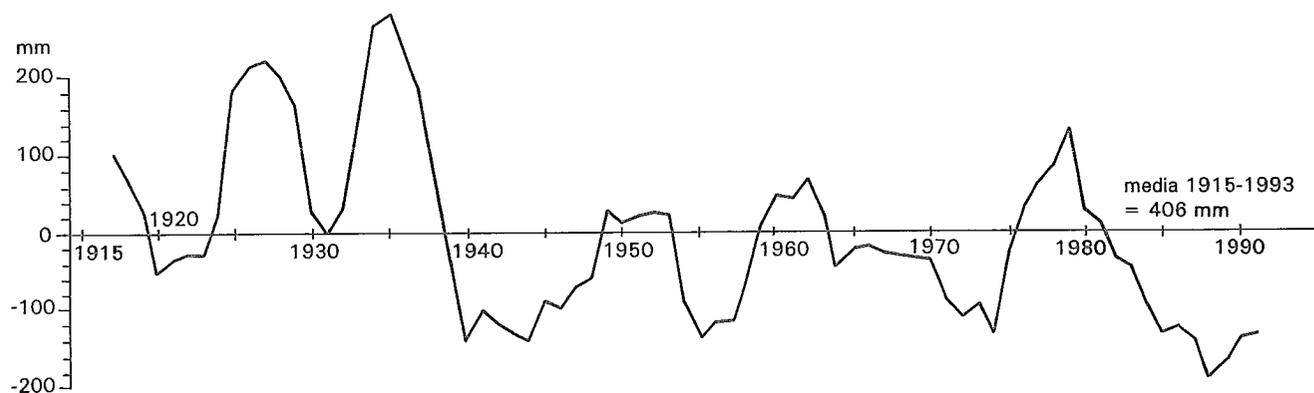


FIG. 5 - Stazione di Sondrio. Medie mobili di ordine cinque degli scarti della media 1915-1993 delle precipitazioni invernali (Novembre-Aprile).  
 FIG. 5 - Meteorological station of Sondrio. Winter precipitations (November to April): 5 year running means of the differences from the 1915-1993 average.

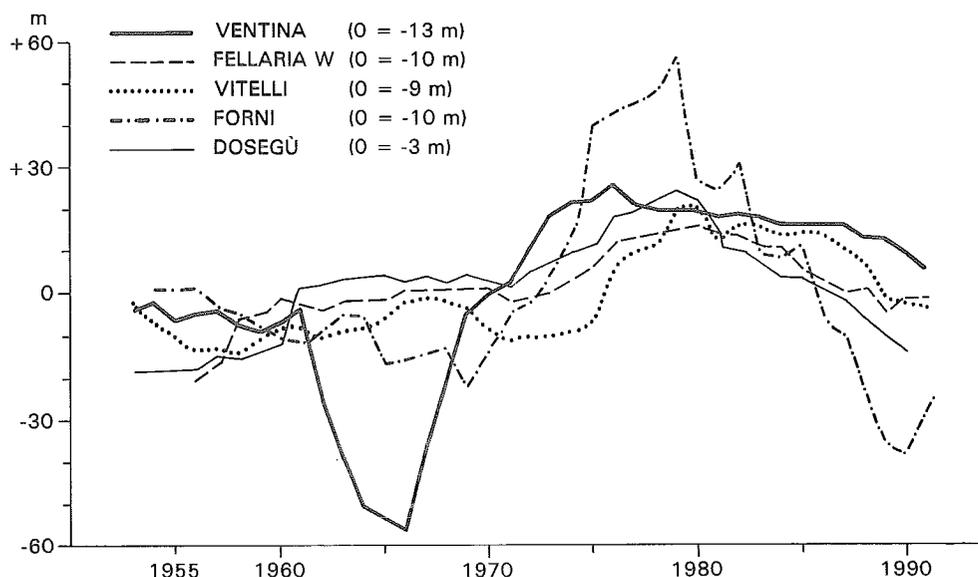


FIG. 6 - Variazioni frontali di cinque ghiacciai delle Alpi Lombarde. Medie mobili di ordine cinque degli scarti della media di lungo periodo (cioè dalla media delle variazioni frontali dall'inizio degli Anni Cinquanta all'inizio degli Anni Novanta, calcolata per ciascun ghiacciaio).  
 FIG. 6 - Termini fluctuations of five glaciers of the Alps of Lombardy. 5 year running means of the differences from 1950-1990 average of the termini fluctuations for each glacier.

seguita da una pulsazione fresca di poco più di un trentennio. Sembra quindi di poter individuare un'intera oscillazione climatica che, partendo da temperature meno elevate (evidenziate nel grafico solo per la seconda metà del primo decennio del nostro secolo), raggiunge l'acme negli Anni Trenta, inverte la tendenza a metà secolo, raggiunge l'acme negativo nella seconda metà degli Anni Sessanta, per poi invertire di nuovo la tendenza nella seconda metà degli Anni Ottanta.

L'andamento delle precipitazioni è molto più irregolare, e più difficilmente correlabile con le variazioni frontali, come appare dalla fig. 5. Qui sono indicate le medie mobili di ordine cinque degli scarti delle precipitazioni invernali (Novembre-Aprile) rispetto alla media 1915-1993 (406 mm).

Il periodo di maggiori precipitazioni si colloca nel quindicennio 1925-1940. Si osserva nel complesso che la fase più calda è anche la più umida e che fino al 1960 vi è una corrispondenza quasi perfetta fra periodi caldi (o meno freschi) e periodi umidi. Solo la seconda metà degli Anni Settanta è decisamente fresca e piovosa; successivamente, mentre le temperature tendono ad aumentare, le precipitazioni invernali calano decisamente.

I ghiacciai lombardi hanno reagito al trentennio caldo con una costante e intensa riduzione di superficie e di volume, che per gli apparati vallivi di maggiori dimensioni si è prolungata per circa un ventennio dopo l'inizio dell'inversione di tendenza. Questa si manifesta concretamente negli apparati glaciali con un'avanzata delle fronti,

il cui ordine di grandezza è di qualche decina di m (il massimo viene fatto registrare dal più grande ghiacciaio vallivo delle Alpi Italiane, quello dei Forni, con un progresso frontale fra il 1975 e il 1981 di 228 m). Nella seconda metà degli Anni Ottanta la fase di espansione si smorza con tempi più rapidi rispetto a quelli dell'incremento.

Nella fig. 6 questa evoluzione delle fronti è messa in evidenza per i cinque ghiacciai i cui dati sono riportati nella tab. 6. Le variazioni annuali sono espresse come medie di ordine cinque dello scostamento rispetto alla media delle variazioni frontali dall'inizio degli Anni Cinquanta all'inizio degli Anni Novanta. Si osservi la sostanziale similarità delle curve, che pongono l'inizio dello scostamento positivo dalla media all'inizio degli Anni Settanta con lo smorzamento e la conclusione dell'avanzata frontale nella seconda metà degli Anni Ottanta. Le uniche sensibili anomalie appaiono per il Ventina e i Forni. Il primo fra il 1964 e il 1966 fa registrare un arretramento di circa 300 m, a causa della frammentazione del settore terminale della lingua che si ritira a monte di una ripida emergenza rocciosa; per i Forni la curva registra l'eccezionale avanzata del 1977 (111 m), quando la fronte si riporta a valle del salto roccioso di quota 2400 m.

Assumendo il 1982 come anno di inizio del periodo in cui la temperatura comincia a salire, già nel 1990 le fronti dei cinque ghiacciai-campione sono in arretramento.

Tenendo conto degli scarti dalla media 1915-1993 misurati per la stazione di Sondrio e considerando il 1951 anno in cui inizia l'inversione di tendenza, è possibile affermare che la limitata fase di espansione glaciale sulle Alpi Lombarde è stata determinata dall'abbassamento medio annuo della temperatura media estiva di 0,65 °C per il periodo 1951-1981; per lo stesso periodo l'aumento medio annuo delle precipitazioni invernali sarebbe stato di 1,5 mm. La fase di regresso che ne è seguita sarebbe imputabile ad un aumento medio della temperatura media estiva di 0,23 °C per il periodo 1982-1993 e a una riduzione media di 90,6 mm delle precipitazioni invernali per lo stesso periodo.

La lieve espansione glaciale della seconda metà del nostro secolo non è tuttavia limitata alle Alpi Lombarde. È infatti ben documentata in altri settori montuosi delle Alpi Italiane, come nel Gruppo del Monte Bianco (CERUTTI, 1992), sulle Alpi Orientali (ZANON, 1991), sulle Alpi Austriache e Svizzere (PATZELT, 1985) ed è ascrivibile a quella che si può definire la fase «fredda» posteriore al 1950 (PINNA, 1991).

Per quanto riguarda una tendenza riferibile a tutto il globo è possibile affermare che a partire dal 1960 si è passati da un regime di riduzione del glacialismo ad un regime *misto*, se non di progresso generalizzato (WOOD, 1988), che si è poi interrotto nella seconda metà degli Anni Ottanta (IAHS-UNEP-UNESCO, 1993).

Il *World Glacier Inventory* e il *Catasto del Servizio Glaciologico Lombardo* hanno quindi colto rispettivamente l'acme della fase positiva e l'inizio di quella negativa, che sembra prolungarsi tuttora, inserendosi nel quadro generale di intensa deglaciazione in atto dal termine della Piccola Età Glaciale. Il confronto del Fattore AAR presentato in entrambi i catasti si conferma dunque indicativo di tutta l'evoluzione che ha interessato in questi ultimi decenni il glacialismo lombardo e permette significative correlazioni con le oscillazioni climatiche che quell'evoluzione hanno determinato.

## BIBLIOGRAFIA

- BARSANTI M. & SMIRAGLIA C. (1994) - *Alpine glaciers as indicators of climatic environmental fluctuations in progress: the example of the Ghiacciaio della Sforzellina*. Atti Primo Convegno Internazionale per la Protezione e lo Sviluppo dell'Ambiente Montano «Man and Mountain '94», Ponte di Legno, Italy, 20-24 Giugno 1994, 61-75, Galeati, Imola, 61-75.
- BELLONI S., CATASTA G. & SMIRAGLIA C. (1986) - *Parametri climatici e variazioni glaciali nel periodo 1950-1982*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 8, 97-123.
- BRAITHWAITE R.J. & MÜLLER F. (1980) - *On parametrization of glacier equilibrium line altitude*. IAHS-AISH, 126, 263-271.
- CERUTTI A.V. (1992) - *L'espansione dei ghiacciai italiani del Monte Bianco fra il 1962 e il 1990*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 15, 67-74.
- GROSS G., KERSCHNER H. & PATZELT G. (1977) - *Methodische Untersuchungen über die Schneegrenze in Alpenen Gletschergebieten*. Zeit. Gletscherk. Glazialgeol., 12, 223-251.
- HOINKES H.C. (1971) - *Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern*. Zeit. Gletscherk. Glazialgeol., 6, 37-89.
- IAHS-UNEP-UNESCO (1993) - *Fluctuations of glaciers 1985-1990*, Vol. VI, compiled by W. Haeberli and M. Hoelzle, World Glacier Monitoring Service, Zürich.
- LA CHAPELLE E. (1962) - *Assessing glacier mass budgets by reconnaissance aerial photography*. Journ. Glaciol., 4, 290-297.
- LLIBOUTRY L. (1965) - *Traité de Glaciologie*. 2 voll., Masson, Paris.
- MEIER M.F. & POST A.S. (1962) - *Recent variations in mass net budget of glaciers in Western North America*. IAHS, 58, 63-77.
- MÜLLER F., CAFLISCH T. & MÜLLER G. (1976) - *Firn und Eis der Schweizer Alpen*. ETH, 57, Zürich.
- PATZELT G. (1985) - *The Period of glacier advances in the Alps*. Zeit. Gletscherk. Glazialgeol., 21, 403-407.
- PELFINI M. (1992) - *Le fluttuazioni glaciali oloceniche nel Gruppo Ortles-Cevedale (settore lombardo)*. Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Scienze della Terra, Tesi di Dottorato IV ciclo, 1988-1991.
- PELFINI M. & SMIRAGLIA C. (1992) - *Recent fluctuations of glaciers in Valtellina (Italian Alps) and climatic variations*. Journ. Glaciol., 38, 309-313.
- PINNA M. (1991) - *Le variazioni recenti del clima (1800-1990) e le prospettive per il XXI secolo*. Mem. Soc. Geogr. Ital., 46, 9-68.
- SERVIZIO GLACIOLOGICO LOMBARDO (1992) - *Ghiacciai in Lombardia*, a cura di A. Galluccio e G. Catasta, Bolis, Bergamo, 368 pp.
- SMIRAGLIA C. & CATASTA G. (inedito) - *Data on glaciers of Lombardy for the World Glacier Inventory*.
- WOOD F.B. (1988) - *Global alpine glacier trend, 1960s to 1980s*. Arctic Alp. Res., 20, 404-413.
- ZANON G. (1991) - *Venti anni di progresso dei ghiacciai: 1965-1985*. Mem. Soc. Geogr. Ital., 46, 153-166.