

RICCARDO RABAGLIATI (*) & ROSSANA SERANDREI BARBERO (**)

POSSIBILITÀ DI IMPIEGO DEL REMOTE SENSING DA SATELLITE PER IL CONTROLLO ANNUALE DEI GHIACCIAI

ABSTRACT: The analysis of the glacier movements with the satellite imagery has been investigated and a procedure has been set up to obtain for each glacier: the surface, the perimeter and the length of the glaciers snout.

The surface of 720 glaciers of the Italian Alps has been estimated with an average deviation of 14 % and the surface evolution error is less than 20 % for 82 % of glaciers.

From the movements and lengths of the glaciers snout it has been obtained that the annual surface fluctuations of 74 % glaciers are detectable with the present spatial resolution in satellites images.

RIASSUNTO: Con l'intento di integrare il controllo dei ghiacciai dell'arco alpino per mezzo di immagini da satellite, una indicazione di massima dei risultati ottenibili e degli errori che si potranno commettere è stata ottenuta con un procedimento analitico di attribuzione di forma ai ghiacciai, per dedurne i perimetri e la lunghezza delle fronti.

La superficie di 720 ghiacciai dell'arco alpino è stata stimata con uno scarto medio del 14 % e ne è risultato per l'82 % di essi un errore di lettura della superficie minore del 20 %.

Dagli spostamenti e dalle lunghezze delle fronti si è ottenuto che il 74 % dei ghiacciai risulta osservabile annualmente, con l'attuale risoluzione spaziale nelle immagini da satellite.

TERMINI-CHIAVE: ghiacciai - teleosservazione - Erts-Landsat - classificazione - elaborazione dei dati.

PREMESSA

L'arco alpino copre una superficie di 17 500 000 ettari, di cui 320 000 ricoperti da ghiacciai.

Di essi, la superficie che interessa il territorio italiano è, secondo il Catasto dei Ghiacciai Italiani (CGI, 1959-1962) ed escludendo quelli indicati come estinti, 44 450 ettari relativi a 837 ghiacciai.

La campagna annuale di controllo interessa un centinaio di essi⁽¹⁾ su cui si hanno annualmente delle informazioni glaciologiche a carattere quantitativo.

Ci si è proposti di verificare la possibilità di integrare l'attuale quadro di osservazioni glaciologiche con dati da satellite.

INTRODUZIONE

I satelliti Landsat B e C sorvolano l'arco alpino ogni 18 giorni (tra loro sfasati di 9 giorni) registrandone le immagini⁽²⁾ in quattro bande dello spettro visibile e del-

l'infrarosso; dal confronto della risposta spettrale del suolo nelle diverse bande, possono essere analizzate e misurate separatamente le aree a ricoprimento boscoso, roccioso, nevoso, ecc.

La raccolta dei dati da satellite segue le direttrici N-S, E-W con una maglia di 40 m × 40 m. Questi rettangoli elementari detti pixel, opportunamente selezionati, forniscono l'area, il perimetro, le dimensioni trasversali massime e minime, l'estensione della fronte del ghiacciaio.

Il problema della lettura dell'estensione reale, e non della sua proiezione ortogonale, viene risolto (HAEFNER & SEIDEL, 1974) con processi digitali, associando i dati morfologici della zona in esame, a quelli rilevati dal satellite, precedentemente memorizzati negli archivi del calcolatore sul quale si stanno effettuando le analisi delle immagini da satellite.

La lettura delle aree ricoperte da neve viene realizzata (HOFFER, 1977) mediante tecniche di densità e processi digitali.

La individuazione dei ghiacciai nelle cinque bande⁽³⁾ ha caratteri differenziati: la banda MSS 7 (OSTREM, 1974) permette di distinguere, analogamente a quanto avviene nelle riprese aerofotogrammetriche, le aree ricoperte da neve residua da quella di ghiaccio affiorante, aree rispettivamente bianche e grigie; la lettura sulle bande MSS 5 e 7 (HOEFNER & SEIDEL, op. cit.) permette di distinguere il limite tra neve asciutta ed in via

(*) IBM, Centro Ricerca, Venezia.

(**) CNR, Laboratorio Studio Dinamica Grandi Masse, Venezia.

(1) 1972: 97 ghiacciai osservati; 1973: 158; 1974: 165; 1975: 88; 1976: 50.

(2) Queste unità di registrazione hanno una estensione di 180 × 180 km² e costo unitario di 300 000 lire. L'arco alpino è ricoperto da 6/8 fotogrammi.

(3) La posizione spettrale delle bande Landsat è:

banda 4	0,5- 0,6	µm
banda 5	0,6- 0,7	µm
banda 6	0,7- 0,8	µm
banda 7	0,8- 1,1	µm
banda 8	10,4-12,6	µm (solo Landsat C).

di scioglimento, in quanto la neve bagnata ha un maggior assorbimento di radiazioni vicine all'infrarosso.

Allo scopo di fornire un ordine di grandezza delle informazioni ottenibili e delle approssimazioni raggiungibili, nei paragrafi successivi descriveremo una semplice indagine sviluppata sui ghiacciai del territorio italiano per verificare se la lettura da satellite sia compatibile con i fenomeni in esame.

1. DATI UTILIZZATI

Degli 837 ghiacciai riportati nel Catasto dei Ghiacciai Italiani, esclusi quelli estinti, è stato rilevato ed inserito in un data-base del centro di calcolo il codice progressivo, la larghezza e la lunghezza massime, la superficie e, quando disponibile, la variazione annuale della fronte; non è stato possibile utilizzare il dato larghezza della lingua principale, determinante per la definizione dell'area nei ghiacciai di primo ordine, quasi sempre mancante.

Per le variazioni annuali, si sono considerati (VANNI, 1965-1971) i dati relativi al 1964, 1965, 1970, 1971, inserendo nel data-base uno degli spostamenti verificatisi; nel caso di misure riferite ad un periodo maggiore di un anno, si è considerato lo spostamento medio; non si è tenuto conto del segno dello spostamento.

Sono stati immediatamente esclusi dalle elaborazioni i ghiacciai per cui era sconosciuto uno dei parametri; successivamente quelli in cui la superficie era maggiore del prodotto $\text{lungh. max.} \times \text{largh. max.}$, in quanto non riproducibili con le forme di cui si dirà più avanti: è probabile che appartengano a questo gruppo gli apparati di tipo himalaiano.

In base a questa selezione, risultano esaminabili 720 ghiacciai dei quali in fig. 1 (curva A) è mostrata la distribuzione secondo la superficie.

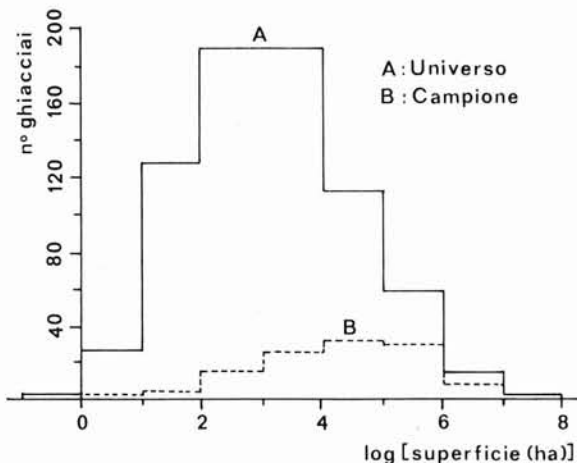


FIG. 1 - Istogramma delle superfici dei ghiacciai dell'arco alpino italiano.

2. SUPERFICI DEI GHIACCIAI

Minimizzando la media del valore assoluto degli scarti tra superficie calcolata e dichiarata, è stata operata una divisione dei ghiacciai in due gruppi: i ghiacciai in cui la superficie è maggiore del 60 % del prodotto $\text{lungh. max.} \times \text{largh. max.}$, sono stati rappresentati con una ellisse dove

$a = 0,5 \text{ lungh. max.}$
 $b = 0,5 \text{ largh. max.}$

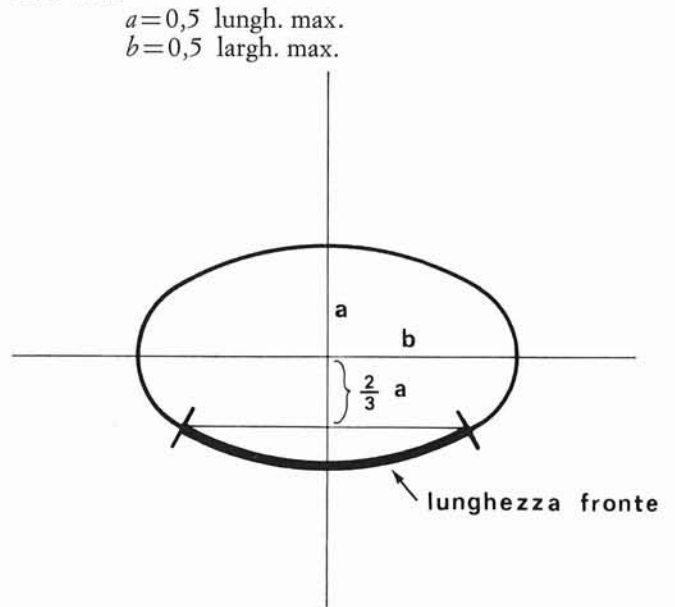


FIG. 2 - Rappresentazione schematica dei ghiacciai in cui la superficie è maggiore del 60 % del prodotto lunghezza massima per larghezza massima.

I ghiacciai nei quali la superficie data risulta minore del 60 % del prodotto $\text{lungh. max.} \times \text{largh. max.}$, sono stati rappresentati con due ellissi, dove

$$\begin{aligned} a &= 0,5 \text{ lungh. max.} \\ b &= c/3 \\ c &= 0,5 \text{ largh. max.} \\ d &= a/3. \end{aligned}$$

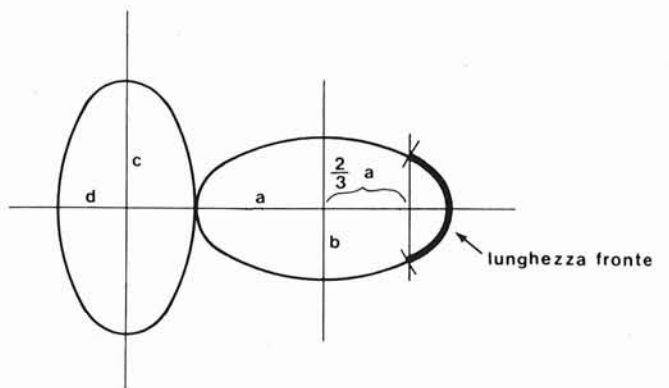


FIG. 3 - Rappresentazione schematica dei ghiacciai in cui la superficie è minore del 60 % del prodotto lunghezza massima per larghezza massima.

In prima approssimazione sembrano competere al primo gruppo i ghiacciai di secondo e terzo ordine (di circo, falda, pendio, sella, sommità, altopiano, ecc.) e al secondo gruppo quelli di primo ordine, dove i semiassi c e d definiscono il bacino collettore e i semiassi a e b le dimensioni della lingua valliva: ma la necessità di sceglierne il gruppo di appartenenza in base al minimo errore nel calcolo della superficie, rende questa corrispondenza solo parzialmente verificata.

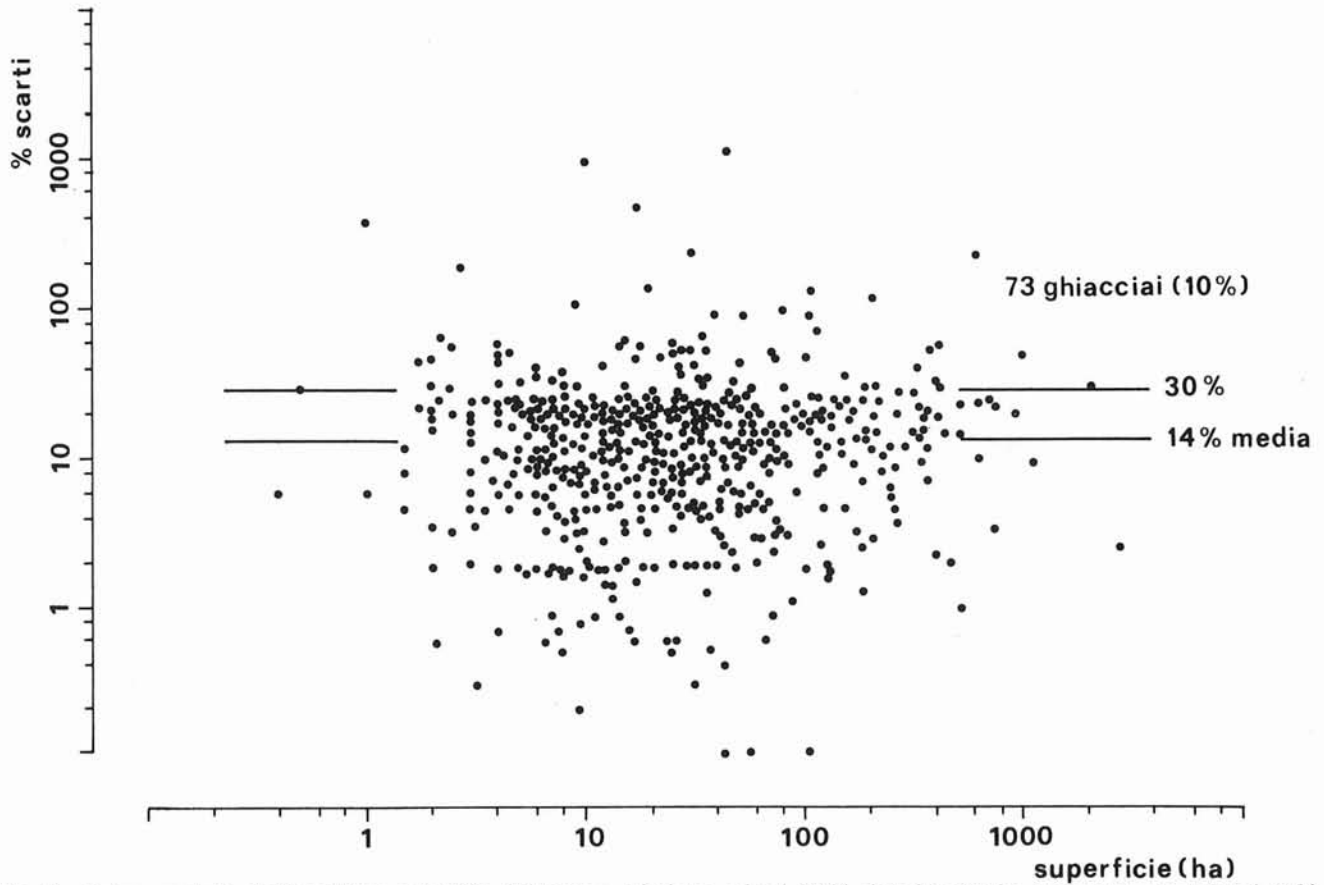


FIG. 4 - Valore assoluto degli scarti tra superficie dichiarata e calcolata: solo il 10 % dei ghiacciai ha uno scarto superiore al 30 %.

La superficie totale ottenuta è pari a 44 900 ettari contro i 44 450 dichiarati (CGI, op. cit.) e con uno scarto medio per ghiacciaio tra superficie calcolata e superficie reale, del 14 %. In fig. 4 è rappresentato l'andamento degli scarti in funzione della superficie: solo per il 10 % dei ghiacciai (73) si hanno errori che superano il 30 %.

Dalle superfici calcolate è stato ottenuto il numero di pixel che descrive ciascun ghiacciaio ed in particolare il numero di quei pixel che giacciono sul contorno (dati che saranno direttamente ottenibili dalle immagini Landsat). Assunto che l'errore commesso nel calcolare la superficie sia approssimativamente fornito da metà dei pixel che sono sul contorno, in fig. 5 è stato tracciato

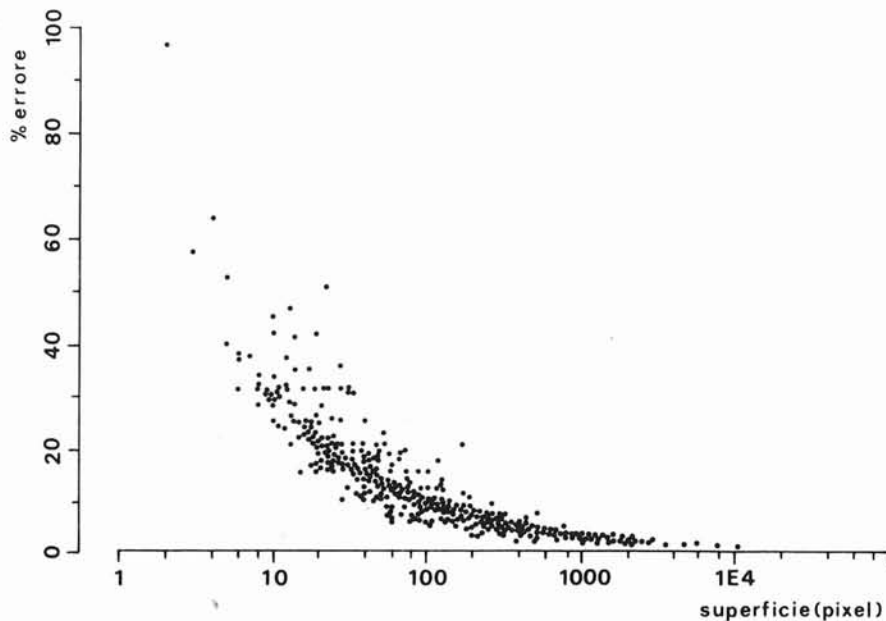


FIG. 5 - Distribuzione degli errori nella determinazione delle superfici dei ghiacciai.

l'andamento di tale errore in funzione del numero di pixel che descrive ciascun ghiacciaio.

In questa ipotesi, per altro largamente maggiorante per quanto concerne la definizione dell'errore che si può commettere nel determinare la superficie dei ghiacciai, nell'82 % dei casi l'errore è inferiore al 20 %.

3. VARIAZIONI DI SUPERFICIE

Esclusi i ghiacciai innevati o stazionari, i valori disponibili di spostamento annuo della fronte sono risultati 115; com'è osservabile in fig. 6, la maggior parte attorno ai 10 m, e tra i 20 m ed i 40 m.

Le dimensioni dei 115 ghiacciai campione si distribuiscono (fig. 7) rispetto alle dimensioni di tutti i ghiacciai in esame (fig. 8), in modo sufficientemente omogeneo per considerare il campione rappresentativo dell'universo; dalla fig. 1 si ha una ulteriore conferma di questa rappresentatività, confrontando gli istogrammi delle superfici del campione (curva B) e dell'universo (curva A).

È quindi possibile estendere a tutto l'arco alpino le considerazioni relative alle variazioni delle superfici dei ghiacciai del campione.

A questo scopo si consideri la lunghezza della fronte dei ghiacciai campione, come indicato nelle figg. 2 e 3; moltiplicando tale valore per il rispettivo spostamento

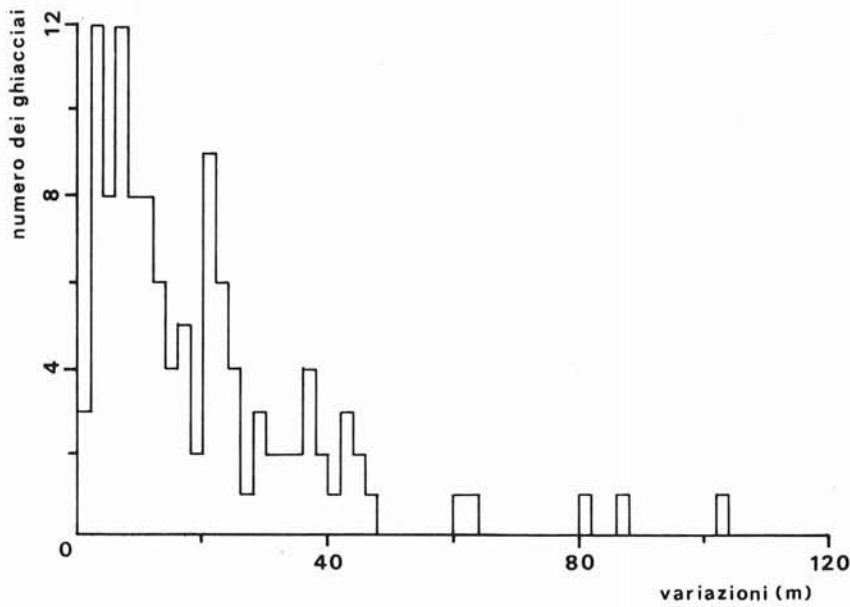


FIG. 6 - Istogramma degli spostamenti delle fronti.

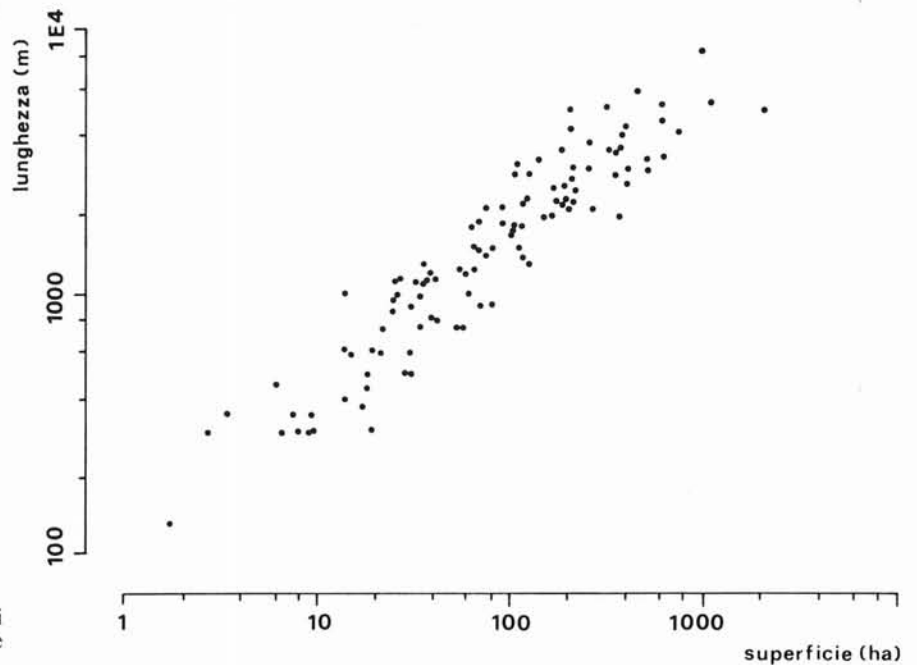


FIG. 7 - Distribuzione delle lunghezze dei ghiacciai del campione in funzione delle superfici.

annuo, si ottiene una stima della variazione annua di superficie. In fig. 9 tali variazioni sono rappresentate in funzione della superficie dei ghiacciai a cui si riferiscono: si noter  che solo per i ghiacciai pi  piccoli potranno verificarsi problemi per l'individuazione delle variazioni di superficie.

In pratica la variazione di superficie di un ghiacciaio sar  direttamente misurata per confronto tra due immagini registrate dal satellite al termine di due successive stagioni di ablazione; considerato quindi l'attuale potere risolutivo dei satelliti, si assume che siano apprezzabili variazioni di superficie maggiori di un pixel.

Come risulta dal grafico di fig. 9 solo 30 ghiacciai

su 115 (26 %) presentano variazioni inferiori ad un pixel (semipiano destro della retta di fig. 9).

Possiamo concludere che il 74 % dei ghiacciai dell'arco alpino italiano   osservabile nei suoi movimenti con una campionatura annuale.

CONCLUSIONI

Ricostruita la superficie dei ghiacciai attraverso semplici forme ellittiche   stato stimato mediante il perimetro l'errore possibile nel misurare la superficie dalle immagini Landsat.

FIG. 8 - Distribuzione delle lunghezze dei ghiacciai dell'arco alpino italiano in funzione delle superfici.

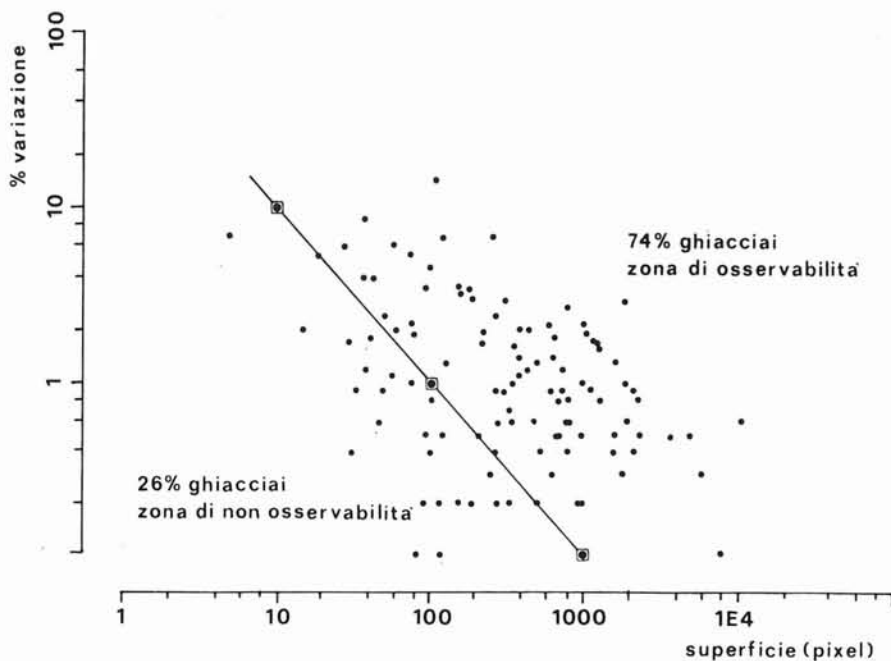
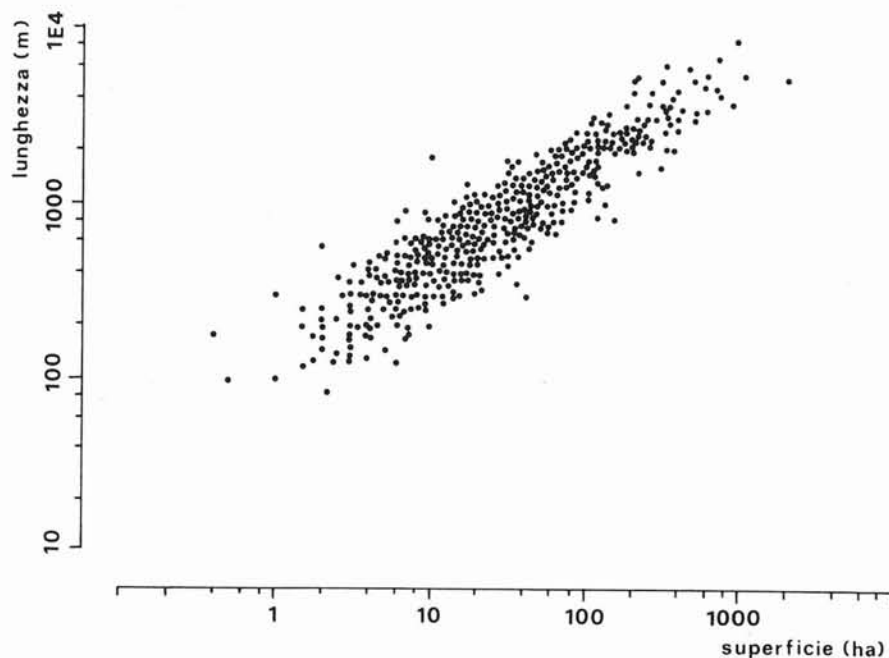


FIG. 9 - Andamento percentuale delle variazioni delle superfici dei ghiacciai nel campione esaminato.

Si è trovato che tale errore è per l'82 % dei casi inferiore al 20 %.

Desunta dalla descrizione dei ghiacciai una stima della lunghezza delle fronti è stata valutata la variazione annua di superficie dei ghiacciai.

Assunto 1 *pixel* come limite inferiore dell'osservabilità delle variazioni di superficie, rientrano nell'osservabilità annuale il 74 % dei ghiacciai.

Viste le dimensioni dei ghiacciai ed i loro valori di variazione annua è quindi possibile integrare a costi relativamente bassi, le attuali informazioni relative allo spostamento delle fronti, con errori che risultano ragionevolmente contenuti.

A ciò va aggiunta la possibilità di effettuare la lettura delle registrazioni su bande differenziate: in particolare, l'analisi della risposta in banda 7 fornisce il limite fra neve residua e ghiaccio; tale limite al termine della stagione di ablazione coincide con la *linea di equilibrio*, determinante ai fini del bilancio di massa e, in ultima

analisi, della valutazione delle risorse idriche su scala regionale.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- COMITATO GLACIOLOGICO ITALIANO (1959-62) - *Catasto dei Ghiacciai Italiani*. 1-4, Torino.
- HAEFNER H. & SEIDEL K. (1974) - *Methodological aspects and regional examples of snow-cover mapping from Ertis-1 and Erep imagery of the Swiss Alps*. ESRO, Proc. Symp. Frascati, Neuilly, 155-164.
- HOFFER R. M. (1977) - *Computer-aided analysis of satellite and aircraft MSS data for mapping snow cover and water resources*. Comm. Eur. Comm., Joint Res. Centre, Ispra, 1-31.
- OSTREM G. (1974) - *ERTS-1 images in Glaciology and Hydrology: Norwegian experience*. ESRO, Proc. Symp. Frascati, Neuilly, 165-172.
- VANNI M. (1965) - *Le variazioni dei ghiacciai italiani nel 1965*. Boll. Comit. Glac. It., ser. 2, 15, 3-8.
- VANNI M. (1971) - *Le variazioni dei ghiacciai italiani nel 1971 (1970-71)*. Boll. Comit. Glac. It., ser. 2, 19, 9-16.