

ANNA DELLA VENTURA (*), RICCARDO RABAGLIATI (**), ANNA RAMPINI (*)
& ROSSANA SERANDREI BARBERO (***)

CONTROLLO DELLE FLUTTUAZIONI DEI GHIACCIAI ALPINI MEDIANTE TELERILEVAMENTO DA SATELLITE

ABSTRACT: DELLA VENTURA A., RABAGLIATI R., RAMPINI A. & SERANDREI BARBERO R., *Satellite monitoring of Alpine glacier fluctuations* (IT ISSN 0084-8948, 1985).

Landsat digital images are processed by an interactive computer program (ISIID) from which information on glacier surface and morphology is obtained. The proposed method uses MSS (Multi Spectral Scanner) bands of visible and near infrared spectrum. It identifies standard bands 5 and 7 to get the best insight of both total and snow free glacier surfaces.

The method for digital images interpretation and glacier identification has been implemented by comparing the radiance maps with the ground topography; in particular the fixed structures along glacier boundaries were exploited. The digital image analysis is organized in four steps: pre-processing; total glacier and snow free glacier surfaces identification; recognition and classification of both accumulation basins and frontal areas by utilizing elevation data along glacier boundaries; multitemporal comparison of glacier surfaces using the coordinates of the fixed structures.

By means of these techniques glacier surfaces of Mount Disgrazia (Alpi Retiche, Italy) have been compared for different years to estimate frontal and snow line fluctuations.

RIASSUNTO: DELLA VENTURA A., RABAGLIATI R., RAMPINI A. & SERANDREI BARBERO R., *Controllo delle fluttuazioni dei ghiacciai alpini mediante telerilevamento da satellite* (IT ISSN, 0084-8948, 1985).

Mediante tecniche di analisi automatica di immagini digitali è possibile ottenere informazioni sulla estensione e sulla morfologia dei ghiacciai dalle immagini Landsat.

Il metodo proposto utilizza le registrazioni MSS (Multi Spectral Scanner) nello spettro del visibile e parzialmente dell'infrarosso individuando la miglior capacità di restituzione di superfici innevate o glacializzate nelle bande 5 e 7.

I criteri interpretativi dell'immagine digitale sono stati messi a punto mediante il confronto dei valori di radianza con le caratteristiche al suolo e il riconoscimento a priori di strutture fisse lungo il contorno dei ghiacciai per la loro individuazione.

La procedura di analisi si articola in quattro fasi: pretrattamento dei dati; identificazione della superficie dei ghiacciai e della loro area innevata; riconoscimento del bacino di accumulo e dell'area frontale; controllo nel tempo della superficie dei singoli ghiacciai, posti in relazione per mezzo delle loro strutture fisse.

Mediante questa tecnica è stato eseguito il confronto in anni diversi delle superfici dei ghiacciai del Monte Disgrazia (Alpi

Retiche), apprezzandone le fluttuazioni delle fronti e della linea di nevato.

TERMINI CHIAVE: ghiacciai, satelliti Landsat, teleosservazione.

1. PREMESSA

I satelliti della serie Landsat sono operanti dal 1972; essi, sincroni con il sole, registrano l'immagine di una data zona alla stessa ora e con una ciclicità di 18 giorni, o 9 nei periodi in cui hanno funzionato insieme il Landsat 2 e 3, sfalsati tra loro di 9 giorni. L'ultimo satellite della serie Landsat, il 4, lanciato nel Luglio '82, ha un intervallo tra due passaggi di 16 giorni.

I satelliti Landsat utilizzano il sistema di ripresa MSS (Multi Spectral Scanner) che misura la radiazione luminosa di ogni elemento di superficie terrestre (pixel) di 57×79 m in quattro bande spettrali: MSS-4 (verde: lunghezza d'onda 0,5-0,6 μm), MSS-5 (rosso: 0,6-0,7 μm), MSS-6 (da rosso a infrarosso vicino: 0,7-0,8 μm) e MSS-7 (infrarosso vicino: 0,8-1,1 μm). Il Landsat 3 aveva una quinta banda registrante nella parte di spettro dell'infrarosso termico.

Oltre al Multi Spectral Scanner, la serie Landsat utilizza un secondo sistema di sensori, il Return Beam Vidicon (RBV), la cui risoluzione al suolo nel Landsat 1 e 2 era simile a quella del MSS e nel Landsat 3 era di 40×40 m; il Landsat 4 effettua la registrazione RBV con risoluzione al suolo di 20×20 m e dispone inoltre del sensore Thematic Mapper, attualmente non operativo, che registra in 7 bande spettrali, con risoluzione al suolo di 30×30 m nelle 6 bande del visibile e dell'infrarosso e di 120×120 m nel canale IR termico.

Nonostante la sua alta risoluzione al suolo, la registrazione RBV non è normalmente utilizzata nell'elaborazione delle immagini Landsat per la forte influenza su di essa del velo atmosferico. I dati utilizzati dai vari Autori per lo studio di superfici innevate provengono esclusivamente dai sensori MSS (NASA, 1979). Le bande che si sono rivelate più sensibili nella ripresa di superfici glacializzate o innevate sono (Haefner in NASA, 1979; Wiesnet in NASA, 1979; PAGLIARI & ROSSI, 1980; DELLA VENTURA & alii, 1981) le bande MSS 5

(*) Istituto di Fisica Cosmica del CNR, Via Bassini, 15 A, 20133 Milano.

(**) IBM Italia, Galleria Giacomuzzi 6, 30100 Mestre-Venezia.

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

e 7, la cui risoluzione al suolo è sufficiente (RABAGLIATI & SERANDREI BARBERO, 1979) ad apprezzare le variazioni di superficie, legate alle fluttuazioni delle fronti, di gran parte dei ghiacciai alpini.

2. METODO DI STUDIO

2.1. Il primo approccio per l'analisi dei ghiacciai è consistito nel confronto tra l'immagine del Gruppo Badile-Disgrazia (Alpi Retiche) ottenuta dalle registrazioni Landsat mediante tecniche di trattamento di immagini digitali e le caratteristiche morfologiche dei singoli ghiacciai.

A questo scopo è stato preparato un reticolo in scala 1 : 25 000 con maglie di 57×79 m e su di esso sono stati contrassegnati i pixel con massimo valore di radianza in banda 5, che fornisce il miglior contrasto (Wiesnet in NASA, 1979) tra terreno libero e coperto da neve; il reticolo così contrassegnato è stato sovrapposto alla tavoletta IGM in scala 1 : 25 000.

I pixel distorti ai margini della scena per effetto del maggior cammino ottico e della curvatura terrestre sono già corretti sul nastro magnetico che contiene la registrazione; tuttavia la coincidenza dell'immagine registrata da satellite con la tavoletta topografica è buona solo su piccole distanze per i diversi fattori di imprecisione in gioco, quali, ad esempio, le diverse proiezioni usate per la superficie di riferimento delle immagini Landsat (conica conforme di Lambert) e per le tavolette IGM (cilindrica inversa di Gauss). Malgrado le inevitabili deformazioni geometriche, su singoli ghiacciai o su ghiacciai

vicini si riscontra una buona corrispondenza tra le superfici glacializzate e i pixel al più alto valore di radianza. È stato quindi possibile procedere al confronto tra le classi di radianza in banda 7, capace di distinguere delle sottozone all'interno delle aree evidenziate dalla banda 5, e le caratteristiche morfologiche dei ghiacciai.

I valori di radianza sulla superficie glacializzata mostrano (DELLA VENTURA & alii, 1981) uno stacco molto netto rispetto l'area al contorno quando si esaminano settori esposti al sole. Nell'area in ombra la zona di confine è più ambigua; tuttavia, dopo una prima graduale e moderata diminuzione dei valori di radianza corrispondente al cono d'ombra sul corpo del ghiacciaio, si osserva una brusca caduta a valori estremamente bassi corrispondenti a roccia o a materiale morenico in ombra, che hanno un alto potere di assorbimento della radiazione luminosa. Sulla superficie del ghiacciaio la banda 7 registra inoltre delle cadute di radianza in corrispondenza di affioramenti rocciosi; anche le zone di ghiacciaio fittamente crepacciate e le zone frontali libere da neve mostrano un'apprezzabile diminuzione dei valori di radianza.

2.2. Il gradino successivo è consistito nella messa a punto della procedura per l'analisi delle immagini digitali MSS. Tale procedura è stata definita (DELLA VENTURA & alii, 1982) mediante il sistema ISIID (Interactive System for Image Interpretation Definition) per il trattamento di immagini digitali riguardanti diversi campi di applicazione (CUGINI & alii, 1982). Essa si avvale, per l'individuazione delle superfici dei ghiacciai, di alcune loro strutture invariabili nel tempo: più esattamente, dei confini dei bacini di accumulo con le circostanti pareti in area esposta al sole; confini che per la loro natura sono pressoché fissi e lungo i quali la differenza di radianza tra l'area glacializzata e il fondo è massima.

Tali strutture fisse permettono inoltre il confronto tra immagini registrate in anni diversi.

L'applicazione in oggetto (fig. 1) del sistema ISIID ha come dati in entrata le immagini digitali Landsat fornite dalla ESRIN (European Space Research Institute, Frascati, Roma) e fornisce i criteri interpretativi con i relativi programmi; la procedura così definita si articola in quattro fasi:

a) pretrattamento delle immagini per l'eliminazione del rumore introdotto nei dati durante il processo di acquisizione;

b) identificazione delle superfici, ottenuta con tecniche di classificazione multispettrale;

c) riconoscimento e descrizione delle caratteristiche morfologiche con distinzione, mediante l'inserimento di alcuni punti quotati, del bacino di accumulo e della zona frontale;

d) confronto dei ghiacciai in anni diversi, ottenuto mediante l'uso delle loro strutture fisse limitanti i bacini di accumulo; esso permette la valutazione delle fluttuazioni della fronte, mediante il confronto dell'intera superficie, e delle fluttuazioni della linea del nevato, mediante il confronto della sola superficie innevata.

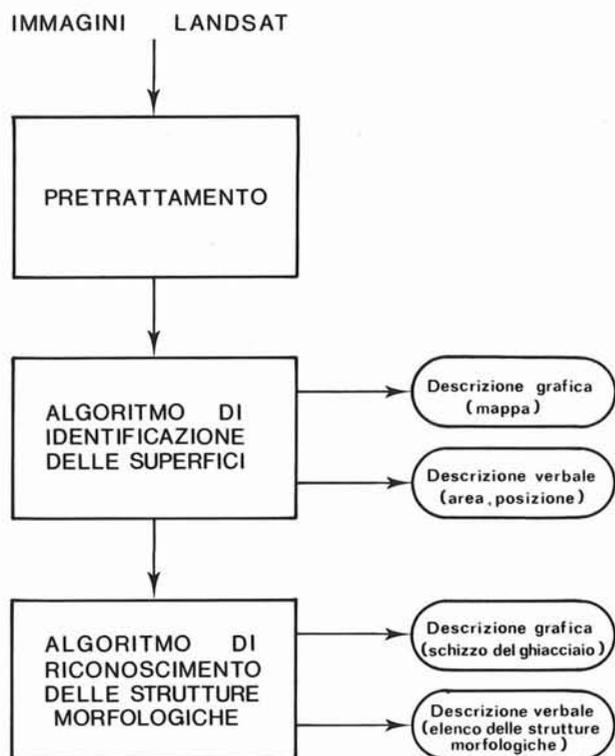


Fig. 1 Schema della procedura di interpretazione usata nell'analisi di superfici glacializzate.

3. RISULTATI

Il metodo illustrato è stato applicato a quei ghiacciai del Gruppo Badile-Disgrazia che si dispongono, con diverse orientazioni, attorno alla cima del Monte Disgrazia (3 678 m).

Si è fatto uso di finestre comprese nelle immagini Landsat MSS 209/28 del 13-9-1975, 28-8-1978 e 4-9-1980, date prossime al termine della stagione di ablazione.

Un primo confronto tra queste immagini ha evidenziato come i valori di radianza di anno in anno siano fortemente influenzati dalle diverse caratteristiche del velo atmosferico e da modifiche intervenute nella sensibilità dei sensori. In particolare, tra il 1975 e il 1980 i valori di alta radianza hanno subito una sensibile riduzione (DELLA VENTURA & *alii*, 1983a). I valori di ra-

dianza per ogni tipo di suolo abbracciano quindi una fascia piuttosto ampia che risente pesantemente delle condizioni atmosferiche e strumentali.

In fase di pretrattamento delle immagini digitali, sulle aree in saturazione sono stati calcolati i coefficienti di normalizzazione al massimo valore di radianza per i 6 sensori di ciascuna banda MSS.

Nella fase di identificazione delle superfici, il programma ha quindi affrontato i problemi connessi con le variazioni della radianza, modificando di anno in anno le sogliature utilizzate. Esso ha quindi estratto dalle immagini i singoli ghiacciai dando una classificazione della loro superficie su cui è chiaramente distinguibile (Φ STREM, 1974; DELLA VENTURA & *alii*, 1981; 1983a) la superficie libera da innevamento limitata a monte dalla linea del nevato.

TABELLA 1

SUPERFICIE TOTALE DEI GHIACCIAI DEL MONTE DISGRAZIA OTTENUTA DALLE IMMAGINI LANDSAT MMS DEL 13 SETTEMBRE 1975, 28 AGOSTO 1978 E 4 SETTEMBRE 1980 (da DELLA VENTURA & *alii*, 1983b).

numero di catasto (*)	nome del ghiacciaio (*)	superficie totale (km ²)			Δ 1975-1980
		1975	1978	1980	
408	di Predarossa	1,081	0,985	1,052	- 0,029
409	di Corna Rossa	0,046	0,051	0,036	- 0,010
410	di Cassandra Occidentale	0,293	0,313	0,368	+ 0,075
411	di Cassandra Orientale	0,492	0,616	0,641	+ 0,149
415	del Pizzo Rachele	non misurata			—
416	della Ventina	1,854	1,940	2,024	+ 0,170
417	del Canalone della Vergine	0,470	0,515	0,566	+ 0,096
419	del Disgrazia	2,438	2,732	2,890	+ 0,452
				totale	+ 0,903

TABELLA 2

SUPERFICIE INNEVATA DEI GHIACCIAI DEL MONTE DISGRAZIA OTTENUTA DALLE IMMAGINI LANDSAT MMS DEL 13 SETTEMBRE 1975, 28 AGOSTO 1978 E 4 SETTEMBRE 1980 (da DELLA VENTURA & *alii*, 1983b).

numero di catasto (*)	nome del ghiacciaio (*)	superficie innevata (km ²)			Δ 1975-1980
		1975	1978	1980	
408	di Predarossa	0,772	0,857	0,881	+ 0,109
409	di Corna Rossa	0,036	0,046	0,026	- 0,010
410	di Cassandra Occidentale	0,233	0,288	0,313	+ 0,080
411	di Cassandra Orientale	0,444	0,563	0,588	+ 0,144
415	del Pizzo Rachele	non misurata			—
416	della Ventina	1,384	1,267	1,097	- 0,287
417	del Canalone della Vergine	0,243	0,263	0,268	+ 0,025
419	del Disgrazia	1,562	1,380	1,431	- 0,131
				totale	- 0,070

(*) Catasto dei Ghiacciai Italiani (CGI, 1959-1962).

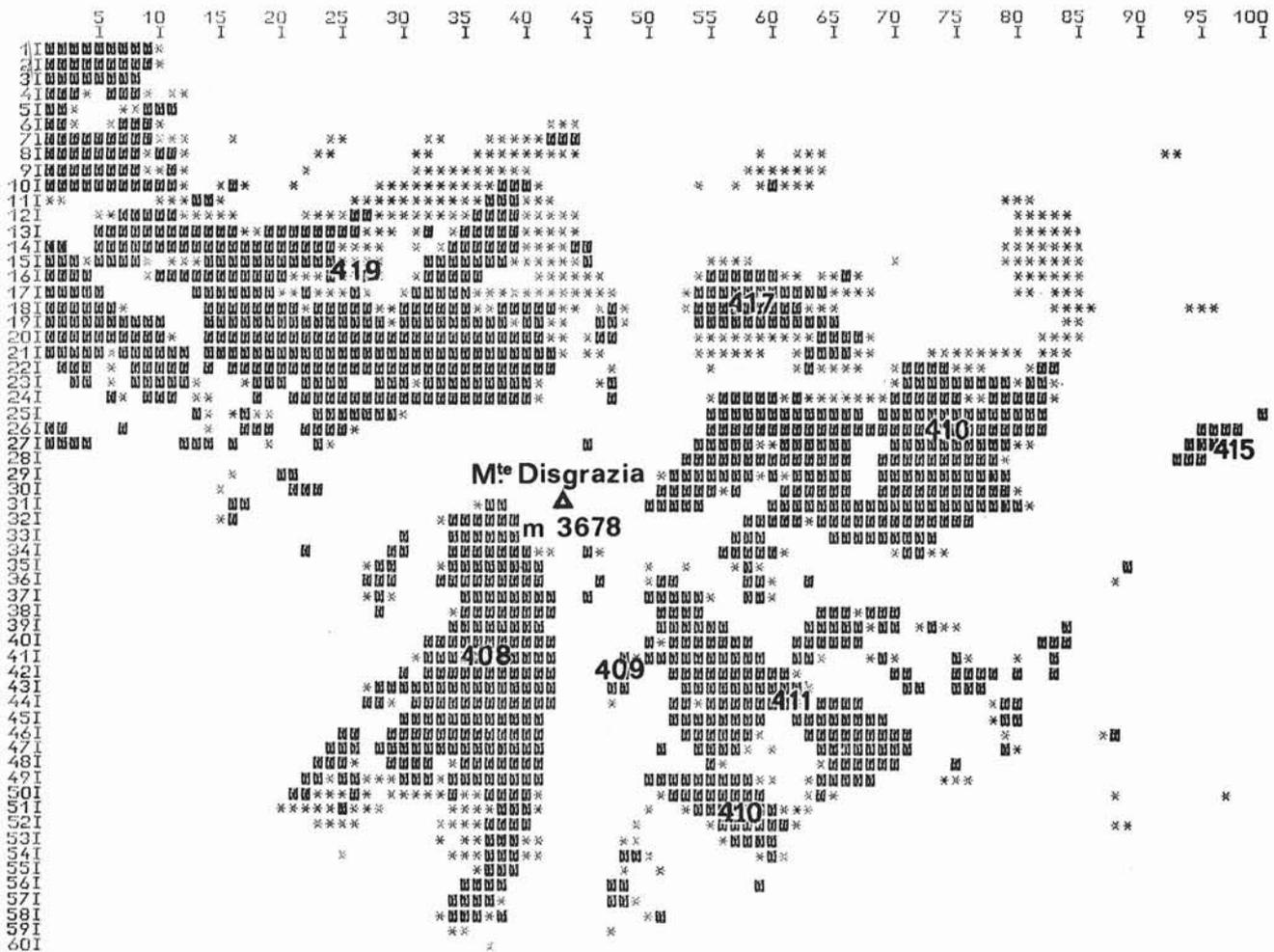


Fig. 2 - Superfici dei ghiacciai del Monte Disgrazia ottenute dall'immagine registrata dal satellite Landsat 2 il 13 Settembre 1975 (sull'elaborato sono stati riportati i numeri dei ghiacciai secondo il Catasto dei Ghiacciai Italiani (CGI 1959-1962)). I pixel più scuri hanno un più alto valore di radianza e corrispondono ad aree innevate.

Questa fase della procedura ha anche affrontato i problemi connessi con le diverse modalità di incidenza della radiazione luminosa; usando infatti sul gruppo in esame la stessa sogliatura, il Ghiacciaio del Disgrazia (419) ⁽¹⁾, esposto a Nord, non è riconoscibile nelle tre immagini analizzate. Si è fatto quindi uso, sulla sottofinestra dell'immagine contenente il Ghiacciaio del Disgrazia, di una sogliatura particolarmente bassa, vicina ai valori di radianza della roccia al contorno dei ghiacciai esposti a Sud-Est, cioè al massimo della radiazione luminosa.

Tenendo dunque conto delle oggettive variazioni dello strumento e della diversa risposta del terreno, è possibile ottenere una prima descrizione della qualità della superficie dei ghiacciai.

La fase di riconoscimento delle caratteristiche mor-

fologiche utilizza (DELLA VENTURA & alii, 1983a) alcuni punti quotati sul contorno dei ghiacciai, attraverso i quali è in grado di distinguere la zona di ablazione dal bacino di accumulo, e, in particolare, le aree a quota più bassa, lungo il cui contorno viene identificata la fronte.

Il confronto delle superfici dei ghiacciai è infine ottenibile (DELLA VENTURA & alii, 1983b) sia per diretta sovrapposizione delle immagini dei ghiacciai mediante l'uso delle loro strutture fisse, sia calcolando i valori di superficie nei diversi anni.

Per ottenere la superficie reale dalla sua proiezione ortogonale registrata sui nastri Landsat, è stato utilizzato il valore di inclinazione media indicato dal Catasto dei Ghiacciai Italiani (CGI, 1959-1962). I valori di superficie così ottenuti nei diversi anni, indicano tra il 1975 e il 1980 per i ghiacciai in esame un aumento complessivo di 0,9 km² (tab. 1); il limite tra nevato e ghiaccio è risultato ben distinguibile (fig. 2) special-

⁽¹⁾ Numero d'ordine del Catasto dei Ghiacciai Italiani (CGI, 1959-62).

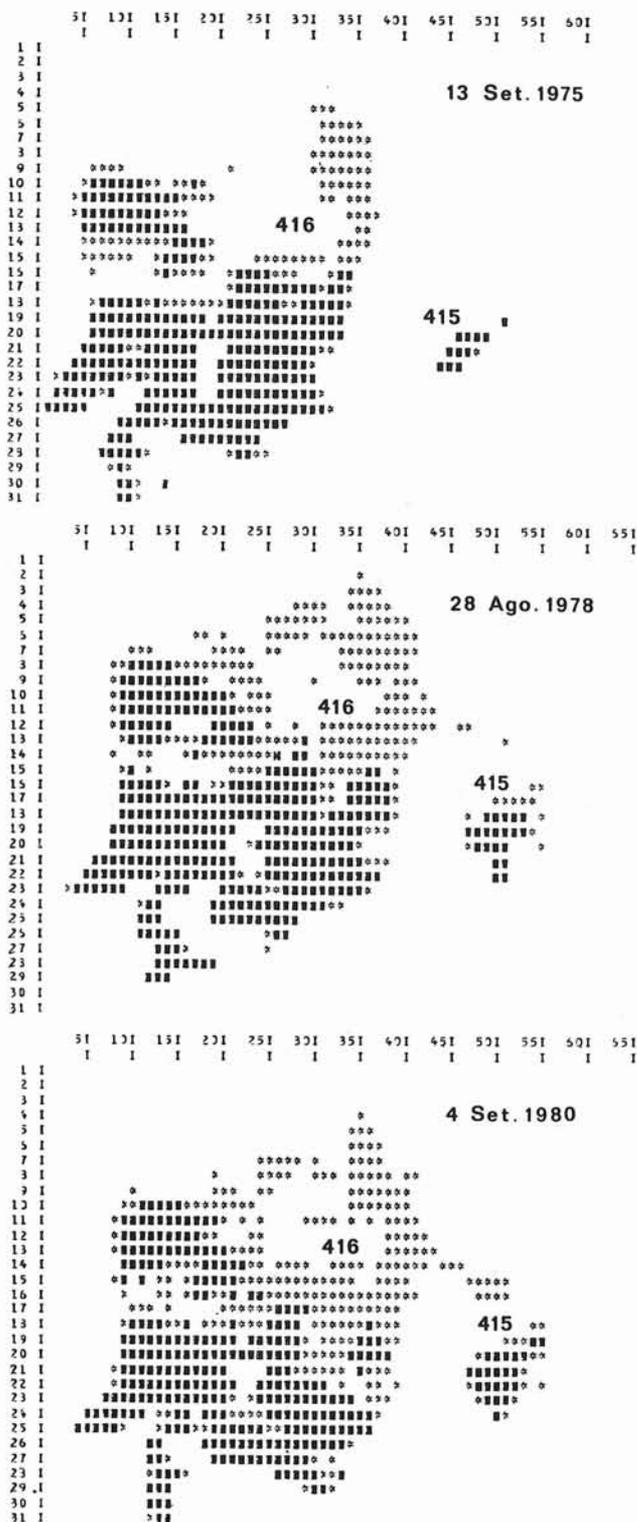


FIG. 3 - Ricongiungimento del Ghiacciaio del Pizzo Rachele (415) al Ghiacciaio della Ventina (416) testimoniato dalle immagini registrate dal satellite Landsat 2 il 13 Settembre 1975, 28 Agosto 1978 e 4 Settembre 1980.

mente sugli apparati esposti a Nord, la cui fronte è a quota sensibilmente più bassa della quota della linea di nevato negli anni analizzati ⁽²⁾.

I risultati quantitativi dell'analisi sono in buon accordo con la generale fase di avanzata delle fronti segnalata negli anni esaminati un po' dovunque sull'arco alpino, e in particolare sul Gruppo del Disgrazia, attraverso le tradizionali campagne di misura. In particolare il Ghiacciaio del Pizzo Rachele (415), di superficie così ridotta da risultarne la misura troppo imprecisa data l'attuale risoluzione al suolo, mostra tuttavia nelle immagini Landsat (fig. 3) la progressiva espansione, segnalata da CATASTA G. (in COMITATO GLACIOLOGICO ITALIANO, 1981), che l'ha portato a ricongiungersi, come negli anni '20, al Ghiacciaio della Ventina (416).

4. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

L'analisi di una serie di immagini digitali Landsat di un'area *test* dell'arco alpino ha permesso la definizione della procedura di descrizione automatica della superficie dei ghiacciai e degli algoritmi di riconoscimento delle loro strutture morfologiche.

Ogni immagine Landsat copre una superficie di 185×185 km e contiene in media un centinaio di ghiacciai; l'arco alpino italiano è coperto da 6/8 immagini. Il costo della procedura utilizzata (al 31 Dicembre 1983 L. 800 000 per immagine, oltre ai costi di calcolo) è confrontabile con i costi delle tradizionali campagne di misura.

L'analisi automatica delle immagini Landsat richiede tuttavia, a priori, l'individuazione dei singoli ghiacciai, che spesso, pur appartenendo alla stessa immagine, presentano risposte spettrali notevolmente diverse, e la realizzazione delle tabelle di coordinate dei punti di riferimento al suolo, costituiti dalle strutture fisse lungo il contorno dei ghiacciai: questo approccio mediato ha fino ad oggi differito l'uso estensivo delle registrazioni da satellite, il cui impiego si dimostra ricco di implicazioni per la disponibilità di serie temporali e per la copertura simultanea di ampie zone dell'arco alpino e a cui le tradizionali campagne di misura possono fornire la necessaria verifica al suolo.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- COMITATO GLACIOLOGICO ITALIANO (1959-1962) - *Catasto dei Ghiacciai Italiani*. 1-4, Torino.
- COMITATO GLACIOLOGICO ITALIANO (1976) - *Relazione della campagna glaciologica 1975*. Boll. del CGI, 24.
- COMITATO GLACIOLOGICO ITALIANO (1979) - *Relazioni della campagna glaciologica 1978*. Geogr. Fis. Din. Quat., 2 (2).
- COMITATO GLACIOLOGICO ITALIANO (1981) - *Relazioni della campagna glaciologica 1980*. Geogr. Fis. Din. Quat., 4 (2).
- CUGINI U., DELL'OCA M., MERELLI D. & MUSSIO P. (1982) - *A computer aided system for interactive definition of digital image interpretation*. 2nd Int. Conf. on Image Analysis and Processing, Selva di Fasano.

(2) Quota della linea di nevato nel Gruppo Badile-Disgrazia: 1975, 2 200 - 2 400 m (CGI, 1976); 1978, 2 300 - 2 500 m (CGI, 1979); 1980, attorno a 2 700 m (CGI, 1981).

- DELLA VENTURA A., MUSSIO P., RABAGLIATI R., RAMPINI A. & SERANDREI BARBERO R. (1981) - *Determination of the spectral signatures of a glacier*. International Colloquium on spectral signatures of objects in remote sensing, Avignon, INRA, vol. 5, 477-485.
- DELLA VENTURA A., RABAGLIATI R., RAMPINI A. & SERANDREI BARBERO R. (1982) - *An application of ISIID: Remote Sensing Observation of Glaciers*. Second Conference on Images Analysis and Processing, Novembre 1982, Selva di Fasano.
- DELLA VENTURA A., RABAGLIATI R., RAMPINI A. & SERANDREI BARBERO R. (1983a) - *Remote-sensing observation of glaciers towards their monitoring*. Seventeenth International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan May 9-13, pp. 723-733.
- DELLA VENTURA A., RABAGLIATI R., RAMPINI A. & SERANDREI BARBERO R. (1983b) - *Glacier monitoring by satellite*. Il Nuovo Cimento, 6 C, 211-222.
- NASA (1979) - *Operational applications of satellite snowcover observations*. Conference Publication n. 2116. Proceedings final workshop sponsored National Aeronautics and Space Administration and University of Nevada, Reno held at Sparks, Nevada April 16-17.
- PAGLIARI M. & ROSSI G. (1980) - *Considerations sur le rapport entre le climat et les variations volumétriques des glaciers: Marmolada et Caresèr (Alpes Orientales)*. C. R. 16me Congrès International Météorologie Alpine.
- RABAGLIATI R. & SERANDREI BARBERO R. (1979) - *Possibilità d'impiego del remote sensing da satellite per il controllo annuale dei ghiacciai*. Geogr. Fis. Din. Quat., 2, 35-40, 9 ff.