

MAURO GUGLIELMIN (*) & CLAUDIO TELLINI (*)

RILEVAMENTO DEL PERMAFROST CON IL METODO BTS (bottom temperature of the winter snow cover) NELL'ALTA VALTELLINA (Sondrio, ITALIA) (**)

ABSTRACT: M. GUGLIELMIN & C. TELLINI, *Permafrost mapping with BTS methodology in the Upper Valtellina (Sondrio Province, Italy)*. (IT ISSN 0391-9883, 1994).

At the end of the 1992 and 1993 winters, 285 BTS (Bottom Temperature of the Winter Snow Cover) measurements were carried out in four areas of the Upper Valtellina (Northern Italy). The BTS is a quick and unexpensive method to map the occurrence of permafrost and/or buried ice. This method is based on the fact that the surficial temperature of the ground beneath the snow cover at the end of the winter reflects the amount of heat stored by the ground during the summer season and the Earth heat flow.

According to literature values of BTS below -3°C point out the high probability of the occurrence of permafrost, whereas temperatures ranging between -1.7 and -3°C suggest its possible presence.

In the investigated areas the BTS temperatures range between 0.0°C and -10.1°C . In particular, very low BTS temperatures (min. -10.1°C ; max. -3.0°C) were recorded on rock glacier named Pizzo Filone III.

The measurements carried out in the studied areas indicated that the presence of permafrost is concentrated in active rock glaciers, polygenetic active alpine cones and subordinately in glacial deposits and inactive rock glaciers. The permafrost distribution is also irregular within active rock glaciers but it seems concentrated in their frontal and apical parts.

KEY WORDS: BTS, Alpine permafrost, Rock Glaciers, Central Alps.

RIASSUNTO: M. GUGLIELMIN & C. TELLINI, *Rilevamento del permafrost con il metodo BTS (Bottom temperature of the Winter Snow Cover) nell'Alta Valtellina (Sondrio, Italia)*. (IT ISSN 0391-9838, 1994).

(*) Istituto di Geologia, Paleontologia e Geografia, Università di Parma.

(**) Lavoro eseguito con il contributo del M.U.R.S.T. fondi 60% 1991 (Responsabile Prof. A. Clerici) e fondi 60% 1992 (Responsabile Prof. C. Tellini).

Desideriamo ringraziare vivamente l'Assessorato all'Energia e Protezione Civile della Regione Lombardia nella persona dell'Assessore Ing. Giancarlo Morandi, il Direttore del Centro Nivometeorologico Sperimentale di Bormio, Dott. Giovanni Peretti ed i tecnici Luigi Bonetti e Eraldo Meraldi, del Centro medesimo, che hanno collaborato materialmente all'acquisizione dei dati. Un ringraziamento particolare all'Ing. Gianangelo Bonfigli ed al Sig. Luigi Bossi, dell'Azienda Energetica Municipale di Milano, per l'appoggio logistico offertoci senza il quale l'acquisizione dei dati sarebbe stata oltremodo lunga e difficoltosa. Infine, si ringrazia la disegnatrice Edwige Masini che ha curato le figure nel testo di questo ed altri lavori.

Al termine delle stagioni invernali del 1992 e 1993 sono state eseguite 285 misure di BTS in quattro aree campione dell'Alta Valtellina (Sondrio). Il BTS è una metodologia relativamente semplice e piuttosto economica per individuare e cartografare preliminarmente la presenza di permafrost e/o ghiaccio sepolto.

Il metodo si basa sul principio che la temperatura alla base del manto nevoso, alla fine della stagione invernale, riflette la quantità di calore immagazzinata dal terreno durante l'estate ed il flusso di calore terrestre dell'area. In letteratura i valori di temperatura $\leq -3^{\circ}\text{C}$ indicano un'alta probabilità della presenza di permafrost e/o ghiaccio sepolto, mentre i valori compresi tra -1.7 e -3°C suggeriscono una sua possibile presenza.

Il campo dei valori di BTS misurati nelle quattro zone indagate va da $0,0^{\circ}\text{C}$ a $-10,1^{\circ}\text{C}$; le temperature più basse si sono registrate nell'area del Pizzo Filone, in particolare nel III rock glacier, dove si sono registrate temperature minime di $-10,1^{\circ}\text{C}$ e massime di $-3,0^{\circ}\text{C}$.

Si è osservato come il probabile permafrost interessi prevalentemente i rock glaciers attivi ed i coni detritici attivi d'ambiente alpino, costruiti da vari agenti morfogenetici quali valanghe, debris flows e gravità, e solo in modo subordinato i depositi morenici ed i rock glaciers ritenuti inattivi. La distribuzione del permafrost risulta però piuttosto irregolare anche all'interno dei rock glaciers attivi, con la tendenza a concentrarsi nelle zone frontali ed apicali.

TERMINI CHIAVE: BTS, Permafrost alpino, Rock Glaciers, Alpi Centrali.

PREMESSA

Negli ultimi anni l'interesse per le forme ed i processi crionivali ed in particolare per gli aspetti legati alla presenza del permafrost nelle aree alpine è in continuo aumento sia da parte della comunità scientifica che dai vari organismi preposti alla pianificazione e valorizzazione delle risorse del territorio montano.

Infatti, lo studio del permafrost sporadico riveste una notevole importanza sia nella possibilità di ricostruire le variazioni climatiche recenti e del passato (KERSCHNER, 1983; HAEBERLI & alii, 1993), sia nella valutazione del suo significato idrogeologico che nei riflessi tecnico-economici derivanti dalla sua degradazione (instabilità di manufatti e/o versanti) connessa a vari tipi di interventi antropici (HAEBERLI, 1992).

Tra le diverse metodologie utilizzabili per l'individuazione del permafrost montano il BTS (*Bottom Temperature of the Winter Snow Cover*) è una tra le più semplici e rapide da utilizzare. Il presente lavoro costituisce il risultato di un biennio di acquisizione di dati utilizzando questo metodo allo scopo di definire l'estensione del permafrost in alcune aree delle Alpi Centrali ed i suoi rapporti con le forme glaciali e periglaciali.

IL METODO BTS

La metodologia della misurazione della temperatura alla base del manto nevoso, nota comunemente come BTS, è stata introdotta negli anni '70 da ricercatori svizzeri, in particolare da HÄEBERLI (1973), ed è basata sul concetto che la copertura nevosa, quando sia sufficientemente potente, agisce come coibente termico isolando il suolo dalle variazioni di temperatura esterne ed impedendo gli scambi energetici tra suolo e atmosfera. La temperatura del suolo

così misurata, pertanto, dipende dal bilancio energetico della superficie del suolo stesso e tale bilancio è determinato da diversi fattori sia di tipo endogeno che esogeno.

I fattori endogeni sono da considerare praticamente immutabili nel tempo e sono legati alle proprietà termiche del substrato (roccioso e/o detritico), alle condizioni morfo-oro-topografiche che determinano l'entità dell'insolazione e all'entità del flusso di calore terrestre.

I fattori esogeni, mutabili nel tempo anche a scala stagionale, sono rappresentati dalle variazioni climatiche ed in particolare dalla quantità e distribuzione delle precipitazioni nevose.

Lo spessore della copertura nevosa e la sua variazione stagionale sono, in ambiente alpino di alta quota, i fattori più significativi per la temperatura della superficie del suolo e quindi, per la formazione, il mantenimento o la degradazione del permafrost. L'andamento stagionale delle precipitazioni nevose ha, infatti, un duplice effetto: quelle autunnali producono un rilevante aumento della temperatura media annua del suolo (KELLER & *alii*, 1993) mentre quelle tardoprimaverili la abbassano.

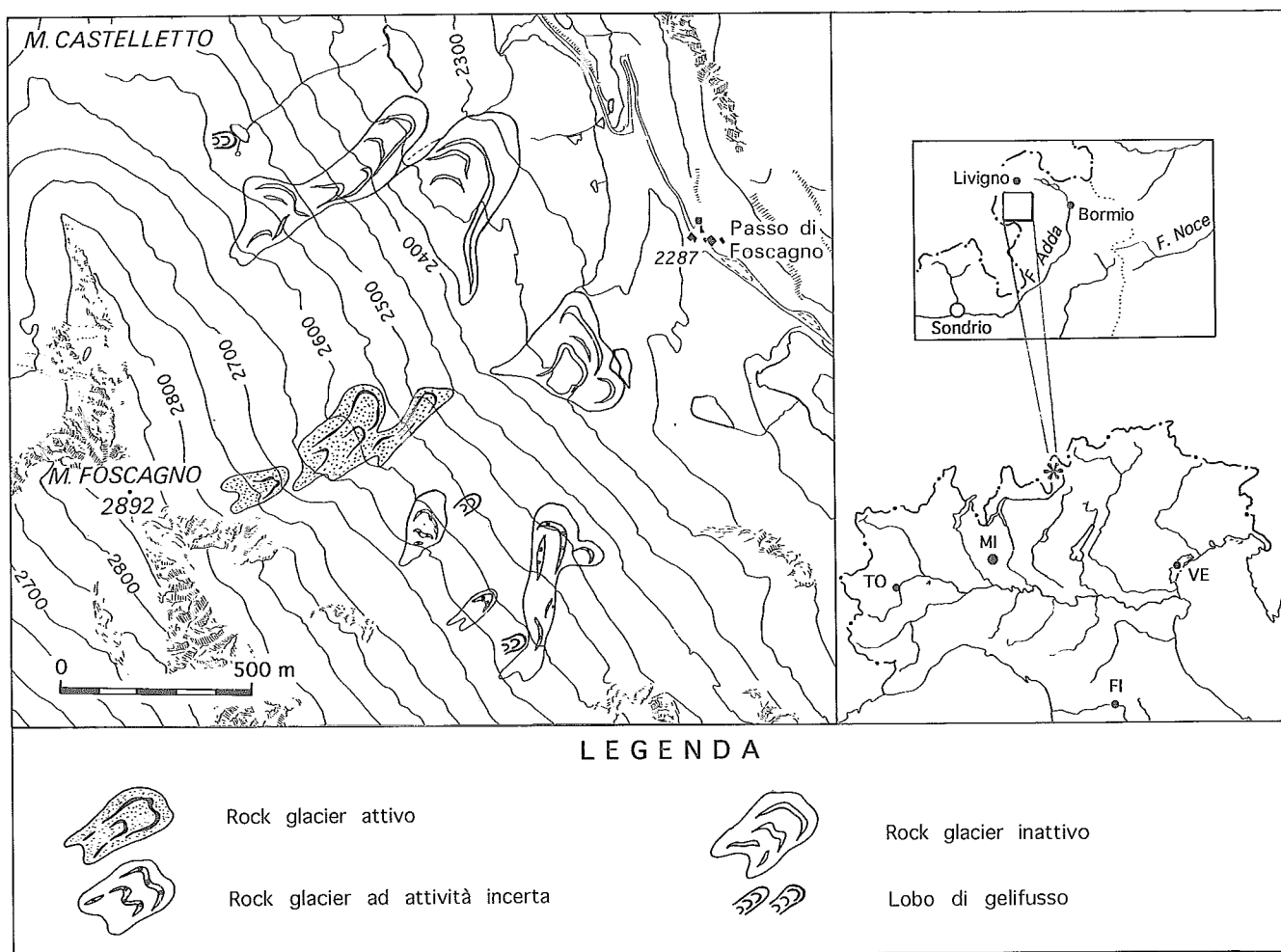


Fig. 1 - Ubicazione dell'area di studio e principali forme crionivali dell'area del Passo di Foscagno. (La *legenda* in figura è valida anche per la fig. 2).

Fig. 1 - Index map and main periglacial landforms in the Foscagno Pass area.

Quando il bilancio energetico della superficie risulta in pareggio i valori di BTS sono prossimi allo zero, mentre con bilancio negativo, si instaurano le condizioni favorevoli alla formazione del permafrost. Laddove il permafrost è già presente, si ha un'anomalia negativa del flusso di calore, che rende ancor più bassi i valori di BTS.

HAEERLI & PATZELT (1983) propongono una relazione empirica tra lo spessore dello strato attivo h_a e la temperatura in gradi centigradi rilevata con il metodo BTS:

$$h_a(m) = 6,59 + 0,69 \text{ BTS } (^\circ\text{C})$$

Questa relazione è stata ricavata dagli autori confrontando i valori di BTS con lo spessore dello strato attivo, determinato mediante indagini geofisiche (di tipo sismico) su alcuni rock glaciers svizzeri.

Il metodo BTS, unitamente ad altri metodi geofisici, è stato utilizzato da noi e da vari altri autori europei (KING & alii, 1987; KRUMMENACHER & BUDMIGER, 1992; HOELZLE, 1992; GUGLIELMIN & TELLINI, 1992) per l'individuazione del permafrost.

AREA DI INDAGINE

A partire dalla seconda metà di Marzo 1992 si sono effettuate le misurazioni di BTS in quattro aree del Livignasco, nelle Alpi Centrali lombarde, scelte per la ricchezza di fenomeni e forme periglaciali, in particolare di rock glaciers, già oggetto di studio durante le precedenti stagioni estive.

Una prima area di studio riguarda il versante orientale della dorsale M. Corno - M. di Foscagno, prospiciente il Passo del Foscagno (fig. 1); in essa sono riscontrabili numerose forme crionivali tra cui alcuni rock glaciers di diversa forma, dimensione e grado di attività e depositi glaciali piuttosto informi la cui messa in posto, molto probabilmente di età Tardiglaciale, attende di essere confermata da ulteriori ricerche.

Un'altra zona riguarda la testata de « La Foppa », vallecola glaciale che si origina dal versante destro della Vallaccia, situata ad una quota compresa tra i 2.650 e i 2.900 m con esposizione verso nord (fig. 2). Geomorfologicamente si tratta di un circo glaciale in cui si trovano numerose forme dell'ambiente periglaciale, quali suoli strutturati, lobi di geliflusso, nivomorene e tre rock glaciers attivi (La Foppa I e due nell'area de La Foppa Alta) ed uno inattivo (La Foppa II) e testimonianze del glacialismo olocenico e tardiglaciale con numerose forme d'esarazione e depositi morenici. Anche nell'adiacente forma circoide di M. Corno sono presenti tre piccoli rock glaciers, probabilmente attivi, che saranno oggetto di indagine nella prossima campagna di misurazioni.

L'alta valle del Foscagno è una parte della valle avente direzione NE-SW ed estensione di circa 3 km², delimitata dalla cresta montuosa M. Corno-M. Forcellina-M. Foscagno-M. Sattaron che presenta la sua massima elevazione nella vetta del M. Forcellina (3.090 m). La testata valliva, chiaramente modellata dall'azione glaciale, è carat-

terizzata da due circhi affiancati; il principale di questi contiene il grande rock glacier del Foscagno lungo oltre un chilometro ed altimetricamente compreso tra i 2.380 e i 2.750 m di quota (fig. 2). Si tratta di un rock glacier con morfologia assai articolata, suddiviso in diversi lobi e dai margini difficilmente definibili nella parte apicale e lungo il versante settentrionale del M. Foscagno ove i limiti con le falde detritiche ed i depositi morenici non sempre sono netti. Questo rock glacier presenta una ripida fronte unitaria posta a quota 2.500 m, al di sotto della quale è situata la parte ritenuta inattiva, completamente inerbita, posta a circa 2.380 m di quota.

L'area dominata dal Pizzo Filone, che con i suoi 3.133 m è la cima più elevata dell'intero territorio livignese, è situata sul versante Nord-orientale del massiccio e risulta caratterizzata da quattro circhi glaciali, tre dei quali esposti verso Nord-Est ed uno verso Nord. All'interno di questi circhi posti, ad una quota compresa tra i 2.600 ed i 2.950 m, vi sono altrettanti rock glaciers ritenuti attivi (tuttavia Pizzo Filone II e IV mostrano zone in cui l'attività è incerta), i quali si raccordano, con la loro parte apicale, ai depositi morenici della Piccola Età Glaciale (fig. 2).

Il glacialismo olocenico recente è documentato, nel circo II, sino al 1940 dove si manteneva un piccolo ghiacciaio di circa 3 ha con fronte posta a 2.830 m, dichiarato estinto nel 1955 (COMITATO GLACIOLOGICO ITALIANO - C.N.R., 1961). Sino al 1935 anche nei circhi III e IV venivano segnalati dalla cartografia I.G.M. alla scala 1:25.000 due piccoli ghiacciai (o glacionevati?) che raggiungevano rispettivamente quota 2.810 e 2.790 m. Oltre i 2.600 m di quota l'intera area del Pizzo Filone è caratterizzata da numerose microforme crionivali quali suoli poligonali, *block streams* e piccoli lobi di geliflusso.

Infine, l'area di M. Vago comprende un circo glaciale che si estende per circa 1 km², altimetricamente compreso tra i 2.600 ed i 3.050 m della vetta omonima (fig. 2). Il circo del M. Vago risulta esposto verso Nord-Est e sino agli anni '60 ospitava un ghiacciaio di 9,5 ha di estensione (COMITATO GLACIOLOGICO ITALIANO - C.N.R., 1961). Attualmente rimangono solo alcuni piccoli nevai semipermanenti sottostanti la vetta. L'ampio circo del M. Vago è caratterizzato dalla presenza nella sua parte centrale, di estesi depositi morenici, mentre ai due estremi sono localizzati i due rock glacier attivi. Il rock glacier occidentale, la cui fronte raggiunge i 2.720 m di quota, presenta la caratteristica morfologia «fluidale» e risente di una alimentazione in parte differente dall'adiacente morena. Il lungo e stretto rock glacier orientale si origina a ridosso della parete rocciosa a circa 2.740 m di quota e si abbassa sino a 2.550 m.

METODOLOGIA DI INDAGINE

Per la rilevazione della temperatura dell'aria e della superficie del suolo alla base del manto nevoso è stato utilizzato un termometro digitale Digitek con sonda Pt 100 pro-

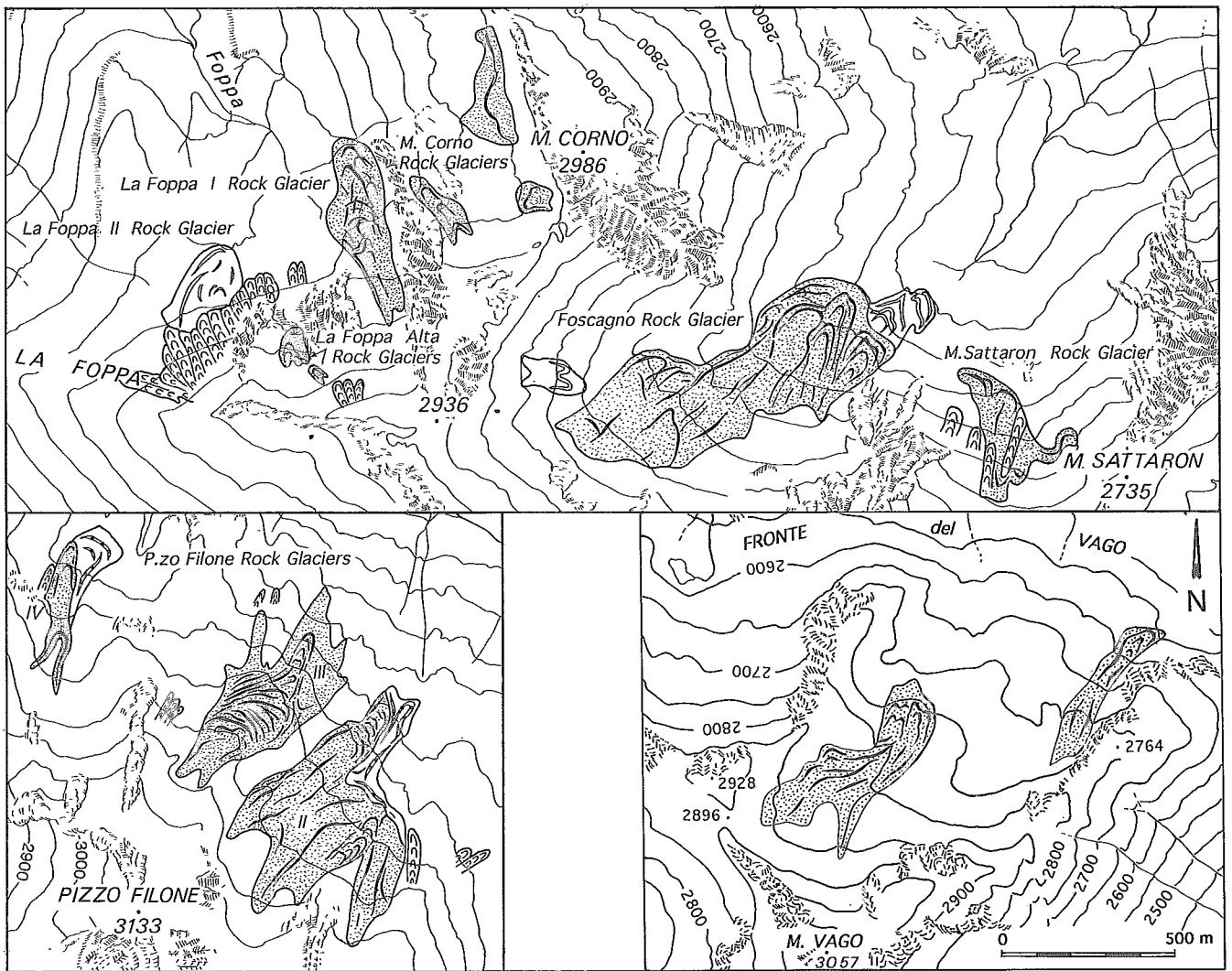


FIG. 2 - Principali forme crionivali della Val Vallaccia (area del Pizzo Filone e del circo La Foppa), del Foscagno e del Monte Vago.
 FIG. 2 - Main periglacial landforms in the Vallaccia Valley (which includes Pizzo Filone and La Foppa areas), Foscagno Valley and Mt. Vago.

dotta dall'Italcoppie con una precisione di 0.1°C nell'intervallo di misurazione utilizzato. Questa sonda è stata montata all'interno di una serie di aste di acciaio inox di prolunga, terminanti con punta conica, all'interno della quale viene fissata la sonda Pt 100 attraverso un particolare sistema di ancoraggio. Solo la parte sensibile della sonda (5 cm) fuoriesce dalla punta per effettuare la misura. Onde favorire l'infissione della sonda ed evitare danneggiamenti al termosensore, si predispose il foro con una seconda sonda in ferro a punta conica piena idonea per attraversare gli strati di neve compattati o gelati.

Per ciascun punto di rilevazione è stata misurato lo spessore del manto nevoso e la temperatura alla base dello stesso. Le misurazioni sono state eseguite in giorni diversi tra la fine di Marzo e la fine di Aprile del 1992 e durante il mese di Marzo del 1993.

RISULTATI

Nel primo anno di attività, durante l'esecuzione delle misure, si sono manifestati diversi inconvenienti tecnici legati soprattutto alla presenza di strati di neve ghiacciata, al notevole spessore della coltre nevosa ed alle proibitive condizioni atmosferiche. L'anno successivo alcuni di questi inconvenienti sono stati superati con l'adozione della seconda sonda sopracitata.

Complessivamente, nell'area del circo de «La Foppa» (fig. 3) sono stati effettuate 71 misure (34 nel 1992 e 37 nel 1993) distanti tra loro dai 20 ai 50 m. I punti sono stati ubicati in modo da coprire i diversi elementi morfologici presenti nel circo come: rocce montonate, falde detritiche, coni detritici attivi d'ambiente alpino di natura poligenetica (GRUPPO NAZIONALE GEOGRAFIA FISICA E GEOMORFOLOGICA - C.N.R., 1992), suoli strutturati, lobi di geliflusso e cordoni morenici.

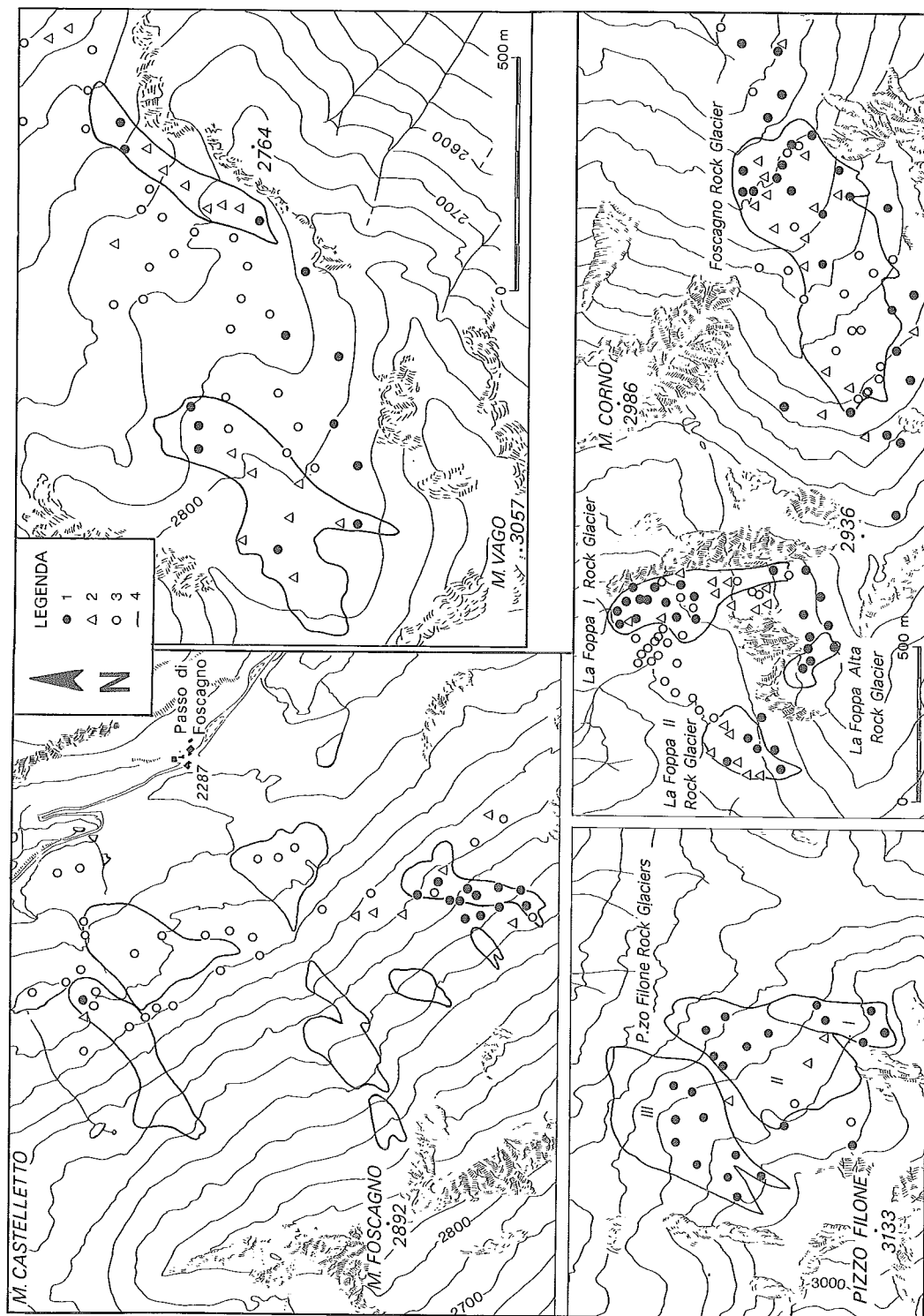


FIG. 3 - Ubicazione delle stazioni di misura BTS e classificazione dei valori ottenuti. I tondi pieni (1) rappresentano i valori $\leq -3^{\circ}\text{C}$ attestando la presenza di permafrost; i triangoli vuoti (2) indicano valori compresi tra $-1,7$ e -3°C suggerendo la presenza di possibile permafrost ed, infine, i cerchi (3) indicano valori superiori a $-1,7^{\circ}\text{C}$ testimoniando l'assenza di permafrost. La linea piena (4) delimita l'area dei rock glaciers.

FIG. 3 - Location and classification of the BTS measurements. The occurrence of permafrost is represented by black dots (1) which indicate BTS temperatures $\leq -3^{\circ}\text{C}$; possible permafrost occurrence is represented by triangles (2) which indicate BTS temperatures ranging between $-1,7$ to -3°C ; the absence of permafrost is represented by circles (3) which indicate BTS temperatures higher than $-1,7^{\circ}\text{C}$.

L'attenzione principale è stata, tuttavia, rivolta ai quattro rock glaciers presenti nell'area ed in particolar modo ai due di maggiori dimensioni ossia il rock glacier attivo «La Foppa I» (LOZEJ & GUGLIELMIN, 1992; GUGLIELMIN & TELLINI, 1993) ed il rock glacier «La Foppa II» di attività incerta ubicato qualche centinaio di metri più ad Ovest.

Sul rock glacier «La Foppa I» sono stati effettuate 26 misure in modo da coprire abbastanza uniformemente l'intera superficie. Sul rock glacier «La Foppa II» e sui lobi di geliflusso sovrastanti, sono state effettuate 12 misure. In corrispondenza dei due rock glaciers più piccoli posti oltre i 2.800 m di quota (La Foppa Alta) sono stati ubicati 5 punti di misura mentre i rimanenti sono distribuiti negli altri tipi di deposito ed in particolare sulla morena di quota 2.660 m. Nell'area dell'alta Valle di Foscagno (fig. 3) sono state eseguite 62 misure (18 nel 1992 e 44 nel 1993) in modo da ricoprire le forme presenti al di sopra dei 2.350 m di quota; la maggior parte delle misure (una cinquantina) sono distribuite in corrispondenza del rock glacier. Delle restanti misure, 3 sono ubicate in corrispondenza della parte ritenuta inattiva del rock glacier, ed una dozzina di misure sono localizzate su falde detritiche, con poligenetici d'ambiente alpino e morene.

In base alle indicazioni ottenute dall'analisi di risposta spettrale da immagini da satellite che suggerivano la possibile presenza di permafrost lungo il versante orientale del M. Corno (ANTONINETTI & alii, 1993), sono state eseguite 49 misure (tutte nel 1993) distribuite in modo tale da caratterizzare termicamente i due rock glaciers principali, i depositi glaciali del P.so di Foscagno ed anche la falda detritica, il substrato subaffiorante ed un lago. Nell'area del Pizzo Filone sono state effettuate 28 misurazioni (anch'esse nel 1993) quasi tutte ubicate in corrispondenza dei rock glaciers o dei depositi morenici. Infine, nell'area del M. Vago sono state realizzate 64 misurazioni (23 nel 1992 e 41 nel 1993) 23 delle quali in corrispondenza dei due rock glaciers; le rimanenti sono state effettuate in modo di coprire quasi tutta l'area del circo interessando le falde detritiche, i conigligenetici d'ambiente alpino ed i depositi morenici olocenici. In fig. 3 non sono riportate 10 misure relative al pianoro morenico sito immediatamente a nord dell'area disegnata.

I dati ottenuti riportati nella fig. 3 permettono di verificare la distribuzione areale dei valori significativi della presenza di permafrost considerando come limite superiore il valore di -3°C in accordo con i valori noti in letteratura (HAEBERLI, 1973; HOELZLE, 1992). La distribuzione dei punti con misure inferiori a tale limite suggerisce che possono esistere le seguenti situazioni:

- rock glaciers attivi (Pizzo Filone I e III, La Foppa Alta) o ad attività incerta (Passo del Foscagno) con permafrost distribuito su gran parte della loro superficie;
- rock glacier attivi (La Foppa I e Pizzo Filone II) con permafrost prevalentemente concentrato nelle zone frontali e sua possibile estensione alla restante parte del corpo;
- rock glaciers attivi (M. Vago e Foscagno) in cui il permafrost è concentrato nella zona frontale e poi nelle altre forme di raccordo con le pareti del circo;
- rock glacier inattivo (La Foppa II) il permafrost sembra distribuito nella zona apicale e di raccordo con i lobi di geliflusso sovrastanti.

I vari rock glaciers esaminati, pur trovandosi in condizioni microclimatiche assai simili, mostrano valori assoluti di BTS sensibilmente diversi che sono riassunti in tab. 1.

Tabella 1 - Riepilogo dei valori di BTS ($^{\circ}\text{C}$) nelle aree studiate: 1 = valore medio; 2 = valore minimo; 3 = valore massimo.

Table 1 - Maximum (3), minimum (2) and average (1) of BTS values in the investigated areas.

Ubicazione	1	2	3
La Foppa I R.G.	-3,4	-5,3	-0,6
La Foppa II R.G.	-3,1	-4,5	-1,9
La Foppa Alta R.G.	-5,1	-5,5	-4,3
Foscagno R.G.	-3,5	-4,5	-0,5
M. Vago Est R.G.	-2,3	-4,4	-1,7
M. Vago Ovest R.G.	-2,9	-5,2	-1,6
Pizzo Filone I R.G.	-5,5	-6,7	-4,4
Pizzo Filone II R.G.	-3,5	-4,6	-0,4
Pizzo Filone III R.G.	-6,4	-10,1	-3,0
Passo Foscagno R.G.	-0,9	-6,6	0,0

Con valori di BTS decisamente inferiori agli altri si pone in particolare evidenza il rock glacier Pizzo Filone III. Da notare, inoltre, che all'interno dei singoli rock glaciers la distribuzione è disomogenea, variando in modo sensibile anche in pochi metri come hanno rivelato le misure effettuate nella parte centrale del rock glacier «La Foppa I» oppure nel versante orientale del M. Corno.

Dai diagrammi di figg. 4 e 5 si può notare rispettivamente come la quota (sempre superiore ai 2300 m) e lo spessore del manto nevoso (tranne pochissimi casi sempre superiore a 80 cm) non esercitino un'influenza determinante sulla distribuzione delle misure di BTS.

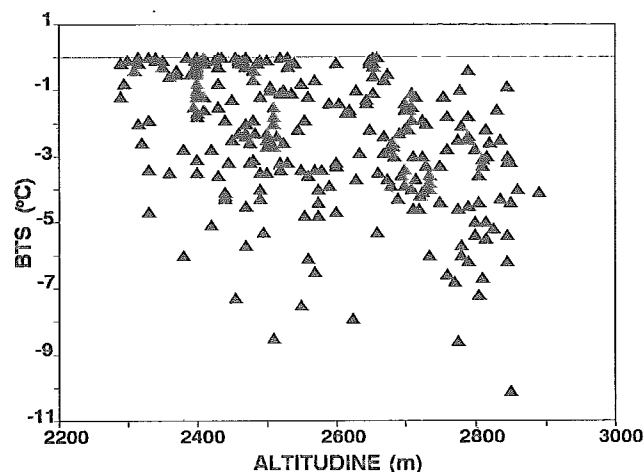


FIG. 4 - Relazioni tra i valori di BTS ($^{\circ}\text{C}$) e l'altitudine (m) delle stazioni di misura. L'elevata dispersione dei punti suggerisce la scarsa influenza del fattore altimetrico sui valori di BTS.

FIG. 4 - Relationship between BTS and altitude of the measured sites. The high point scattering suggests a poor influence of the elevation factor on BTS values.

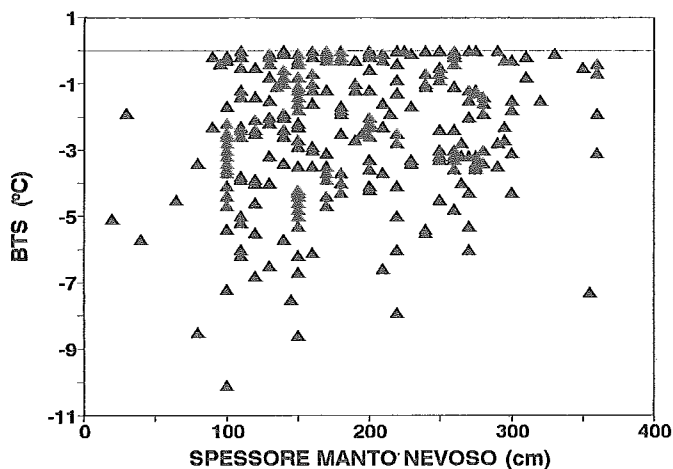


Fig. 5 - Relazioni tra i valori di BTS (°C) e lo spessore del manto nevoso (cm).

Fig. 5 - Relationship between BTS and thickness of the snow cover.

Per verificare l'influenza dello spessore della coltre nevosa sono state eseguite alcune misure sul versante orientale del M. Corno in corrispondenza di rocce subaffioranti con spessori di neve variabili. Come si può osservare dalla fig. 6 i valori di BTS non risultano influenzati dalle variazioni della temperatura dell'aria quando la copertura nevosa supera gli 80 cm di spessore. Nel corso delle nostre misurazioni si è verificato sperimentalmente che, per ritenere affidabili le misure di BTS, il manto nevoso deve presentare uno spessore non inferiore agli 80 cm in un intorno di almeno una decina di metri dal punto stesso.

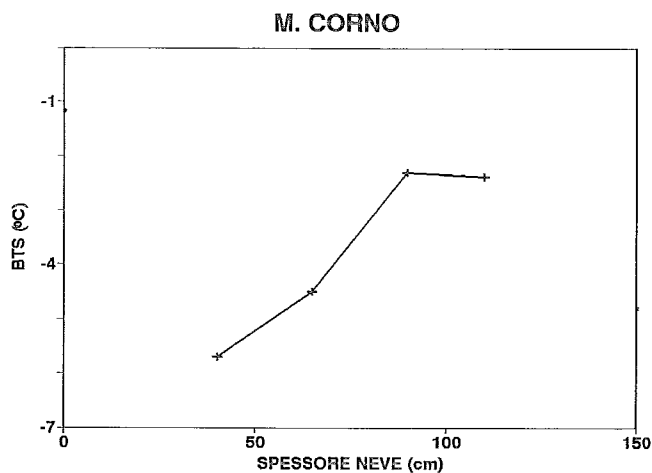


Fig. 6 - Variazione di BTS (°C) in funzione dello spessore del manto nevoso (cm) nel medesimo sito. Si può osservare come per spessori del manto nevoso superiori a 80 cm il valore di BTS non sia influenzato dalla temperatura esterna.

Fig. 6 - In the same site BTS values change within the first 80 cm of the snow cover. Above this thickness BTS values become stable.

VALUTAZIONE DELLO SPESSORE DELLO STRATO ATTIVO E CRITERI PER LA MAPPATURA DEL PERMAFROST

Allo scopo di evidenziare eventuali relazioni tra lo spessore dello strato attivo e, quindi, la stima della profondità della tavola del permafrost direttamente dal BTS, è stato condotto un tentativo di confrontare lo spessore dello strato attivo di un sito, ricavato da sondaggio elettrico verticale (S.E.V.) con il corrispondente valore di BTS.

Si è calcolata la regressione lineare su 12 valori di BTS posti al centro dei S.E.V. realizzati su alcuni rock glaciers (LOZEI & GUGLIELMIN, 1992; GUGLIELMIN & *alii*, 1993) e dei valori di spessore dello strato attivo dedotti dall'interpretazione dei S.E.V. stessi, ottenendo la seguente relazione valida per valori di BTS superiori a $-4,4^{\circ}\text{C}$:

$$h_a = 5,30 + 1,05 \text{ BTS} (^{\circ}\text{C})$$

Riteniamo però che tale relazione empirica abbia una validità puramente indicativa in quanto i fattori che determinano la temperatura media annua del suolo (TMAS) e quindi i valori di BTS (vedasi paragrafo sul BTS), sono molteplici.

Rispetto alla relazione empirica proposta da HAEERLI & PATZELT (1983) citata in precedenza, questa relazione differisce sia per il metodo geofisico utilizzato (nel primo caso sismico e nel nostro caso geoelettrico) che per le condizioni climatiche in cui sono stati ottenuti i dati BTS. Inoltre, in alcuni casi, abbiamo potuto verificare che, applicando la relazione di Haerberli, lo spessore dello strato attivo ottenuto era notevolmente superiore a quello determinato con l'indagine geoelettrica.

In particolare in tab. 2 sono riportate alcune caratteristiche del permafrost, ricavabili da questo tipo di indagine geofisica quali la resistività (funzione del contenuto di ghiaccio e della temperatura) e lo spessore, sembrano influenzare i valori di BTS (funzione della TMAS) (tab. 2).

Tabella 2 - Confronto fra i valori di BTS e caratteristiche del permafrost ricavate dalle indagini geoelettriche. (h_a : spessore dello strato attivo; $h_p \cdot r$: prodotto dello spessore del permafrost per la sua resistività).

Table 2 - Comparison between BTS and permafrost characteristics obtained through electric soundings. (h_a : thickness of active layer $h_p \cdot r$: permafrost thickness x permafrost resistivity).

h_a (m)	BTS (°C)	$h_p \cdot r$
0.85	- 3.10	283800
0.90	- 3.85	487500
2.00	- 3.45	5000000
2.50	- 2.60	333000
6.50	- 1.65	682500

Dalla tabella si può osservare come non solo lo spessore dello strato attivo influenzi il valore di BTS ma anche il tipo di permafrost presente, indicato dal prodotto tra lo spessore del permafrost (h_p) e la resistività (r) dello stesso. Infatti ai primi due valori (0,85 e 0,90) di spessore dello strato attivo quasi uguali (5% circa di differenza) corri-

rispondono valori di BTS che differiscono di circa il 20% a fronte di una differenza pari a circa il 42% del prodotto spessore del permafrost per la sua resistività.

Pur non avendo dati sufficienti per ottenere una regressione statisticamente probante questi dati mostrano come un permafrost più freddo e/o più potente ($hp \times r$) può influenzare la temperatura media annua del suolo e quindi anche il BTS a parità di spessore dello strato attivo.

Attraverso il confronto tra i valori di BTS e i risultati delle indagini geoelettriche si è definito il valore di BTS discriminante tra terreni privi di permafrost e terreni con una possibile, ma non certa, presenza di permafrost. In letteratura (HAEBERLI, 1973; HOELZLE, 1992) sono riportati per tale limite valori compresi tra -1,7 e -2°C.

Dalla tab. 2 si può osservare come l'indagine geoelettrica abbia evidenziato la presenza di permafrost anche ad elevate profondità con valori di BTS pari a -1,7°C. Pertanto abbiamo deciso di utilizzare il valore -1,7°C come discriminante della possibile presenza di permafrost.

CONCLUSIONI

I dati ottenuti da questa prima esperienza italiana nell'applicazione del metodo BTS sono interessanti e possono essere un valido punto di partenza per un ulteriore approfondimento della metodologia, e soprattutto, del significato fisico delle misure in relazione al regime termico e idrico dei suoli nell'ambiente periglaciale alpino.

I fattori che determinano il regime termico del suolo sono, infatti, molteplici e raggruppabili in due grandi categorie: fattori che non mutano o che variano molto lentamente nel tempo e fattori a rapida evoluzione. Tra i primi i fattori dominanti sono le caratteristiche geo-orografiche che influenzano l'irraggiamento (latitudine, altitudine, esposizione, inclinazione e scabrezza della superficie topografica, ecc.) e quelle geomorfologiche (in particolare quelle legate agli aspetti strutturali dei vari tipi di rocce, sedimenti o depositi) che determinano le proprietà termiche del suolo (composizione mineralogica di rocce e/o sedimenti, granulometria, porosità e grado di saturazione, ecc.).

Tra i fattori variabili nel tempo vi è sicuramente la temperatura media annua dell'aria (TMAA) e, soprattutto, l'escursione termica diurna, lo spessore del manto nevoso e la sua distribuzione spazio-temporale sono quelli più importanti in quanto determinano la TMAA. Per comprendere appieno il significato delle misure BTS bisogna quindi disporre di registrazioni continue della temperatura superficiale del suolo e disporre per il medesimo sito di dati climatici comprensivi delle precipitazioni nevose, della temperatura dell'aria e delle caratteristiche termiche del manto nevoso nonché dei valori relativi ad alcune proprietà termiche del suolo.

Per realizzare questo tipo di approfondimento saranno di grande ausilio i dati forniti dalla stazione nivometeorologica automatica installata nell'area della Foppa, grazie all'intervento dell'Assessorato all'Energia e Protezione Civi-

le della Regione Lombardia. Tale struttura comprende anche tre stazioni termometriche con cinque sensori ciascuna per la rilevazione in continuo delle condizioni termiche del suolo a diverse profondità (2, 30, 50, 150 e 300 cm). Due di esse sono state situate nella zona frontale del rock glacier La Foppa I e l'altra sul cordone morenico tardiglaciale in parte ricoperto dallo stesso rock glacier. La stazione inizierà la sua attività a partire dall'Ottobre 1993.

BIBLIOGRAFIA

- ANTONINETTI M., BINAGHI E., GUGLIELMIN M. & RAMPINI A. (1993) - *Detection of mountain permafrost using a remote sensing approach*. Proceedings Int. Symp. on Remote Sensing in Arid & semi-arid regions, Lanzhou, China, 53-60.
- COMITATO GLACIOLOGICO ITALIANO-C.N.R. (1961) - *Catasto dei ghiacciai Italiani - Anno geofisico - 1957/58*. Vol. III, Torino.
- GRUPPO NAZIONALE GEOGRAFIA FISICA E GEOMORFOLOGIA-C.N.R. (a cura di MORTARA G., OROMBELLI G., PELFINI M., TELLINI C.) (1992) - *Suoli e suoli sepolti olocenici per la datazione di eventi geomorfologici in ambiente alpino: alcuni esempi tratti da indagini preliminari in Val d'Aosta*. Il Quaternario, 5, 135-146.
- GUGLIELMIN M. (1991) - *I rock glaciers del Passo Foscatto (Alta Valtellina, Sondrio)*. Natura Bresciana, 26, 35-47.
- GUGLIELMIN M. & TELLINI C. (1992) - *I rock glaciers del livignasco (Alta Valtellina, SO)*. Riv. Geogr. It., 94, 395-414.
- GUGLIELMIN M. & TELLINI C. (1993) - *First example of permafrost mapping with BTS in the Italian Alps (Livigno, Sondrio, Italy)*. «L'Ateneo Parmense» - Acta Naturalia, 29, 39-46.
- GUGLIELMIN M., LOZEJ A. & TELLINI C. - *Rock glaciers and permafrost distribution in Livigno area (Northern Italy)*. Permafrost Periglac. Proc., 5, 1 (in press).
- HAEBERLI W. (1973) - *Die Basis-temperatur der winterlichen Schneedecke als möglicher Indikator für die Verbreitung von Permafrost in den Alpen*. Zeit. Gletsch. Glazialgeol., B. IX (1-2), 221-227.
- HAEBERLI W. (1992) - *Construction, environmental problems and natural hazards in periglacial mountain belts*. Permafrost Periglac. Proc., 3, 111-124.
- HAEBERLI W. & PATZELT G. (1983) - *Permafrostkartierung in gebiet der Hochebenkar Blockgletscher, Oberburgl, Otzal*. Zeit. Gletsch. Glazialgeol., 18, 127-150.
- HAEBERLI W., CHENG C., GORBUNOV A.P. & HARRIS S.A. (1993) - *Mountain permafrost and climatic change*. Permafrost Periglac. Proc., 4, 165-174.
- HOELZLE M. (1992) - *Permafrost occurrence from BTS-measurements and climate parameters in the Eastern Swiss Alps*. Permafrost Periglac. Proc., 3, 143-147.
- KELLER F. & GUBLER G. (1993) - *Interaction between snow cover and high mountain permafrost, Murtèl/Corvatsch, Swiss Alps*. Proceedings of Sixth Int. Conf. on Permafrost, Beijing, 1, 332-337.
- KERSCHNER H. (1983) - *Late glacial paleotemperatures and paleoprecipitations as derived from permafrost glacier relationship in the Tyrolean Alps, Austria*. Proceedings Fourth Int. Conf. on Permafrost, Washington D.C., 589-594.
- KING L., FISCH W., HAEBERLI W. & WAECHTER H.P. (1987) - *Comparison of resistivity and radio-echo soundings on rock glacier permafrost*. Zeit. Gletsch. Glazialgeol., B. 23, 77-97.
- KRUMMENACHER B. & BUDMINGER K. (1992) - *Monitoring of periglacial phenomena in the Furggentälts (Swiss Alps)*. Permafrost Periglac. Proc., 3, 149-155.
- LOZEJ A. & GUGLIELMIN M. (1992) - *Prospezioni geoelettriche sul rock glacier de «La Foppa», Livigno, Sondrio (Italia)*. Boll. Ass. Min. Subalpina, 24, 373-382.