

DAVIDE BOSCHI*, MAURO GUGLIELMIN**, CLAUDIO SMIRAGLIA*

**IL GHIACCIAIO CHANGRI NUP, UN *DEBRIS COVERED GLACIER*
NEL MASSICCIO DELL'EVEREST (Himalaya, Nepal).
STUDIO DELLO SPESSORE E DELLA STRUTTURA DELLA COPERTURA
DETRITICA MEDIANTE PROSPEZIONI GEOELETTICHE**

RIASSUNTO - Si riportano i risultati della campagna di sondaggi elettrici verticali (SEV) condotta durante la Spedizione Ev-K2-CNR 96 nella regione del Khumbu Himal, Nepal, sul Ghiacciaio Changri Nup, un *debris covered glacier* nel massiccio dell'Everest. I sei sondaggi eseguiti avevano lo scopo di ottenere dati sullo spessore del detrito superficiale e sulle variazioni areali dello spessore stesso. Un altro stendimento è stato eseguito su un *rock glacier* situato nei pressi del ghiacciaio con lo scopo di determinare l'eventuale presenza di ghiaccio al suo interno. Cinque dei sei sondaggi sul ghiacciaio hanno raggiunto l'interfaccia ghiaccio-detrito rivelando uno spessore del detrito supragliale, nella zona medio-bassa della lingua, compreso tra 0,90 e 3,75 m, con un aumento dello spessore verso valle. I valori di resistività del ghiaccio di ghiacciaio sono risultati mediamente inferiori ai valori riportati in letteratura, e sono stati quindi interpretati come riconducibili alla presenza di acqua liquida e detrito nel ghiaccio stesso. In due casi l'interpretazione ha rivelato la presenza di permafrost. Il sondaggio eseguito sul *rock glacier* ha evidenziato la presenza di un livello di permafrost ricco in ghiaccio di circa 6 m, al di sotto di uno strato attivo di circa 1 m.

ABSTRACT - *The Changri Nup Glacier, a debris covered glacier in the Everest Massif, Himalaya, Nepal. Study about the debris cover thickness and structure by means of geoelectrical prospection.*

The results of vertical electric soundings (VES) carried out during the Ev-K2-CNR 96 Expedition in the Khumbu Himal region, Nepal, are reported; six soundings were executed on the Changri Nup debris covered glacier to obtain data about the thickness and the thickness areal distribution of debris, and a further sounding on a rock glacier close to the glacier to verify the occurrence of ice in its inside.

Five of six soundings on the glacier have reached the debris-ice interface revealing a supraglacial debris thickness ranging from 0,9 to 3,5 m, in the medium-low zone of the tongue, with an increasing thickness downvalley. Resistivity values of the glacier ice have resulted lower on average than literature reported values, and consequently interpreted as referable to the occurrence of liquid water and debris into the ice. The interpretation of two of these soundings has revealed the presence of permafrost. The sounding carried out on the rock glacier has showed an ice rich permafrost level of about 6 m under an active layer 1 m thick.

PREMESSA

Nell'ambito della Sezione "Glaciologia" del Progetto CNR EV-K2, diretta da C. Smiraglia, uno dei principali temi di ricerca è il bilancio di massa dei *debris covered glaciers*. Si tratta di apparati glaciali, detti anche "ghiacciai himalayani" per la loro diffusione in questa catena montuosa, caratterizzati da una copertura detritica pressoché continua della zona di ablazione; tale copertura isola il ghiaccio dall'energia termica solare tanto che il gradiente di ablazione, solitamente negativo da valle verso monte nei ghiacciai alpini, si inverte e l'ablazione diviene meno intensa nella parte bassa del ghiacciaio rispetto a quella centrale. Ciò differenzia nettamente la dinamica e il bilancio di massa di questi apparati rispetto ai ghiacciai alpini;

* Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Milano, via Mangiagalli, 34 - 20134 Milano.

** Servizio Geologico Regione Lombardia, via Filzi, 22 - 20124 Milano.

il movimento stesso del settore inferiore del corpo glaciale è rallentato fino a divenire quasi nullo. Fondamentale per la comprensione della dinamica di questi ghiacciai è dunque l'acquisizione di dati sullo spessore della copertura detritica e sulla sua distribuzione areale.

In particolare la Spedizione 1996 ha operato sul Ghiacciaio Changri Nup, nel massiccio dell'Everest (Nepal), posto non lontano dal Laboratorio-Piramide del CNR, realizzando indagini geofisiche e rilievi di tipo geomorfologico.

INTRODUZIONE

I “*debris covered glaciers*” e la loro dinamica sono stati oggetto di numerosi lavori di carattere generale (ad esempio, BOZHINSKIY *et al.*, 1986; CLARK *et al.*, 1994; ØSTREM, 1959); il Ghiacciaio Changri Nup non ci risulta essere stato finora oggetto di ricerche specifiche. Anche l'uso delle prospezioni geofisiche in ambiente di alta quota è ormai piuttosto sviluppato, anche se in genere applicato alla determinazione dello spessore dei ghiacciai alpini (GUGLIELMIN *et al.*, 1995; RÖTHLISBERGER 1967, RÖTHLISBERGER - VÖGTLI, 1967) o all'individuazione del *mountain permafrost* (HAEBERLI, 1985; GUGLIELMIN *et al.*, 1994; VONDER MUHLL, 1993), ma raramente alla individuazione dello spessore della copertura detritica dei *ghiacciai neri*.

Nella Valle di Khumbu, area dove ha operato la spedizione italiana, studiosi giapponesi hanno determinato mediante numerosi scavi a mano lo spessore del detrito superficiale di alcuni ghiacciai, in particolare quello di Khumbu, hanno analizzato le particolari morfologie e valutato gli effetti della copertura detritica sul bilancio di massa degli apparati glaciali (IWATA *et al.*, 1980; NAKAWO *et al.*, 1986).

L'AREA DI STUDIO

L'area di studio è situata nel settore settentrionale del Khumbu Himal, una vasta regione nel Nepal nord-orientale, comprendente oltre al Monte Everest, altre vette sopra gli ottomila metri di quota quali il Makalu, il Lhotse e il Cho Oyu. Il Ghiacciaio Changri, anch'esso coperto di detrito nel settore centro-inferiore, rappresenta il maggior affluente, in destra idrografica, della lingua del Ghiacciaio Khumbu nella valle omonima (Fig. 1); è costituito da due lingue (il Changri Shar e il Changri Nup) che verso 5250 m confluiscono in un'unica lingua ricoperta da detrito poco prima di sfociare nella colata del Khumbu (Fig. 2).

L'alta valle del Khumbu è caratterizzata dalla grande lingua glaciale del ghiacciaio omonimo, che occupa gran parte del fondovalle ed è coperta di detriti da una quota di circa 5300 fino alla fronte. Il bacino di accumulo del Khumbu è delimitato dalle pareti dei monti Everest, Lhotse e Nuptse, mentre la fronte del ghiacciaio è sospesa allo sbocco dell'alta valle sulla piana di Periche, a monte dell'abitato di Dughla. Il versante sinistro idrografico dell'alta valle del Khumbu è costituito dalla parete NW del Monte Nuptse e dalla dorsale Nuptse-Pokalde, e comprende alcuni valloni laterali al Ghiacciaio Khumbu occupati in parte da piccoli ghiacciai di circo e in parte da forme periglaciali (*rock glaciers*). Il versante destro idrografico è topograficamente più complesso, con la piramide del Monte Pumori, i valloni del Changri Shar e del Changri Nup e verso valle il meno esteso Ghiacciaio Lobuche.

Il Ghiacciaio Changri Nup è alimentato nella parte alta del bacino da due rami, provenienti da nord (ramo del Changri La) e da ovest. Secondo i dati elaborati da G. Mortara, la lunghezza massima del Changri Nup, misurata secondo l'asse del ramo settentrionale, nel cui bacino alimentatore si colloca anche il rilievo montuoso più elevato (m 6.853), è di circa 7 km, mentre la superficie complessiva è di 8 km². A partire da quota 5.400 (ramo nord) - 5.500 (ra-

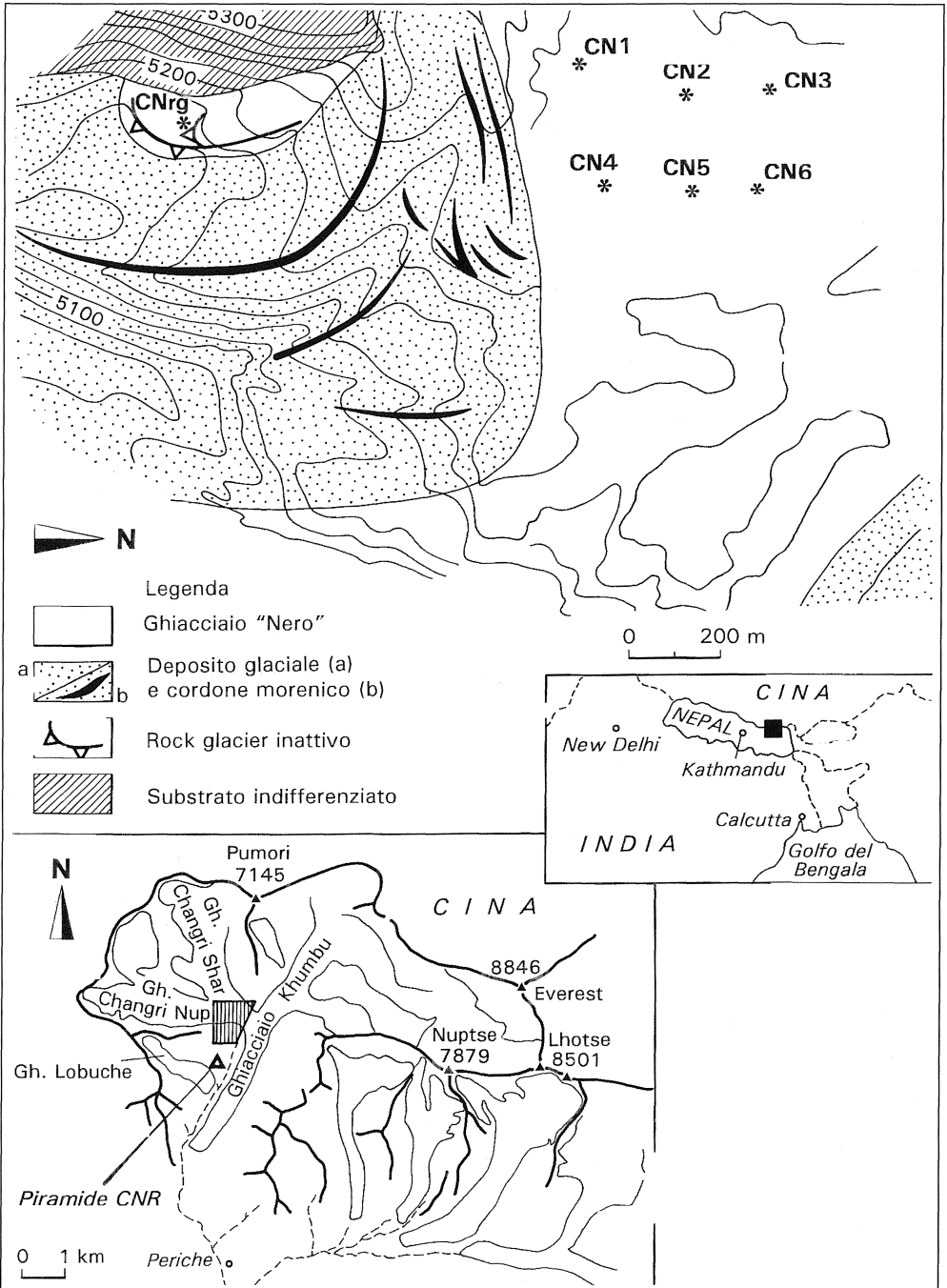


Fig. 1 - Localizzazione dell'area di studio nell'alta Valle del Khumbu (Nepal occidentale) e schizzo geomorfologico. Gli asterischi indicano i centri dei sondaggi elettrici. La localizzazione nell'ambito del ghiacciaio Changri Nup è evidenziata nella carta inferiore.



Fig. 2 - La confluenza del Changri Nup e del Changri Shar vista dalle propaggini del Khala Pattar (5.545 m). È ben visibile la zona ricoperta di detrito, dove sono stati effettuati i sondaggi elettrici (foto C. Smiraglia, 1994).



Fig. 3 - Il rock glacier sul quale è stato effettuato il sondaggio elettrico, visto dalla morena laterale destra del Ghiacciaio Khumbu (foto C. Smiraglia, 1996).

mo sud) per una lunghezza di circa 4 km, il Changri Nup assume le caratteristiche di *debris covered glacier*, essendo ricoperto con continuità da una coltre detritica grossolana *open work* di spessore generalmente plurimetrico, estesa per circa 2,7 km² (34 % dell'area totale). Assegnando prudenzialmente uno spessore medio di 2 m al detrito, si può stimare in non meno di 5,5 milioni di m³ il volume del detrito epiglaciale. Il ghiacciaio, dopo la confluenza con il Changri Shar, presenta alla fronte una larghezza di 800-1.000 m; la fronte, che si trova poco sotto q 5.200 m, in corrispondenza del sentiero per il Campo Base dell'Everest, è sospesa rispetto al fondovalle recettore del Khumbu, sopra il quale si eleva di circa 300 m e dal quale è separata da ampie falde di detrito. La confluenza del Changri nel Khumbu è incerta a causa della spessa copertura detritica che maschera l'eventuale ghiaccio residuo.

Il *rock glacier* sul quale è stato effettuato un ulteriore sondaggio geoelettrico è situato sul versante destro idrografico della valle del Khumbu fra il Ghiacciaio Changri e il Ghiacciaio Lobuche. È un classico *valley-wall rock glacier*, che si estende ai piedi della triangolare parete che culmina a circa 5.520 m in una cima senza nome (Fig. 3). La parete è soggetta a intensi fenomeni di disfacimento crioclastico e il suo settore inferiore, che rappresenta la zona di alimentazione del *rock glacier*, è praticamente sommerso dal detrito. Il *rock glacier*, che ha una larghezza massima di circa 400 m e una lunghezza massima di meno di 200 m, presenta due lobi principali coalescenti, la cui superficie subpianeggiante è movimentata da rughe arcuate poco accennate e da solchi longitudinali riempiti da blocchi quasi completamente lichenizzati. L'intera forma, che appare ricoperta da vegetazione erbacea con radi arbusti, si spinge fino a 5160 m di quota con una fronte abbastanza ripida e ben delineata (25°-30° di inclinazione), circondata alla base da una corona di blocchi interamente ricoperti da licheni e parzialmente immersi in detrito fine. Le sue caratteristiche morfologiche e vegetazionali indurrebbero a classificarlo come *rock glacier* inattivo, al cui interno vi è solo del *permafrost* relitto (Barsch, 1977).

Gli apparati morenici della zona sono molto ben evidenti sia ai bordi della lingua del Khumbu sia intorno agli apparati del Changri Nup e del Lobuche, particolarmente quelli depositi durante la Piccola Età Glaciale (PEG). Ben osservabile la sovrapposizione degli eventi riconducibili alla PEG e quelli olocenici, questi ultimi con un inerbimento ed una lichenizzazione del deposito morenico nettamente più accentuati. Imponenti, ma meno facilmente interpretabili, i depositi morenici attribuibili all'ultimo massimo glaciale e alle pulsazioni Tardiglaciali.

La grande morena tardiglaciale laterale destra del Khumbu e la laterale sinistra del Lobuche, delimitano la piccola conca nella quale è stato installato a 5.050 m il Laboratorio Piramide, stazione di ricerca del CNR.

I rilievi geoelettrici sono stati tutti eseguiti sul Ghiacciaio Changri Nup, con due eccezioni. Un sondaggio è stato infatti eseguito sul *rock glacier* precedentemente descritto; un altro, del quale non si riportano i risultati in questa sede, sulla morena della PEG del Ghiacciaio Lobuche.

LA PROSPEZIONE ELETTRICA

a) Il metodo elettrico

La prospezione geoelettrica è stata scelta, tra i diversi metodi di indagine geofisica, per la relativa economicità e leggerezza dell'attrezzatura e per i buoni risultati ottenuti nello studio di corpi geologici contenenti ghiaccio, grazie alla rilevante diversità di proprietà elettriche tra ghiaccio e qualsiasi altro materiale costituente depositi superficiali (HOEKSTRA - McNEILL, 1973; HAEBERLI, 1985).

La prospezione geoelettrica consiste nella determinazione delle resistività elettriche dei materiali attraversati dal sondaggio, ognuno dei quali ha una propria resistività specifica che è funzione della granulometria, del contenuto in acqua e della temperatura di quest'ultima. In

particolare l'acqua ha la proprietà di aumentare esponenzialmente la propria resistività al diminuire della temperatura sino ad una temperatura di circa -3°C (WILLIAMS - SMITH, 1989), oltre la quale rimane pressoché costante a causa del passaggio di tutta l'acqua allo stato solido. Nel caso di terreni contenenti quantità di ghiaccio assai variabili come nel *permafrost* anche le resistività elettriche variano in modo rilevante (EVIN - FABRE, 1992; VONDER MÜHLL 1993; GUGLIELMIN *et al.*, 1994) da 10 $\text{K}\Omega\text{m}$ a oltre 1.000 $\text{K}\Omega\text{m}$ e, a parità di contenuto di ghiaccio sono inversamente proporzionali alla temperatura del permafrost (KING, 1982). Nel caso dei ghiacciai, la resistività elettrica dipende solamente dalla temperatura e quindi dalla quantità di acqua allo stato liquido circolante al momento del sondaggio (GUGLIELMIN *et al.*, 1995; HAS-SINGER - MAYEWSKY, 1983).

Nella Tabella 1 sono presentati alcuni valori di resistività elettrica riscontrati in *permafrost* e su ghiacciai alpini e polari.

Tab. 1 - Valori di resistività per il permafrost e per il ghiaccio di ghiacciaio, e loro interpretazione, tratti dalla letteratura.

Autore	Località	Resistività ($\text{K}\Omega\text{m}$)	Interpretazione
FISCH <i>et al.</i> (1977)	Alpi Svizzere	da 10 a 280	permafrost a medio contenuto di ghiaccio
KING (1982)	Scandinavia	da 10 a 900	permafrost
HAEBERLI (1985)		da 10 a 100	permafrost discontinuo
KING <i>et al.</i> (1987)	Alpi Svizzere	da 10 a 750	permafrost
GAHE <i>et al.</i> (1988)	Québec	da 10 a 40	permafrost
SEGUIN <i>et al.</i> (1988)	Québec	da 35 a 150	permafrost
EVIN - FABRE (1992)	Alpi Meridionali Francesi	da 25 a 50 da 100 a 200 sopra i 500	permafrost a basso contenuto di ghiaccio permafrost a medio contenuto di ghiaccio permafrost ad alto contenuto di ghiaccio
GUGLIELMIN <i>et al.</i> (1994)	Alpi Centrali	da 23 a 560 da 18 a 90	permafrost ad alto contenuto di ghiaccio permafrost a basso contenuto di ghiaccio
VOGTLI (1967)	Canada	< 100	ghiaccio di ghiacciaio
RÖTHLISBERGER - VOGTLI (1967)	Alpi Svizzere	da 10.000 a 110.000	ghiaccio di ghiacciaio
GUGLIELMIN <i>et al.</i> (1995)	Ghiacciaio dei Forni Ghiacciaio Sforzellina	da 20 a 1.000 da 200 a 400	ghiaccio di ghiacciaio ghiaccio di ghiacciaio
ILICETO (1969)	Ghiacciaio della Marmolada	10.000	ghiaccio di ghiacciaio

Come si può verificare, in genere la resistività del ghiaccio puro è uno o due ordini di grandezza più alta del *permafrost* e almeno tre-quattro ordini di grandezza più alta dei materiali non congelati e del *bedrock*. Nel caso dei ghiacciai è stato anche dimostrato come la resistività elettrica aumenti con l'aumentare dello spessore del ghiaccio (RÖTHLISBERGER - VÖGTLI, 1967).

Tra i diversi metodi di indagine geoelettrica si è scelto di operare attraverso il sondaggio elettrico verticale (SEV), che consente di ottenere un modello elettrostratigrafico al di sotto del centro geometrico del sondaggio indipendentemente dall'orientamento del circuito (stendimento). In particolare si è utilizzata la configurazione simmetrica del quadripolo Schlumberger. Questa configurazione è costituita da due coppie di elettrodi disposte simmetricamente ri-

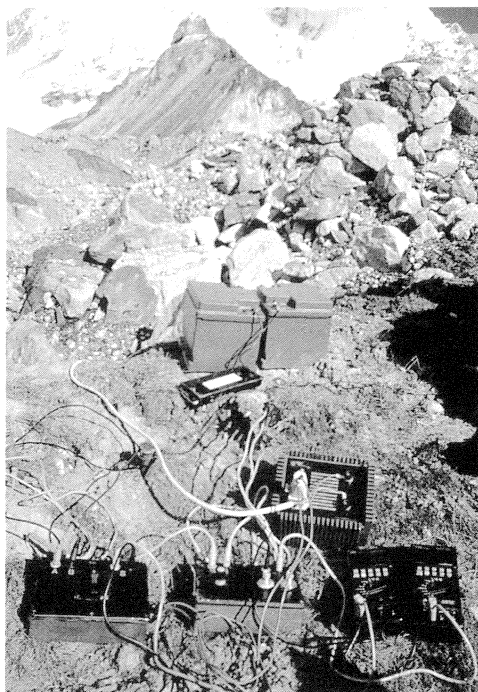


Fig. 4 - La strumentazione usata per i sondaggi elettrici sul Changri Nup. In primo piano sono visibili il sesistivimetro e il convertitore di tensione; in secondo piano le due batterie da 12 V ciascuna. Sullo sfondo la parete est del Nuptse (7.879 m) (foto D. Boschi, 1996).

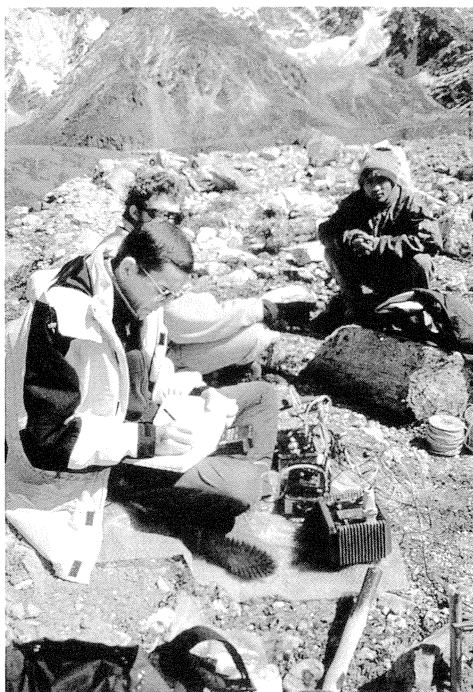


Fig. 5 - Esecuzione di uno stendimento sulla morena laterale destra del Lobuche Glacier, a breve distanza dalla Piramide CNR (foto G. Mortara, 1996).

spetto al centro del sondaggio; il sondaggio si effettua trasmettendo al terreno, tramite la coppia esterna di elettrodi la corrente elettrica e misurando tramite la coppia di elettrodi interna la differenza di potenziale indotta nel terreno stesso. Tenendo conto della distanza degli elettrodi esterni, dei valori della corrente circolante e della differenza di potenziale fra gli elettrodi interni, si ottengono i valori di resistività apparente (R_a). Questi valori e le corrispondenti semidistanze fra gli elettrodi esterni ($AB/2$) individuano dei punti riportati in diagrammi bilogaritmici, dalla cui interpolazione si traccia una “curva elettrica di campagna”. Quest’ultima viene confrontata con una serie di curve teoriche, costruite sulla base di modelli matematici a due o più strati pianoparalleli (RIJKSWATERSTAAT, 1969). Con l’utilizzo di programmi matematici computerizzati (KOEFOED, 1980), si ottiene poi il modello stratigrafico teorico, il più possibile corrispondente alla curva di campagna. Questo modello elettrostratigrafico dipende soprattutto dalla forma della curva e dai valori assoluti della resistività apparente. La sua interpretazione geologica viene fatta considerando le caratteristiche geomorfologiche del sito di misura e i valori noti in letteratura per le diverse tipologie di materiali.

b) Strumenti

Il resistivimetro utilizzato è un apparecchio appositamente costruito per consentire la lettura in continuo sia della differenza di potenziale che della intensità di corrente con una preci-

sione di 0,1 mV e mA. Il vantaggio di questo resistivimetro rispetto a quelli commerciali è rilevante nella prospezione geoelettrica di materiali disomogenei e molto resistivi come i ghiacciai e il *permafrost*, in quanto la differenza di potenziale e l'intensità di corrente possono variare anche in modo sensibile in uno stesso ciclo di misure e l'uso della media matematica del ciclo stesso (come avviene nei resistivimetri commerciali) può indurre un elevato errore. Inoltre l'elevata precisione di misura consente di avere dati affidabili anche quando l'intensità di corrente è molto bassa come in queste applicazioni.

L'energizzazione del terreno è stata realizzata attraverso uno speciale convertitore di tensione appositamente realizzato dalla AGF Electronics SRL di Albizzate (VA) che, collegato a due batterie da 12 V ricaricabili collegate in serie, forniva una tensione di circa 700 V (Fig. 4).

La principale difficoltà nella esecuzione degli stendimenti è stata la realizzazione di configurazioni geometricamente a causa della estrema irregolarità della topografia e della scarsa omogeneità del materiale detritico superficiale incontrato lungo gli stendimenti (Fig. 5). Nonostante questo, si è riusciti ad individuare dei siti che, per la presenza di materiale fine nel quale inserire i picchetti, si sono rivelati adatti a fornire contatti soddisfacenti. In quasi tutti i casi si è avuto un buon passaggio di corrente senza la necessità di utilizzare soluzioni saline per l'abbattimento delle resistenze di contatto. Estremamente difficoltosi si sono rivelati gli spostamenti delle attrezzature geoelettriche sul ghiacciaio anche a causa delle quote del tutto inusuali (si è trattato, per quanto è a nostra conoscenza, del più elevato sondaggio di questo tipo effettuato da studiosi italiani).

c) Localizzazione dei sondaggi

I sei stendimenti sul Ghiacciaio Changri Nup sono stati eseguiti nella zona medio-bassa della lingua, lungo due transetti perpendicolari alla direzione di flusso del ghiacciaio, a quote comprese tra i 5.200 e i 5.245 m (Fig. 1). La morfologia della superficie del ghiacciaio, estremamente accidentata, è caratterizzata da una successione caotica di accumuli grossolanamente conici, costituiti da detrito privo di selezione, granulometricamente variabile dalla sabbia fine ai blocchi di dimensioni metriche (frazione prevalente). L'area interessata dai sondaggi mostrava, ad una osservazione qualitativa, uno spessore detritico tale da inibire quasi totalmente l'ablazione, soprattutto nella zona del transetto più a valle dei due effettuati. Quest'ultimo è stato realizzato nella fascia altimetrica dove non sono più osservabili le morfologie a "semi-luna" (rilievi asimmetrici con ghiaccio affiorante sul versante più ripido, versante a monte), frequenti invece poco più a monte.

Non si è mai incontrata acqua corrente sulla superficie del ghiacciaio nella zona degli stendimenti, mentre è stata rilevata la presenza di diversi laghi epiglaciali, tutti di piccole dimensioni, alimentati dall'acqua di fusione circolante all'interno del detrito.

Il centro del sondaggio sul *rock glacier* era ad una quota di circa 5.200 m, su una delle rughe latero-frontali inerbite; lo stendimento era orientato trasversalmente al corpo detritico.

RISULTATI E DISCUSSIONE

In Figura 6 sono riportati i grafici della resistività apparente dei sondaggi eseguiti sul Ghiacciaio Changri Nup, mentre i risultati dell'interpretazione dei dati sono presentati nella Figura 7, nella quale vengono anche indicati per ogni sondaggio la resistività dei singoli strati e la profondità delle interfacce. L'interpretazione delle curve è stata resa difficoltosa dalle loro elevate pendenze, spesso vicine ai 45° e quindi al limite del metodo di interpretazione basato sul modello degli strati piano paralleli.

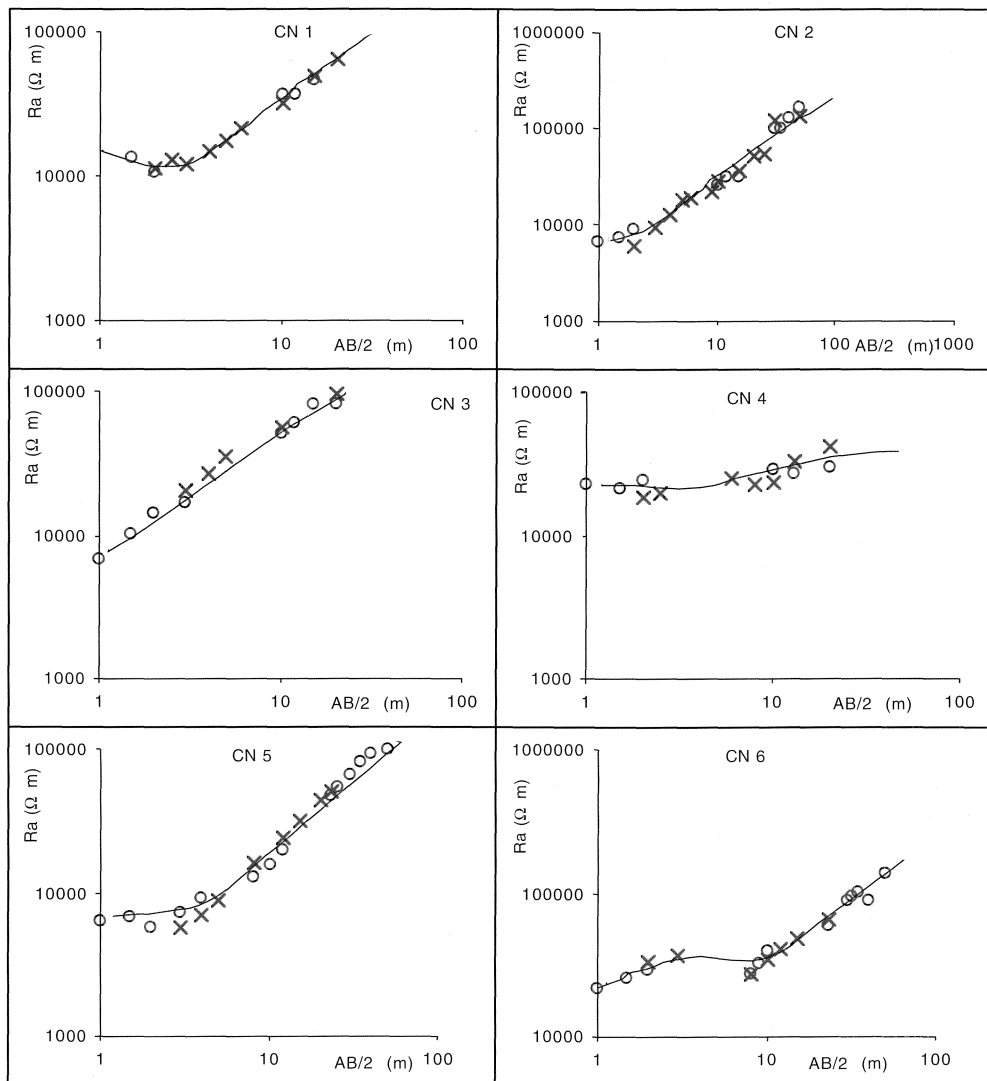


Fig. 6 - Grafici della resistività apparente (R_a) in relazione alla semidistanza elettroica ($AB/2$) per i sondaggi eseguiti sul Ghiacciaio Changri Nup. I punti e le croci rappresentano i dati di terreno, indicati con simboli differenti per differenti distanze tra gli elettrodi M e N; le linee rappresentano la curva teorica di interpretazione dei sondaggi.

I sondaggi 1, 2 e 3 mostrano una copertura detritica di spessore variabile tra 1 e 2 m, pressoché omogenea e con valori di resistività nella media inferiori ai $10 \text{ K}\Omega\text{m}$ (tra i 4,8 e i 6,3 $\text{K}\Omega\text{m}$); questi valori di resistività sono certamente riferibili a detrito eterogeneo, non gelato, umido e piuttosto grossolano. I $17 \text{ K}\Omega\text{m}$ del sondaggio n. 1 indicano un livello particolarmente grossolano e asciutto subito sotto la superficie topografica.

I valori di spessore sono superiori, e la struttura della copertura detritica appare più complessa, nei sondaggi appartenenti al transetto a valle.

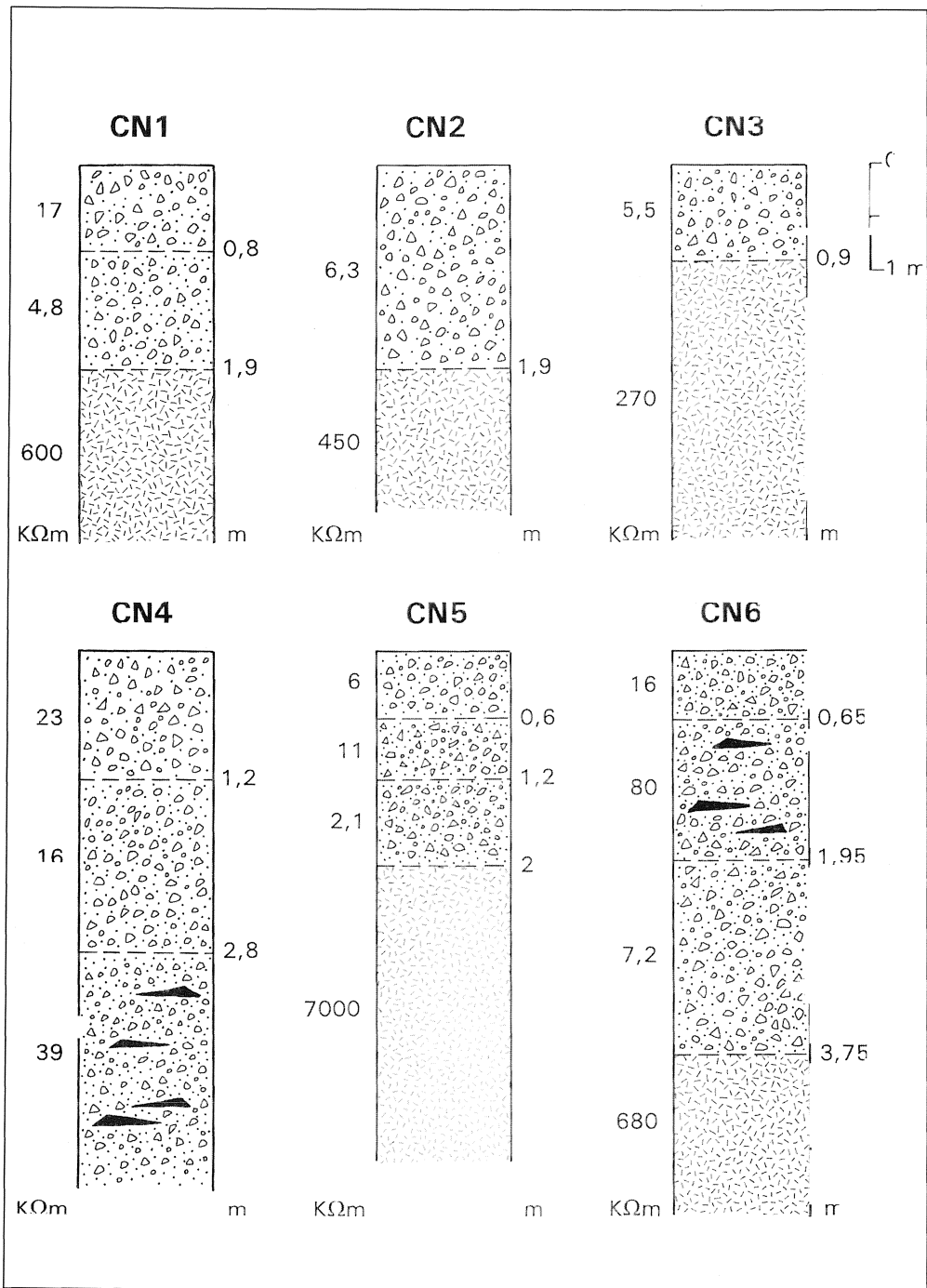


Fig. 7 - Interpretazione elettrostratigrafica e geologica delle curve elettriche di campagna per il Ghiacciaio Changri Nup. Si veda la legenda in figura 9.

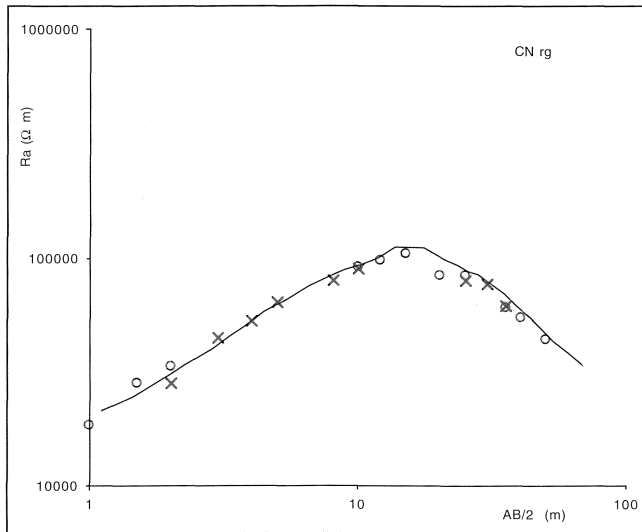


Fig. 8 - Grafico della resistività apparente (R_a) in relazione alla semidistanza $AB/2$ per il sondaggio eseguito sul *rock glacier*. I punti e le croci rappresentano i dati di terreno, indicati con simboli differenti per differenti distanze tra gli elettrodi M e N; la linea rappresenta la curva teorica di interpretazione del sondaggio.

Il sondaggio n. 4 è l'unico dei sei effettuati sul ghiacciaio a non mostrare valori di resistività superiori ai $50 \text{ K}\Omega\text{m}$ interpretabili come ghiaccio; non è quindi stata raggiunta l'interfaccia ghiaccio-detrito e lo spessore complessivo della copertura detritica rimane indeterminato, anche se sicuramente superiore ai 4 m.

Di estremo interesse lo strato, tra quelli individuati da questo sondaggio, con resistività elettrica pari a 39 km ; tale livello è interpretabile solo come *permafrost*, ossia come copertura detritica congelata e contenente ghiaccio interstiziale.

Il sondaggio n. 5 mostra una copertura detritica di spessore inferiore (2 m) rispetto a quella rilevata nei sondaggi dello stesso transetto, e un livello alla base, di spessore indefinito, con una resistività molto alta ($7 \text{ M}\Omega\text{m}$). Tale valore, del tutto confrontabile con i valori riportati in letteratura (Tabella 1), risulta nettamente più elevato rispetto agli altri misurati per il ghiaccio nel corso della presente ricerca, probabilmente a causa della morfologia del sito (cresta rilevata di oltre dieci metri rispetto all'area circostante) che impedisce la circolazione di acqua all'interno del ghiaccio. Altra peculiarità di questo sondaggio è nel livello 3 la resistività molto bassa ($2,1 \text{ K}\Omega\text{m}$), tale da indicare la presenza di acqua; l'ipotesi dell'acqua circolante è in accordo con la presenza, a circa una cinquantina di metri dal centro del sondaggio, di un laghetto epiglaciale.

Nel sondaggio n. 6 la copertura detritica è pari a 3,75 m ed è caratterizzata dalla presenza di uno strato di oltre 1 m di spessore ad elevata resistività ($80 \text{ K}\Omega\text{m}$) che è interpretabile come un livello di *permafrost*.

Complessivamente i sondaggi sul Ghiacciaio Changri Nup hanno evidenziato uno spessore della copertura detritica variabile tra 0,9 e 3,75 m. Il detrito mostra inoltre valori di resistività molto variabili legati alla eterogeneità dei materiali, alla presenza di livelli con acqua circolante e a strati di *permafrost* immediatamente sovrapposti al ghiaccio.

Il grafico della resistività apparente del sondaggio eseguito sul *rock glacier* (CN rg) è riportata nella Figura 8, mentre l'interpretazione dei risultati è presentata nella Figura 9. La for-

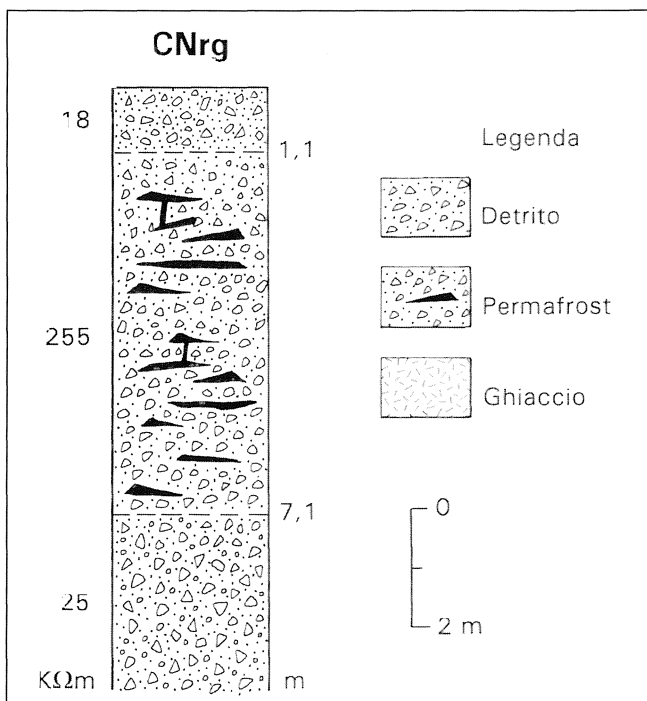


Fig. 9 - Interpretazione elettrostratigrafica e geologica delle curve elettriche di campagna per il *rock glacier* e legenda della simbologia geologica utilizzata.

ma della curva, a campana con convessità verso l'alto, indica la presenza di un livello ad alta resistività posto tra due a resistività minore. In particolare, la resistività di 255 KΩm è riferibile a *permafrost* con contenuto in ghiaccio da medio ad alto; lo spessore del *permafrost* è di circa 6 m, mentre lo strato attivo, che risulta avere una resistività di 18 KΩm, ha uno spessore di circa 1 m. Il *rock glacier*, pur inattivo dal punto di vista dinamico, come evidenziato dalla totale copertura erbacea, contiene ancora del *permafrost*. Si può ritenere che lo strato gelato, pur con spessore cospicuo come sopra indicato, sia isolato e abbia una limitata distribuzione areale e non sia quindi in grado di mantenere il *rock glacier* in una fase di attività.

CONCLUSIONI

I sondaggi elettrici verticali condotti sulla parte inferiore del Changri Nup hanno consentito di verificare come la copertura detritica aumenti di spessore con il diminuire della quota, passando da 0,9-2 m lungo il transetto 1 ad oltre 4 m in corrispondenza del sondaggio 4 del transetto 2.

Si può anche notare come la copertura detritica, pur nei margini d'errore del metodo utilizzato e nel limitato numero dei sondaggi eseguiti, abbia uno spessore minore della zona centrale del transetto altimetricamente più elevato, mentre sembra aumentare verso entrambi i lati nel transetto inferiore.

La resistività del ghiaccio sepolto varia tra i 270 e i 680 K Ω m, valori tra i più bassi rilevati per il ghiaccio di ghiacciaio e confrontabili con quelli ottenuti da GUGLIELMIN *et al.* (1995) e da HASSINGER - MAYEWSKY (1983) ; tali valori indicano un rilevante contenuto in acqua allo stato liquido e/o un certo quantitativo di detrito. Unica eccezione, il valore di 7.000 K Ω m del sondaggio 5, del tutto confrontabile con quelli riportati da RÖTHLISBERGER - VÖGTLI (1967) e ILCETO - ANDRIEUX (1965).

La prospezione elettrica ha permesso di evidenziare la presenza di *permafrost*, verosimilmente al contatto con il ghiaccio nelle zone a copertura detritica maggiore (sondaggio 4), ma anche in livelli più superficiali (sondaggio 6) sovrastanti sedimenti non congelati.

L'insolita stratigrafia evidenziata dal sondaggio 6 (sedimenti non congelati al di sotto del *permafrost*) può derivare dalla presenza di una falda acquifera, che impedisce il congelamento della porzione basale della copertura detritica; i valori misurati potrebbero tuttavia corrispondere ad uno strato di detrito contenente un livello di ghiaccio di ghiacciaio.

Ai fini della comprensione degli effetti della copertura detritica sulla dinamica del Ghiacciaio Changri Nup, risulta importante avere individuato *permafrost* nel sondaggio 4. La profondità dello strato attivo in corrispondenza di questo sondaggio, pari a 2,8 m, può essere considerata come il massimo spessore di detrito oltre il quale il ghiacciaio sottostante non subisce processi di ablazione. La profondità infatti della tavola del *permafrost* al momento della realizzazione dei sondaggi può essere considerata la massima profondità della isoterma 0°C oltre la quale, pur verificandosi variazioni di temperatura, non si hanno fenomeni di fusione.

Importante è anche la individuazione del *permafrost* nel *rock glacier* esaminato. Infatti se si tiene conto della sua morfologia e della copertura vegetale questa forma appare inattiva e dovrebbe quindi presentare al suo interno solo del *permafrost* relitto (BARSCH, 1977). Lo spessore dello strato attivo, pari a 1,1 m, risulta tuttavia confrontabile con i valori ottenuti da BARSCH - JAKOB (1993) nella Valle del Khumbu (0,6-3,9 m) nei *rock glaciers* attivi. Si deve quindi ritenere che, visti il notevole spessore del *permafrost* e l'esiguità dello strato sgelato, il *rock glacier*, sia in equilibrio con le condizioni climatiche attuali, le quali permettono la conservazione di una cospicua massa di *permafrost* (SOLLID - SORBEL, 1992). La sua inattività, evidenziata dalla copertura completa di vegetazione e dalle caratteristiche morfologiche generali, può dipendere dalla scarsa estensione laterale del suolo gelato che limita le possibilità di deformazione e quindi di movimento del *rock glacier*.

RINGRAZIAMENTI

La ricerca qui presentata è avvenuta nell'ambito del Progetto Strategico Ev-K2-CNR "Sezione Glaciologia" (contributo di ricerca 95.02820.ST74). Gli autori ringraziano G.P. Verza della *Mountain Equipe*, che ha collaborato alla messa a punto degli strumenti, e l'*AGF Electronics SRL* di Albizzate (Va), che ha fornito il prototipo di uno speciale convertitore di tensione rivelatosi risolutivo per il buon andamento dei sondaggi. Un particolare ringraziamento ai colleghi che hanno collaborato ai rilievi sul Changri Nup (M. Dugnani e M. Fiorentini, studenti di geologia presso l'Università di Milano, l'Ing. M. Barsanti dell'AEM di Milano, il dr. G. Mortara dell'IRPI-CNR di Torino) e agli sherpa (in particolare Nuhru, Beam, Sunil Rai, Jamba) che hanno reso possibili gli spostamenti sul ghiacciaio. Si ringraziano inoltre l'AEM di Milano, l'IRPI-CNR di Torino e il Comitato Glaciologico Italiano per il contributo prestato ad alcuni componenti della spedizione. La pubblicazione del presente lavoro è avvenuta con un contributo MUR-ST 40%, resp. prof. S. Belloni.

Si ringrazia infine il prof. A. Carton per la sua preziosa opera di referaggio del manoscritto.

B I B L I O G R A F I A

- BARSDCH D., 1977 - *Nature and importance of mass-wasting by rock glaciers in alpine permafrost environment*. Earth Surface Processes, 2: 231-245.
- BARSDCH D., JAKOB M., 1993: *Active rockglaciers and lower limit of discontinuous alpine permafrost in the Khumbu Himalaya, Nepal*. Proceedings of IV Int. Conf. on Permafrost, 27-31.
- BOZHINSKIY A.N., KRASS M.S., POPOVNIK V.V., 1986 - *Role of debris cover in the thermal physics of glaciers*. Journal of Glaciology, 32, 111: 255-266.
- CLARK D.H., CLARK M.N., GILLESPIE A.R., 1994 - *Debris-covered glaciers in the Sierra Nevada, California, and their implications for snowline reconstructions*. Quaternary Research, 41: 139-153.
- EVIN M., FABRE D., 1992 - *The distribution of permafrost in rock glaciers of the Southern Alps (France)*. Geomorphology, 3: 57-71.
- FISCH W. sen., FISCH W. jun., HAEBERLI W., 1977 - *Electrical D.C. resistivity soundings with long profiles on rock glaciers and moraines in the Alps of Switzerland*. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 13, 9: 239-260.
- GAHE E., ALLARD M., SEGUIN M.K., FORTIER R., 1988 - *Measurements of active layer and permafrost parameters with electrical resistivity, self potential and induced polarization*. Proceedings of V Int. Conf. on Permafrost, Trondheim, Norway: 148-153.
- GUGLIELMIN M., LOZEJ A., TELLINI C., 1994 - *Permafrost and rock glaciers distribution in the Livigno area (Northern Italy)*. Permafrost and Periglacial Processes, 5: 25-36.
- GUGLIELMIN M., NARDO A., SMIRAGLIA C., 1995 - *Lo spessore dei ghiacciai della Valfurva. Misurazioni tramite sondaggi elettrici verticali*. Neve e Valanghe, Rivista AINEVA, 24: 60-67.
- HAEBERLI W., 1985 - *Creep of mountain permafrost. Internal structure and flow of alpine rock glaciers*. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidenössische Technische Hochschule, Zürich, 77, 142 pp.
- HASSINGER J.M., MAYEWSKY P.A., 1983 - *Morphology and dynamics of the rock glaciers in Southern Victoria Land, Antarctica*. Arctic and Alpine Research, 15, 3: 351-368.
- HOEKSTRA P., MCNEILL D., 1973 - *Electromagnetic probing of permafrost*, Proceedings of II Int. Conf. on Permafrost, Yakutsk, North American Contribution, 517-526.
- ILICETO V., ANDRIEUX P., 1965 - *Mesures électriques sur le Glacier de la Marmolada (Alpes Orientales)*. Bollettino del Comitato Glaciologico Italiano, II, 15: 72-90.
- IWATA S., WATANABE O., FUSHIMI H., 1980 - *Surface morphology in the ablation area of the Khumbu Glacier*. Seppyo, 41: 9-17.
- KING L., 1982 - *Qualitative und quantitative Erfassung von Permafrost in Tarfala (Schwedisch-Lappland) und Jotunheimen (Norwegen) mit Hilfe geoelektrischer Sondierungen*. Zeit. Geomorph. N.F., Suppl. Bd. 43: 141-160.
- KING L., FISCH W., HAEBERLI W., WAECHTER H.P., 1987 - *Comparison of resistivity and radio-echo soundings on rock glacier permafrost*. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 23, 1: 77-97.
- KOEFOED O., 1980 - *Geosounding principles, 1: Resistivity sounding measurements*. Elsevier Scientific, pp. 276.
- NAKAWO M., IWATA S., WATANABE O., YOSHIDA M., 1986 - *Processes which distribute supraglacial debris on the Khumbu Glacier, Nepal, Himalaya*. Annals of Glaciology, 8: 129-131.
- ØSTREM G., 1959 - *Ice melting under a thin layer of moraine, and the existence of ice cores in moraine ridges*. Geografiska Annaler, 41, 4: 228-230.
- RIJKSWATERSTAAT, 1969 - *Standard graphs for Resistivity Prospecting*. European Association of Exploration Geophysics.
- RÖTHLISBERGER H., 1967 - *Electrical resistivity measurements and sounding on glaciers: introductory remarks*. Journal of Glaciology, 6, 47: 599-606.
- RÖTHLISBERGER H., VÖGTLI K., 1967 - *Recent D.C. Resistivity soundings on Swiss glaciers*. Journal of Glaciology, 6, 47: 607-621.
- SEGUIN M.K., GAHE E., ALLARD M., BEN-MIKOUD K., 1988 - *Permafrost geophysical investigation at the new airport site of Kangiqsualluqjuq, northern Quebec, Canada*. Proceedings of V Int. Conf. on Permafrost, Trondheim, Norway: 980-986.
- SOLLID L., SORBEL B., 1992 - *Rock glaciers in Svalbard and Norway*. Permafrost and Periglacial Processes, 3: 215-220.
- VÖGTLI K., 1967 - *D.C. resistivity soundings on Devon Island, N.W.T., Canada*. Journal of Glaciology, 6, 47: 635-642.
- VONDER MÜHLL D., 1993 - *Geophysikalische Untersuchungen im Permafrost des Oberengadins*. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidenössische Technische Hochschule, Zürich, 122, pp 222.
- WILLIAMS P.J., SMITH M.W., 1989 - *The frozen earth. Fundamentals of geocryology*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 324.