

PROSPEZIONE DI **GHIACCIAI** ALCUNI **DOLOMITICI** TRAMITE TECNICHE **GPR** E **GPS**

**Marco Pasta
e Mauro Pavan**
DIPTERIS

Università degli Studi di Genova
Dipartimento Per Lo Studio
Del Territorio e Delle Sue Risorse

Diego Sonda
Libero professionista

Federico Carollo
SWF Studio
Libero Professionista

Anselmo Cagnati
ARPAV
Centro Valanghe di Arabba

Vengono presentati i risultati delle prospezioni eseguite con tecnica georadar e gps alla fine dell'estate 2004 sul ghiacciaio della Marmolada, sul ghiacciaio della Fradusta e sul ghiacciaio Superiore dell'Antelao. Le metodologie impiegate, già largamente sperimentate dal gruppo di lavoro, hanno permesso di determinare gli spessori delle coperture glaciali, evidenziando valori massimi di circa 45 metri per il ghiacciaio della Marmolada, di circa 37 metri per la vedretta della Fradusta e di circa 80 metri per il ghiacciaio Superiore dell'Antelao.

Per la prospezione GPR è stata impiegata sia un'antenna da 100 Mhz, che ha dato buone indicazioni circa i riflettori medio profondi sia un'antenna da 35 Mhz che ha confermato ed in alcuni casi fugato dubbi di interpretazione per i riflettori più profondi.





Fig. 1 - Il Ghiacciaio Principale della Marmolada.

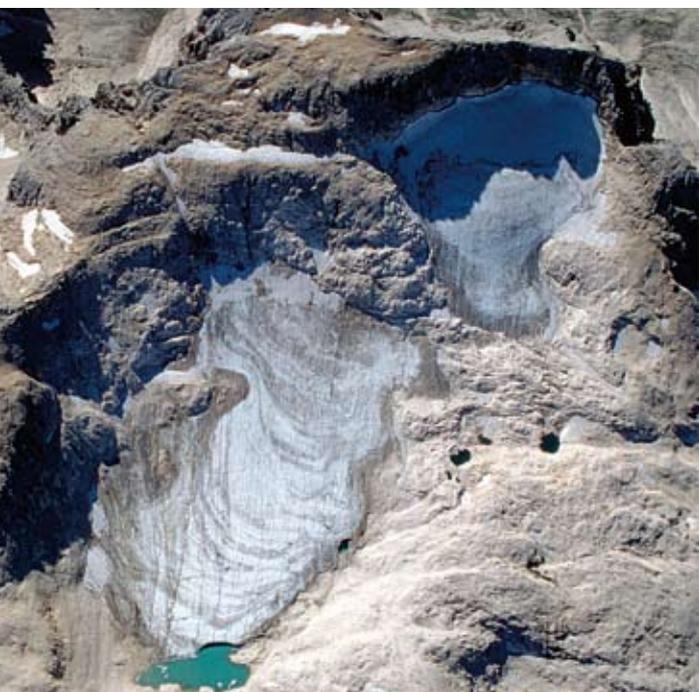


Fig. 2 - Il Ghiacciaio della Fradusta.

Fig. 3 (pagina precedente) - Il Ghiacciaio Superiore dell'Antelao.

INQUADRAMENTO GLACIOLOGICO DEI SITI DI MISURA

Ghiacciaio della Marmolada

Il Ghiacciaio Principale della Marmolada è il più esteso e celebre apparato glaciale delle Dolomiti. Esso si estende su gran parte del versante settentrionale del massiccio su un'area di 1,980 km² (rilievo 2004) approssimativamente a forma di trapezio la cui base maggiore, intersecata dal Sasso delle Undici e dal Sasso delle Dodici, corrisponde alla zona frontale che non va quindi a

formare una vera lingua ablatrice ma tre distinte e brevi colate, l'orientale, la centrale e l'occidentale, terminanti ciascuna con una propria fronte (Fig. 1).

Dal punto di vista idrografico il ghiacciaio appartiene ai bacini Avisio-Adige (80%) e Cordevole-Piave (20%). La grande notorietà del ghiacciaio, che si è tradotta in una notevole mole di materiale cartografico, iconografico e scientifico, è dovuta alla sua particolarità nel contesto dolomitico, all'interesse alpinistico e, probabilmente, anche alla sua facile osservabilità ed accessibilità da N.

Anche il ghiacciaio della Marmolada, come tutti gli apparati dolomitici, ha risentito pesantemente dei cambiamenti climatici in atto con un trend di riduzione volumetrica, areale e di arretramento frontale particolarmente accentuati a partire dalla metà degli anni '80 del secolo scorso.

Il ghiacciaio, oggi risalito al di sopra della quota 2500m, presenta un profilo longitudinale marcatamente concavo a causa della progressiva perdita di massa glaciale. Le fronti, dagli anni '20 del secolo scorso ad oggi, hanno subito un arretramento medio di 400 m, interrotto

solo dalla breve e modesta avanzata tra il 1973 ed il 1982 (fonte C.G.I.).

Il ghiacciaio, caratterizzato da scarso riparo orografico, è alimentato principalmente per via diretta e dipende quindi fortemente dai fattori climatici. Inoltre, l'intenso sfruttamento che ha subito negli ultimi decenni per l'attività sciistica (soprattutto estiva), pur avendone accresciuto la notorietà apportando benefici economici alle popolazioni locali, non ne ha favorito la buona conservazione.

Ghiacciaio della Fradusta

Si tratta di un ghiacciaio di forma non ben definita che si estende sul versante settentrionale della Cima di Fradusta (2939 m) sull'Altopiano della Pale di San Martino. Pur essendo ubicato in territorio amministrativo della Provincia Autonoma di Trento, dal punto di vista idrografico sembra afferire al bacino del Cordevole-Piave anche se la corretta identificazione dell'idrografia di superficie è incerta.

Il ghiacciaio, che presenta un'estensione di 0,217 km² (rilievo 2004), è caratterizzato da una superficie complessivamente poco inclinata, con pendenza più accentuata nel settore superiore

e da una fronte che termina in un piccolo laghetto proglaciale a 2650 m di quota (Fig. 2).

L'apparato è caratterizzato da scarso riparo orografico ed è alimentato quasi esclusivamente in maniera diretta ragion per cui l'evoluzione della massa glaciale risulta direttamente correlata ai fattori climatici. Il ghiacciaio mostra una tendenza alla riduzione di volume e di area ben superiore ai valori medi degli altri apparati dolomitici tanto che la sua sopravvivenza, alla luce dell'attuale trend climatico, appare compromessa.

La variazione areale media nel periodo 1910-1999 è stata del 78% (Cagnati, 2002) con arretramento frontale di ben 41 m nel periodo 1991-1997. Già con la campagna di osservazioni del 2002 risultava evidente la progressiva rapida emersione delle rocce centrali che faceva presupporre, in tempi brevi, lo smembramento del corpo del ghiacciaio in due porzioni distinte.

Ghiacciaio Superiore dell'Antelao

Il Ghiacciaio Superiore dell'Antelao (chiamato anche Ghiacciaio Orientale dell'Antelao) è ubicato immediatamente sotto la cima più orientale del massiccio (Cima Fanton, 3162 m) e si sviluppa in direzione E-N-E con una lingua principale e una piccola lingua trasfluente verso il bacino del sottostante Ghiacciaio Inferiore dell'Antelao non più rigonfia e imponente come agli inizi del '900 ma estremamente ridotta. Il ghiacciaio, che presenta una superficie poco inclinata e addirittura sub-pianeggiante nel suo tratto mediano, rappresenta uno degli esemplari più belli e significativi del glacialismo dell'area dolomitica.

La superficie totale del ghiacciaio è di circa 0,283 km² (rilievo

2004) e anche per questo apparato appaiono evidenti i segni della forte riduzione in atto, dal ritiro frontale (37 m nel periodo 1981-1997), alla riduzione di spessore, alla deglaciazione delle pareti circostanti. La fronte principale presenta una caratteristica forma "ad unghia" e il margine del ghiaccio è quasi completamente libero da copertura detritica (Fig. 3).

Il ghiacciaio è sovrastato per buona parte del perimetro da pareti rocciose che offrono tuttavia un modesto riparo orografico anche se i numerosi canali e il tipo di stratificazione rocciosa presente in destra orografica, convogliano sul ghiacciaio sottostante masse nevose dovute a valanghe. La modesta inclinazione della superficie del ghiacciaio e l'ampiezza del circo contribuiscono tuttavia a conferire notevole importanza all'alimentazione diretta.

GEORADAR (PRINCIPI)

Il metodo di indagine utilizzato (GPR = Ground Probing Radar o georadar), è una tecnica di prospezione di tipo indiretto che sfrutta la generazione,

propagazione e ricezione nel suolo di onde elettromagnetiche ($0,1 \text{ m} < \lambda < 100 \text{ m}$). Le frequenze impiegate possono variare a seconda del tipo di obiettivo e del contesto ambientale in cui si opera fra i 10 MHz e i 2,5 GHz.

La tecnica di indagine georadar sfrutta la capacità di rilevare mezzi di diversa permittività relativa e conducibilità, attraverso la riflessione delle onde elettromagnetiche generate da un'antenna.

Il percorso dell'onda elettromagnetica all'interno di un mezzo stratificato è vincolato dalle leggi dell'ottica geometrica e dal principio di Fermat. Quando l'onda incontra l'interfaccia fra mezzi con diverse proprietà elettriche può venire riflessa e/o rifratta e quindi ritornare in superficie ed essere captata.

Le riflessioni si verificano nel sottosuolo all'interfaccia tra strati con impedenza elettromagnetica diversa e sono dovute, per esempio, a cambiamenti della litologia, del contenuto in acqua, della densità e della temperatura.

Tramite un'antenna vengono irradiati nel sottosuolo impulsi di energia elettromagnetica di brevissima durata (qualche nano-

Fig. 4 - Rappresentazione schematica del processo di misura con metodo georadar.

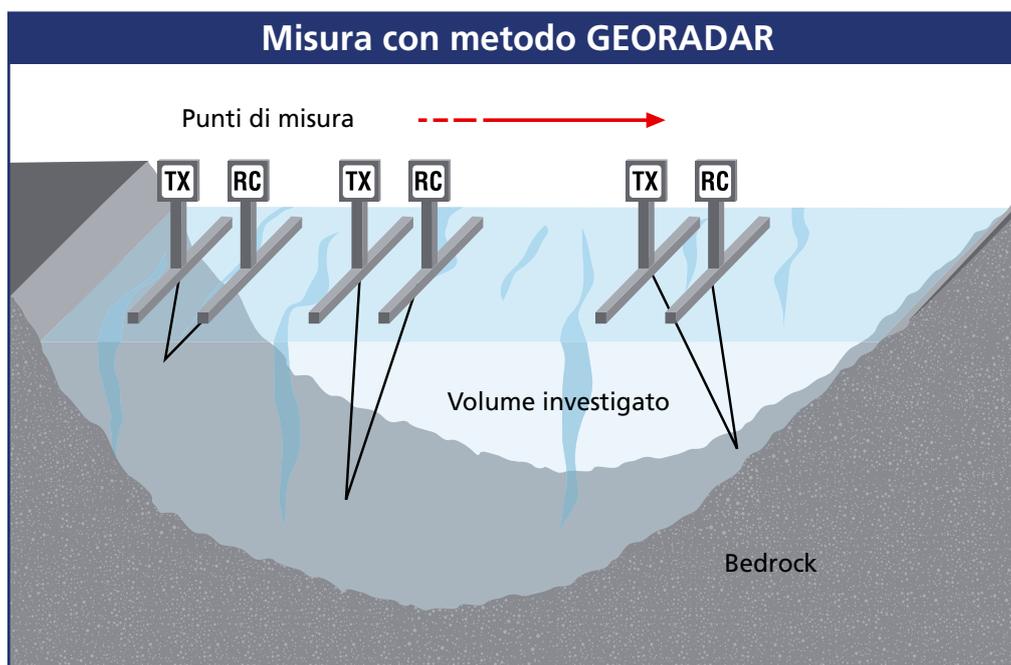
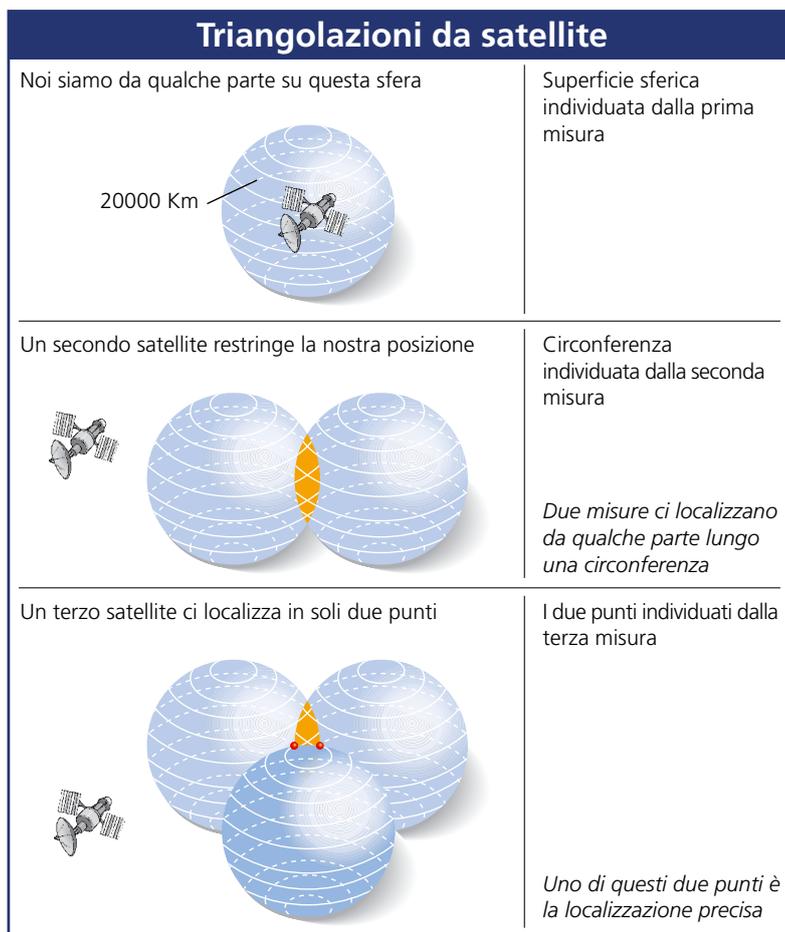


Fig. 5 - Schematizzazione trilaterazione.



secondo) che vengono riflessi, ricevuti, registrati ed elaborati. Il tempo impiegato dall'impulso per viaggiare dal trasmettitore al riflettore e ritornare al ricevitore viene misurato e, nel caso che la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche sia nota, si può determinare la profondità di riflessione (Fig. 4). Nelle rappresentazioni schematiche l'onda elettromagnetica viene rappresentata da un raggio in una dimensione, in realtà quello che si diparte dall'antenna è un fascio di impulsi che si allarga verso il basso secondo un fronte d'onda sferico, la cui intensità con la direzione varia secondo il diagramma di irradiazione dell'antenna emittente. La risoluzione ottenibile e la profondità di penetrazione sono funzione rispettivamente della lunghezza d'onda del segnale emesso, dell'attenuazione e dell'assorbimento subito dall'onda nel terreno in altre parole

maggiore è la profondità della discontinuità oggetto dell'indagine, minore è la risoluzione complessiva risultante.

In generale la scelta della frequenza da impiegare in una prospezione georadar rappresenterà il migliore compromesso tra risoluzione richiesta, profondità di indagine, dimensione del "target", necessità logistiche e contesto glaciologico in cui si opera.

GPS (PRINCIPI)

Il sistema di posizionamento globale (GPS, Global Positioning System) prevede l'utilizzo dei satelliti per determinare le coordinate di un qualsiasi punto della terra. I satelliti in orbita trasmettono, oltre ad altre informazioni, i dati orbitali per calcolare la loro posizione (effemeridi), e un segnale di tempo molto preciso per stabilire l'istante esatto di inizio della trasmissione. Semplificando in modo estremo il

funzionamento di uno strumento GPS si può dire che il ricevitore a terra misura il tempo di ricezione utilizzando un suo orologio interno sincronizzato con quello dei satelliti sul GPS-time (tempo del sistema), moltiplicando la differenza dei due valori di tempo per la velocità dell'onda elettromagnetica si ottiene la distanza tra satellite e ricevitore. Questa misura permette di individuare una superficie sferica di raggio uguale alla distanza misurata. Con l'osservazione di un secondo satellite si individuerà una seconda sfera che intersecherà la prima, l'intersezione tra le due superfici sferiche descritte dal segnale delimita un cerchio sulla cui circonferenza si trova il ricevitore.

Una terza osservazione delimiterà una terza sfera che intersecherà le due precedenti in due punti; in questo caso, scartando la posizione non occupata dal GPS si può calcolare la posizione del ricevitore.

Per accrescere la precisione della misura (soprattutto per la misura dell'altezza sul livello del mare) si dovrà far ricorso ad un quarto satellite che, oltre a determinare univocamente la posizione del GPS su uno dei due punti individuati, servirà a correggere la sincronia dell'orologio del ricevitore (meno preciso di quello dei satelliti) diminuendo notevolmente l'errore sulla misura del tempo.

Il procedimento descritto, comunemente chiamato trilaterazione, è riassunto nella Fig. 5.

ESECUZIONE DELLE MISURE GPR E GPS

Rilievi GPS

Dopo una preliminare fase di studio delle aree oggetto di indagine si è convenuto di utilizzare la tecnica di rilievo basata sul posizionamento globale (GPS, Global

Position System), in quanto l'area in esame si presentava piuttosto estesa e priva di ostacoli significativi che potessero oscurare il segnale satellitare, salvo la presenza delle ripide pareti rocciose in prossimità delle creste.

Per inquadrare correttamente un rilievo topografico nel sistema WGS84 è necessario appoggiarsi ad un punto di coordinate note; per questo motivo per ciascun ghiacciaio è stato materializzato, alla base dello stesso, un punto di appoggio derivato dal punto IGM95 più vicino. Questi punti, per le caratteristiche della rete di cui fanno parte, sono espressi nelle coordinate WGS84 e Gauss-Boaga. Per i medesimi punti, inoltre, è nota con precisione l'ondulazione geoidica, ossia lo scostamento fra la quota ellissoidica (quota sull'ellissoide WGS84) e quota ortometrica (quota sul livello del mare).

Il rilievo topografico è stato condotto adottando la medesima metodologia per tutti i ghiacciai rilevati; in particolare i punti materializzati in prossimità delle aree da rilevare sono stati utilizzati per posizionare la stazione base GPS, in grado di fornire in tempo reale la correzione differenziale al ricevitore Rover durante la fase di rilievo, attraverso un ponte radio (UHF).

I dati raccolti con il GPS sono poi stati utilizzati per localizzare i rilievi con georadar e quindi definire l'andamento del bedrock. In altre parole i rilievi sono stati impostati per ottenere due modelli digitali delle quote: uno di superficie e uno del bedrock, in modo da poter valutare, per differenza, gli spessori e il volume complessivo del ghiaccio presente.

Il rilievo della superficie dei ghiacciai è stato condotto adottando lo schema "Stop and Go" in

modalità RTK (Real Time Kinematic). La correzione differenziale, a ciascun punto rilevato, era applicata in tempo reale grazie al ponte radio (UHF) stabilito fra la stazione GPS base e il Rover. Nel rilievo con strumentazione GPS è necessario disporre in modo continuativo di almeno 4 satelliti, ma lavorando in modalità RTK è auspicabile un numero di satelliti pari a 5; salvo ostacoli significativi questi valori sono rispettati nelle zone di pianura e negli ambienti aperti. Eventuali problemi possono insorgere nelle zone di montagna oppure se ci si avvicina troppo a degli ostacoli, rappresentati nel caso specifico dalle pareti rocciose verticali o versanti particolarmente ripidi. Queste problematiche sono state in parte superate da una puntuale analisi dell'orizzonte apparente e in secondo luogo per la strumentazione adottata. Infatti, i ricevitori GPS utilizzati sono in grado di ricevere il segnale satellitare da entrambe le costellazioni presenti in orbita (GPS-NAVSTAR+GLONASS), assicurando per tutto l'arco delle giornate di rilievo almeno 5-6 satelliti anche a ridosso delle pareti rocciose, ma con punte di 10-13 satelliti in spazi aperti (Fig. 6).

Tecnicamente il rilievo è stato condotto dall'alto verso il basso, tranne per una parte del ghiaccio della Fradusta, seguendo dei percorsi a zig-zag che andavano da un estremo all'altro dell'area da rilevare. Lungo queste linee sono stati raccolti in modo continuo dati di posizionamento con un intervallo temporale di registrazione di 5 secondi. In termini spaziali la distanza fra i punti non è stata superiore ai 2-5 metri, mentre, per quanto riguarda la precisione topografica dei singoli punti, l'errore definito dallo scarto quadratico medio non superava i 2 cm sia in planimetria, sia in quota.

Per la tecnica di rilievo adottata, i dati registrati dai ricevitori GPS erano già corretti differenzialmente, mentre non potevano essere utilizzati così com'erano per le successive elaborazioni, in quanto riferiti al sistema WGS84. Si è resa necessaria, pertanto, la conversione di coordinate planimetriche dal sistema WGS84 alle coordinate Gauss-Boaga e la trasformazione delle quote da ellissoidiche a geoidiche.

Nel caso specifico è stato utilizzato il software dell'Istituto Geografico Militare (Verto2), il quale richiede che siano forniti i

Ricezione satellitare GPS da parte delle due costellazioni presenti in orbita (GPS-NavStar e GLONASS)

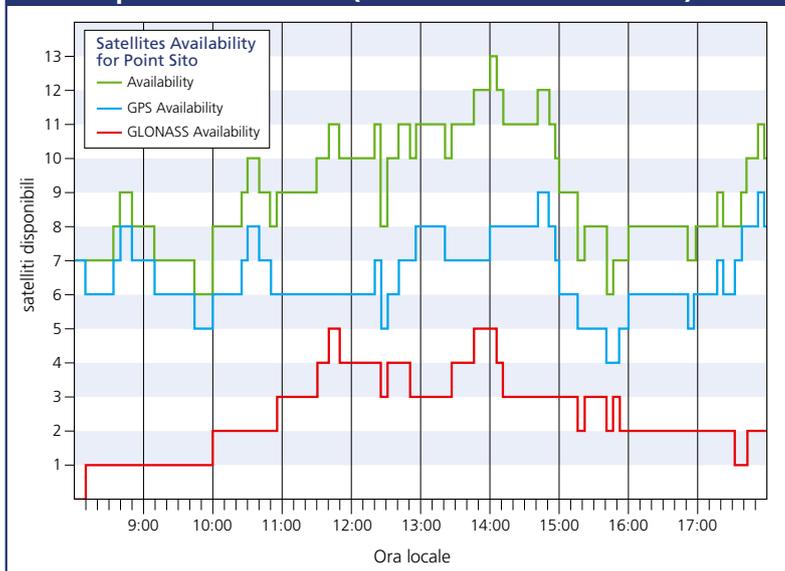


Fig. 6 – Esempio di previsione della configurazione satellitare in termini di numerosità (la linea superiore indica la disponibilità totale di satelliti, la linea intermedia la disponibilità di satelliti della costellazione GPS-NavStar e la linea più in basso la disponibilità di satelliti della costellazione GLONASS).

Esempio di segnale GPR

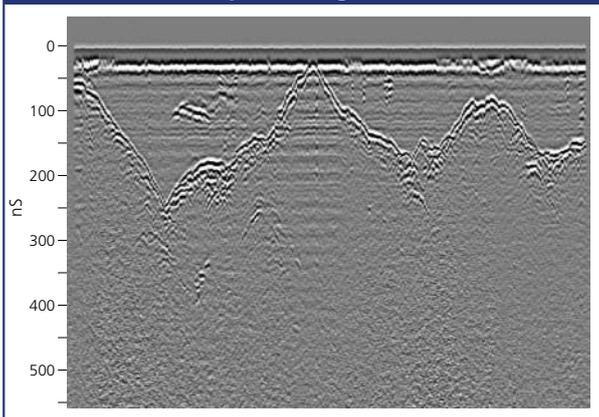


Fig. 7

Esempio di segnale GPR

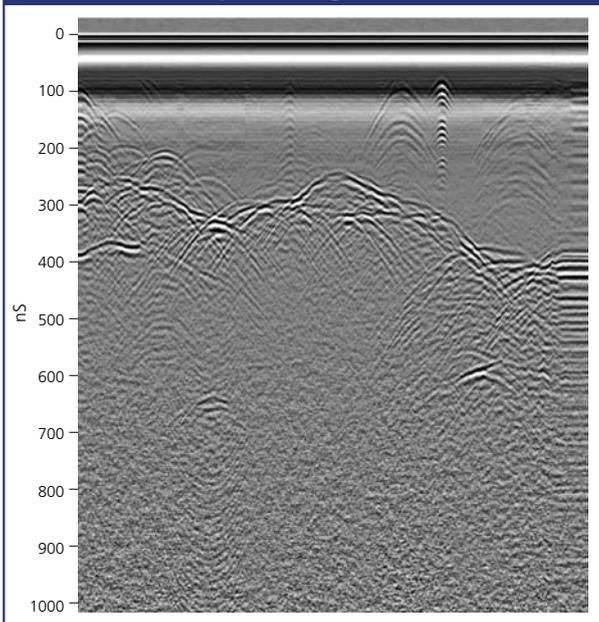


Fig. 8

Esempio di segnale GPR

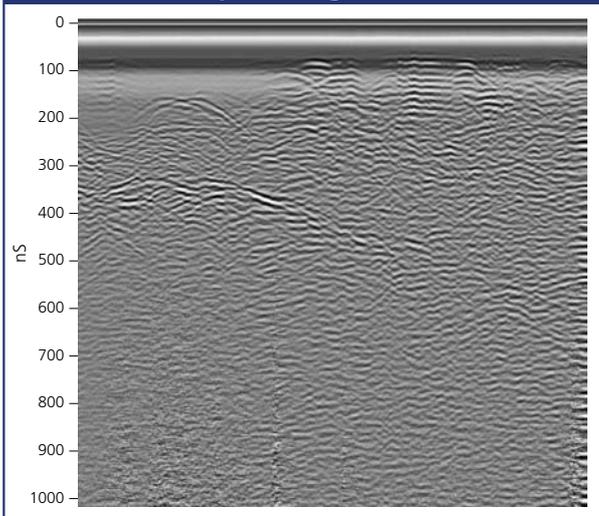


Fig. 9

dati relativi al "grigliato" di zona, ossia la variazione spaziale dei parametri di rototraslazione, oltre alle informazioni sull'ondulazione geoidica.

La rappresentazione dei punti raccolti espressi nel sistema di coordinate Gauss-Boaga e quota sul livello del mare hanno permesso di elaborare il modello tridimensionale delle aree rilevate, schematizzato con una maglia di triangoli irregolari, che descrivono le variazioni altimetriche. Questi triangoli hanno rappresentato l'informazione di base per il tracciamento delle curve di livello con equidistanza di 1 metro.

Rilievi GPR

Nel mese di Settembre e di Ottobre 2004 sono stati eseguiti numerosi rilevamenti lungo profili disposti perpendicolarmente alla massima pendenza dei ghiacciai considerati e in alcuni casi, dove necessario per controllo in fase di elaborazione o impossibilitati a procedere diversamente, lungo percorsi secondo la massima pendenza. L'esecuzione delle misure è stata realizzata con movimentazione a piedi della strumentazione lungo i profili scelti e con l'ausilio di elicottero solo per il trasporto in loco della strumentazione e delle persone impegnate nelle misure. La scelta della prospezione da terra è stata preferita per la possibilità di ottenere un migliore dettaglio sul posizionamento dei singoli rilievi e per la facile raggiungibilità di molti settori di misura. Si è considerato, infatti, che la prospezione aerea per i ghiacciai considerati, avrebbe comportato notevoli difficoltà operative legate al volo radente per la presenza di zone acclivi con pareti rocciose.

Contemporaneamente alla prospezione radar è stato eseguito il rilievo tramite tecnica DGPS in tempo reale della topografia, dei punti notevoli (estremi dei profili) e di tutti i percorsi effettuati durante l'esecuzione delle misure. Per il ghiacciaio della

Fradusta lo sviluppo complessivo delle misure è stato di circa 4900 m, per il ghiacciaio Superiore dell'Antelao 8300 m e per la Marmolada oltre 18 Km.

Sul ghiacciaio della Fradusta, sulla base delle misure preliminari, si è proceduto utilizzando solamente il set di antenne da 100 MHz mentre per i ghiacciai dell'Antelao e della Marmolada si è resa necessaria, in considerazione dei maggiori spessori presenti, l'integrazione delle misure a 100 MHz con altre eseguite con antenna da 35 MHz. Sia per il ghiacciaio dell'Antelao sia per il ghiacciaio della Marmolada sono state escluse dalla prospezione alcune aree in quanto caratterizzate da notevole acclività e dalla presenza di estese aree screpacciate.

Nel primo caso infatti è risultato improponibile procedere all'esecuzione delle misure a causa della difficoltà di movimentare la strumentazione su pendii in forte pendenza ed, al contempo garantire una adeguata sicurezza per gli operatori sul campo. Nel secondo caso, sulla base di precedenti esperienze, si è preferito rinunciare all'esecuzione dei rilievi, tutto a vantaggio di aree di maggiore interesse poiché la presenza di crepacci e di materiali terrigeni ed acqua al loro interno, non avrebbero permesso una propagazione efficiente del segnale nella massa e quindi di poter ottenere informazioni affidabili sulla profondità del bedrock.

INTERPRETAZIONE DELLE MISURE

Le attività sul terreno hanno fornito una notevole messe di dati per la cui elaborazione si è proceduto ad una prima fase di analisi del segnale finalizzata al miglioramento qualitativo delle sezioni acquisite al fine di porre

maggiormente in risalto gli eventi di interesse. Per questo scopo il segnale è stato opportunamente filtrato ed amplificato. Sono stati poi corretti i tempi iniziali di acquisizione per riallineare l'istante di inizio delle tracce rispetto ad un tempo zero. Successivamente una seconda fase di analisi ha consentito di discriminare il riflettore dovuto al contrasto ghiaccio/roccia da falsi echi dovuti a riflessioni prodotte da discontinuità laterali. Infine si è calcolato lo spessore del ghiaccio in base ai tempi di percorrenza del segnale nel mezzo. Per il calcolo degli spessori si è assunta una velocità delle onde elettromagnetiche nel ghiaccio pari a 0,168 m/ns; questo valore è riportato in bibliografia come il più frequentemente utilizzato nella prospezione di ghiacciai di tipo temperato-alpino. Nelle figure 7, 8 e 9 è riportato un campionario delle tipologie di segnali più comunemente individuati nella prospezione dei tre ghiacciai. Si passa dall'individuazione di un riflettore regolare piuttosto continuo (Fig. 7) ben evidenziato in un mezzo omogeneo a condizioni di segnale più complesse in cui si ha il riflettore di interesse costituito dall'involuppo di varie iperboli di diffrazione (Fig. 8) e, ancora, a situazioni in cui il segnale appare confuso in un "rumore di fondo" dovuto sia alla inomogeneità del mezzo (fratturazione) sia da echi prodotti da discontinuità laterali (Fig. 9). L'interpretazione del segnale ha permesso di ricavare la distribuzione di spessore per i tre ghiacciai esaminati.

Il Ghiacciaio della Marmolada

In particolare per il ghiacciaio della Marmolada la prospezione ha permesso di stabilire che i maggiori spessori della coltre sono situati a Nord del vallone

discendente da Punta Rocca con il raggiungimento di circa 45 m e a Sud del Sas da les Undesc con la presenza di coperture il cui spessore massimo è di circa 40 m. Si evidenziano spessori importanti anche sulle due calotte sommatali di punta Penia e di Punta Rocca dove si sono individuati spessori della copertura che arrivano a circa 30 m. Allo stesso modo è stato possibile identificare alcune zone caratterizzate da minima copertura, evidenziate in parte da morfologie superficiali caratterizzate dalla presenza di rocce emerse. In questa parte del ghiacciaio, situata a sud del Sas da les Doudesc fino all'attacco delle maggiori acclività sotto Punta Rocca, si sono individuati spessori della coltre dell'ordine del metro. In quasi tutti i profili è stato possibile identificare il segnale riflesso dall'interfaccia ghiaccio-bedrock ad esclusione di alcuni in cui la determinazione del riflettore di interesse è piuttosto dubbia in conseguenza della presenza di numerosi eventi di disturbo. Tali eventi possono essere ricondotti a riflessioni laterali sulle pareti di crepacci o sulla superficie laterale del bacino roccioso nelle zone di forte pendenza, e ancora ad atte-

nuazione del segnale in volumi di ghiaccio fratturati e/o impregnati di acqua.

Anche per la parte di ghiacciaio situata nella Valle che da Pian dei Fiacconi porta a Punta Penia si hanno dati di cattiva qualità probabilmente a causa del notevole stato di fratturazione del ghiaccio che produce vistosi fenomeni di diffrazione del segnale. Le stime sullo spessore del ghiaccio sono quindi da considerarsi, anche per quest'area con cautela.

La valutazione degli spessori, e la loro distribuzione, per il ghiacciaio della Marmolada, può essere riassunta nella carta di isopache presentata in Fig. 10. La mappatura è stata realizzata interpolando i valori degli spessori rilevati sui profili di misura secondo una griglia regolare con celle quadrate di 10 m di lato. L'elaborazione dei dati ridistribuiti sulla griglia ha permesso di stimare il volume del ghiacciaio in circa $29,5 \cdot 10^6$ metri cubi con uno spessore medio di circa 16,5 m.

Il Ghiacciaio della Fradusta

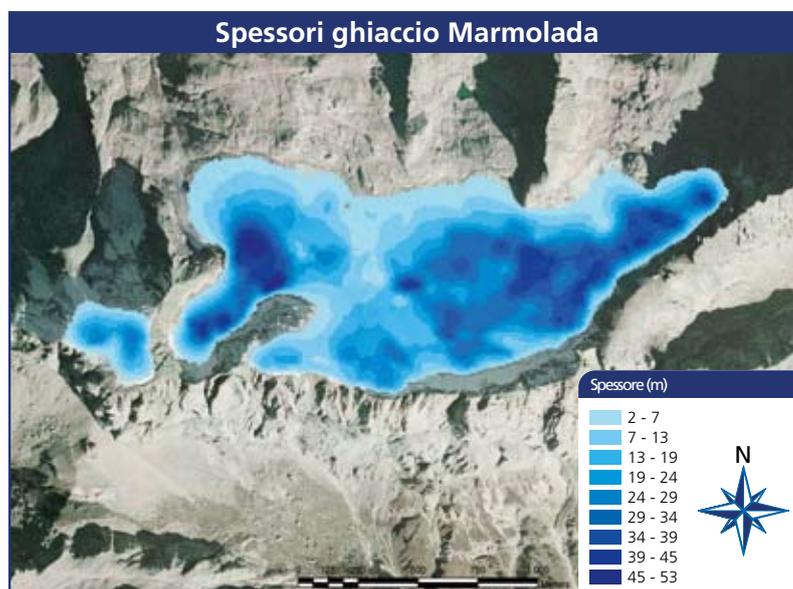
Per quanto riguarda il ghiacciaio della Fradusta il rilievo ha permesso di definire lo spessore della copertura glaciale e di individuare nel lobo superiore le massime profondità che giun-

Fig. 7 - Esempio di segnale acquisito in condizioni di ghiaccio omogeneo e superficie del bedrock regolare.

Fig. 8 - Esempio di segnale acquisito in condizioni di ghiaccio omogeneo e superficie del bedrock irregolare.

Fig. 9 - Esempio di segnale acquisito in condizioni di ghiaccio fratturato e superficie del bedrock irregolare.

Fig. 10 - Mappa rappresentativa degli spessori del Ghiacciaio Principale della Marmolada (su ortofoto CGR 2003).



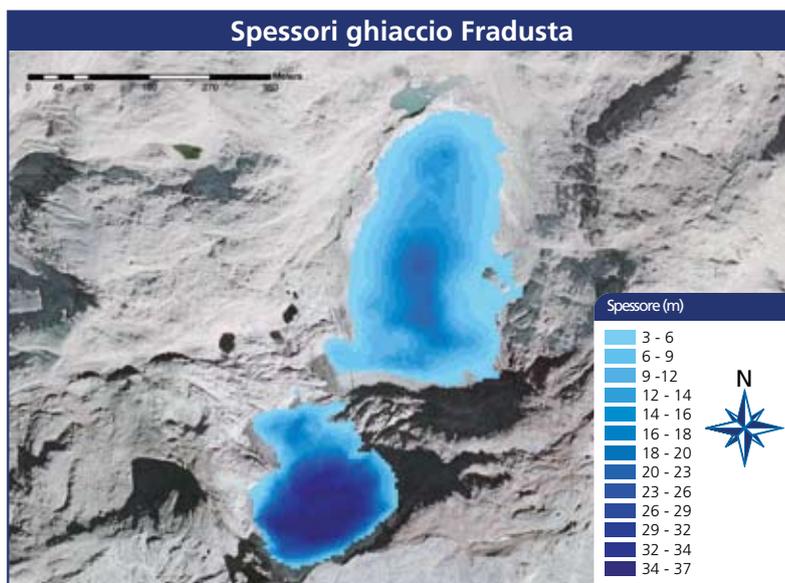


Fig. 11 - Mappa rappresentativa degli spessori del Ghiacciaio della Fradusta (su ortofoto CGR 2003).

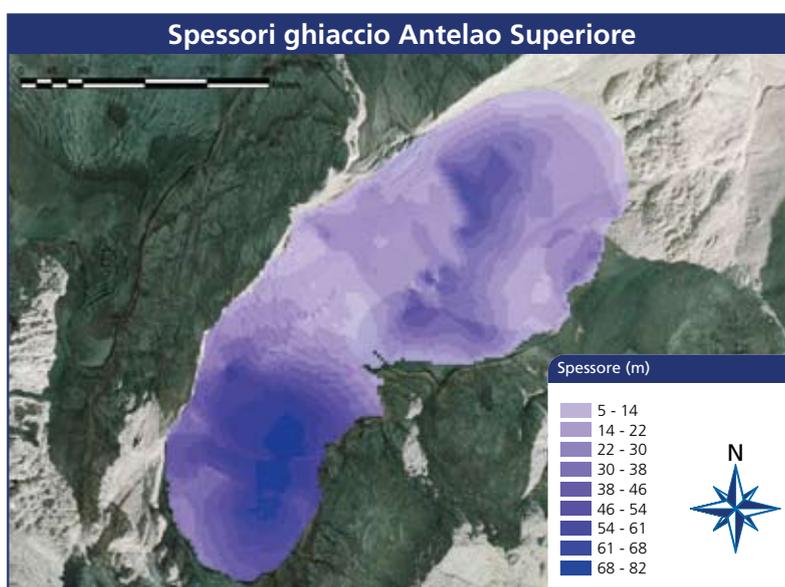


Fig. 12 - Mappa rappresentativa degli spessori del Ghiacciaio Superiore dell'Antelao (su ortofoto CGR 2003).

gono a circa 37 m. Nel lobo inferiore gli spessori non sono superiori a 25 metri.

La prospezione radar ha evidenziato alcune aree in cui il segnale proveniente dal fondo sembra derivare da fenomeni di scattering. Tale caratteristica potrebbe indicare la presenza di un letto di tipo clastico (per esempio permafrost o tilliti) similmente alle aree presenti nei dintorni o di ghiaccio in condizione di equilibrio con acqua di impregnazione (brine).

La riattribuzione, secondo una griglia regolare di 5 m di lato, dei valori di spessore misurati sui profili ha permesso di ricavare la carta delle isopache raffigurata

in Fig. 11. L'elaborazione della griglia ha permesso di stimare il volume del ghiacciaio in circa $1,75 \cdot 10^6$ metri cubi e uno spessore medio di circa 16,5 m.

Il Ghiacciaio Superiore dell'Antelao

Le misure eseguite sull'Antelao hanno comportato vari problemi di elaborazione sia nella parte basale, in cui il segnale rilevato risultava talvolta poco discriminabile, sia nella parte di circo in cui l'interpretazione risultava complicata dalla presenza di riflettori intermedi ascrivibili ad accumulo presumibilmente di valanga.

La possibilità di disporre di dati ottenuti con strumentazioni e

modalità differenti per gli stessi punti di misura ha permesso di sciogliere alcuni dubbi nell'interpretazione del segnale e quindi in ultima analisi, nella definizione del posizionamento del bedrock.

Rispetto alle prospezioni effettuate su altri ghiacciai la qualità del dato rilevato sul ghiacciaio dell'Antelao sembra non essere delle migliori; permangono alcuni dubbi sulla localizzazione del substrato in quanto spesso il segnale risulta poco chiaro e influenzato da disturbi prodotti dalle riflessioni laterali tipiche di versanti con pareti sub-verticalizzate. Soprattutto nella zona mediana del ghiacciaio, caratterizzata da intensa crepacciatura, non è stato possibile procedere a una buona distribuzione delle linee di misura ed ottenere significative informazioni sull'andamento del bedrock.

La prospezione ha permesso comunque di definire con buona approssimazione sia la mappatura degli accumuli da apporto valanghivo, presenti essenzialmente nell'area di circo, sia l'andamento dello spessore dell'intero ghiacciaio.

Sono stati individuati nelle conoidi di accumulo nevoso spessori massimi di circa 29 metri; le maggiori profondità del bedrock sono presenti nella parte di circo del ghiacciaio dove sembrano essere raggiunti spessori della copertura dell'ordine di 80 m. Nella lingua basale del ghiacciaio si hanno, invece, spessori prossimi a 65 m; i risultati della prospezione sono sintetizzati in Fig. 12.

La stima della volumetria del corpo glaciale dell'Antelao varia fra $6,7 \cdot 10^6$ e $8,0 \cdot 10^6$ m³ a seconda delle approssimazioni impiegate nei calcoli degli spessori della coltre sui margini laterali del ghiacciaio.

Le prospezioni condotte sull'Antelao, oltre a definire la morfologia del bacino, hanno evidenziato, alcuni orizzonti correlabili ad eventi valanghivi importanti; questi eventi hanno fornito e forniscono tutt'ora un considerevole apporto alla formazione di nuovo ghiaccio che va ad aggiungersi a quello di ordinaria produzione derivato dalle precipitazioni nevose. Questo è un elemento che di per se giustifica come questo ghiacciaio, pur essendo posto a quote relativamente modeste, sia potuto sopravvivere malgrado le forti ablazioni che si sono osservate, in questi ultimi anni, un po' su tutti i ghiacciai dell'arco alpino.

In alcuni settori, soprattutto nella parte inferiore e nella crepacciata intermedia, la determinazione degli spessori della copertura del ghiacciaio presenta tutt'ora alcuni limiti di incertezza. Questi sono i casi in cui la prospezione georadar ha raggiunto i suoi limiti di impiego.

CONCLUSIONI

Le prospezioni condotte hanno fornito una buona descrizione generale delle coperture glaciali della Marmolada, Fradusta e dell'Antelao Superiore consentendo di quantificare in modo molto verosimile la volumetria glaciale presente e quindi di conoscere l'attuale disponibilità della risorsa idrica.

Tutto ciò rappresenta un importante "Punto Zero" nello studio dell'evoluzione di questi ghiacciai alpini. Controlli ripetuti nel tempo consentiranno di descrivere in modo preciso il trend evolutivo, consentendo di ottenere proiezioni verosimili sulla durata della disponibilità della risorsa sia in termini diretti (es.: sfruttamento attraverso bacini idroelettrici) sia in termini indiretti (es.: turismo).

Ringraziamenti

Ringraziamo l'Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto per aver promosso e finanziato la ricerca e per la messa a disposizione dei mezzi di trasporto aerei; in particolare ringraziamo i previsori

del Centro Valanghe di Arabba Andrea Crepez e Gianni Marigo per il supporto meteorologico indispensabile alla programmazione del lavoro giornaliero in montagna e la Guida Alpina Ermanno dal Santo.

Bibliografia

- Cagnati A., Taurisano A., Valt M., 2002. "Il monitoraggio dei ghiacciai dolomitici", Neve e Valanghe n. 45, Aprile 2002, 6-13.
- Lozej A., Merlanti F., Pavan M., Tabacco I., 1998, "Preliminary results of r.e.s. surveys over hells gate ice shelf (Victoria Land - Antarctica)", Terra Antarctica Reports, n.1, 129-132.
- Nobes, 1999, "The directional dependence of the ground penetrating radar response on the accumulation zones of temperate alpine glaciers", First Break Vol. 17 Issue 7 Page 249 July 1999
- L. Levato, L. Veronese, A. Lozej and E. Tabacco, 1999, "Seismic image of the ice-bedrock contact at the lobbia glacier, Adamello Massif, Italy", Journal of Applied Geophysics, Volume 42, Issue 1, August 1999, Pages 55-63
- Merli F., Pavan M., Rossi G.C., Smiraglia C., Tamburini A., Ubiali G., 2001, "Variazioni di spessore e di volume della lingua del ghiacciaio dei Forni (Alpi centrali, gruppo Ortles-Cevedale) nel XX secolo. Risultati e confronti di metodologie", Suppl. Geogr. Fis. e Din. Quat. V, 2001, pp. 121-128.
- Pavan M., Diolaiuti G., Smiraglia C., Maggi V., D'Agata C., 2000, "Prospezioni sismiche e radar sul ghiacciaio della Sforzellina, un nuovo approfondimento glaciologico nel gruppo Ortles-Cevedale, in Lombardia", Neve e Valanghe n. 41, Dicembre 2000, pp. 6-13.
- Mark L. Moran, Roy J. Greenfield, Steven A. Arcone, Allan J. Delaney, 2000, "Multidimensional gpr array processing using kirchhoff migration", Journal of Applied Geophysics 43 (2000) 281-295
- Richard Hodgkins; Martin J. Siegert; Julian A. Dowdeswell, 2000, "Geophysical investigations of ice-sheet internal layering and deformation in the Dome C region of Central East Antarctica", Journal of Glaciology, 2000, vol. 46, no. 152, pp. 161-166(6)
- Diolaiuti G., D'agata C., Pavan M., Smiraglia C., 2001, "Rilievi gpr e gps per lo studio del ghiacciaio dello Sforzellina (Alpi lombarde)", 5A Conferenza Nazionale Federazione delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali e Ambientali "La Qualità" dell'Informazione Geografica", Rimini 9-12 ottobre 2001, Atti vol 2, pp. 727-731.
- Edson Ramírez; Bernard Francou; Pierre Ribstein; Marc Desclotres; Roger Guérin; Javier Mendoza; Robert Gallaire; Bernard Pouyau; Ekkehard Jordan, 2001, "Small glaciers disappearing in the tropical Andes: a case-study in Bolivia: glacier Chacaltaya (16° S)", Journal of Glaciology, 1 May 2001, vol. 47, no. 157, pp. 187-194(8)
- D.H. Elsberg; W.D. Harrison; K.A. Echelmeyer; R.M. Krimmel, 2001, "Quantifying the effects of climate and surface change on glacier Mass Balance", Journal of Glaciology, 15 October 2001, vol. 47, no. 159, pp. 649-658(10)
- Mancini M., Frezzotti M., Smiraglia C., Gagnani R., Proposito M., Zirizzotti A., Motta M., Pavan M., 2002, "Mass Balance of Campbell glacier (Northern Victoria Land, Antarctica)", 4° Convegno Nazionale di Glaciologia Antartica, Milano, 25-26 GIUGNO 2002. Terra Antarctica Reports 8, 2003, pp. 11-14
- Steven A. Arcone, 2001, "Airborne-radar stratigraphy and electrical structure of temperate firn: Bagley ice field, Alaska, U.S.A.", Journal of Glaciology, 15 January 2002, vol. 48, no. 161, pp. 317-334(18)
- William D. Harrison; Charles F. Raymond; Keith A. Echelmeyer; Robert M. Krimmel, 2003, "A macroscopic approach to glacier dynamics", Journal of Glaciology, 1 March 2003, vol. 49, no. 164, pp. 13-21(9)
- Eisen O., Nixdorf U., Keck L., Wagenbach D., 2003, "ALPINE ice cores and ground penetrating radar: combined investigations for glaciological and climatic interpretations of a cold alpine ice body", Tellus, 22 April 2003 55B, 1007-1017
- Diolaiuti G., Smiraglia C., D'Agata C., Kirkbride M., Benn D., Deline P., Pavan M., Pasta M., Citterio M., Carnielli T., Tamburini A. & Mortara G., 2005, "Miage glacier and lake recent dynamics: a contribution for understanding alpine calving". 9th Alpine Glaciological Meeting, 24-25 February 2005, Milan.
- Francisco J. Navarro, Yuri Ya. Macheret and Beatriz Benjumea, 2005, "Application of radar and seismic methods for the investigation of temperate glaciers", Journal of Applied Geophysics, Volume 57, Issue 3, April 2005, Pages 193-211