

il GPR

STUDIO DELLA DENSITA' DELLA NEVE

Profili stratigrafici ottenuti con metodologia georadar

Stefania Burba
Ingegnere per l'Ambiente e il Territorio
Politecnico di Milano
stefiburba@gmail.com

Il proposito di questo lavoro è quello di sperimentare la metodologia georadar, nello studio della densità del manto nevoso. Il Ground Penetrating Radar (GPR), emette un segnale elettromagnetico che penetra nel materiale con modalità che dipendono dalle caratteristiche del mezzo indagato. I dati raccolti sul campo consentono di analizzare i segnali di tipo riflesso allo scopo di ricavare alcune caratteristiche elettromagnetiche della neve. Utilizzando dei modelli empirici presenti in letteratura è possibile correlare queste caratteristiche alla densità del materiale e ricostruire il profilo stratigrafico del manto nevoso.

L'obiettivo è quello di testare e validare la metodologia georadar in direzione orizzontale, analizzando ciascuno strato individuato nel manto. Si vuole verificare che i valori ricavati applicando i modelli matematici ai dati sperimentali, siano paragonabili a quelli ottenuti attraverso l'attuale metodologia manuale.

I risultati ottenuti non sono univoci e presentano forti differenze a seconda della metodologia di analisi scelta. In generale la metodologia si è dimostrata estremamente sensibile alla stima della velocità del segnale e al momento non sembra abbastanza robusta per riuscire a produrre profili stratigrafici attendibili, ma è solo in grado di descrivere il trend crescente dei valori di densità. Le motivazioni di tale imprecisione sono da ricercare nella grande variabilità spaziale del mezzo indagato, nella complessità della procedura utilizzata, negli errori riscontrati nel posizionamento della sonda e nella natura empirica dei modelli utilizzati.

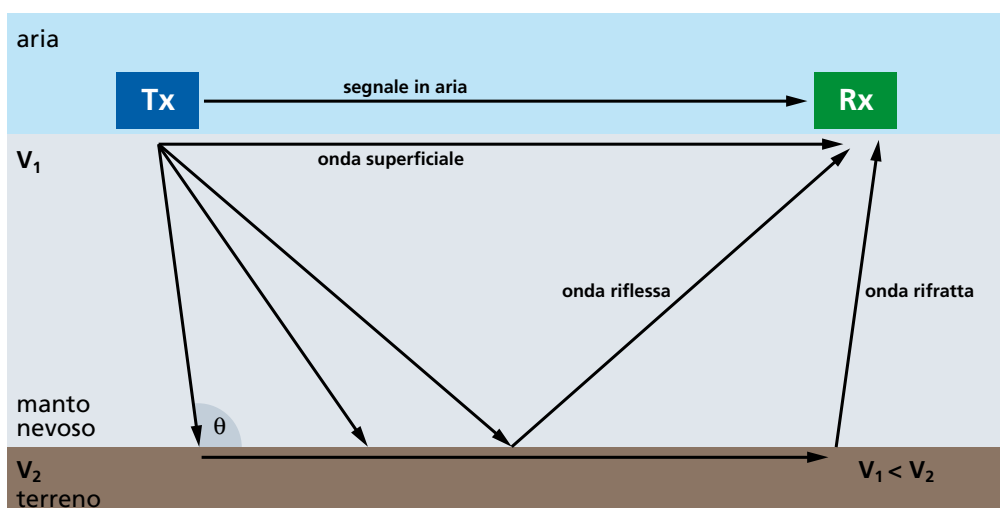


INTRODUZIONE

La copertura nevosa subisce numerose evoluzioni nel arco di tempo in cui permane al suolo, dovute alle condizioni meteorologiche e alla morfologia del terreno sottostante, tali fenomeni contribuiscono alla presenza di strati di neve sovrapposti di diversa densità. Numerosi studi riguardo al rischio valanghe hanno dimostrato come le caratteristiche dei profili stratigrafici dei manti nevosi influiscano sulle dinamiche dei fenomeni valanghivi. Da diversi anni vengono effettuati regolarmente rilievi speditivi che prevedono il carotaggio di campioni di neve, con l'obiettivo di ricostruire la stratigrafia del manto e ricavare le principali caratteristiche dei cristalli.

Il proposito di questo lavoro è quello di sperimentare la metodologia georadar, nello studio della densità del manto nevoso. Il Ground Penetrating Radar (GPR), emette un segnale elettromagnetico che penetra nel materiale da indagare con modalità che dipendono dalle caratteristiche del mezzo indagato; ha il vantaggio di non essere uno strumento invasivo e in futuro potrebbe essere installato e integrato in una stazione di rilevamento di dati nivometeorologici di tipo automatico. I dati raccolti sul campo consentono di analizzare i segnali di tipo riflesso allo scopo di ricavare alcune caratteristiche elettromagnetiche della neve. Utilizzando dei modelli empirici presenti in letteratura è possibile correlare queste caratteristiche alla densità del materiale e ricostruire il profilo stratigrafico del manto nevoso.

Figura 1



L'obiettivo è quello di testare e validare la metodologia georadar analizzando ciascuno strato individuato nel manto. Applicando dei modelli matematici ai dati ottenuti in sito si vuole verificare che questi possano fornire dei risultati attendibili in termini di parametri fisici del manto nevoso, quali la densità e il contenuto d'acqua, ossia che i valori ricavati dai modelli siano paragonabili a quelli ottenuti attraverso l'attuale metodologia manuale.

IL GEORADAR

Il Ground Penetrating Radar, o georadar, è un radar che lavora nel campo delle radiofrequenze che permette di effettuare indagini di tipo geofisico basate sull'interpretazione di segnali elettromagnetici. Lo strumento è composto da due antenne, la prima emette un segnale elettromagnetico di tipo impulsivo e la seconda registra il segnale che la raggiunge dopo aver viaggiato, con diverse modalità e velocità, all'interno del mezzo. La distanza che separa le due antenne è chiamata offset, e nello strumento utilizzato per questo lavoro è fisso, molto piccola, pari a 6 centimetri.

L'antenna trasmittente (Tx) emette un segnale elettromagnetico che si propaga nell'aria e nel mezzo da indagare, secondo lo schema illustrato in figura 1. Per quanto riguarda questo studio, delle componenti del segnale che arrivano all'antenna (Rx) ricevente, sono da considerare:

■ onda diretta: è il segnale che viaggia in aria con velocità di 30 cm/ns, essa percorre il tragitto più breve tra trasmittente

e ricevente.

■ onda superficiale: è l'onda che percorre la distanza minima tra Tx e Rx viaggiando nel mezzo, la sua velocità dipende quindi dalle caratteristiche del materiale che attraversa.

■ onda riflessa: è il segnale che penetra nel mezzo e che, una volta incontrato un materiale con diverse caratteristiche elettromagnetiche, viene parzialmente riflesso e torna verso la superficie.

Quando il segnale attraversa un mezzo omogeneo, per le onde di tipo diretto (segnale in aria e di superficie) il tempo di arrivo dell'onda all'antenna ricevente si misura come rapporto tra la distanza percorsa e la velocità dell'onda nel mezzo in oggetto. Il segnale riflesso invece, disegna un'iperbole la cui equazione è definita nel seguente modo:

$$t = \frac{2}{v} \sqrt{x^2 + z^2}$$

dove con x si indica la distanza in superficie e con z la profondità dell'indagine.

Le frequenze del segnale elettromagnetico emesso dal georadar sono comprese tra 25 MHz e i 3 GHz, e vengono scelte in funzione del tipo di indagine: più è alta la frequenza più aumenta la risoluzione ma diminuisce la penetrazione, che varia da diversi metri a qualche centimetro.

Uno dei principali parametri elettromagnetici che caratterizzano un mezzo in cui si propaga il segnale elettromagnetico è la permittività dielettrica (ϵ_r), la quale definisce la capacità di un materiale di polarizzarsi in presenza di un campo elettrico. Essa varia in relazione alle caratteristiche del materiale e nel caso della neve, in funzione della densità e del contenuto di acqua allo stato liquido.

La velocità di un segnale elettromagnetico che viaggia all'interno di un materiale dipende solo dalla permittività e la formula per descriverla è:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

dove con c si indica la velocità della luce. Nella figura 2 sono riportati i valori di permittività che caratterizzano alcuni

materiale	ϵ_r	V [cm/ns]
Aria	1	30
Acqua	84	3,3
Acqua salata	80	1
Ghiaccio	3-4	16
Neve	1,3-2,4	18-26

materiali e le velocità di propagazione del segnale elettromagnetico. Si noti come i valori della neve sono compresi tra quelli dell'aria e quelli del ghiaccio. Le escursioni riportate sono dovute al fatto che la densità della neve, a differenza degli altri materiali, non è costante.

I MODELLI

La metodologia georadar permette di ricavare le caratteristiche elettromagnetiche del manto nevoso dall'analisi della velocità del segnale. Attraverso modelli di tipo fisico è possibile poi correlare tali caratteristiche, in particolare la costante dielettrica, con la densità della neve e ricavare l'eventuale contenuto in acqua libera.

I dati disponibili riguardo alla permittività dielettrica ϵ mettono in evidenza che, nell'intervallo di frequenze del georadar, il valore di permittività della neve asciutta è correlabile direttamente alla densità. Per nevi bagnate, invece, la densità dipende anche dal contenuto di acqua liquida che interferisce nella propagazione del segnale elettromagnetico causandone l'attenuazione.

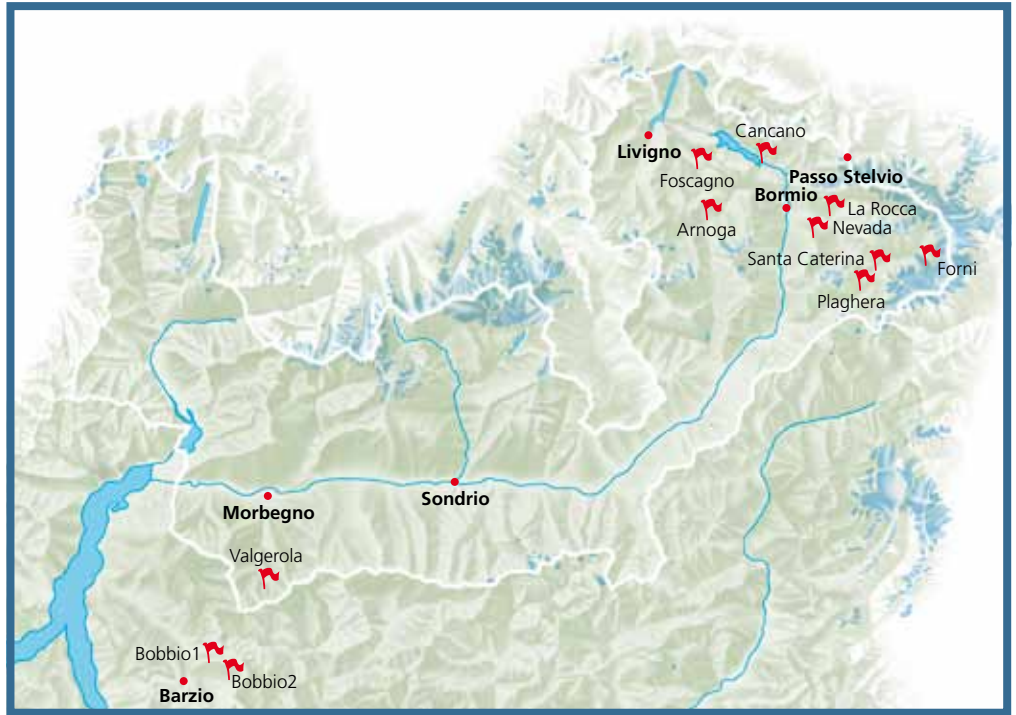
Per questo motivo è stato necessario dividere il campione di dati raccolti in due gruppi e utilizzare per il calcolo della densità (ρ) dello strato di neve due diverse tipologie di modello.

Per nevi asciutte è stato utilizzato il modello quadratico di Kovac (1993).

$$\epsilon'_{ds} = (1 + 0,845\rho_s)^2$$

Per nevi bagnate, invece, si è optato per la metodologia proposta da Tiuri (1984), la quale prevede il calcolo del contenuto di acqua allo stato liquido (W) dalla seguente relazione:

$$\Delta\epsilon'_s = (0,1W + 0,8W^2) \epsilon'_w$$



In alto a sinistra, figura 2

Sopra, figura 3



Figura 4



Figura 5



Sopra, figure 6



A lato, figure 7



Dove con ϵ , si indica la permittività dell'acqua e con $\Delta\epsilon_s$ la variazione di permittività della neve dovuta alla presenza di acqua. Il contenuto di acqua libera W appena calcolato viene in seguito sommato alla densità della matrice solida (ρ_d) per ottenere la densità totale della neve (ρ_{ws}).

$$\rho_{ws} = \rho_d + W\rho_w$$

L'APPARATO SPERIMENTALE E LA PROCEDURA OPERATIVA

La fase sperimentale del lavoro è stata condotta effettuando una serie di rilievi in diverse località della Lombardia, al fine di raccogliere dati in diverse condizioni di altitudine, temperatura, esposizione e spessore del manto. (figura 3)

I siti dei rilievi sono pianeggianti per un'area di qualche metro quadrato, liberi da copertura boschiva e non soggetti

ad accumulo da vento. Il primo passo è la preparazione del sito: le prove sono state eseguite sulla parete verticale di trincee scavate nella neve di profondità di almeno 1 metro; a seguito si procede al riconoscimento dei diversi strati mediante esame visivo e prove di penetrazione e le interfacce individuate sono evidenziate con del colorante rosso (figure 4 e 5). Ai fini dell'indagine è inoltre importante effettuare le misure della temperatura dei vari strati di neve, a tale scopo viene utilizzato un termometro digitale a stelo. Lo strumento utilizzato per l'acquisizione dei dati è un'antenna georadar avente una frequenza nominale di 2 GHz; collegata al corpo centrale è presente una rotella, (figure 6 e 7), la quale permette la registrazione del segnale e misura la distanza percorsa dallo strumento. La strumentazione è collegata ad un sistema di acquisizione e controllata mediante un software dedicato installato su un PC. L'acquisizione del segnale si realizza tra-

mite lo scorrimento dell'antenna lungo una superficie che permetta alla rotella di mettersi in movimento. Poiché sulla superficie della neve non è possibile garantire una rotazione continua della rotella, è stato utilizzato un pannello di plaxiglass trasparente che, svolge la funzione di base di appoggio per l'antenna e permette di ottenere un attrito costante con la rotella garantendone la sua corretta rotazione. Si predispose il pannello contro la parete da indagare, avendo cura di farlo aderire ad essa il più possibile. L'antenna viene fatta scorrere sul pannello in direzione orizzontale e, in base allo spessore dello strato, si collezionano una o più profili.

Per rilevare la velocità con cui il segnale emesso dall'antenna attraversa il mezzo da indagare è necessario un target, ovvero un oggetto che permetta la riflessione del segnale in arrivo dall'antenna. A tale scopo si è utilizzata una sonda da soccorso in alluminio, la quale viene introdotta

nella neve a due prefissate distanze dalla trincea (50 e 25 cm) e parallelamente ad essa. L'alluminio di cui è composto ha caratteristiche elettromagnetiche diverse rispetto a quelle della neve in cui è immerso pertanto la sonda garantisce una buona riflessione del segnale ed è utile anche durante le fasi di esplorazione preliminare del sito per stabilire lo spessore della neve.

Terminata la prima serie di acquisizioni effettuata con la sonda posizionata a 50 cm dalla parete della trincea, la si sposta ad una distanza di 25 cm e si ripetono i profili di acquisizione secondo il medesimo schema seguito nella prima serie. Nel complesso si effettuano quindi due serie di acquisizioni con la sonda posizionato a distanza diversa (figure 8 e 9).

Per ogni strato indagato viene infine rilevata manualmente la densità, pesando con un dinamometro un campione estratto mediante l'utilizzo di un carotatore (figura 10). La densità viene quindi calcolata come rapporto tra il peso del campione e il volume del campione con un'incertezza di ± 10 kg/m³.

Dove la morfologia lo permette viene destinata ai rilievi la parete della trincea che rimane in ombra, nei casi in cui ciò non è possibile, viene eretta in sito una struttura di teli per crearla artificialmente: questa accortezza consente di evitare, contro la parete oggetto di indagine, l'irraggiamento solare diretto, il quale tende a sciogliere i primissimi centimetri di neve e quindi ad alterarne le caratteristiche (foto pagina 51).

ANALISI DEI PROFILI GPR

Durante la campagna di acquisizione dei dati sono stati effettuati 11 rilievi in differenti località, per un totale di 63 strati di neve analizzati. Questi ultimi sono stati indagati attraverso due serie di acquisizioni e raccogliendo un totale di 240 profili GPR. I dati ottenuti sono stati analizzati tramite il software *RadarPoli2d*, sviluppato dal Politecnico di Milano, il quale permette, attraverso una serie di operazioni in successione, di ricavare la velocità del segnale analizzato (figura 11). In particolare sono state adottati due differenti approcci:

■ **Fitting:** Con la tecnica *Fitting* si sfrutta la geometria dell'iperbole di diffrazione che risulta dalle acquisizioni. Si ricava la velocità del segnale sovrapponendo un'iperbole sintetica di equazione nota a quella reale. Questa metodologia consente di analizzare l'iperbole nella sua interezza ma è un metodo piuttosto soggettivo, in quanto è l'operatore che stabi-

lisce visivamente se una iperbole sintetica si sovrappone meglio di un'altra, senza avere a disposizione parametri oggettivi per poter effettuare una scelta.

■ **Picking:** Per il secondo metodo si individua il vertice dell'iperbole registrata e la stima della velocità consiste nel calcolare il rapporto tra lo spazio percorso dal segnale e il tempo che ha impiegato per coprirlo. Lo spazio percorso è pari al doppio della distanza tra il target e la parete della trincea, il segnale registrato infatti viaggia verso il target e ritorna riflesso da questo, mentre il tempo è un dato registrato durante le acquisizioni.

Le due metodologie presentano differenti caratteristiche: la prima consente di analizzare l'iperbole nella sua interezza, ma è un metodo soggettivo e quindi il valore di velocità ottenuto risente della accuratezza e dell'esperienza dell'operatore. Il secondo invece, non necessita di elaborazioni, ma i risultati ottenuti risentono della precisione nella calibrazione della scala dei tempi.



Figura 8

Figura 9

Figura 10



Figura 11

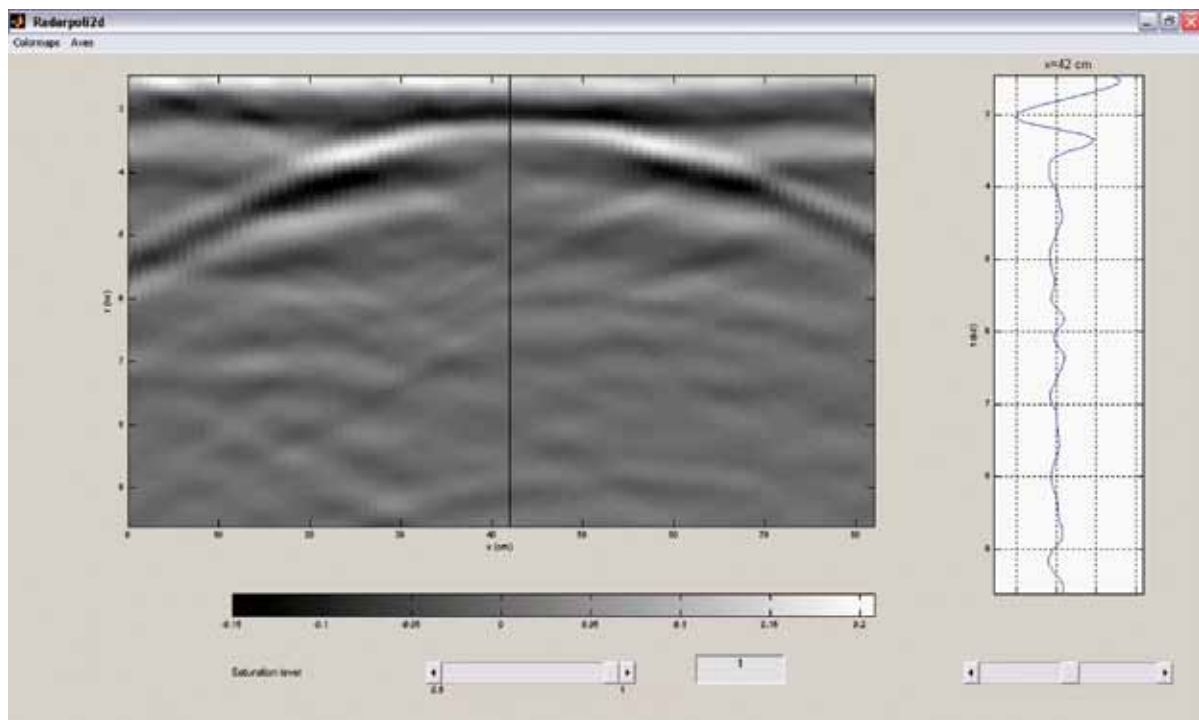


Figura 12

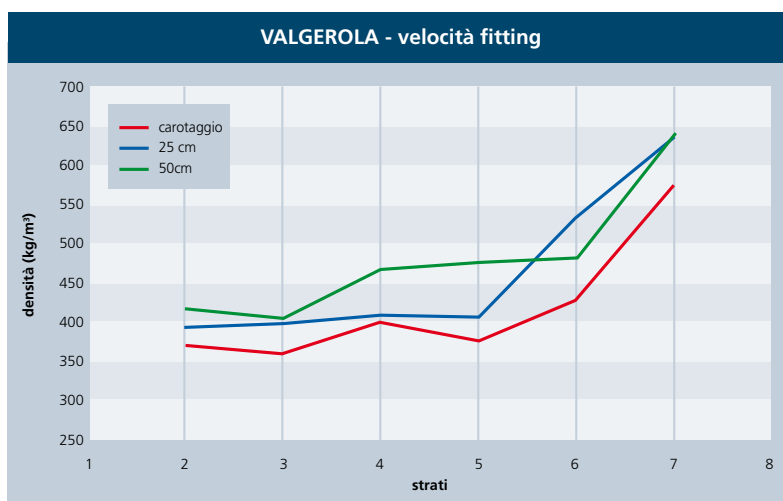
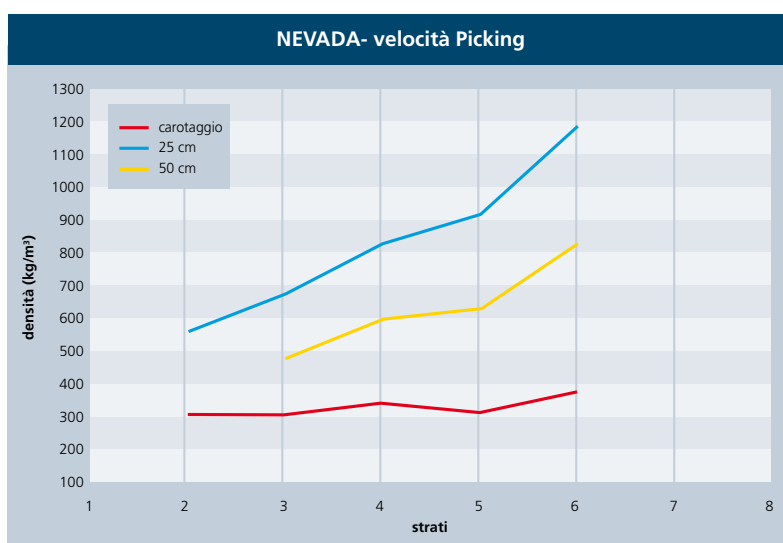


Figura 13



Condizioni di neve asciutta

Vengono ora presentati i risultati ottenuti utilizzando queste due metodologie nell'ipotesi di assenza di acqua allo stato

liquido all'interno del manto nevoso.

Per ciascun rilievo è stato realizzato un grafico con il confronto tra i valori di densità dei vari strati ottenuti con la pesatura

dei campioni carotati e i valori ricavati attraverso le due metodologie di analisi dei dati acquisiti attraverso le misurazioni GPR per le due distanze del target indagate (50 e 25 cm).

A titolo di esempio si riportano i risultati ottenuti con la tecnica Fitting per il rilievo di Valgerola (figura 12): l'andamento dei valori stimati ad entrambe le distanze segue quello dei valori di riferimento e la differenza tra i valori di densità stimati e quelli ottenuti dal carotaggio variano da meno di 10 kg/m³ fino a 100 kg/m³. La tendenza ad ottenere stime soddisfacenti delle densità di riferimento in maniera saltuaria si riscontra in tutti i rilievi effettuati, con oscillazioni più o meno ampie. Per quanto riguarda i risultati ottenuti con la tecnica del Picking viene riportato il rilievo di Nevada (figura 13). I valori di densità ottenuti con questo metodo risultano generalmente in una sovrastima che in questo caso si manifesta con un valore di densità per lo strato 6 addirittura quattro volte superiore a quello di riferimento. Tale discordanza tra valori stimati e valori misurati è stata imputata ad una imprecisa calibrazione della scala assoluta di tempo degli esperimenti. Ciò si ripercuote sui valori del tempo di arrivo del segnale che risultano così non corretti.

Osservando i dati di picking si nota per alcuni rilievi un forte trend crescente che

si manifesta negli strati più profondi in valori di densità molto superiori a quelli di riferimento. Tale tendenza ha portato a supporre la possibilità che il target non fosse inserito verticalmente nella neve e quindi non fosse rispettata la distanza ipotizzata. La sonda viene introdotta sporgendosi dalla parete della trincea e risulta quindi difficoltoso evitare qualsiasi tipo di inclinazione nel momento dell'inserimento senza il supporto di uno strumento. Tale sospetto è stato verificato con una prova: imponendo la densità corretta è stata applicata la metodologia inversa per risalire alla distanza del target. La sonda è risultata inclinata di circa 5°. In questo caso il segnale ha percorso una distanza superiore, il valore di velocità ad esso associato risulta quindi sottostimato e di conseguenza la densità ottenuta più alta. E' da sottolineare, inoltre, che la tendenza si manifesta in modo più evidente sui dati ricavati con la tecnica *picking* poiché tale procedura risulta molto più sensibile agli errori sulla scala dei tempi rispetto alla tecnica *fitting*.

Fino a questo momento sono stati considerati i profili stratigrafici di ciascun rilievo, sotto l'ipotesi di considerare per l'intero manto l'assenza di acqua allo stato liquido. Vengono presi ora in considerazione i risultati ottenuti per tutti i profili analizzati al fine di poter osservare i dati da una prospettiva globale. Per questa analisi sono stati selezionati solamente gli strati aventi una temperatura non compatibile con la presenza di acqua allo stato liquido. Considerando gli inevitabili errori di misurazione, la pressione dovuta agli strati sovrastanti è stato scelto come valore di confine la temperatura di -0,8°C: circa il 60% degli strati di neve individuati rientra in questo limite di temperatura. In figura 14 e 15 sono riportati i valori rispettivamente a 25 e 50 cm ottenuti con la metodologia del *fitting* e con le rispettive incertezze di misura, ordinati in ordine crescente di densità.

I valori di densità ottenuti con i carotaggi presentano un intervallo di poco più di 200 kg/m³ e si assume per tali valori un'incertezza di ± 20 kg/m³. Per quanto

riguarda le serie *fitting*, invece, è stato considerato un possibile errore sulla stima della velocità di circa ± 0,6 cm/ns. Le incertezze di misura su questi dati sono state ottenute ricavando la relazione che

lega una variazione di velocità, alla variazione di densità che tale errore comporta. Dai grafici si può evincere che i valori di densità ottenuti dall'analisi dei profili GPR con la tecnica del *fitting* stimano i valori

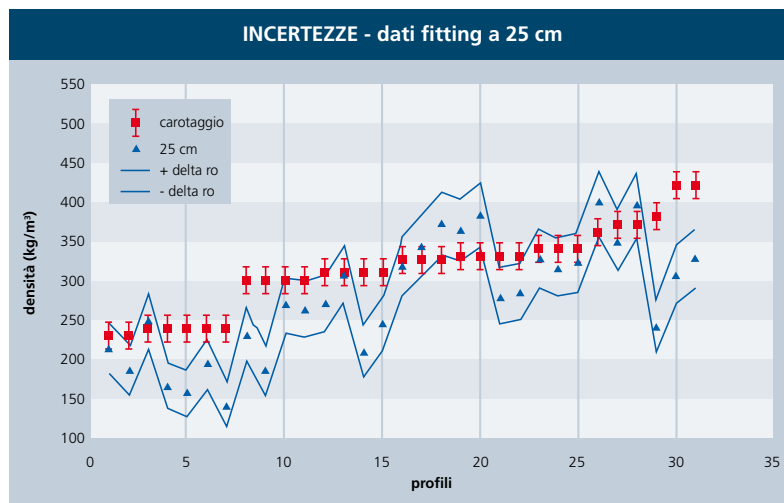


Figura 14

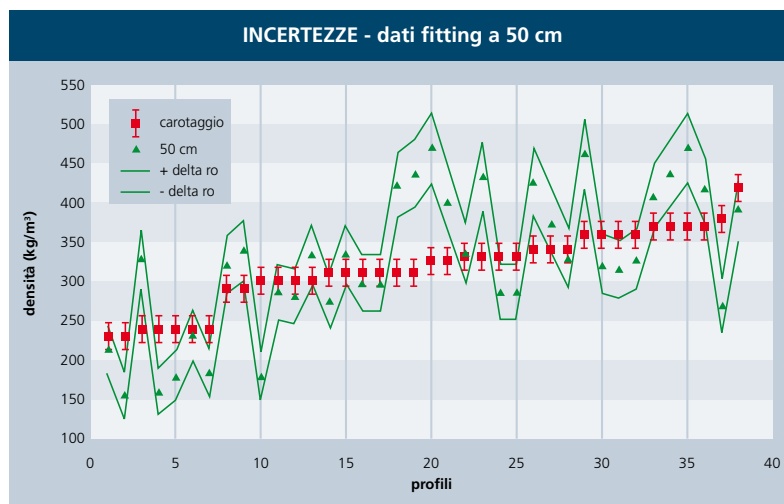


Figura 15

Per evitare che la parete sia sottoposta a irraggiamento solare diretto viene eretta in sito una struttura utilizzando dei teli.



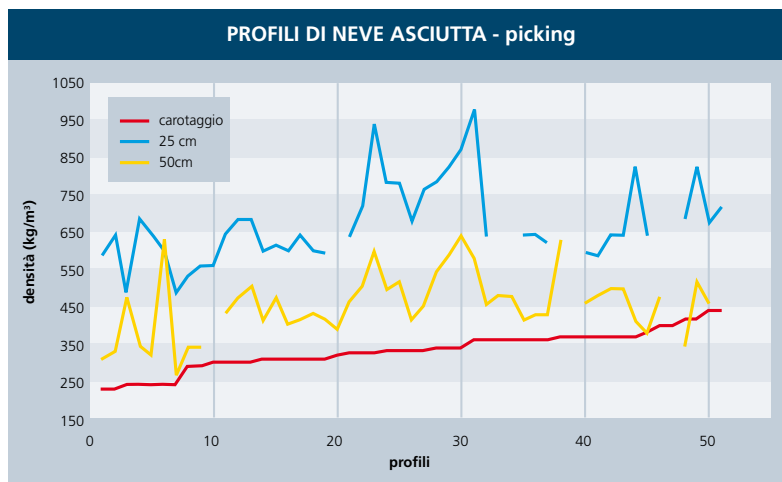


Figura 16

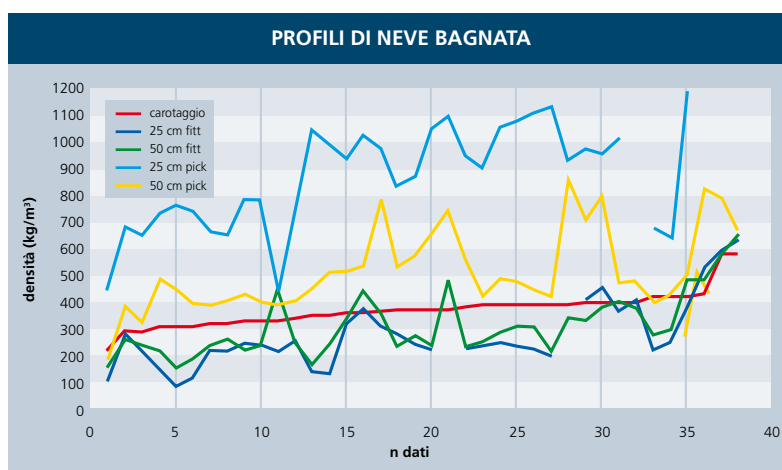


Figura 17

di riferimento con una discreta approssimazione, rispettando il trend crescente. Si nota come il 65% dei dati della serie ricavata con target a 25 cm sia compatibile con la misura di densità di riferimento mentre per quanto riguarda la serie acquisita a distanza di 50 cm, la corrispondenza raggiunge l'80% del totale.

In figura 16 sono riportati i risultati aggregati ottenuti con la tecnica del Picking. I dati ottenuti da profili GPR individuano il trend crescente dei dati di riferimento ma risultano sovrastimati.

In particolare la serie di dati rilevata con target posto a 25 cm di distanza, presenta gli errori più evidenti poiché a distanza minore le misurazioni risentono maggiormente di un errore sulla scala temporale. Le prestazioni offerte da questa metodologia sono peggiori di quelle offerte dalla tecnica fitting poiché risentono in modo considerevole dei problemi legati alla calibrazione della scala dei tempi che si ripercuote sulla precisione con cui è possibile stimare la velocità. Questo spiega come con metodologie differenti

applicate allo stesso profilo GPR si giunga a valori di densità così differenti.

Condizioni di neve bagnata

Per quanto riguarda la stima della densità della neve in condizioni di presenza di acqua allo stato liquido la stima vengono selezionati gli strati di neve bagnata, ovvero quegli strati dove è stata misurata una temperatura superiore a $-0,8^{\circ}\text{C}$, i quali rappresentano circa il 40% del totale.

A differenza di quanto accade nell'ipotesi di neve asciutta, viene in questo caso presa in considerazione anche l'effetto di attenuazione causato dalla presenza di acqua allo stato liquido.

Il coefficiente di attenuazione viene ricavato dalla valutazione delle ampiezze dei segnali registrati per il singolo strato con il target posizionato a distanza diversa, sfruttando il rapporto delle ampiezze dei due segnali.

Sebbene la procedura per il calcolo dell'ampiezza sia semplice dal punto di vista teorico, una volta applicata ai dati sperimentali ha evidenziato tutta la sua

debolezza: i profili GPR acquisiti risultano tutti affetti da disturbi di vario tipo, impedendo talvolta la individuazione corretta dell'iperbole di riflessione.

I disturbi descritti incidono a tal punto sulle ampiezze dei segnali che buona parte dei valori del coefficiente di attenuazione (α) calcolati risulta negativa. Ciò significherebbe che il segnale che percorre una distanza più lunga ritorna all'antenna con una energia maggiore di quello che ha percorso metà della distanza. E' evidente che ciò non può accadere. Per questo motivo è stato quindi deciso di utilizzare una metodologia alternativa per la stima dei coefficienti di attenuazione α . Tale metodologia prevede di fissare un coefficiente di attenuazione come riferimento, in questo caso quello ricavato dal segnale meno affetto da disturbi, e calcolare tutti gli altri coefficienti rapportandoli a quello di riferimento, così che ne risultino tutti proporzionali.

In figura 17 sono riportati i risultati ottenuti con questa procedura. Sono rappresentate le quattro serie di velocità e i valori di riferimento.

Osservando il grafico si nota come tutte le serie rispecchino l'andamento crescente dei dati di riferimento e che ciascuna risulti traslata, in particolare le serie fitting sono sottostimate mentre quelle picking appaiono sovrastimate, soprattutto quella ottenuta con distanza 25 cm.

Da sottolineare la discreta precisione con cui vengono stimati i valori di densità per gli strati più densi, a partire dai 400 kg/m^3 . I risultati ottenuti per i profili di neve bagnata sono in definitiva migliori rispetto alle previsioni in quanto sono affetti sia dai problemi riscontrati per la metodologia per nevi asciutte sia dalle problematiche che affliggono la stima del valore di attenuazione α .

Simulazioni

Dati i problemi riscontrati nei rilievi è stato affrontato il problema della stima della densità della neve con un approccio alternativo. Tale metodologia sfrutta le informazioni contenute nel segnale di accoppiamento diretto, ovvero quello che segue il percorso rettilineo tra l'antenna

trasmittente e quella ricevente. Attraverso un software dedicato vengono prodotti dei segnali simulati e, dalla loro analisi, sono ricavate delle relazioni che legano alcune caratteristiche individuabili nel segnale con le proprietà elettromagnetiche del materiale. In particolare è possibile distinguere l'ampiezza e il tempo di arrivo delle diverse componenti del segnale, da cui sono stata ricavate due differenti relazioni.

Le formulazioni sono state dedotte direttamente dalle caratteristiche di proporzione geometrica dell'onda e dall'equazione che relaziona la velocità del segnale alla permittività caratteristica del materiale in cui si propaga. Sembra pertanto, poter essere adattabile alle eventuali perturbazioni che caratterizzano i segnali reali. Resta ora da verificare sul campo la possibilità di utilizzare tali relazioni su dati reali.

L'analisi del segnale di accoppiamento diretto tra antenna trasmittente e ricevente può portare numerosi vantaggi in termini operativi nei rilievi sulla neve. Con questa geometria di acquisizione infatti, sarà sufficiente registrare un'unica traccia per ciascuno strato da indagare. Non sarà più necessario utilizzare un target per la riflessione con i problemi che ne derivano e non servirà una superficie di scorrimento per ricavare un intero profilo. In sostanza tutto ciò consentirebbe di semplificare la fase operativa con una riduzione dei tempi di acquisizione e permetterebbe di analizzare il segnale di accoppiamento diretto il quale, avendo effettuato un percorso rettilineo e più breve, dovrebbe risultare meno affetto da distorsioni o interferenze rispetto a quello riflesso.

CONCLUSIONI

Il lavoro svolto ha avuto l'obiettivo di verificare la possibilità di utilizzare la metodologia georadar al fine di ricavare profili stratigrafici di densità del manto nevoso. La conoscenza dell'andamento delle densità all'interno del manto ricopre un ruolo fondamentale nello studio del rischio valanghe, le quali trovano spesso un valido piano di scorrimento proprio

dove la differenza di densità tra gli strati è rilevante e i cristalli di neve non riescono ad offrire una coesione sufficiente a trattenere gli strati sovrastanti.

La presenza in letteratura di una quantità numerosa di modelli empirici o semi-empirici che legano la costante dielettrica della neve alla sua densità e al contenuto d'acqua dimostra come il problema sia articolato, soprattutto a causa delle particolari caratteristiche fisiche ed elettromagnetiche della neve.

I rilievi sul campo sono stati eseguiti in varie località della Lombardia tra le prealpi lecchesi e la Valtellina allo scopo di raccogliere un campione significativo di acquisizioni GPR in diverse condizioni di temperatura, esposizione e altitudine. I rilievi sono stati effettuati sulla parete verticale di trincee scavate nella neve e i dati acquisiti sono stati elaborati con due differenti metodologie.

I dati registrati risultano affetti da disturbi che hanno probabilmente origine dall'apparato utilizzato per i rilievi e dalle pareti della trincea; tali perturbazioni alterano le caratteristiche dei segnali e, a volte, ne impediscono un'analisi esente da incertezze.

I risultati ottenuti non sono univoci e presentano forti differenze a seconda della metodologia di analisi scelta. In generale la metodologia si è dimostrata estremamente sensibile alla stima della velocità del segnale e al momento non sembra abbastanza robusta per riuscire a produrre profili stratigrafici attendibili, ma è solo in grado di descrivere il trend crescente dei valori di densità. Le motivazioni di tale imprecisione sono da ricercare nella grande variabilità spaziale del mezzo indagato, nella complessità della procedura utilizzata, negli errori riscontrati nel posizionamento della sonda e nella natura empirica dei modelli utilizzati.

In una futura applicazione si dovrebbe prendere in considerazione l'utilizzo di uno strumento per la verificare la verticalità della sonda ed eventualmente la possibilità di installare una postazione fissa in assenza di copertura nevosa

La metodologia applicata attraverso le si-

mulazioni, invece, ha riguardato l'analisi del segnale di accoppiamento diretto tra l'antenna trasmittente e quella ricevente. Tale studio ha portato alla formulazione di due differenti relazioni che legano alcune caratteristiche del segnale registrato alle proprietà elettromagnetiche della neve. In particolare si tratta della differenza nel tempo di arrivo e della somma delle ampiezze di due differenti componenti dell'onda superficiale.

In questa fase di simulazione i risultati ottenuti sono confortanti e lasciano aperta la possibilità di una validazione su dati reali applicando una metodologia che risulta essere in linea teorica meno soggetta alle svariate forme di disturbo che hanno afflitto le acquisizioni sul campo dei segnali riflessi. Risulta inoltre più semplice dal punto di vista operativo in quanto non prevede l'utilizzo né di un pannello né di un target ma solo di due antenne con posizione reciproca non fissata.

Ringraziamenti

Un doveroso ringraziamento va al Prof. Luigi Zanzi e all'Ing. Arosio del Politecnico di Milano. Grazie ai tecnici del Centro Nivometeorologico - ARPA Lombardia di Bormio per il supporto fornito.

Bibliografia

- M. E. Tiuri, 1984. "The complex dielectric constant of snow at microwave frequencies", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. OE-9, n° 5.
- M. Hallikainen, 1992. "Review of the microwave dielectric and extinction properties of sea ice and snow", University of technology, Helsinki, Finlandia.
- R. Fortin, 1998. "Ground penetrating radar in delineating snowpack structure", Université Laval, Sainte-Foy, Quebec (Canada).
- J. R. Kendra, 1998. "Radar measurements of snow: experiments and analysis",
- IEEE Transaction on Geoscience and remote sensing, Vol. 36, n° 3.
- A. D. Frolov, 1999. "On dielectric properties of dry and wet snow", Hydrological Processes 13.
- P. Waldner, 2001. "Continuous measurements of liquid water content and density in snow using TDR", Proceedings of the Second International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Geotechnical Applications.
- T. Murray, 2003. "Water-content of Glacier-Ice: Limitations on Estimates from velocity analysis of surface ground-penetrating radar survey", JEEG, vol.12, Issue 1, pp 87-88.
- J. H. Bradford, 2006. "Measuring complex dielectric permittivity from GPR to estimate liquid water content in snow", SEG Annual meeting, New Orleans.
- A. Lundberg, 2006. "Snow density variations: consequences for ground-penetrating radar", Stockholm University, Svezia.