

Nuovo per metodo visualizzare i profili di del stabilità manto nevoso

**Fabiano Monti^{1,2},
Anselmo Cagnati², Mauro Valt²,
Jürg Schweizer¹**

¹ WSL Institute for Snow and
Avalanche Research SLF, Davos, Svizzera

² ARPA Veneto - DRST
Centro Valanghe di Arabba, Arabba, Italia
e-mail: monti@slf.ch (F. Monti)

La valutazione della stabilità del manto nevoso mediante l'interpretazione dei profili stratigrafici è un procedimento lungo e molto soggettivo, soprattutto quando la stratigrafia non è accompagnata da un test di stabilità. La stratigrafia del manto nevoso è chiaramente associata alla stabilità della neve. Molti studi hanno, infatti, evidenziato i legami tra alcune proprietà specifiche del manto, per es. dimensione e tipologia dei grani, con l'instabilità.

In questo lavoro è suggerito un nuovo metodo per visualizzare la stratigrafia della neve in relazione alla stabilità basato sullo studio di sei variabili strutturali (noto come "Threshold sum approach"). Ogni strato di neve è rappresentato dal numero di variabili che non si trovano nel corrispondente range critico. Questo approccio non è stato applicato solo ai profili stratigrafici tradizionali, ma anche - una volta rettificati i valori di soglia - ai profili simulati con il modello numerico del manto nevoso SNOWPACK.

Il nuovo metodo di visualizzazione, utilizzato sia con i profili tradizionali sia con quelli simulati, è stato quindi testato analizzando gli episodi valanghivi più critici dell'inverno 2008-2009 nelle Dolomiti Venete.

I risultati indicano che il nuovo metodo di visualizzazione è particolarmente efficace per interpretare rapidamente e in modo intuitivo la stabilità della neve. Inoltre, le informazioni sulla stabilità ricavate dai profili simulati risultano essere chiaramente correlate al grado di pericolo. Integrando il modello numerico SNOWPACK con l'analisi delle variabili critiche è possibile incrementarne l'utilità ai fini della previsione valanghe.



INTRODUZIONE

Valutare il rischio valanghe per una determinata regione è un processo difficile che implica notevoli responsabilità. La previsione valanghe corrisponde alla previsione dell'instabilità attuale e futura della neve (McClung; 2000), definita nello spazio e nel tempo, in relazione ad un determinato sovraccarico. Tra i vari approcci alla problematica, quello convenzionale o sinottico è il più comune e generalmente adottato da gran parte dei servizi valanghe. Esso si basa per lo più sulle capacità, l'esperienza e la conoscenza del previsore. Quest'approccio è stato descritto da LaChapelle (1980) e da allora non è sostanzialmente cambiato. Le singole previsioni sono fondate su dati raccolti in campo, classificati secondo il loro grado di attiguità con la stabilità del manto nevoso. In relazione alla vastità dell'area da valutare, i dati assumono una importanza e un significato diverso. In una previsione del pericolo valanghe su microscala (500-100 km²) i dati più importanti sono quelli

chiamati "a bassa entropia" (per es. osservazioni di valanghe o test di stabilità in situ), seguiti dai dati "a media entropia" (per es. profili stratigrafici) e, in ultimo, dai dati meteorologici (ad alta entropia).

Questo metodo sinottico (LaChapelle, 1980) ha alcuni svantaggi:

- l'interpretazione dei dati disponibili (per es. profili stratigrafici) è molto soggettiva tanto che molti autori la considerano un'arte più che una scienza (Schweizer e Wiesinger, 2001);
- la disponibilità di dati a bassa (es. test di stabilità) o media entropia è tipicamente limitata;
- l'analisi dei dati richiede molto tempo da parte dei previsori valanghe.

Somma delle variabili critiche

Per ridurre la soggettività interpretativa dei profili stratigrafici, specialmente se non abbinati a test di stabilità, Schweizer et al. (2005) hanno suggerito un metodo oggettivo e semi-quantitativo chiamato

"*Threshold sum Approach*", più facilmente traducibile come "*somma delle variabili critiche*". Tale metodo, rifinito in seguito da Schweizer e Jamieson (2007) e Schweizer et al. (2008), si basa sull'analisi di sei variabili strutturali ritenute indicatrici di potenziali instabilità all'interno del manto nevoso. Tre di esse (differenza di dimensione dei grani, differenza di durezza, profondità dello strato) sono proprietà riconducibili ai punti di contatto tra i vari strati (interfacce), mentre le altre tre sono riconducibili alle caratteristiche degli strati stessi (dimensione e tipologia dei grani, durezza dello strato). Se il valore di una variabile raggiunge una determinata soglia, individuata come critica (fig 1), questa è considerata come potenziale fonte d'instabilità (Fig. 2A).

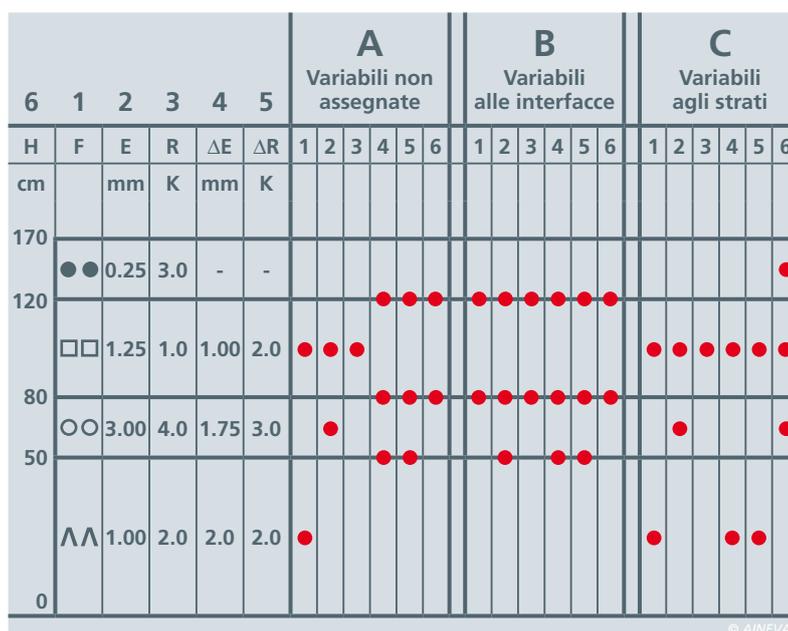
Sia le variabili strettamente riconducibili alle interfacce sia i parametri legati agli strati sono assegnati all'interfaccia formata da due strati adiacenti e quindi sommati. Nel caso delle proprietà dello strato, è preso in considerazione il conteggio dello strato con il più alto numero d'instabilità strutturali, a prescindere dal fatto che sia lo strato inferiore o superiore (Fig. 2B). La scelta di assegnare tutte le sei variabili a un'interfaccia è motivata dal fatto che, nella gran parte dei casi, una frattura occorre in corrispondenza di un'interfaccia (Schweizer et al., 2003) e non all'interno di uno strato.

Ogniquale cinque o sei variabili sono contemporaneamente nel rispettivo range critico, quell'interfaccia è considerata potenzialmente debole (Schweizer et al., 2008). Secondo Winkler e Schweizer (2009), la *somma delle variabili critiche* fornisce buoni risultati per la determinazione di profili instabili (86% di profili instabili individuati correttamente) ma presenta qualche difficoltà nell'identificare le condizioni stabili (38% profili stabili corretti). Il metodo è stato ideato per l'analisi d'instabilità persistenti (legate a brina di profondità, cristalli sfaccettati o brina di superficie) all'interno del manto nevoso; la sua applicabilità per instabilità legate a neve fresca o bagnata non è stata ancora verificata.

Fig. 1 - Range critici dei parametri utilizzati con l'analisi delle variabili critiche. Sono riportati i range critici sia per i profili tradizionali sia per quelli simulati. Per un confronto, sono indicati anche i range suggeriti da Schweizer and Jamieson (2007) (originali).

VARIABILI	RANGE CRITICI		
	originali	oss. manuali	simulazioni
Dimensione dei grani (mm)	≥ 1.25	≥ 1.25	> 0.6
Differenza di dimensione (mm)	≥ 0.75	≥ 0.75	≥ 40%
Differenza di durezza	≥ 1.7	≥ 2	≥ 1
Durezza	≤ 1.3	≤ 1	≤ 2
Tipologia dei grani	persistenti	persistenti	persistenti
Spessore del lastrone o profondità dello strato (cm)	18...94	≤ 100	≤ 100

Fig. 2 - Da sinistra: altezza del manto nevoso (H); tipologia dei grani (F) —simbologia in accordo con Fierz et al. (2009); dimensione dei grani (E); durezza (R); differenza di dimensione dei grani (ΔE); differenza di durezza (ΔR). (A) I punti rossi indicano le variabili presenti nel rispettivo range critico (Figura 1). Le variabili critiche sono rappresentate in corrispondenza dell'elemento al quale sono riferite (strati o interfacce); (B) i punti indicano le variabili nel rispettivo range critico ricondotte alle interfacce (metodo tradizionale); (C) i punti rossi indicano le variabili nel rispettivo range critico assegnate agli strati.



Anche se il punto di frattura è localizzato in corrispondenza di uno strato/interfaccia debole, è importante rimarcare che non è possibile determinare la stabilità generale del manto nevoso analizzando unicamente le caratteristiche di tale punto. Per dedurre la propensione alla propagazione di una frattura sono, infatti, fondamentali sia le proprietà del lastrone (porzione del manto nevoso soprastante lo strato debole) sia le caratteristiche dello strato sottostante.

Modello del manto nevoso SNOWPACK

La modellazione numerica della stabilità del manto nevoso può migliorare la risoluzione spaziale e temporale dei dati a disposizione dei previsori valanghe (Lehning et al., 1999). Le simulazioni possono essere aggiornate su base oraria e, contrariamente ai profili eseguiti manualmente, i dati sono disponibili anche durante periodi di elevato pericolo valanghe e da aree remote. Il modello numerico unidimensionale del manto nevoso

SNOWPACK viene utilizzato in diversi Paesi (per es. Svizzera, Italia, Canada, Giappone) per supportare i previsori nel valutare il pericolo valanghe.

Il modello calcola la stratigrafia del manto nevoso e la sua evoluzione temporale utilizzando dati provenienti da stazioni nivo-meteorologiche automatiche (Lehning et al., 1999; Bartelt e Lehning, 2002; Lehning et al., 2002a,b). SNOWPACK fornisce le proprietà fisiche e le caratteristiche microstrutturali di ogni strato presente all'interno del manto nevoso.

La stratigrafia della neve calcolata numericamente, ossia il profilo simulato del manto nevoso, è comparabile a un profilo rilevato manualmente, anche se la sua risoluzione è più elevata, cioè gli strati sono tipicamente più sottili che non nei profili manuali.

Ad ogni modo, per la corretta interpretazione di un profilo simulato, vi sono alcune differenze fondamentali con i profili manuali che devono essere tenute in considerazione (per es. nei profili simulati la dimensione dei grani della neve fresca

è fittizia). Studi sulla concordanza tra le simulazioni di SNOWPACK e quanto misurato sul campo hanno mostrato risultati soddisfacenti.

In particolare, la verifica delle simulazioni effettuata per il bacino superiore del Cordevole (Belluno, Italia), medesima area di studio presa in esame nel presente lavoro (Fig. 3), ha evidenziato come le caratteristiche della neve simulata concordavano con le osservazioni manuali nel 72% dei casi (Monti et al., 2009).

Fig. 3 - Mappa dell'aria di studio, nel territorio di Arabba (Italia). Sono indicate: la stazione meteo automatica e il campo neve di Monti Alti di Ornella (MORN), il campo neve di Passo Pordoi (PORD) (fonte della mappa: Regione del Veneto - Segreteria Regionale per le Infrastrutture Unità di Progetto per il Sistema Informativo Territoriale e la Cartografia).

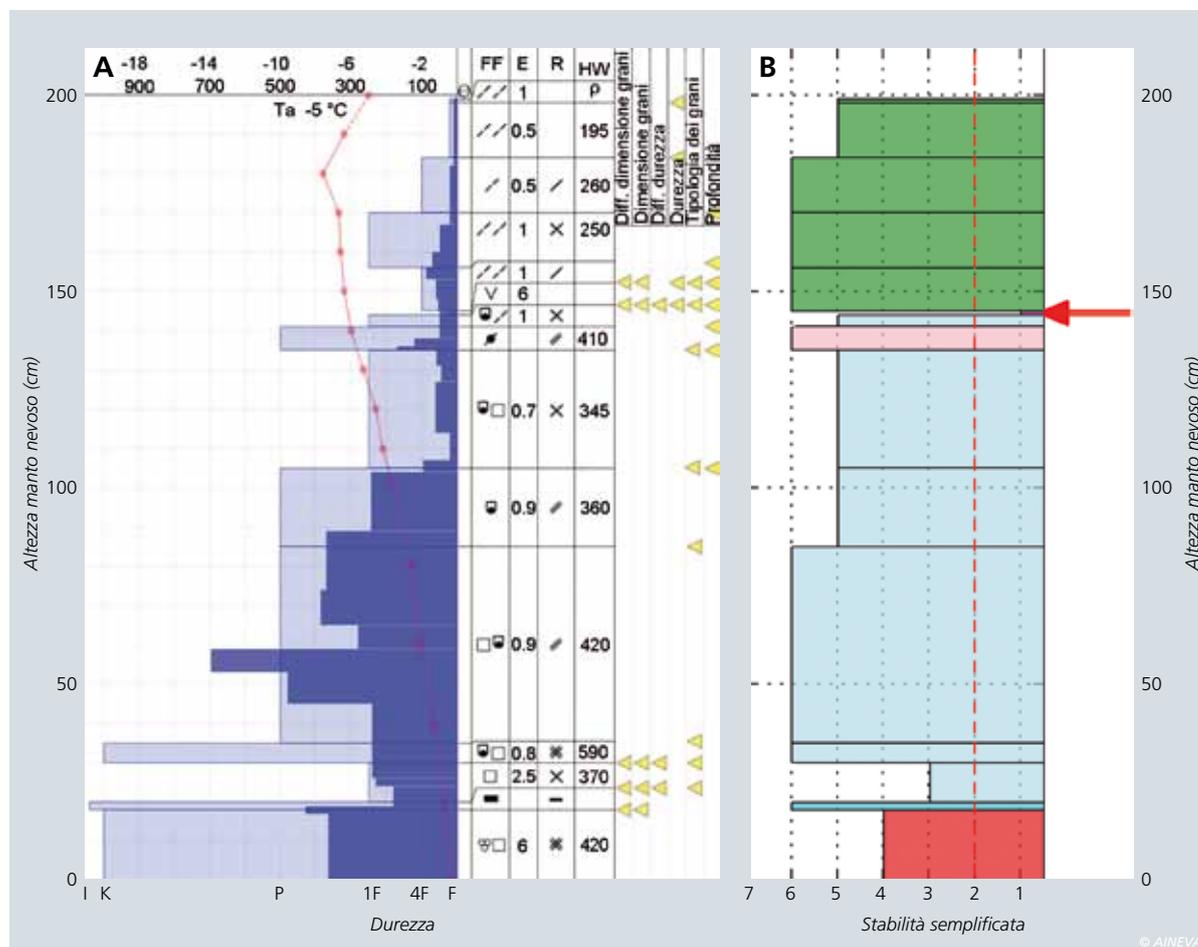
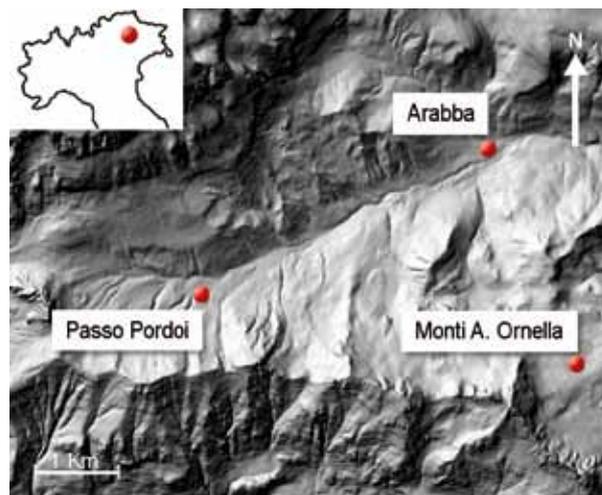


Fig. 4 - (A) Profilo del manto nevoso osservato manualmente presso il campo neve di Monti Alti d'Ornella il 28 gennaio 2009 (visualizzato con YETI NIK). Sulla sinistra si possono osservare i profili dei test di durezza della mano (azzurro) e della sonda penetrometrica (blu). In seguito sono riportate le caratteristiche degli strati (tipologia dei grani, dimensione dei grani, durezza e densità). I triangoli gialli indicano le variabili presenti nel rispettivo intervallo critico e assegnate alle interfacce. (B) Profilo semplificato della stabilità. Le variabili critiche sono state assegnate agli strati. Il colore degli strati indica la tipologia principale dei grani, in accordo con Fierz et al. (2009). La freccia rossa individua l'interfaccia con più di 5 variabili critiche.

Obiettivi

Obiettivo del presente lavoro è definire un nuovo metodo per visualizzare la *somma delle variabili critiche* che:

a) fornisca direttamente e intuitivamente informazioni sull'instabilità strutturale del manto nevoso (caratterizzato da un profilo stratigrafico);

b) possa essere applicato sia a profili manuali che simulati.

Lo scopo finale è quello di rendere l'interpretazione dei profili del manto nevoso più veloce e oggettiva e aumentare le funzionalità di SNOWPACK come strumento di supporto decisionale ai previsori valanghe.

METODI

Il metodo della somma delle variabili critiche applicato a SNOWPACK

I range utilizzati per la *somma delle variabili critiche* proposti da Schweizer e Jamieson (2007) sono stati adattati in modo da rispecchiare le procedure di osservazione in uso presso i servizi di previsione valanghe italiani (fig 1).

Le variazioni riguardano i valori soglia del test di durezza della mano, la differenza di durezza in corrispondenza di un'interfaccia e lo spessore critico del lastrone.

Inoltre, a causa delle differenze tra le caratteristiche della neve simulate e rilevate, si è dovuto tarare i range critici in modo da poterli utilizzare con SNOWPACK. In generale, nei profili manuali, gli strati presentano caratteristiche significativamente differenti che li rendono registrabili come distinti dagli osservatori. Le simulazioni hanno invece una risoluzione maggiore, quindi le differenze tra i vari strati sono meno marcate. Per questa ragione, i va-

lori che definiscono le differenze critiche tra due strati simulati devono essere modificati. Il valore critico per la differenza di dimensione dei grani è espresso in millimetri (Schweizer et al., 2008). Tale definizione non tiene conto del fatto che la differenza tra due grani va messa in relazione anche con le loro dimensioni. Se quest'aspetto può essere trascurato nei profili manuali, va invece considerato per quelli simulati, dove le differenze tendono a essere minori. Abbiamo dunque deciso di esprimere la differenza di dimensione dei grani in modo relativo, individuando nel 40% di differenza la soglia critica:

$$\Delta e = \frac{e_2 - e_1}{e_1} > 0.4$$

dove e_1 è il valore di dimensione dei grani minore ed e_2 è il valore di dimensione dei grani maggiore.

Analogamente sono stati corretti i valori critici per l'indice di durezza con il test della mano e la sua differenza tra strati adiacenti. Non si sono rese necessarie modifiche per la variabile riferita alla tipologia di grani (persistenti). La fig 1 riporta i range critici utilizzati sia per i profili rilevati manualmente sia simulati.

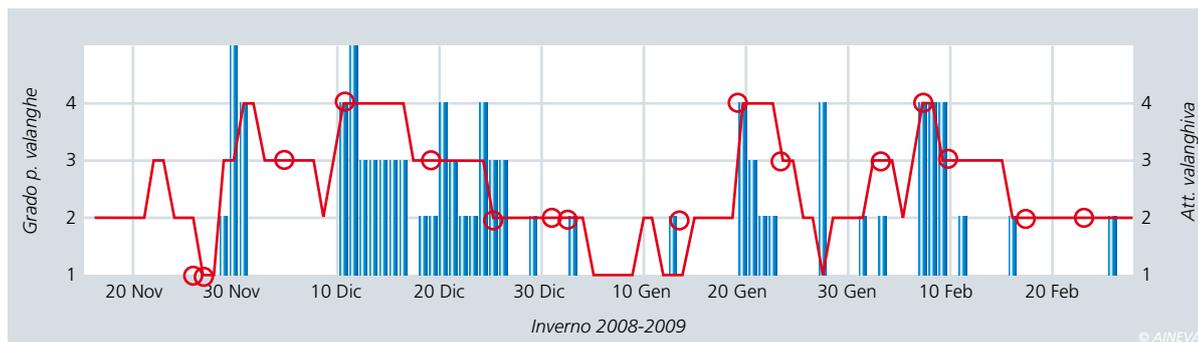
Profilo semplificato della stabilità

In questi ultimi anni alcuni servizi di previsione valanghe nazionali (p.e. Svizzera e Italia) hanno integrato il metodo della somma dei valori soglia nel loro visualizzatore dei profili stratigrafici, considerandolo utile per l'analisi dei profili. Anche il software italiano YETI NIK è in grado di visualizzare il numero di variabili critiche (comunemente conosciuti come lemon) per una determinata interfaccia,

seguendo lo schema descritto in precedenza (Fig. 4A).

La rappresentazione grafica proposta in questo lavoro prevede invece l'assegnazione delle sei variabili strutturali critiche ai singoli strati sulla base delle seguenti regole: (i) le variabili che già si riferiscono alle proprietà dello strato vengono assegnate allo strato stesso; (ii) le variabili che si riferiscono alle interfacce generate da due strati adiacenti vengono assegnate al più soffice tra i due strati (in base all'indice di durezza del test della mano); nel caso due strati adiacenti avessero lo stesso indice di durezza, le variabili dell'interfaccia sono assegnate allo strato superiore, poiché la sollecitazione indotta da uno sciatore diminuisce con l'aumento della profondità ed è dunque maggiore nello strato superiore che non in quello inferiore; (iii) la variabile per la profondità critica è assegnata a tutti gli strati che si trovano all'interno (anche parzialmente) del rispettivo range (Fig. 2C). Seguendo queste regole è possibile definire un profilo semplificato della stabilità (Fig. 4B). Per ottenere un grafico simile a quello classicamente utilizzato per visualizzare la durezza del manto nevoso, il profilo di stabilità semplificato evidenzia il numero di variabili strutturali di un determinato strato che non sono comprese nel range critico. Per esempio, se per un determinato strato il numero di variabili strutturali nel range critico è 5, il valore di stabilità (SSD) assegnato allo strato è $7-5=2$. In modo da avere 1 come valore minimo di stabilità invece di 0, il numero di variabili viene sottratto da 7 invece che dal numero massimo di variabili nel range critico (6). Di conseguenza, il valore di SSD varia da 1, per gli strati potenzialmente

Fig. 5 - Grado del pericolo valanghe regionale e indice dell'attività valanghiva registrato presso Monti Altì d'Ornella durante l'inverno 2008-2009. I cerchi indicano i giorni per i quali sono disponibili i profili manuali. Il grado di pericolo valanghe (linea rossa) varia da 1 a 4, corrispondente a: Debole, Moderato, Marcato e Forte. L'indice di attività valanghiva (barre) per l'area di Arabba è distinto nelle classi: 0: nessuna valanga osservata; 1: osservate piccole valanghe (valanghe a debole coesione); 2: osservate valanghe spontanee di media grandezza; 3: osservate molte valanghe spontanee di media grandezza; 4: osservata singola valanga spontanea di grandi dimensioni; 5: osservate molte valanghe spontanee di grandi dimensioni.



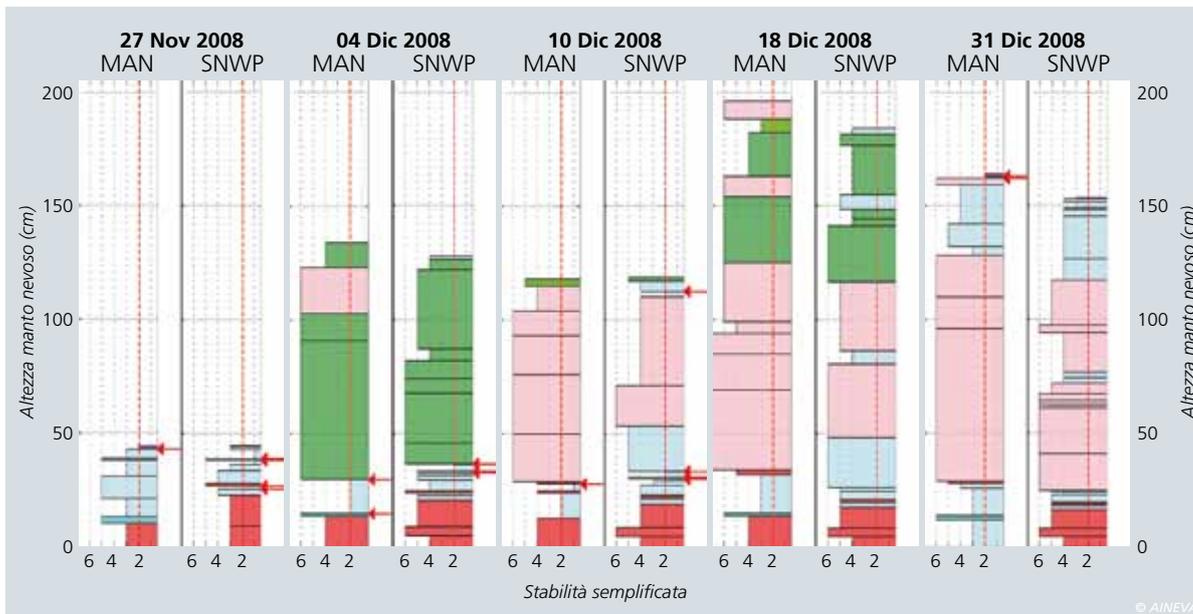


Fig. 6 - Profili semplificati della stabilità, per la stazione di Monti Altissimi di Ornella, raccolti il 27 novembre, 4, 10, 18 e 31 dicembre 2008. Per ogni data è visualizzato il profilo osservato manualmente (MAN) e simulato (SNWP).

più instabili, a 7 per quelli più stabili. In accordo con Schweizer e Jamieson (2007), gli strati con $SSD \leq 2$ sono considerati potenzialmente instabili. Inoltre, le frecce a lato del profilo indicano tutte le interfacce con $SSD \leq 2$. I colori assegnati ai vari strati si riferiscono alla tipologia primaria dei grani formanti lo strato stesso, in accordo con lo schema dei colori proposto nella classificazione internazionale della neve al suolo (Fierz et al., 2009).

Caso di studio: inverno 2008-2009 nelle Dolomiti Venete

L'inverno 2008-2009 (da dicembre a febbraio), caratterizzato da nevicate eccezionali sui versanti meridionali delle Alpi europee (Valt e Cianfarra, 2009), rappresenta un periodo ideale sul quale testare la visualizzazione semplificata della stabilità appena proposta.

Sono stati confrontati 16 profili rilevati tradizionalmente (Cagnati, 2003) con i profili simulati ottenuti da SNOWPACK. Tutti i profili tradizionali sono stati eseguiti in aree di studio situate nel bacino superiore del Cordevole: vicino alla stazione meteo automatica (AMS) di Monti Altissimi di Ornella (MORN), a 2250 m s.l.m. (utilizzata per le simulazioni di SNOWPACK) e presso la stazione del Passo Pordoi (PORD) (2142 m s.l.m.) (Fig. 3). Come termine di paragone alla *somma delle variabili critiche*, applicata sia ai profili tradizionali che simulati, è stato utilizzato il grado

di pericolo valanghe verificato. La verifica del grado di pericolo ha comportato l'ind-casting delle condizioni di stabilità secondo l'approccio sinottico convenzionale (LaChapelle, 1980). Si sono presi in considerazione i profili stratigrafici tradizionali, i dati sulla frequenza delle valanghe e le condizioni meteo. Inoltre, a supporto della verifica, sono stati utilizzati i bollettini sulla stabilità redatti per i comuni e la Protezione Civile.

RISULTATI

28 novembre - 2 dicembre 2008 e 10-12 dicembre 2008

Due periodi d'intense nevicate (28 novembre - 2 dicembre 2008 e 10 - 12 dicembre 2008) hanno innescato il primo e il secondo ciclo di valanghe della stagione. Ad inizio stagione la parte superiore del manto nevoso era formata da diversi strati deboli costituiti da tipi di grani persistenti, mentre forme di fusione (MF) caratterizzavano gli strati più prossimi al terreno. Diverse osservazioni hanno riportato anche la formazione di uno strato di brina di superficie (SH) nelle notti tra il 25 il 27 novembre 2008.

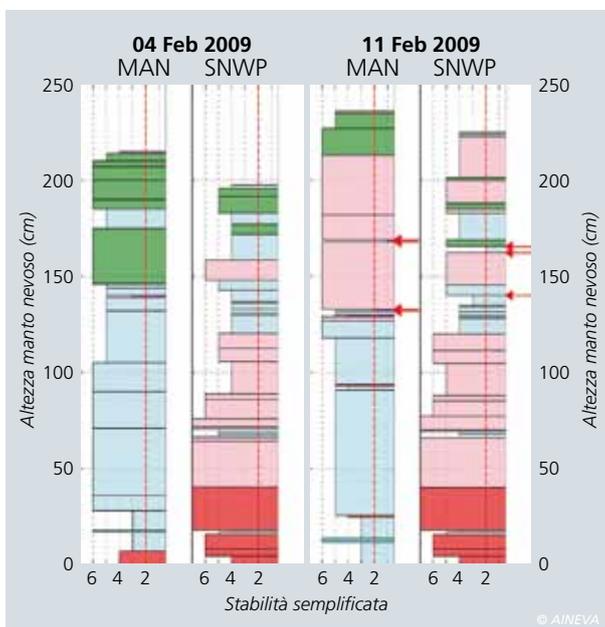
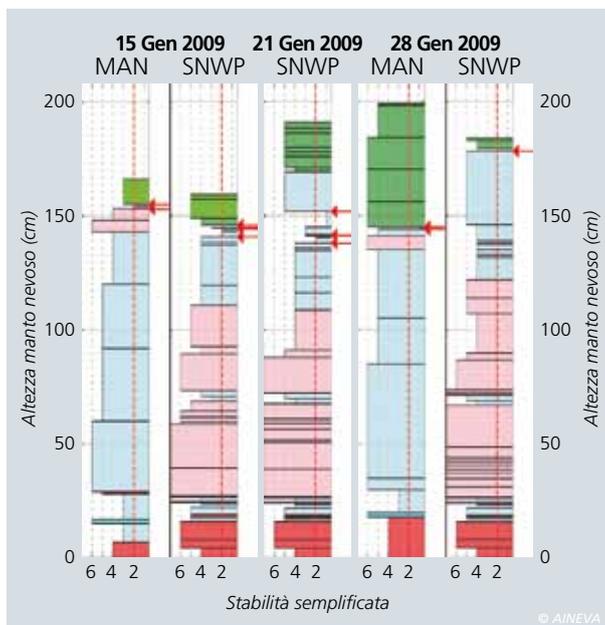
A causa della scarsa copertura nevosa e della sua distribuzione ancora irregolare, non è stata registrata alcuna attività valanghiva fino al termine di novembre (Fig. 5). Dal 28 novembre 2008 inizia a nevicare e la neve recente va quindi a posarsi su un manto nevoso sottile e

fragile. La sera del 29 novembre 2008 si verificano numerose grandi valanghe che raggiungono il fondovalle. Le valanghe di maggiori dimensioni sono state registrate l'1 dicembre 2008. Un secondo ciclo di valanghe ha inizio durante il secondo periodo di forti nevicate (10 - 12 dicembre 2008) e termina gradualmente intorno al 16 dicembre 2008. In entrambi i periodi, sono state osservate valanghe con un tempo di ritorno di 20 anni. Nei giorni seguenti la temperatura dell'aria e della neve aumenta. Alle altitudini inferiori, il manto nevoso, caratterizzato da neve umida alla base, diventa instabile. Alla quota delle due aree di studio (circa 2200 m s.l.m.), l'effetto del riscaldamento non è molto pronunciato e dunque la sua influenza sulla stabilità della neve è limitata. Questo ciclo termina verso il 27 dicembre 2008.

Per questo periodo sono disponibili nove profili stratigrafici tradizionali, quattro ricavati dall'area di studio di PORD e cinque dall'area di studio vicino alla stazione automatizzata di MORN. In Figura 6 sono visibili sia i profili tradizionali di MORN sia le rispettive simulazioni effettuate con SNOWPACK.

Il 27 novembre 2008 l'instabilità strutturale nella parte più profonda del manto nevoso è già visibile nei profili sia tradizionali sia simulati.

Il profilo del 4 dicembre 2008, eseguito dopo il primo episodio nevoso, evidenzia



Dall'alto:

Fig. 7 - Profili semplificati della stabilità, per la stazione Monti Altì di Onella, raccolti il 15, 21 e 28 Gennaio 2009. Nessun profilo tradizionale era disponibile per il 21 Gennaio 2009, giorno con il picco massimo di attività valanghiva.

Fig. 8 - Profili semplificati della stabilità, per la stazione Monti Altì di Onella, raccolti il 4 e 11 febbraio 2009.

strati ben consolidati nella parte centrale e superiore del manto, ma anche alcuni strati potenzialmente critici, con tipi di grani persistenti, nella porzione inferiore del manto nevoso. L'analisi dell'instabilità strutturale produce gli stessi risultati, sia utilizzando i profili tradizionali sia quelli simulati (Fig. 6).

Anche per il 10 dicembre 2008 le condizioni di stabilità reale del manto nevoso si possono correttamente desumere sia dal profilo tradizionale che dalle simulazioni. Il profilo fornito da SNOWPACK evidenzia uno strato debole a pochi centimetri sotto la superficie. Non si hanno indicazioni sulla reale esistenza di questo strato debole, non essendo stato osservato sul

campo. Tuttavia, visto lo scarso spessore del lastrone soprastante, tale discrepanza non ha avuto alcun effetto sulla stima della stabilità nel suo insieme. Simulazioni e profili in campo indicano un progressivo aumento della stabilità dal 18 dicembre 2008 (MORN) (Fig. 6) che si completa attorno al 31 dicembre 2008. Nei profili tradizionali gli strati basali sono indicati più deboli che non nel profilo simulato. Tuttavia, il numero di variabili strutturali nel range critico non è tale da indicare criticità.

19-22 gennaio 2009

Il successivo periodo di forte attività valanghiva è legato alle nevicate (60-70 cm di neve fresca) del 19-22 gennaio 2009. Prima dell'evento, la superficie del manto nevoso era costituita da cristalli sfaccettati (FC) sovrastanti uno strato di brina di superficie (SH). I grani sfaccettati (FC) e la brina di superficie (SH) sono il risultato di un periodo di freddo intenso verificatosi nella prima decade di gennaio 2009. Le prime valanghe si staccano dai pendii più ripidi nel tardo pomeriggio del 20 gennaio 2009 e l'attività valanghiva perdura anche nei 2-3 giorni successivi (Valt e Pesaresi, 2009).

Le condizioni precedenti il periodo valanghivo sono descritte dal profilo stratigrafico del 15 gennaio 2009 (MORN) (Fig. 7). Nel profilo simulato la crescita cinetica dei cristalli è meno pronunciata.

Tuttavia, la stabilità che è possibile derivare dal profilo simulato e tradizionale è abbastanza simile (Fig. 7). Gli strati inferiori e centrali del manto nevoso sono piuttosto ben consolidati. La durezza degli strati in prossimità del terreno è bassa, ma il numero di variabili nel range critico non è sufficiente per classificare tali strati come instabili.

Sia nei profili tradizionali sia simulati, è chiaramente evidenziato lo strato di brina di superficie (SH) sepolta, a circa 20 cm dalla superficie, che ha creato l'instabilità (Fig. 7). Nella simulazione con SNOWPACK la durezza dello strato di brina di superficie (SH) è leggermente più elevata rispetto alla durezza dello strato

adiacente costituito da cristalli sfaccettati (FC). Di conseguenza, le variabili critiche che descrivono le proprietà del punto di contatto sono state assegnate allo strato di cristalli sfaccettati. Tuttavia, la parte instabile del manto nevoso è stata chiaramente identificata dal modello.

Nel profilo del 28 gennaio 2009 (MORN) è ancora presente lo strato di brina di superficie (SH) sepolta (così come lo era stato due giorni prima nel profilo registrato a PORD) ed è sempre segnalato come instabile. In realtà la stabilità della neve nel suo insieme è notevolmente migliorata, come evidenziato sia dal grado di pericolo valanghe sia dall'indice di attività valanghiva (Fig. 5).

Il modello SNOWPACK suggerisce, invece, un marcato ritorno a condizioni piuttosto stabili. Nel profilo simulato del 28 gennaio 2009, la porzione più debole è ancora quella intorno allo strato di brina di superficie (SH) sepolta, ma il numero di variabili nel range critico non è sufficiente a indicare condizioni instabili come invece era possibile vedere nel profilo simulato del 21 gennaio 2009 (Fig. 7).

6-8 febbraio 2009

L'ultimo periodo esaminato ha inizio con una nevicata tra il 6 e il 7 febbraio 2009. Nell'area di studio sono registrati 50 cm di neve fresca, in aggiunta ai 30 cm caduti nei giorni precedenti. Sopra il limite della vegetazione arborea forti venti da sud provocano notevoli accumuli di neve. Le precipitazioni terminano l'8 febbraio 2009 quando avvengono il maggior numero di grandi valanghe. Le instabilità sono legate alla presenza di vari strati di brina di superficie (SH) sepolta e alla presenza, a 70-90 cm dalla superficie del manto, di strati a debole coesione formati da cristalli sfaccettati (FC).

Le condizioni del manto prima dell'evento sono descritte dal profilo del 4 febbraio 2009 (MORN) (Fig. 8). Ancora una volta nel profilo simulato sono visibili più forme di crescita cinetica (nella parte centrale del manto nevoso) che non nel profilo simulato. Tuttavia, la differenza non ha avuto alcun effetto sulla valutazione della

stabilità. Gli strati intermedi e superiori del manto nevoso simulato sono leggermente meno duri dei corrispondenti osservati manualmente.

Per contro, gli strati basali nei profili manuali sono più soffici di quanto riportato nelle simulazioni.

Lo strato di brina di superficie (SH) sepolta, che aveva causato la precedente instabilità, è ancora presente sia nelle rilevazioni manuali che nelle simulazioni. Due profili sono stati realizzati nei giorni successivi al picco di attività valanghiva: l'11 febbraio (MORN) e il 16 febbraio 2009 (PORD). Nel profilo realizzato presso la stazione di MORN (Fig. 8) sono stati individuati due strati di brina di superficie (SH) sepolta ai quali è possibile ricondurre la causa d'instabilità; gli stessi strati sono stati registrati alla stazione di PORD. I profili simulati non hanno evidenziato alcuno strato di brina di superficie (SH) sepolta, ma piuttosto una serie di strati caratterizzati da modesta durezza. Tali strati sono il risultato della trasformazione degli strati di brina di superficie (SH) e degli strati di neve fresca (PP) depositatisi ai primi di febbraio.

Il profilo tradizionale del 16 febbraio 2009 (PORD) indica ancora una situazione instabile (lo strato di brina di superficie sepolta è ancora presente) che non è riscontrabile però in termini di attività valanghiva o grado di pericolo (Fig. 5). Ancora una volta, il modello SNOWPACK sembra essere in grado di simulare in modo più appropriato l'aumento della resistenza degli strati deboli di quanto si possa ricavare da un profilo stratigrafico tradizionale.

Evoluzione della stabilità durante l'inverno 2008-2009

Una valutazione più quantitativa della *somma delle variabili critiche* è offerta dal confronto con il pericolo valanghe. Per ogni profilo è stato scelto lo strato con il numero massimo di variabili nel rispettivo range critico escludendo quelli compresi nei 18 cm più superficiali poiché considerati poco influenti per la valutazione della stabilità generale (Schweizer et al., 2007). L'SSD dello strato più debole è stato quindi confrontato con il grado di pericolo valanghe verificato assegnato alla medesima data del profilo. Ogni strato con 5 – 6 variabili nel rispettivo range critico è stato classificato come instabile (Fig. 9). Al contrario, abbiamo assunto che con un grado di pericolo valanghe 1 (Debole) e 2 (Moderato) il manto nevoso sia abbastanza stabile, quindi privo di strati classificati come instabili. Con un grado di pericolo 3 (Marcato) e in particolare 4 (Forte) tali strati avrebbero invece dovuto essere presenti.

Nella Figura 9 è possibile analizzare tale confronto. Per il periodo dal 15 novembre 2008 al 28 febbraio 2009 sono stati impiegati i profili simulati da SNOWPACK a cadenza giornaliera. Anche in questo caso i profili tradizionali disponibili sono solamente 16.

Dalla Figura 9 si può osservare come SNOWPACK inizi a fornire informazioni utili sulla stabilità non appena l'altezza della neve raggiunge circa i 50 cm (28-29 novembre 2008). A metà dicembre i profili, sia tradizionali sia simulati, evidenziavano un ritorno a condizioni stabili prima di quanto indicato dal grado di pericolo,

il che denota un possibile sfasamento temporale del grado di pericolo stesso.

Nei giorni successivi ai cicli valanghivi di gennaio e febbraio 2009, SNOWPACK mostra di essere più sensibile al graduale incremento della resistenza degli strati deboli di quanto possano esserlo i profili tradizionali.

Il basso numero di profili tradizionali non consente un'analisi statistica pienamente significativa.

La classificazione della stabilità ricavata sia dai profili tradizionali sia da quelli simulati è stata messa a confronto con il pericolo valanghe verificato (fig. 10).

L'accuratezza (misura del successo di un modello nel suo insieme) risulta essere relativamente bassa (56% in entrambi i casi). Nel caso dei profili simulati la valutazione può essere estesa al periodo dal 15 novembre 2008 al 28 febbraio 2009 ($N = 106$) (fig. 11). L'accuratezza aumenta così al 72% anche se la probabilità di determinazione delle situazioni instabili (POD) rimane piuttosto bassa (53%).

Nei profili simulati, il numero medio di variabili strutturali nel range critico (n_{crit}) è di 4.7 nei giorni in cui il pericolo valanghe era 3 o maggiore ($N = 47$), e di 3.4 nei giorni "stabili" con un grado di pericolo valanghe 1-debole o 2-moderato (fig. 11). Tale differenza è statisticamente rilevante (U -Test, $p < 0.001$), cioè n_{crit} è chiaramente associato al grado di pericolo valanghe – o alla stabilità in generale.

DISCUSSIONE

Tre periodi d'instabilità, registrati durante la stagione invernale 2008-2009, sono stati analizzati con la *somma del-*

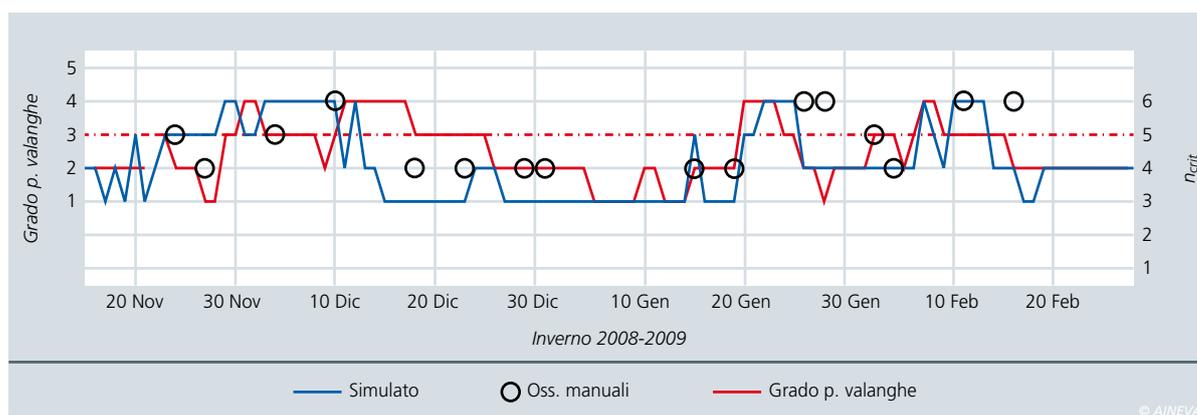


Fig. 9 - Massimo numero di variabili (per singolo strato) nel rispettivo range critico (n_{crit}) (per profili sia osservati manualmente sia simulati). La linea rossa tratteggiata indica la soglia oltre la quale uno strato è considerato instabile, in accordo con Schweizer et al. (2007), e il grado 3 del pericolo valanghe (Marcato).

le variabili critiche e la visualizzazione semplificata della stabilità, applicata sia ai profili manuali sia simulati. I 16 profili tradizionali, realizzati prima e subito dopo un periodo di elevata attività valanghiva, sono stati paragonati con i corrispondenti profili stratigrafici simulati. Nonostante le molte limitazioni, la nostra analisi preliminare consente di dimostrare l'utilità del metodo per la previsione delle valanghe. La nuova rappresentazione semplificata della stabilità riassume, in un singolo grafico, le informazioni su sei variabili

strutturali; non si tratta quindi solo di un profilo della durezza come nel caso della rappresentazione convenzionale. La principale caratteristica del metodo grafico proposto è la sua intuitività. I previsori valanghe possono interpretarlo a colpo d'occhio in quanto la rappresentazione è simile al profilo di durezza tradizionale, con cui hanno già familiarità. Rispetto alla rappresentazione classica dei lemon, la nuova visualizzazione è più completa e diretta (Fig. 4). Aver rettificato la somma delle variabili critiche in modo da poterla

applicare ai profili simulati con SNOWPACK ha permesso di ottenere risultati soddisfacenti ed ha facilitato il raffronto delle informazioni sulla stabilità deducibili dai profili manuali e simulati. Inoltre, le stime sulla stabilità ricavate dalle simulazioni risultano più sensibili alle variazioni della stabilità di quelle ottenute dai profili rilevati manualmente.

Il numero massimo di variabili nel range critico, assegnato a un qualsiasi strato di un determinato profilo simulato, risulta chiaramente legato al grado di pericolo valanghe, il che evidenzia l'utilità delle informazioni ricavabili dalle simulazioni. D'altro canto, l'accuratezza di classificazione risulta ancora limitata ma comunque comparabile (e anche superiore) a quella che si può ottenere con i profili manuali. Infatti, Schweizer e Jamieson (2007) hanno messo in relazione il numero di variabili strutturali nel range critico con la stabilità del profilo stimata usando il metodo proposto da Schweizer e Wiesinger (2001) e hanno rilevato una precisione di classificazione di solo il 47%. Comunque va sempre tenuto in considerazione che, in entrambi i casi, la stima della stabilità avviene senza conoscere a priori lo strato debole (fatto superabile con un test di stabilità) il che rende il processo estremamente difficoltoso.

E' risaputo che la somma delle variabili critiche generalmente sovrastima l'instabilità (Winkler e Schweizer, 2009). Questo trend risulta meno pronunciato utilizzando i profili simulati.

Anche se nel presente studio un profilo è stato classificato come stabile o instabile semplicemente sulla base delle caratteristiche di un singolo strato, occorre tener presente che l'interpretazione di un profilo stratigrafico è un processo più complesso (Schweizer e Wiesinger, 2001). Occorre poi evidenziare le limitazioni del metodo adottato in questo lavoro: (i) il grado di pericolo valanghe riassume la situazione valanghiva in una determinata regione; è soprattutto indicativo delle condizioni di determinati pendii ad una certa quota ed esposizione. Confrontare la stabilità del profilo locale con il grado

Fig. 10 - Confronto tra la stabilità derivata dalla stratigrafia (osservata manualmente o simulata) e il grado di pericolo valanghe.

		OSSERVATI	
		"stabili" (P. valanghe ≤ 2)	"instabili" (P. valanghe ≥ 3)
PREVISTI	profili tradizionali		
	"Stabili" ($n_{crit} \leq 4$)	5	3
	"Instabili" ($n_{crit} \geq 5$)	4	4
	profili simulati		
	"Stabili" ($n_{crit} \leq 4$)	6	4
	"Instabili" ($n_{crit} \geq 5$)	3	3

© AINEVA

Fig. 11 - Confronto tra la stabilità derivata dai profili simulati e il grado di pericolo valanghe per il periodo compreso tra il 15 novembre 2008 e il 28 febbraio 2009 (N = 106).

Sono anche mostrati i valori medi del numero massimo di variabili nel rispettivo range critico (n_{crit}) assegnato ad un qualunque strato presente all'interno di profilo simulato. Il p-value (U-test di Mann-Whitney) indica se i campioni "stabili" o "instabili" provengono da due popolazioni differenti (p-value < 0.001).

profili	GRADO DEL PERICOLO VALANGHE		P
	1 e 2 ("stabili")	3 e 4 ("instabili")	
$n_{crit} \leq 4$ ("stabili")	51	22	
$n_{crit} \geq 5$ ("instabili")	8	25	
n_{crit}	3.4	4.7	< 0.001

© AINEVA





di pericolo valanghe regionale è per principio un metodo opinabile che può introdurre notevoli incertezze; (ii) la somma delle variabili critiche è un metodo ideato per valutare instabilità dovute a strati deboli persistenti e potrebbe risultare inadatto per classificare instabilità legate a neve fresca o fusione del manto nevoso.

CONCLUSIONI

Abbiamo proposto una visualizzazione semplificata della stabilità della neve che si basa su sei parametri del manto nevoso e testato il nostro approccio con profili sia raccolti manualmente sia simulati.

La nuova rappresentazione del profilo riassume le informazioni sulla stabilità ottenibili dalla stratigrafia e ne facilita un'interpretazione rapida e intuitiva. Non solo consente di evidenziare le caratteristiche dello strato debole, ma anche le proprietà strutturali del potenziale lastrone.

Aggiustando i range di criticità delle singole variabili è possibile applicare questo metodo anche ai profili simulati con il modello del manto nevoso SNOWPACK.

Le informazioni ricavate dai profili simulati hanno dimostrato di essere più sensibili alle variazioni di stabilità rispetto ai dati ottenuti dai profili manuali. Inoltre, un vantaggio dell'utilizzo del modello è che

si può facilmente ottenere una risoluzione giornaliera anche in situazioni di elevato pericolo, quando le osservazioni manuali sono solitamente impossibili. Il confronto della stabilità ottenuta dai profili simulati con il grado di pericolo valanghe ha evidenziato come questo tipo d'informazione sia significativamente associato alla stabilità reale – sebbene la precisione di classificazione non sia molto elevata (circa 70%), la bontà del metodo è comunque paragonabile a quella degli approcci più tradizionali. I risultati preliminari suggeriscono che una stima della stabilità basata sulla stratigrafia della neve simulata potrebbe benissimo integrare i tradizionali dati utilizzati per la previsione valanghe.

RINGRAZIAMENTI

Ringraziamo Giorgio Barberis per la disponibilità e per essersi adoperato ad integrare il metodo proposto nel software YETI. Ringraziamo Christoph Mitterer per l'aiuto fornito con le simulazioni e l'analisi dei dati con SNOWPACK. Ringraziamo Tiziana Corso e Walter Cagnati, che hanno raccolto i dati dei profili. Un grazie anche a Renato Zasso, Charles Fierz, Michael Lehning, Christine Groot Zwaafink, Alec van Herwijnen e Andrea Pozzi per il supporto e la consulenza.

Bibliografia

- Bartelt, P. e Lehning, M., 2002. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning; Part I: numerical model. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 35(3): 123-145.
- Cagnati, A., 2003. Strumenti di misura e metodi di osservazione nivometeorologici. Manuale per i rilevatori dei Servizi di previsione valanghe, 131 pp.
- Fierz, C., Armstrong, R.L., Durand, Y., Etchevers, P., Greene, E., McClung, D.M., Nishimura, K., Satyawali, P.K. e Sokratov, S.A., 2009. The International Classification for Seasonal Snow on the Ground. IHP-VII Technical Documents in Hidrologia N°83, IACS Contribution N°1, UNESCO IHP, Paris.
- LaChapelle, E.R., 1980. The fundamental process in conventional avalanche forecasting. *J. Glaciol.*, 26(94): 75-84.
- Lehning, M., Bartelt, P., Brown, R.L. e Fierz, C., 2002a. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning; Part III: meteorological forcing, thin layer formation and evaluation. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 35(3): 169-184.
- Lehning, M., Bartelt, P., Brown, R.L., Fierz, C. e Satyawali, P.K., 2002b. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning; Part II. Snow microstructure. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 35(3): 147-167.
- Lehning, M., Bartelt, P., Brown, R.L., Russi, T., Stöckli, U. e Zimmerli, M., 1999. Snowpack model calculations for avalanche warning based upon a new network of weather and snow stations. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 30(1-3): 145-157.
- McClung, D.M., 2000. Predictions in avalanche forecasting. *Ann. Glaciol.*, 31: 377-381.
- Monti, F., Cagnati, A., Fierz, C., Lehning, M., Valt, M. e Pozzi, A., 2009. Validation of the SNOWPACK model in the Dolomites. In: J. Schweizer and A. van Herwijnen (Editors), International Snow Science Workshop ISSW, Davos, Switzerland, 27 September – 2 October 2009. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, pp. 313-317.
- Schweizer, J. e Jamieson, J.B., 2007. A threshold sum approach to stability evaluation of manual snow profiles. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 47(1-2): 50-59.
- Schweizer, J. e Wiesinger, T., 2001. Snow profile interpretation for stability evaluation. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 33(2-3): 179-188.
- Schweizer, J., Fierz, C. e Jamieson, J.B., 2005. Assessing the probability of skier triggering from snow layer properties. In: K. Elder (Editor), Proceedings ISSW 2004. International Snow Science Workshop, Jackson Hole WY, U.S.A., 19-24 September 2004, pp. 192-198.
- Schweizer, J., Jamieson, J.B. e Schneebeli, M., 2003. Snow avalanche formation. *Rev. Geophys.*, 41(4): 1016.
- Schweizer, J., McCammon, I. e Jamieson, J.B., 2008. Snowpack observations and fracture concepts for skier-triggering of dry-snow slab avalanches. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 51(2-3): 112-121.
- Valt, M. e Cianfarra, P., 2009. Lo straordinario inverno 2008–2009. Neve e Valanghe, AINEVA, 67: 4-15.
- Valt, M. e Pesaresi, D., 2009. Detecting snow avalanches with seismic stations in North-east Italy: first results of dataset analysis. In: J. Schweizer and A. van Herwijnen (Editors), International Snow Science Workshop ISSW, Davos, Switzerland, 27 September – 2 October 2009. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, pp. 458-462.
- Winkler, K. e Schweizer, J., 2009. Comparison of snow stability tests: Extended column test, rutschblock test and compression test. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 59(2-3): 217-226.