

# analisi dei fattori predisponenti lo SCIVOLAMENTO DEL MANTO NEVOSO:

**Elisabetta Ceaglio**<sup>1,2</sup>,  
**Michele Freppaz**<sup>2</sup>,  
**Gianluca Filippa**<sup>2</sup>,  
**Stefano Ferraris**<sup>4</sup>,  
**Valerio Segor**<sup>3</sup>,  
**Ermanno Zanini**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fondazione Montagna sicura -  
Montagne Sûre, Villa Cameron,  
Località Villard de la Palud 1,  
11013 Courmayeur (AO), Italy

<sup>2</sup> Dipartimento di Scienze Agrarie,  
Forestali e Alimentari - DISAFA,  
Chimica Agraria e Pedologia and  
NatRisk - LNSA, University of Torino -  
Via Leonardo Da Vinci 44,  
10095 Grugliasco (TO), Italy

<sup>3</sup> Ufficio neve e valanghe, Assetto  
idrogeologico dei bacini montani,  
Regione Autonoma Valle d'Aosta,  
Loc. Amérique 44,  
11020 Quart (AO), Italy

<sup>4</sup> Dipartimento Interateneo di Scienze,  
Progetto e Politiche del Territorio,  
Politecnico e Università di Torino -  
Viale Mattioli 39,  
10125 Torino, Italy

e-mail: [eceaglio@fondms.org](mailto:eceaglio@fondms.org)  
(E. Ceaglio)

Negli ultimi anni sono stati fatti molti passi avanti nella comprensione delle valanghe per scivolamento della neve, ma i processi che regolano questo tipo di fenomeno sono ancora poco conosciuti e quindi rappresentano un punto di incertezza nella previsione delle valanghe. Con questo studio, si è cercato di contribuire alla comprensione del fenomeno, con particolare attenzione ai fattori predisponenti, considerando parametri meteorologici, nivologici e pedologici. In Valle d'Aosta, in un'area caratterizzata da intenso movimento della neve e da formazione di grandi fessurazioni a bocca di balena, seguite talvolta dal distacco di una valanga, è stato allestito un sito di monitoraggio con strumentazione fissa per la misura dello scivolamento del manto nevoso e diversi sensori di temperatura e contenuto di acqua, collocati a diverse profondità nel suolo e nella neve. A questo sono stati associati dati meteorologici e proprietà dei suoli con particolare attenzione agli orizzonti superficiali. I dati sono stati raccolti durante due anni idrologici, 2009-2010 e 2010-2011, caratterizzati da differenti condizioni nivo-meteorologiche: più freddo e nevoso il primo, più caldo e meno nevoso il secondo. Durante la prima stagione invernale sono stati registrati intensi movimenti della neve (3.5 - 4.4 cm/gg). Nel 2010 è stato registrato anche il distacco di una valanga. Durante la seconda stagione invernale lo slittamento della neve è stato maggiormente variabile (6.3 - 0.6 cm/gg) e senza distacco di una valanga. È stata evidenziata una stretta correlazione tra lo scivolamento del manto nevoso e le proprietà del suolo (contenuto d'acqua, temperatura), identificate come fattori ambientali importanti nel controllare il movimento della neve, in relazione anche al processo di liquefazione del suolo. Tra i fattori meteorologici, l'altezza della neve è apparsa significativamente correlata con il movimento del manto nevoso. Nel loro insieme, i risultati ricavati da questo studio hanno evidenziato come lo scivolamento della neve possa essere modellato tramite un insieme di fattori predisponenti, sia pedologici sia nivologici, anche se i risultati sono sito-specifici e dunque trasferibili ad altre aree di studio con la dovuta cautela.

**ILCASO  
STUDIO DI  
MONT DE  
LA SAXE  
(AO)**



## INTRODUZIONE

Lo slittamento della neve, definito come lento movimento del manto nevoso, può portare alla formazione di pieghe e fessurazioni che sono considerate come precursori delle valanghe per scivolamento della neve (Clarke e McClung, 1999). I processi legati allo slittamento ed ai movimenti del manto nevoso sono stati studiati dagli anni '30 fino ad oggi (e.g. Jones et al., 2004), tuttavia, attualmente le valanghe di neve bagnata, comprese quelle per scivolamento della neve, rappresentano uno dei maggiori punti di incertezza nell'ambito delle attività previsionali (Baggi e Schweizer, 2009; Peitzsch et al., 2012). Inoltre, l'interesse per questo tipo di fenomeni sta via via aumentando poiché i cambiamenti climatici potrebbero portare ad una maggiore frequenza di precipitazioni di neve bagnata e di eventi

di pioggia su neve, anche a quote elevate, determinando una generale evoluzione del manto nevoso verso condizioni più calde e umide (Peitzsch et al., 2012). Per questo motivo il verificarsi di condizioni nivometeorologiche favorevoli al distacco di valanghe per scivolamento della neve è probabilmente destinato ad aumentare ed il monitoraggio dello scivolamento della neve e della formazione di fessurazioni potrebbe rappresentare un passo essenziale verso la gestione di pericolo e rischio connessi (Peitzsch et al., 2012).

Le valanghe per scivolamento della neve sono più comuni nei climi marittimi (Peitzsch et al., 2012), anche se possono verificarsi anche in climi più asciutti, durante i periodi invernali più miti o in primavera (McClung e Schaerer, 2006), quando le temperature dell'aria aumentano (eventi con temperature calde, secondo Clarke e McClung, 1999). Tuttavia questi fenomeni sono stati osservati anche dopo lunghi periodi di clima secco, con temperature sotto zero e giornate corte e con manto nevoso quasi completamente asciutto (eventi con temperature fredde, Clarke e McClung, 1999). Elementi che favoriscono i processi di slittamento della neve sono: a) interfaccia neve/suolo abbastanza liscia, con poca rugosità, b) temperatura all'interfaccia neve/suolo uguale a 0°C, che consente la presenza di acqua liquida; c) inclinazione del pendio >15° (Clarke e McClung, 1999).

Alcuni studi hanno dimostrato che la velocità di scivolamento della neve è molto influenzata dalla quantità di acqua libera presente all'interfaccia neve/suolo (Clarke e McClung, 1999). Diversi sono i processi che possono apportare acqua liquida all'interfaccia neve/suolo: (1) eventi piovosi su neve; (2) fusione all'interfaccia neve/suolo derivante dal calore immagazzinato e rilasciato dal suolo; (3) fusione del manto nevoso ad opera della radiazione solare; (4) fusione del manto nevoso in corrispondenza di affioramento di acqua sotterranea; mentre i primi tre processi descritti sono più frequenti, l'effetto delle risorgive è più raramente osservato e studiato (ad esempio: Clarke e McClung,

1999; Jones, 2004; Mitterer e Schweizer, 2012a,b). Anche se meno comuni, possono rappresentare localizzazioni efficaci per l'installazione di siti sperimentali finalizzati ad indagare come il contenuto di acqua liquida e la temperatura all'interfaccia neve/suolo possano influenzare il meccanismo di scivolamento della neve. Inoltre, pochi lavori sono stati concentrati sul ruolo svolto dalle proprietà del suolo nel processo di scivolamento della neve (Mitterer e Schweizer, 2012b).

Neve e suolo sono sistemi connessi e altamente dinamici, gli strati incontrati in un manto nevoso sono in qualche modo analoghi agli orizzonti che compongono un suolo. Le interazioni tra i due domini sono così forti che essi possono essere considerati come un sistema continuo (Guymon, 1978). Se consideriamo questo ipotetico sistema continuo, la parte più debole è sicuramente rappresentata dall'interfaccia neve/suolo. A questo livello vi è un forte scambio di calore e di acqua tra i due mezzi. In particolare, il gradiente di pressione idraulica esistente potrebbe causare un flusso ascendente di acqua dal suolo verso il manto nevoso, giocando un ruolo vitale per la formazione di uno strato basale bagnato, anche senza fusione vera e propria (Mitterer e Schweizer, 2012b). Poiché la permeabilità del suolo può essere molto inferiore rispetto a quella della neve, uno strato di acqua può persistere all'interfaccia neve/suolo, contribuendo ad annullare le asperità del terreno. Inoltre, a seconda delle caratteristiche fisiche del suolo, in particolare i limiti di plasticità e liquidità, la presenza di un alto contenuto di acqua potrebbe indurre liquefazione dei suoli, favorendo la formazione di una pellicola di suolo e acqua, come discusso per la prima volta da Clarke e McClung (1999), condizione predisponente sia per lo scivolamento della neve sia per l'erosione del suolo.

Lo scopo di questo studio è stato quello di contribuire alla comprensione dei processi di slittamento della neve, attraverso: 1) la quantificazione dell'intensità dei movimenti della neve all'interno della zona di

Fig. 1 - Sequenza di foto dell'inverno 2008-2009 a testimonianza dei processi di scivolamento della neve nell'area di studio (Foto R. Cosson).



distacco di una valanga per scivolamento, in punti caratterizzati da diverse condizioni di umidità del suolo, 2) l'indagine delle relazioni esistenti tra il processo di scivolamento della neve ed i fattori predisponenti, tra cui le proprietà fisiche all'interfaccia neve/suolo e i parametri meteorologici.

## MATERIALI E METODI

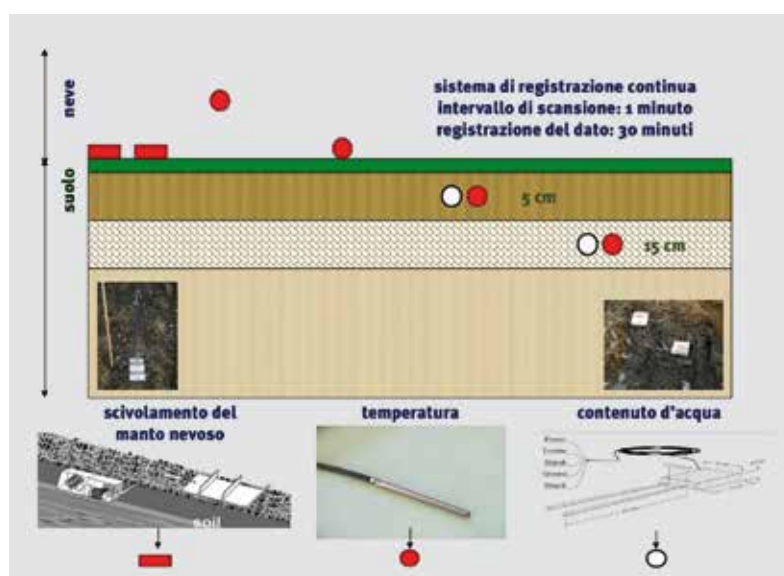
### Area di studio

L'area di studio si trova in Valle d'Aosta, nella zona del massiccio del Monte Bianco (4810 m slm), e consiste in un sito valanghivo denominato "Torrent des Marais - Mont de la Saxe" (esposizione: W, dislivello: 2115 m - 1250 m slm). La zona di distacco della valanga è tipicamente caratterizzata da intenso scivolamento della neve e dalla formazione di una grande fessurazione a bocca di balena (larghezza al distacco: 30-100 m, a seconda dell'intensità dei movimenti della neve; inclinazione media: 30°) che spesso culmina con il distacco di una valanga, prevalentemente in primavera e talvolta anche nel tardo autunno (Fig. 1). Sul fianco in sinistra orografica della zona di distacco è presente una sorgente. Nel 2009, all'interno della zona di distacco della valanga è stato strumentato un sito di monitoraggio con due punti di acquisizione dei dati, collocati rispettivamente in una zona asciutta (plot A) e in una zona più umida (plot B), in prossimità della sorgente (Fig. 2).

### Strumentazione del sito di monitoraggio

All'interfaccia neve/suolo sono stati collocati degli slittini collegati, attraverso 4.5 m di un sottile filo di acciaio il primo anno e 20 m il secondo, a dei potenziometri (Sommer®), secondo una tecnologia sviluppata da in der Gand (1954).

I potenziometri sono stati calibrati al fine di convertire i valori di tensione elettrica (V), emessi quando gli slittini scivolano, in valori di spostamento a valle del manto nevoso (cm). In ciascuno dei due plots (A e B) sono stati collocati due slittini con relativo potenziometro, denominati A1-A2 e



B1-B2 (Fig. 2). Oltre agli slittini, sono stati posizionati dei sensori di temperatura (Campbell - T107) nello strato basale del manto nevoso (Sn), all'interfaccia neve/suolo (I) e nel suolo, a 5 cm (S5) e 15 cm (S15) di profondità. Inoltre, alle stesse profondità (S5 e S15), sono state collocate nel suolo delle sonde per la misura del contenuto d'acqua volumetrico (Campbell - CS616). Tutti i sensori sono stati collegati a dataloggers (Campbell - CR1000), situati in posizione sicura al di fuori della zona di distacco della valanga e dotati di alimentazione autonoma (batterie a lunga durata e pannelli solari). Tutti i cavi dei sensori sono stati sotterrati e rinforzati con picchetti e ancoraggi in modo da minimizzare la possibilità di essere divelti dalle forze esercitate dai movimenti della neve. I dataloggers sono stati program-

mati con scansione del dato ogni minuto e memorizzazione ogni mezz'ora (Fig. 3).

### Raccolta dei dati ed analisi statistiche

In questo lavoro i dati raccolti si riferiscono agli anni idrologici 2009-2010 e 2010-2011 che, per semplicità, vengono chiamati "stagione invernale", o solo "stagione", 2010 e 2011. Per quanto riguarda il sito sperimentale, durante il primo anno i dati sono stati analizzati dal tardo autunno (8 novembre) fino al 14 febbraio (plot B), quando è stata raggiunta la lunghezza massima di cavo disponibile per il movimento degli slittini, e fino al 18 marzo (plot A), quando è avvenuto il distacco di una valanga per scivolamento di neve. Durante il secondo anno, i dati sono stati analizzati dal tardo autunno (8

Fig. 2 - Sito di monitoraggio nella zona di distacco della valanga per scivolamento della neve (i punti A1-A2 e B1-B2 indicano i punti di dislocazione degli slittini nei due plot) (Foto R. Cosson).

Fig. 3 - Strumentazione collocata in ciascuno dei due plot (A e B).

novembre) fino a primavera inoltrata (30 aprile). Inoltre nel corso del primo anno, sulla base delle variazioni delle velocità di scivolamento del manto nevoso, sono stati identificati distinti sotto-periodi di movimento: nel plot A a partire dal 13 gennaio (quando il movimento della neve inizia lentamente e gradualmente ad aumentare) fino al 18 marzo (distacco della valanga), nel plot B dal 15 dicembre (quando la neve inizia a muoversi) fino al 14 febbraio (fine dei cavi).

I dati meteorologici - quali l'altezza della neve (cm) e la temperatura dell'aria (°C) - sono stati forniti dalla stazione meteorologica automatica (di proprietà di Ufficio Centro Funzionale - UCF, Regione Autonoma Valle d'Aosta) di Pré-Saint-Didier Plan Praz (PP, 2044 m slm, a 9 km dall'area di studio). Nella zona di distacco della valanga sono stati descritti alcuni profili di suolo ed i relativi orizzonti sono stati

campionati al fine di determinare le principali proprietà fisiche. I parametri fisici misurati e riportati in questo studio sono: il contenuto di scheletro (%) e i limiti di Atterberg, ovvero il limite di liquefazione (LL,%) e il limite di plasticità (LP,%) che rappresentano il contenuto di umidità del suolo (% in volume) a cui avviene il passaggio dallo stato solido allo stato plastico, e dallo stato plastico allo stato liquido (Stanchi et al., 2012).

I datasets sono stati gestiti e analizzati statisticamente utilizzando il software freeware R (R Development Core Team). Oltre all'applicazione della correlazione di Pearson, al fine di ricavare un modello previsionale dello scivolamento della neve, sulla base di parametri pedologici e meteorologici relativamente semplici, è stata applicata una regressione lineare multipla utilizzando i dati cumulativi di movimento della neve. In particolare è stata utilizzata una regressione stepwise per escludere alcuni regressori dal modello. L'insieme finale di regressori è risultato composto da: umidità del suolo a 5 e 15 cm di profondità, temperatura della neve, temperatura all'interfaccia neve/soffitto e temperatura del suolo a 5 e 15 cm di

Fig. 4 - Altezza della neve al suolo e temperatura dell'aria (valori medi - loc. Plan Praz, 2044 m slm).

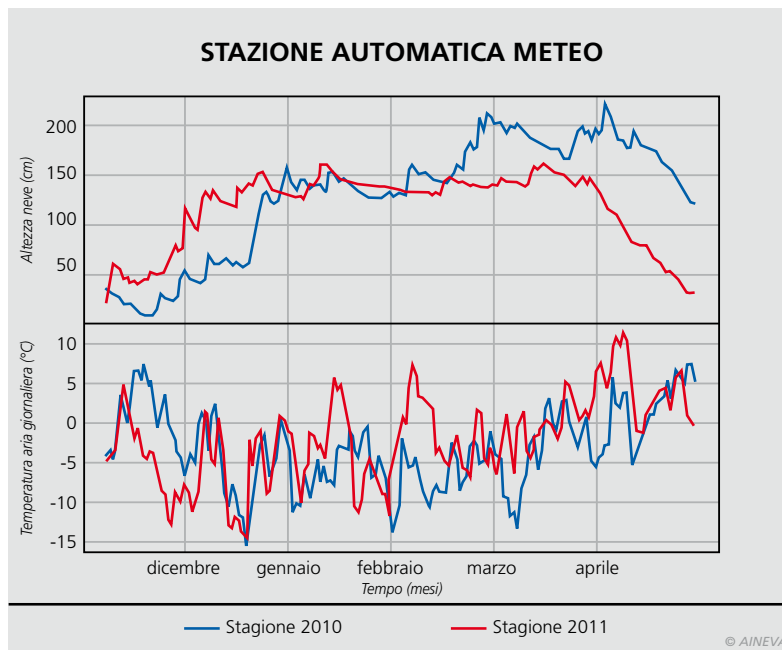
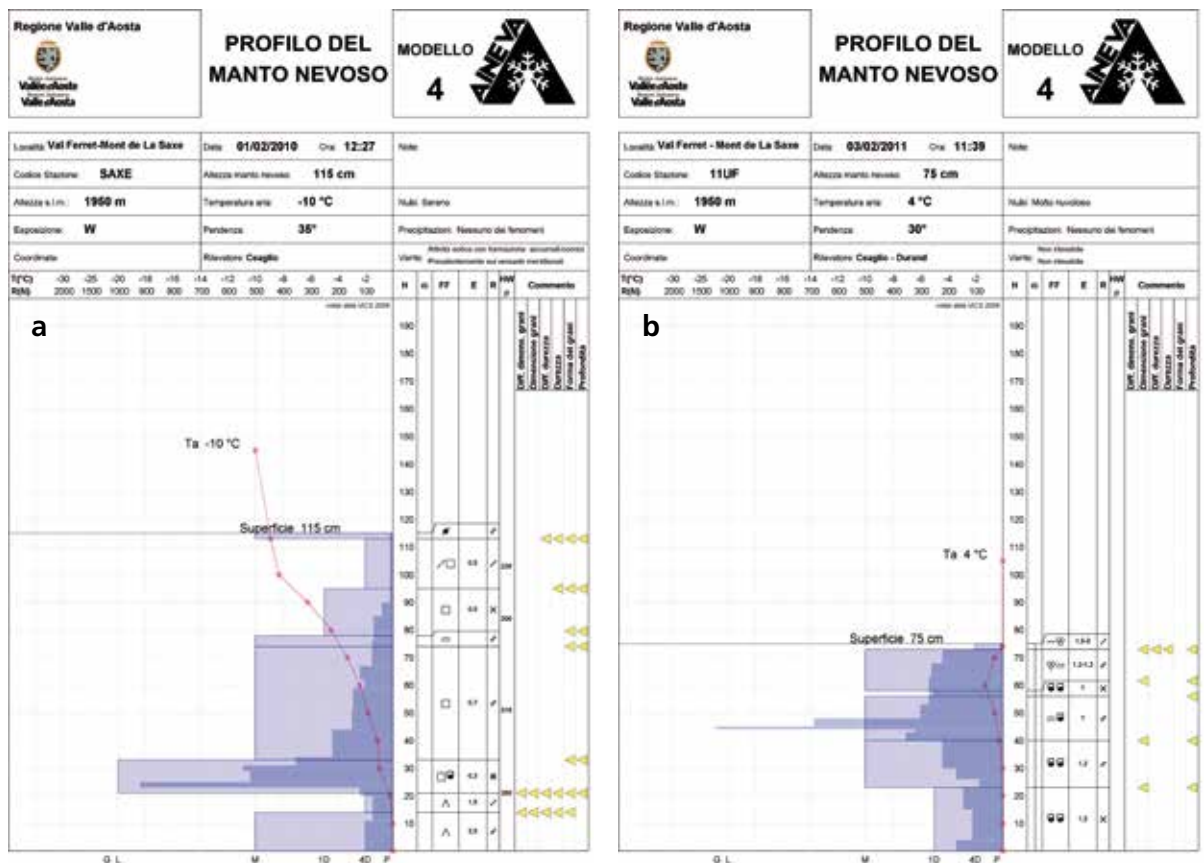


Fig. 5 - Profili della neve rappresentativi di ciascuna delle due stagioni invernali, 2010 (a) and 2011 (b).



profondità. Nel modello sono stati inclusi anche la temperatura dell'aria e l'altezza della neve al suolo. I dati mezzorari dei potenziometri del plot B sono stati mediati prima di far girare il modello e lo stesso è stato fatto per il plot A nella stagione 2010, mentre per l'anno 2011 nel plot A sono stati utilizzati solo i dati provenienti da uno dei potenziometri (A2), dal momento che nessun movimento è stato registrato in A1. I due anni di misurazioni sono stati considerati insieme nel modello. I dati mezzorari dei regressori sono stati aggiustati con una media mobile di un mese. Diverse finestre temporali sono state testate ed infine è stata scelta la finestra ad un mese in quanto portava ad una migliore stima del modello. I dati dei due plots A e B sono stati tenuti separati poiché mediandoli il modello peggiorava. Infine il modello è stato validato utilizzando una k-fold crossvalidation (k=20) ed è stata calcolata l'efficienza del modello (ME).

## RISULTATI

### Descrizione generale delle stagioni invernali e caratteristiche della neve

#### Stagione invernale 2010

La stagione 2010, rispetto al 2011, è stata caratterizzata da maggiori precipitazioni nevose, con un'elevata frequenza di deboli nevicate e lunghi periodi di temperature dell'aria particolarmente fredde (valori medi giornalieri inferiori allo zero) (Fig. 4). In generale si è osservata una struttura molto complessa del manto nevoso, con la presenza di numerosi strati e legami deboli (Fig. 5a) e conseguenti lunghi periodi di condizioni d'instabilità (Segor, 2010).

#### Stagione invernale 2011

Questa stagione invernale è iniziata presto con nevicate molto intense tra fine ottobre e dicembre: quest'ultimo è risultato il mese più nevoso e freddo della stagione, poi però solo a partire dalla metà marzo si sono verificate nuove nevicate degne di nota (Fig. 4). Le temperature dell'aria medie giornaliere hanno superato più volte gli 0°C, anche a gennaio e febbraio e in

generale il manto nevoso si è presentato da moderatamente a ben consolidato (Fig. 5b) (Segor, 2011).

### Temperature e contenuto volumetrico d'acqua registrate nel suolo, nella neve e all'interfaccia suolo/neve

#### Stagione invernale 2010

Nel tardo autunno/inizio inverno (con altezza del manto nevoso inferiore a 100 cm) la temperatura dell'aria è risultata significativamente correlata alla temperatura nel suolo alle due profondità (S5, S15), all'interfaccia neve/soilo (I) e nella neve (Sn).

Le correlazioni sono risultate più alte nel plot più asciutto (A) (S15:  $r = 0.72$ ,  $p < 0.05$ ;

$S5$ :  $r = 0.80$ ,  $p < 0.05$ ;  $I$ :  $r = 0.82$ ,  $p < 0.05$ ;  $Sn$ :  $r = 0.84$ ,  $p < 0.05$ ) rispetto al plot B (S15:  $r = 0.58$ ,  $p < 0.05$ ;  $S5$ :  $r = 0.53$ ,  $p < 0.05$ ;  $I$ :  $r = 0.53$ ,  $p < 0.05$ ;  $Sn$ :  $r = 0.73$ ,  $p < 0.05$ ).

A metà dicembre, in seguito ad una serie di nevicate, l'altezza della neve al suolo è aumentata da 50 cm a 140 cm e la temperatura del suolo, alle diverse profondità, si è stabilizzata sugli 0°C in entrambi i plots fino al 19 marzo, quando la temperatura del suolo è tornata ad essere significativamente correlata con la temperatura dell'aria, rivelando l'assenza di neve al suolo in seguito al distacco della valanga (Fig. 6a). Il contenuto d'acqua volumetrico nel suolo (VWC) a 5 cm di profondità (S5) è risultato generalmente superiore rispetto a quello a 15 cm di profondità (S15),

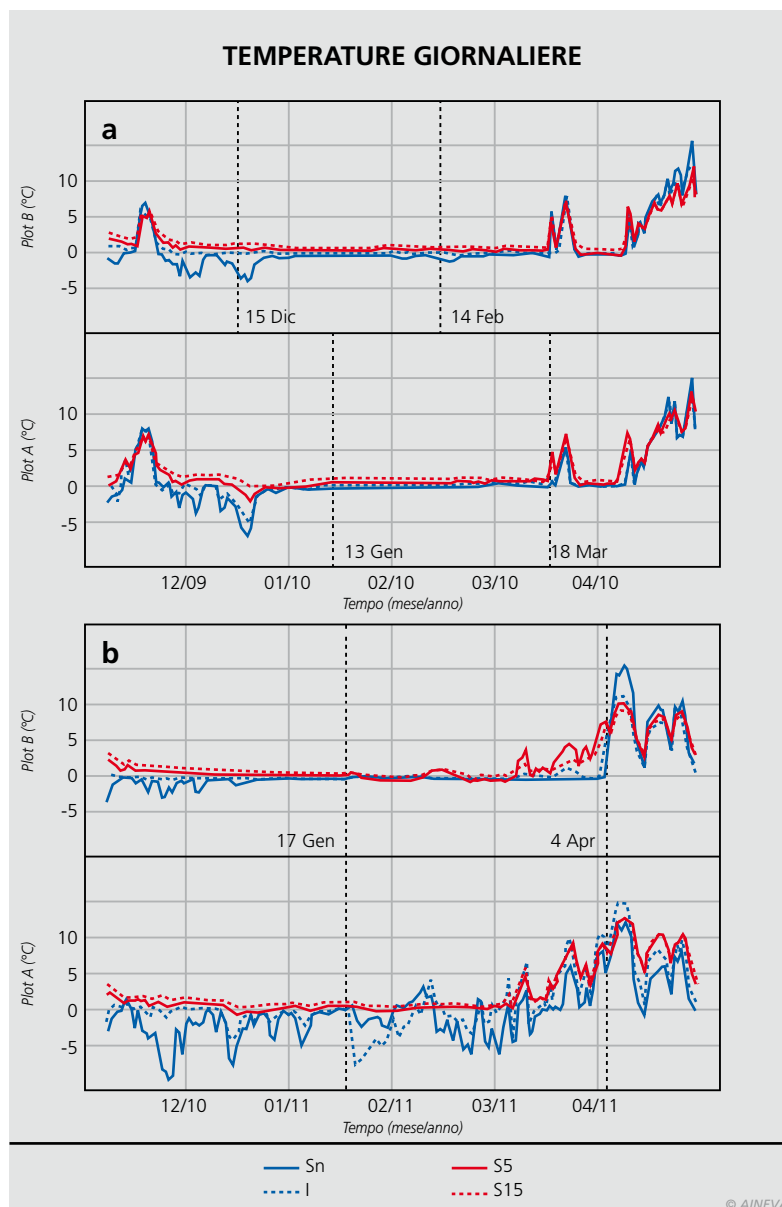


Fig. 6 - Temperatura giornaliera di suolo e neve (inverno 2010 (a) e 2011 (b)), sn = neve, I = interfaccia neve/soilo, S5 = suolo a 5 cm di profondità, S15 = suolo a 15 cm di profondità). Le linee tratteggiate nel 2010 (a), sulla base delle variazioni di velocità dello scivolamento della neve, identificano distinti periodi di movimento considerati per testare le correlazioni: 16 dicembre (momento in cui la neve inizia gradualmente e costantemente a muoversi) e 14 febbraio (fine dei cavi degli slittini) nel plot B; 13 gennaio (momento in cui la neve inizia gradualmente e costantemente a muoversi) e 18 marzo (distacco della valanga) nel plot A. Nel 2011 (b) le linee tratteggiate identificano forti episodi di scivolamento in entrambi i plot (A e B): 17 gennaio e 4 aprile.

Fig. 7 - Dato giornaliero di contenuto d'acqua volumetrico del suolo negli inverni 2010 e 2011 (S5 = 5 cm di profondità, S15 = 15 cm di profondità). Le linee tratteggiate nel 2010, sulla base delle variazioni di velocità dello scivolamento della neve, identificano distinti periodi di movimento considerati per testare le correlazioni: 16 dicembre (momento in cui la neve inizia gradualmente e costantemente a muoversi) e 14 febbraio (fine dei cavi degli slitini) nel plot B; 13 gennaio (momento in cui la neve inizia gradualmente e costantemente a muoversi) e 18 marzo (distacco della valanga) nel plot A. Nel 2011 le linee tratteggiate identificano forti episodi di slittamento in entrambi i plot (A e B): 17 gennaio e 4 aprile.

Fig. 8 - Fessurazione a bocca di balena e valanga per scivolamento (Foto R. Cosson) osservate e registrate durante l'inverno 2010.

in entrambi i plots (Fig. 7). Nel plot A, a 5 cm di profondità (S15), viene raggiunto un picco pari a 30% il 27 febbraio ed un massimo di 32% il 22 marzo, mentre nel plot B il massimo è stato raggiunto in data 8 aprile (40%).

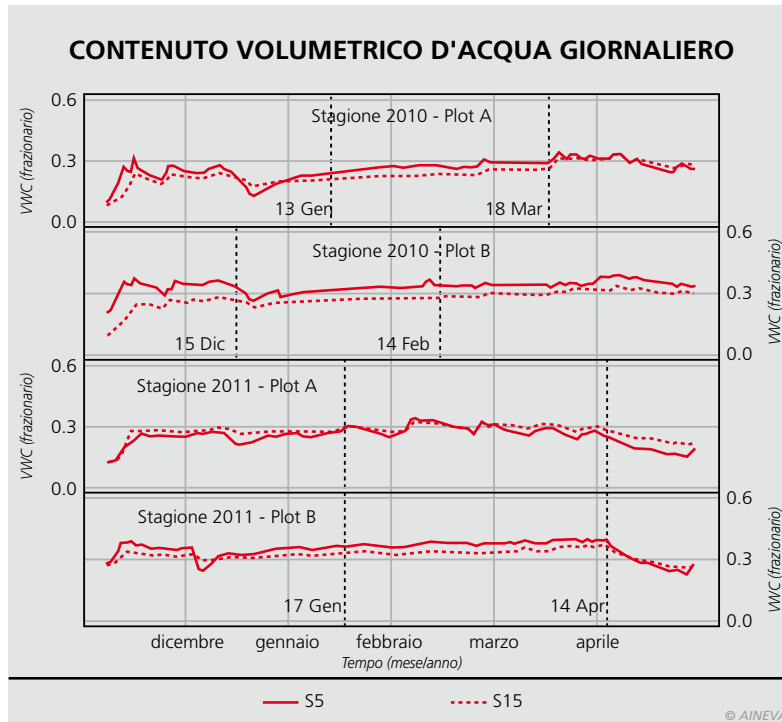
### Stagione invernale 2011

Nel tardo autunno/inizio inverno, periodo

caratterizzato da una maggiore altezza della neve al suolo rispetto al 2010 (> 100 cm ai primi di dicembre), le temperature al suolo (S5, S15) e all'interfaccia neve/soilo (I) sono risultate prossime agli 0°C in entrambi i plots. In seguito, nel plot A, le temperature nello strato basale del manto nevoso (Sn) e all'interfaccia neve/

soilo (I) hanno evidenziato una correlazione significativa con la temperatura dell'aria ( $r = 0,80$ ,  $p < 0,05$  e  $r = 0,62$ ,  $p < 0,05$ , rispettivamente). Ad inizio marzo tutte le temperature del suolo iniziano a salire, suggerendo un graduale ingresso di aria calda nel suolo, probabilmente grazie alla apertura della fessurazione e alla fusione della neve, fino al 5 aprile quando tutte le temperature sono aumentate bruscamente verso valori positivi, significativamente correlati con la temperatura dell'aria. Durante la primavera la completa fusione del manto nevoso è avvenuta senza il distacco di una valanga per scivolamento (Fig. 6b).

Durante la stagione invernale 2011, nel plot A, il meno isolato dalle temperature dell'aria rispetto al plot B, l'andamento del contenuto d'acqua volumetrico è stato caratterizzato da numerose oscillazioni ad entrambe le profondità di suolo. Nel plot B, più umido e meglio termicamente isolato, gli andamenti alle due profondità S5 e S15 sono risultati simili, con valori più elevati in S5 rispetto a S15. Nel plot A il picco massimo di contenuto d'acqua del suolo alle due profondità è stato raggiunto il 6 febbraio (34%). Nel plot B il tenore d'acqua aumenta gradualmente fino al 40%, raggiunto il 4 aprile, per poi diminuire rapidamente (Fig. 7).



### Scivolamento del manto nevoso

#### Stagione invernale 2010

L'apertura di una fessurazione a bocca di balena è stata osservata da metà gennaio, e a metà marzo si è staccata una valanga per scivolamento (Fig. 8). Nel plot B, da metà dicembre (altezza della neve al suolo > 100 cm) fino al 14 febbraio (estensione massima del cavo degli slitini) lo scivolamento totale cumulativo del manto nevoso è stato pari a 443.8 cm e 428.2 cm (B1 e B2) con uno spostamento giornaliero medio di 4.5 cm/gg e 4.3 cm/gg. La velocità massima è stata raggiunta l'11 febbraio, con valori pari a 19.5 cm/gg (B1) e 19.8 cm/gg (B2) (Fig. 9a). Nel plot A, in autunno vengono registrati pochi

movimenti (meno intensi che in B), mentre i movimenti più importanti sono stati registrati dopo la metà di febbraio. Nel plot A lo spostamento totale cumulativo del manto nevoso, misurato il 18 marzo (distacco della valanga) è risultato pari a 459.6 cm (A1) e 464.8 cm (A2). Lo stesso giorno un movimento pari a 47.4 cm è stato registrato in A1, tra le 15:35 e le 15:40, indicando probabilmente l'ora del distacco della valanga. Dall'inizio della stagione, il movimento giornaliero in A è risultato pari a 3.5 cm/gg (media A1-A2) e il valore massimo è stato registrato il 18 marzo in A1 (100.9 cm/gg), e il 2 marzo in A2 (47.1 cm/gg). Nel plot B, dal 15 dicembre fino al 14 febbraio, si è osservata una correlazione significativa tra lo spostamento giornaliero e il contenuto idrico del suolo a 5 e 15 cm di profondità (Fig. 10). In questo periodo lo slittamento della neve è risultato significativamente correlato con le temperature del suolo (ad entrambe le profondità), dell'interfaccia neve/soolo e della neve (Tabella 1). Anche nel plot A, tra il 13 gennaio (inizio dello slittamento della neve) e il 18 marzo (distacco della valanga), il movimento giornaliero del manto nevoso in A2 è risultato significativamente correlato con il contenuto idrico del suolo ad entrambe le profondità. Gli spostamenti della neve in A2 sono inoltre risultati significativamente correlati con la temperatura di neve (Sn) e suolo (S5), mentre in A1 con la temperatura dell'interfaccia neve/soolo (Tabella 2). Inoltre è stata evidenziata una correlazione significativa con l'andamento medio giornaliero della neve al suolo nel plot B durante il tardo autunno e l'inverno e in A2 durante tutta la stagione.

### Stagione invernale 2011

Dai primi di febbraio si è assistito alla formazione di una fessurazione a bocca di balena, senza però il successivo distacco di una valanga. Già il 23 marzo, il manto nevoso è inconsistente e la copertura discontinua, tanto che nel plot A i sensori sono già in superficie, mentre nel B sono sotto soli 20-40 cm di neve (Fig. 11).

Nel plot B lo slittamento totale cumulato del manto nevoso è di 771.6 cm (B1) e

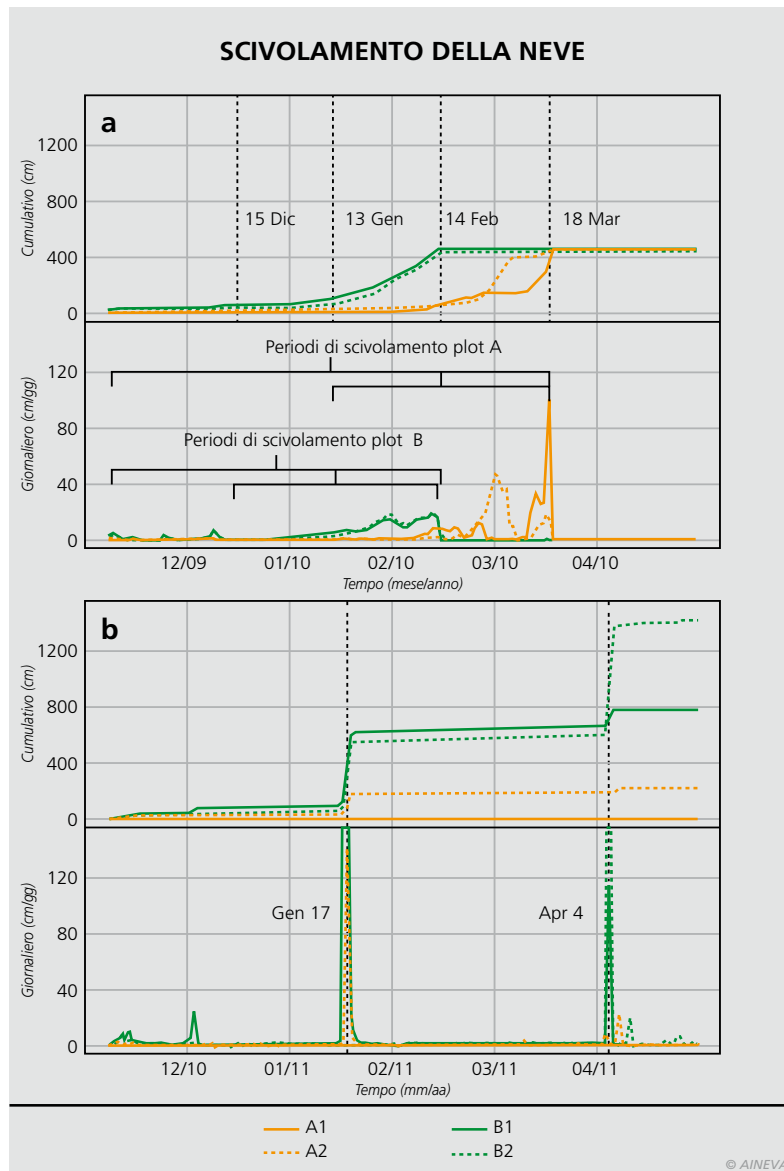


Fig. 9 - Tasso di scivolamento della neve, cumulativo e giornaliero, negli inverni 2010 (a) and 2011 (b). Le linee tratteggiate nel 2010 (a), sulla base delle variazioni di velocità dello scivolamento della neve, identificano distinti periodi di movimento (parentesi graffe) considerati per testare le correlazioni: 16 dicembre (momento in cui la neve inizia gradualmente e costantemente a muoversi) e 14 febbraio (fine dei cavi degli slittini) nel plot B; 13 gennaio (momento in cui la neve inizia gradualmente e costantemente a muoversi) e 18 marzo (distacco della valanga) nel plot A. Nel 2011 (b) le linee tratteggiate identificano forti episodi di slittamento in entrambi i plot (A e B): 17 gennaio e 4 aprile.

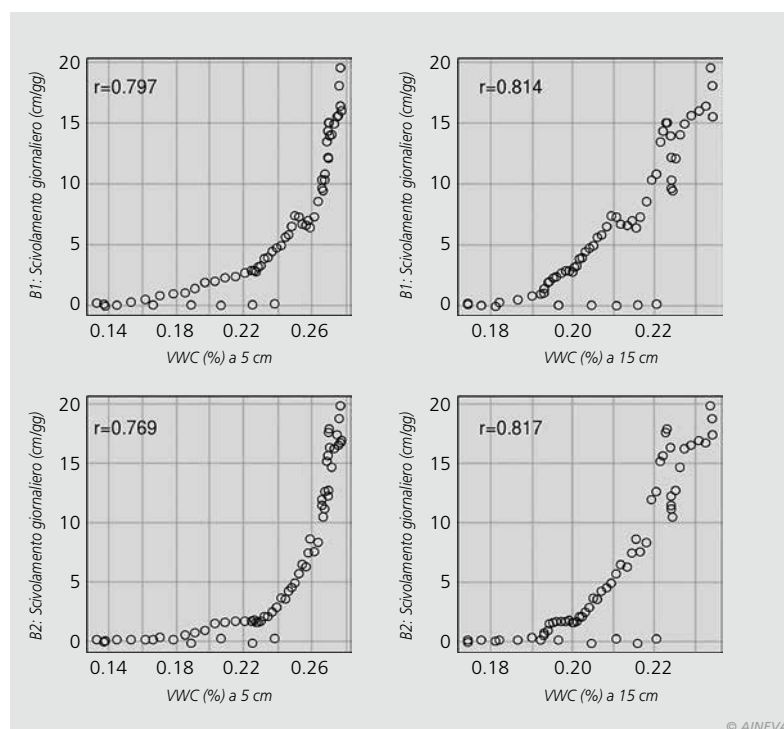


Fig. 10 - Correlazioni tra contenuto d'acqua volumetrico (VWC) giornaliero e scivolamento della neve a 5 e 15 cm di profondità del suolo (B plot) durante la stagione invernale 2009-2010, nel periodo compreso tra il 15 dicembre ed il 14 febbraio.



Tab. 1 - Correlazioni tra slittamento della neve (valori giornalieri) e parametri pedologici e nivologici nel 2010 nel plot B. VWC: contenuto volumetrico di acqua (%), altezza della neve al suolo (cm), Temp: temperatura (°C), Sn: interfaccia neve/ suolo, S5: suolo a 5 cm di profondità, S15: suolo a 15 cm profondità. a) Periodo 8 novembre - 14 febbraio; b) Periodo 15 dicembre - 14 febbraio. \* p < 0.05; n.s. non significativo.

	a		b	
	B1	B2	B1	B2
VWC S5	0.453*	0.465*	0.797*	0.769*
VWC S15	0.329*	0.331*	0.814*	0.817*
Altezza neve	0.620*	0.567*	n.s.	n.s.
Temp Sn	n.s.	n.s.	0.465*	0.415*
Temp I	n.s.	n.s.	0.417*	0.419*
Temp S5	n.s.	n.s.	0.626*	0.571*
Temp S15	n.s.	n.s.	0.650*	0.610*

© AINEVA

Tab. 2 - Correlazioni tra slittamento della neve (valori giornalieri) e parametri pedologici e nivologici nel 2010 nel plot A. VWC: contenuto volumetrico di acqua (%), altezza della neve al suolo (cm), Temp: temperatura (°C), Sn: interfaccia neve/ suolo, S5: suolo a 5 cm di profondità, S15: suolo a 15 cm profondità. a) Periodo 8 novembre - 18 marzo; b) Periodo 13 gennaio - 18 marzo. \* p < 0.05; n.s. non significativo.

	a		b	
	A1	A2	A1	A2
VWC S5	n.s.	n.s.	n.s.	0.565*
VWC S15	n.s.	0.391*	n.s.	0.551*
Altezza neve	n.s.	0.479*	n.s.	0.657*
Temp Sn	n.s.	n.s.	n.s.	0.784*
Temp I	n.s.	n.s.	0.528*	n.s.
Temp S5	n.s.	n.s.	n.s.	0.517*

© AINEVA

1406.8 cm (B2). Nel plot A si è registrato un movimento minore, con un totale cumulato di 212.3 cm in A2 e nessun movimento registrato in A1.

Lo spostamento medio giornaliero in B è pari a 4.4 cm/gg (B1) e 8.1 cm/gg (B2) e pari a 1.2 cm/gg in A2 (Fig. 9b). Una serie di nevicate tra il 6 e l'11 gennaio apporta circa 40 cm di neve fresca nell'area di studio, poi un deciso aumento nella temperatura dell'aria ha inizio il 12 gennaio e culmina il 16 gennaio.

Al termine di questo periodo eccezionalmente caldo, tra il 16 e il 17 gennaio, viene registrato un forte aumento dei tassi di scivolamento della neve.

Nel plot B1 viene registrato il movimento massimo di 40.9 cm tra le 15:30 e le 16:00 del 17 gennaio. Dopo un lungo intervallo di tempo senza movimenti significativi, in 30 ore il manto nevoso scivola verso il



Fig. 11 - Fessurazione a bocca di balena e fusione della neve nell'inverno 2011.

basso per 473.1 cm in B1 e 449.2 cm in B2. In A2 il movimento inizia più tardi, nel pomeriggio del 17 gennaio, con uno spostamento massimo registrato pari a 25.4 cm tra le 16,00 e le 16:30. Poi da metà marzo un deciso e costante aumento delle temperature, con valori positivi anche durante la notte fino a 2700-2800 m s.l.m., causa un intenso e definitivo processo di fusione del manto nevoso.

Il 4 aprile un altro intenso scivolamento del manto nevoso viene registrato in B (plot A già senza neve), con 777.0 cm di movimento, registrati in 1 minuto (B2) (alle 13:59), e 102.8 cm tra le 11.44 e le 11:46 in B1. Nella stagione invernale 2011 non sono state evidenziate correlazioni significative tra il movimento del manto nevoso e le diverse variabili (meteorologiche/nivologiche/pedologiche).

Tuttavia, il plot B, più umido, registra i movimenti maggiori ed i pochi, ma intensi slittamenti della neve si possono qualitativamente associare a significativi assestamenti del manto nevoso e rialzo delle temperature dell'aria.

### Modello di regressione multipla per lo slittamento della neve

Il modello di regressione multipla include diversi regressori per i plots A e B. L'efficienza del modello (ME) dopo validazione incrociata è risultata essere di 0,818 e 0,968 per i plot A e B, rispettivamente. Nel plot A sia l'R-quadro che l'efficienza del modello sono inferiori rispetto al plot B (Tabella 3). Entrambi i modelli danno tuttavia risultati molto buoni, indicando che lo scivolamento della neve può essere modellato sulla base di variabili pedologiche e nivometeorologiche relativamente semplici.

La figura 12 mostra l'andamento stagionale del movimento cumulativo della neve, misurato e modellato, all'interno dei due plots nel corso dei due anni di studio. Nel plot A, durante l'inverno 2010, vi è un buon rapporto tra misurato e modellato durante il forte episodio di scivolamento verificatosi all'inizio di febbraio 2010 e la corrispondenza è sia nel punto di parten-

za del movimento sia, in misura minore, nella magnitudo dell'evento.

Durante l'inverno 2011, il movimento modellato nel plot A mostra una sostanziale corrispondenza con i valori misurati, anche se la risposta del modello risulta in un certo modo disturbata.

A differenza del precedente inverno, il modello è manchevole nel determinare l'inizio del principale episodio di scivolamento (metà gennaio), con circa 15 giorni di anticipo, ma è piuttosto preciso nel determinarne la magnitudo.

Nel plot B, durante l'inverno 2010, vi è una sostanziale corrispondenza tra valori

modellati e misurati, e lo stesso vale per il più complesso andamento stagionale dell'inverno 2011, con due significativi eventi di scivolamento.

### Caratteristiche dei suoli

I suoli dell'area di studio appaiono spesso disturbati dai movimenti della neve (sia slittamento che valanghe per scivolamento), con la rimozione degli orizzonti superficiali (5-20 cm) e la conseguente esposizione di quelli sub-superficiali (Ceaglio et al., 2012). Focalizzandosi sulle proprietà fisiche del suolo, gli orizzonti superficiali (grado di aggregazione medio, 10% di

Tab. 3

**Tabella 3**

Tabella di regressione

#### Modello nel plot A

Residui:

Min	1Q	Mediana	3Q	Max
-126.544	-19.557	-1.952	24.329	187.825

Coefficienti:

	Stima	Err. std	t value	Pr(> t )
Intercetta)	-3.377e+02	5.751e+00	-58.72	<0.001 ***
Temperatura (neve)	-5.407e+01	1.132e+00	-47.77	<0.001 ***
Temperatura (interfaccia)	-5.166e+01	8.926e-01	-57.87	<0.001 ***
Temperatura (suolo 5 cm)	4.362e+01	3.384e+00	12.89	<0.001 ***
Temperatura (suolo 15 cm)	7.442e+01	3.696e+00	20.13	<0.001 ***
VWC (suolo 5 cm)	1.977e+03	2.882e+01	68.59	<0.001 ***
VWC (suolo 15 cm)	-1.978e+03	4.022e+01	-49.18	<0.001 ***
Temperatura (aria)	2.462e+01	4.950e-01	49.74	<0.001 ***
Altezza neve	2.608e+00	3.592e-02	72.61	<0.001 ***

---

Codici di significatività: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Errore standard residuo: 38.88 con 14849 gradi di libertà

(3380 osservazioni cancellate per dato mancante)

Multiple R-squared: 0.8177, Adjusted R-squared: 0.8176

F-statistico: 8325 con 8 e 14849 DF, p-value: < 2.2e-16

#### Modello nel plot B

Residuals:

Min	1Q	Mediana	3Q	Max
-236.386	-30.270	4.886	29.593	212.615

Coefficienti:

	Stima	Err. std	t value	Pr(> t )
Intercetta)	-1822.2701	40.3227	-45.192	<0.001 ***
Temperatura (neve)	-158.6720	4.3230	-36.704	<0.001 ***
Temperatura (interfaccia)	298.2564	5.5823	53.429	<0.001 ***
Temperatura (suolo 5 cm)	-69.6378	7.2179	-9.648	<0.001 ***
Temperatura (suolo 15 cm)	127.3144	11.1671	11.401	<0.001 ***
VWC (suolo 5 cm)	-2283.7368	10.1977	-223.946	<0.001 ***
VWC (suolo 15 cm)	5274.5107	63.4322	83.152	<0.001 ***
Temperatura (aria)	3.0257	0.5900	5.128	<0.001 ***
Altezza neve	3.4884	0.1046	33.345	<0.001 ***

---

Codici di significatività: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Errore standard residuo: 62.85 con 13311 gradi di libertà

(4918 osservazioni cancellate per dato mancante)

Multiple R-squared: 0.968, Adjusted R-squared: 0.968

F-statistico: 5.038e+04 con 8 e 13311 DF, p-value: < 2.2e-16

scheletro sub-angolare fine, abbondanti radici) differiscono significativamente da quelli sottostanti (grado di aggregazione debole/media, 35-70% di scheletro angolare grossolano e pochissime radici). Queste differenze si rispecchiano anche nei limiti di liquidità e plasticità: il topsoil presenta valori relativamente elevati (LL: 76-82%; LP: 65-67%), mentre l'orizzonte sottostante, che rappresenta la superficie del suolo in molte zone di erosione dell'area di studio, è caratterizzato da valori decisamente più bassi (LL: 48-67%; LP: 36-54%), con una conseguente maggiore possibilità di liquefazione del suolo.

## DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

L'inverno 2010, caratterizzato da movimenti del manto nevoso molto intensi e prolungati, seguiti dal distacco di una valanga per scivolamento, è risultato differente rispetto al meno nevoso e più caldo inverno 2011, in cui i movimenti del manto nevoso sono risultati episodici e non sono culminati nel distacco di una valanga. Nel 2011 i due picchi di slittamento della neve più importanti si sono verificati a metà inverno e in primavera, entrambi successivamente ad un significativo aumento della temperatura dell'aria

e in corrispondenza di un evidente assestamento del manto nevoso.

I risultati hanno evidenziato la relazione esistente tra scivolamento della neve e proprietà del suolo - contenuto di acqua, temperatura - identificati come i principali fattori ambientali a controllare i movimenti della neve, in condizioni di suolo più o meno umide.

In entrambi i plots, l'effetto di isolamento termico del manto nevoso (altezza al suolo > 100 cm) ha mantenuto la temperatura del suolo prossima agli 0°C per tutta la stagione, indipendentemente dalla temperatura dell'aria, consentendo la presenza di acqua liquida all'interfaccia neve/suolo e negli orizzonti superficiali del suolo.

Al contrario, nel 2011, il plot più asciutto è risultato essere meno isolato rispetto all'inverno 2010, di conseguenza le temperature alle diverse profondità di suolo sono state maggiormente influenzate dalla temperatura dell'aria, con diversi episodi di congelamento del suolo, che potrebbero aver rallentato i processi di scivolamento del manto nevoso.

Inoltre la liquefazione del suolo è stata identificata come un potenziale fattore in grado di contribuire ai processi di scivolamento della neve, oltre che di erosione del

suolo, tramite la formazione di uno strato di fango e acqua, all'interfaccia neve/suolo, in grado di ridurre la rugosità.

I suoli, infatti, hanno mostrato valori dei limiti di Atterberg (liquido e plastico) relativamente bassi, in particolare a 20 cm di profondità, in corrispondenza dell'orizzonte sub-superficiale che potrebbe rappresentare la superficie del substrato laddove il suolo è già stato eroso con conseguente rimozione dell'orizzonte superficiale. A riprova di questo, nel corso di un'indagine nivologica, effettuata nella primavera del 2010, è stata osservata una consistente "pellicola di fango" nello strato basale del manto nevoso (Fig. 13). Infine tra i fattori nivometeorologici, l'altezza della neve al suolo ha evidenziato una significativa correlazione con il movimento dell'intero manto nevoso.

Durante la stagione invernale 2010, la valanga si è probabilmente verificata il 18 marzo alle ore 15:40, l'improvviso successivo aumento della temperatura all'interfaccia neve/suolo ha indicato che il suolo è stato esposto all'aria.

Il significativo aumento della velocità di slittamento della neve prima del distacco della valanga ha confermato la sua importanza come variabile predittiva relativamente al distacco delle valanghe per scivolamento. In entrambi gli anni i valori massimi di movimento della neve sono stati registrati tra le 15:00 e le 17:00, ad eccezione di quello di aprile 2011, registrato tra le 11:00 e le 12:00, in accordo con quanto riportato in Feick et al. (2012), in cui è risultata una chiara tendenza ad un maggiore scivolamento del manto nevoso intorno a mezzogiorno o nel pomeriggio, durante le ore più calde della giornata o subito dopo il tramonto. Tuttavia ci sono molti esempi a dimostrare che la temperatura dell'aria non risulta un buon predittore delle valanghe di neve umida, ma la sua efficacia potrebbe migliorare se combinata con altre variabili. Nel modello per lo scivolamento della neve ottenuto in questo studio, diversi parametri meteorologici (temperatura dell'aria), nivologici (altezza della neve) e pedologici (temperatura e contenuto idri-

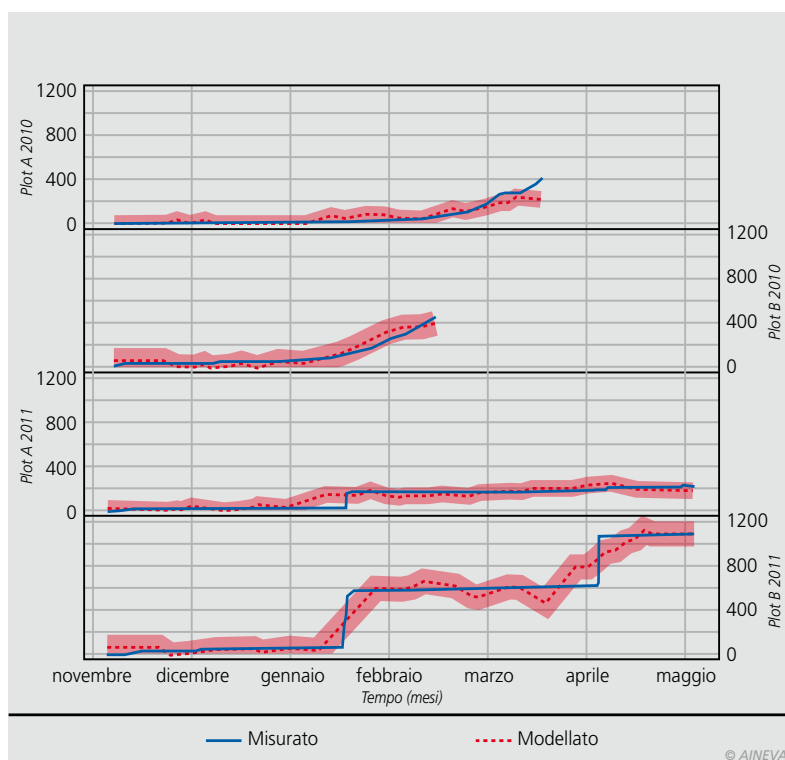


Fig. 12 - Andamento stagionale dello scivolamento della neve cumulativo misurato (linea continua) e modellato (linea tratteggiata) durante le stagioni invernali 2010 e 2011 nei plot A e B. L'area grigia indica l'intervallo di previsione.



co del suolo) sono risultati fondamentali nel descrivere il movimento cumulativo in ciascun plot, con una buona determinazione dei principali episodi di scivolamento del manto nevoso.

Il fatto che l'affidabilità del modello sia diminuita notevolmente andando a considerare simultaneamente i dati dei due plot suggerisce che la variabilità spaziale dei parametri neve e suolo gioca un ruolo chiave nel determinare l'andamento dello slittamento della neve.

Pertanto il processo di scivolamento può essere modellato con un insieme di fattori predisponenti neve e suolo, ma i risultati appaiono sito-specifici e sono necessarie ulteriori indagini per determinare meglio il contributo dei vari fattori.

## RINGRAZIAMENTI

Questo progetto è stato realizzato nell'ambito del Programma operativo 'Italia - Francia (Alpi - ALCOTRA)', Progetto "DynAval - Dynamique des avalanches: départ et interactions écoulement/obstacles".

Vorremmo ringraziare: l'Ufficio neve e valanghe della Regione Autonoma Valle d'Aosta (Assetto idrogeologico dei bacini montani e Fondazione Montagna sicura), Paola Dellavedova e Claudio Lucianaz (FMS) per i loro suggerimenti, Margherita Maggioni, Davide Viglietti e Enrico Bruno (LNSA-NatRisk) per l'assistenza nei lavori di campo e nelle idee, Davide Canone

(DIST) per l'aiuto tecnico con la strumentazione, Fabio Brunier (Ufficio Centro Funzionale, Regione Autonoma Valle d'Aosta) per i dati meteorologici.

Un ringraziamento speciale va a tutti gli amici (molti) che hanno contribuito a realizzare e mantenere il sito di monito-

raggio, primo fra tutti Fabrizio Busa per la grandissima disponibilità, l'inventiva e l'entusiasmo con cui si è adoperato nello strumentare il sito sperimentale; un grazie infine al mitico Renzino Cosson per le foto, il supporto e l'ospitalità nel suo meraviglioso "Rifugio Bertone".

*Fig. 13 - Nell'area di studio, in data 2 aprile 2010, il suolo alla base del manto nevoso appare liquefatto e fortemente interconnesso con la neve.*

## Bibliografia

- Baggi, S. and Schweizer, J., 2009. Characteristics of wet-snow avalanche activity: 20 years of observations from a high alpine valley (Dischma, Switzerland). *Natural Hazards* 50 (1), 97-108.
- Ceaglio, E., Meusburger, K., Freppaz, M., Zanini, E. and Alewell, C., 2012. Estimation of soil redistribution rates due to snow cover related processes in a mountainous area (Valle d'Aosta, NW Italy). *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 517-528.
- Clarke, J.A. and McClung, D.M., 1999. Full-depth avalanche occurrences caused by snow gliding, Coquihalla, B.C., Canada. *Journal of Glaciology*, 45 (151), 539-546.
- Feick, S., Mitterer, C., Dreier, L., Harvey, S. and Schweizer, J., 2012. Automated detection and mapping of glide-snow events using satellite based optical remote sensing and terrestrial photography. *International Snow Science Workshop ISSW 2012*, Anchorage AK, U.S.A., 16-21 September 2012, 603-609.
- Guymon, G., 1978. A review of snow-soil interactions. In: S. Colbeck and M. Ray (eds.), 1978 proceeding, modeling of snow cover runoff, U.S. Army Cold Reg. Res. and Eng. Lab., Hanover, NH.
- in der Gand, H.R. and Zupancic, M., 1966. Snow gliding and avalanches. *Symposium at Davos 1965 - Scientific Aspects of Snow and Ice Avalanches*, IAHS Publication, 69, Int. Assoc. Hydrol. Sci., Wallingford, U.K., 230-242.
- Jones, A., 2004. Review of glide processes and glide avalanche release. *Avalanche News*, 69, 53-60.
- McClung, D.M. and Scherer, P.A., 2006. *The Avalanche Handbook*, Third Edition. The Mountaineers Books, Seattle, 342 pp.
- Mitterer, C. and Schweizer, J., 2012a. Analysis of the snow-atmosphere energy balance during wet-snow instabilities and implications for avalanche prediction. *The Cryosphere Discussion*, 6: 2715-2749, doi:10.5194/tcd-6-2715-2012.
- Mitterer, C. and Schweizer, J., 2012b. Towards a better understanding of glide-snow avalanches. *International Snow Science Workshop ISSW 2012*, Anchorage AK, U.S.A., 16-21 September 2012, pp. 610-616.
- Peitzsch, E.H., Hendrikx, J., Fagre, D.B. and Reardon, B., 2012. Examining spring wet slab and glide avalanche occurrence along the Going-to-the-Sun Road corridor, Glacier National Park, Montana, USA. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 78, 73-81.
- Segor, V. (editor), 2010. *Rendiconto Nivo-meteorologico - Inverno 2009-2010*, Regione Autonoma Valle d'Aosta - Ufficio neve e valanghe, Quart, 176 pp.
- Segor, V. (editor), 2011. *Rendiconto Nivo-meteorologico - Inverno 2010-2011*, Regione Autonoma Valle d'Aosta - Ufficio neve e valanghe, Quart, 184 pp.