# INFLUENZA DELL' ESPOSIZIONE SULLE CARATTERISTICHE FISICO-CHIMICHE del MANTO

Antoine Brulport, Gianluca Filippa, Margherita Maggioni e Michele Freppaz Laboratorio Neve e Suoli Alpini, Università degli Studi di Torino

> Massimo Pecci, Pinuccio D'Aquila EIM - Ente Italiano della Montagna

In ambiente alpino, il manto nevoso è caratterizzato da una grande variabilità spazio-temporale delle proprie caratteristiche fisico-chimiche, legata ad un insieme di parametri ambientali che condizionano la distribuzione e le caratteristiche della neve, come, per esempio, il vento e l'esposizione.

Il presente lavoro ha lo scopo di studiare la variabilità spaziale del manto nevoso "a piccola scala" per valutare l'influenza che le caratteristiche topografiche esercitano sulla sua evoluzione, aspetto spesso trascurato nella valutazione del rischio valanghivo, che può, però, presentarsi estremamente variabile anche a piccola scala.

Una serie di profili stratigrafici e di profili chimici speditivi sono stati effettuati durante la seconda parte dell'inverno 2006/2007 (da febbraio a maggio) in un vallone alpino del Monte Rosa in Valle d'Aosta. Sono stati scelti tre siti a guota 2600 m slm posti a circa 50 m di distanza l'uno dall'altro con due differenti pendenze (25° e sul piano) e su tre differenti esposizioni (Nord, Sud e 360°, vale a dire in piano). Lo studio ha permesso di seguire l'evoluzione fisica (in termini di struttura e stabilità) e chimica (concentrazione in ioni, processo di rilascio degli stessi al suolo) del manto nevoso e di valutare, quindi, gli effetti dell'esposizione e della pendenza sulle caratteristiche fisico-chimiche del manto nevoso durante l'inverno. Nel corso dell'inverno, dal punto di vista fisico, il manto nevoso ha mostrato numerose differenze tra i tre siti, con ripercussioni significative sulla sua stabilità e sul regime di rilascio delle specie chimiche. Il manto nevoso del sito in piano presentava caratteristiche simili a quelle rinvenute a Nord nella parte inferiore del profilo, mentre presentava caratteristiche confrontabili col sito a Sud in superficie. Dal punto di vista chimico, il rilascio dei nutrienti è iniziato a fine febbraio a Sud e sul piano, con differenti fenomeni di "ionic pulse" nel corso del disgelo, mentre a Nord si è verificato un unico ionic pulse a fine aprile.

Questo studio dimostra che le caratteristiche fisiche del manto nevoso possono variare in modo estremo in funzione delle condizioni microtopografiche, determinando quindi differenti condizioni di stabilità del manto nevoso alla piccola scala. Le stesse condizioni topografiche determinano un processo di fusione differente nei tre siti, con conseguenze diverse sul "pool" di elementi nutritivi che giungono al suolo dalla fusione della neve.



## INTRODUZIONE

Nell'ambito di una tesi di laurea dell'Università di Lione e della École Supérieure Europenne d'Ingénierie de l'Espace Rural, una campagna di profili stratigrafici e chimici del manto nevoso è stata condotta sul massiccio del Monte Rosa al fine di valutare l'influenza dell'esposizione sulle caratteristiche della neve.

Congiuntamente ad un insieme di parametri quali il vento (accumuli, erosione), la topografia (substrato, vegetazione) o le temperature, l'intensità dell'irraggiamento solare determina in parte le caratteristiche della neve.

Tali fattori sono molto variabili in ambiente alpino e determinano quindi una grande variabilità spaziale del manto nevoso, che deve essere tenuta in considerazione, per esempio, nella valutazione del pericolo valanghe o nella stima del contenuto in acqua del manto nevoso (Snow Water Equivalent).

Da sempre, l'esposizione viene presa in considerazione nella preparazione delle gite scialpinistiche da parte dei professionisti della montagna come le Guide Alpine o dal semplice scialpinista.

Ultimamente, i Bollettini Valanghe danno indicazioni sulle esposizioni critiche, però, allo stesso tempo, l'esposizione non è ancora integrata correttamente nelle tecniche di previsione, in quanto molti profili stratigrafici utilizzati per la redazione dei Bollettini vengono realizzati presso i campi neve che si trovano sul piano. Bisogna quindi capire come traslare le informazioni ottenute sul piano ai pendii diversamente esposti.

In letteratura non sono molti gli studi che evidenziano scientificamente l'influenza dell'esposizione sulla struttura e sull'evoluzione del manto nevoso.

L'influenza dell'esposizione è sempre stata studiata nell'ambito di ricerche sulla variabilità spaziale della neve.

Per esempio, Pielmeier (2003) ha studiato la struttura del manto nevoso a scala regionale e Birkeland et al. (1995) e Kronholm et al. (2004) a piccola scala, a livello di pendio. Tutti hanno evidenziato come le caratteristiche fisiche non siano uniformi alla scala considerata nelle loro ricerche ed hanno cercato di elaborare metodologie per la localizzazione dei pendii più propensi al distacco di valanghe.

Altre ricerche hanno analizzato la variabilità spaziale al fine di capire i processi di fusione del manto nevoso per la valutazione delle risorse idriche, per esempio nelle regione artiche e sulle Alpi (Anderton et al., 2003; Barber et al., 2002; Bocchiola e Rosso, 2007).

La variabilità spaziale del manto nevoso ha una grande influenza sulla sua stabilità, che quindi può essere molto differente a seconda della scala a cui viene valutata. La stabilità del manto nevoso dipende fortemente dalle caratteristiche fisiche e cristallografiche della neve come per esempio durezza, umidità, tipo e dimensione dei cristalli, parametri legati a fattori esterni come temperatura dell'aria, irraggiamento ed attività eolica, che sono a loro volta molto variabili in relazione all'esposizione.

La chimica della neve, disciplina relativamente nuova, permette di monitorare la qualità dell'aria studiando la composizione della neve che è in grado di stoccare le specie chimiche contenute in atmosfera. Ma questa disciplina si interessa, anche, alla neve, considerandola come vettore di nutrienti e inquinanti verso gli ecosistemi alpini (suoli, aquiferi...).

Il pH della neve permette di controllare i depositi acidi, mentre la Conducibilità Elettrica dà indicazioni sulle specie chimiche disciolte nel manto nevoso.

Per quanto riguarda le proprietà chimiche della neve, in passato gli studi si sono limitati ad analizzare la ripartizione delle concentrazione dei nutrienti e degli inquinanti nel tempo e nello spazio sulle Alpi, con il progetto SNOSP dal 1991 al 1993 (Puxbaum e Wagenbach, 1994).

Più di recente, la chimica della neve è stata studiata nei Alpi orientali (Nickus et al., 1998), nelle Alpi meridionali (Kuhn et al., 1998) e nelle Alpi occidentali (Filippa et al., submitted). Però le informazioni scientifiche relative all'influenza dell'esposizione sulla struttura e sulla composizione chimica della neve a "piccola scala" sono relativamente scarse.

L'obiettivo di questo studio è la valutazione qualitativa e quantitativa dell'influenza dell'esposizione sulle proprietà fisiche e chimiche della neve, analizzando anche la variabilità spaziale della stabilità del manto nevoso.

## MATERIALI E METODI

Lo studio è stato realizzato in Valle d'Aosta, nell'alta Valle del Lys (AO), a 2600 m slm presso il rifugio Squinobal Orestes Hütte, nel cuore del massiccio del Monte Rosa.

Sono stati scelti tre siti posti a circa 50 m di distanza l'uno dall'altro con due differenti inclinazioni del pendio (25° e

#### Fig. 1 Visione generale dell'aria di studio.



sul piano) e su tre differenti esposizioni (Nord, Sud e 360°) (Fig. 1).

L'evoluzione del manto nevoso è stata monitorata tramite profili stratigrafici periodici, due volte a settimana quando le condizione meteorologiche lo permettevano. In totale, nell'arco dell'intera stagione invernale, sono stati realizzati 39 profili stratigrafici.

I rilievi del manto nevoso sono stati eseguiti secondo la procedura standard dell'AINEVA (Cagnati, 2004) misurando i seguenti parametri: spessore di ogni strato, forma e dimensione dei cristalli, durezza della neve, densità e temperatura della neve.

l valori di temperatura della neve sono stati misurati ogni 10 cm utilizzando un termometro digitale a contatto (range -50/+ 50°C). Anche la temperatura dell'aria in prossimità della neve è stata registrata al fine di compararla tra i differenti siti. La temperatura dell'aria esercita infatti un'influenza sul gradiente termico e, quindi, sull'evoluzione della struttura del manto nevoso.

Per la valutazione delle dimensioni e della forma dei cristalli è stata utilizzata una lente di ingrandimento 8x munita di reticolo con dimensione di 1/10 di mm. La densità è stata misurata per ogni strato con un cilindro carotatore da 0.5 l e un dinamometro a molla da 500 q.

Gli indici di durezza degli strati sono stati determinati con il test della mano (hand test).

Tutti i dati sono stati riportati facendo riferimento alla classificazione internazionale "The International Classification for Seasonal Snow on the Ground" della International Commision on Snow and Ice (Colbeck et al., 1990) e archiviati con il software YETI per generare dei grafici completi facilmente leggibili, riproducibili e comparabili.

A partire da questi dati é stato calcolato il contenuto in acqua del manto nevoso (Snow Water Equivalent).

La stabilità del manto nevoso è stata valutata per ogni profilo stratigrafico, utilizzando il test di compressione sviluppato



dai Servizi Valanghe canadesi negli anni Settanta e approfondito da Jamieson e Jonhston (1997), che sono riusciti a correlare i risultati di questo test con quelli di altri test già in uso (del blocco di slittamento e della pala).

Il test di compressione (conosciuto anche come test della colonna) consiste nell'isolare nel manto nevoso una colonna di neve con dimensioni di 30 x 30 cm x H<sub>neve</sub> (Fig. 2).

Si appoggia, poi, la pala di piatto sulla colonna e si applicano successivamente diverse serie di 10 colpi sulla pala. Ogni serie si differenzia dalla precedente in quanto la forza applicata viene di serie in serie aumentata (Cagnati, 2004). La compressione esercitata sulla colonna di neve genera anche una forza di taglio parrallela al pendio ed eventualmente una frattura in corrispondenza di un potenziale strato debole. In caso di rottura, si annotano il numero di colpi eseguiti fino alla rottura, lo spessore del distacco ed il tipo o l'origine dello stesso (presenza di cristalli a calice, neve umida, presenza di crosta, neve ventata,...).

Per quanto riguarda la chimica della neve, ogni settimana è stato realizzato un profilo chimico del manto nevoso. In totale, nell'arco dell'intera stagione invernale, Fig. 2 Isolamento nel manto nevoso di una colonna per la realizzazione del test di compressione. Fig. 3 Evoluzione della temperatura della neve nel sito a Nord (a), sul piano (b) e a Sud (c).





sono stati realizzati 24 profili chimici. Il prelievo è stato effettuato indossando guanti di laboratorio monouso e strerili. La neve è stata raccolta carotando orizzontalmente ogni 10 cm con il contenitore stesso, da 500 ml e in PVC. I contenitori erano stati precedentemente lavati e preparati con acqua distillata (4 lavaggi) e ultrapura (1 lavaggio) in laboratorio. Per le misure di pH e Conducibilità Elet-

trica, i campioni prelevati sono stati analizzati il giorno successivo al prelievo per permettere alla neve di fondere totalmente e di raggiungere una temperatura di circa 20° C (temperatura standard di taratura degli strumenti).

Per la determinazione del pH della neve e stato utilizzato un pHmetro pH 340i, mentre per la Conducibilità Elettrica un Tetracon 325.

Gli strumenti sono inclusi in un kit leggero trasportabile che permette quindi il loro utilizzo direttamente in campo, kit messo a punto dall'Ente Italiano della Montagna per la realizzazione di profili chimichi speditivi (Pecci et al., 2006).

In alcuni casi, per ragioni logistiche, i campioni sono stati conservati in laboratorio in un freezer a – 15 °C ed analizzati successivamente.

I dati forniti dai rilievi in campo sono stati elaborati da differenti software al fine di ottenere i grafici mostrati nelle figure. Per determinare se le differenze tra i siti fossero significative o meno, ci si è avvalsi del software di analisi statistica SPSS. Una prima e grezza analisi dei dati ci ha condotto ad esaminare il profilo separato in una parte composta dagli strati superficiali ed in una composta dagli strati basali. Al fine di inguadrare le condizioni generali, viene presentato l'andamento meteorologico dell'inverno realizzato sulla base dei dati delle stazioni nivometeorologiche automatiche della rete della Regione Valle d'Aosta, già parzialmente elaborati nel Rendiconto Nivometeorologico 2007-2008, redatto dall'Ufficio Neve e Valanghe della Regione in collaborazione con il Laboratorio Neve e Suoli Alpini dell'Università di Torino. In quanto situate a meno di un chilometro in linea d'aria dal sito di studio, sono stati utili, per una visione generale delle condizioni meteorologiche della stagione nell'area di studio, i dati della stazione nivometeorologica automatica della Regione Valle d'Aosta posta nei pressi del Lago Gabiet (2400 m slm) e della stazione del Comando Truppe Alpine - Servizio Meteomont - localizzata nei pressi dell'Istituto Scientifico A. Mosso (2901 m slm). Inoltre, un data-logger per la misura della temperatura e dell'umidità dell'aria è stato installato ad hoc nei pressi del sito di studio, presso il Rifugio Squinobal Orestes Hütte.

## QUADRO METEOROLOGICO DELL'INVERNO 2007-2008

Dopo le prime nevicate dei mesi di novembre (50 cm) e dicembre (80 cm), l'anno 2008 inizia con significative precipitazioni sull'intera Valle d'Aosta (70 cm accumulati tra il 3 e il 6 gennaio, 100 cm nei giorni 11 e 12 gennaio).



Al contrario, la seconda parte del mese, influenzata dalla presenza di un anticiclone sull'Atlantico, è caratterizzata dall'assenza di precipitazioni e da temperature anormalmente elevate con medie giornaliere dell'aria superiori a +1 °C a 2400 m slm tra il 19 e il 21 gennaio 2008.

Anche il mese di febbrario risulta poco nevoso e, a partire dal 21, condizioni meteorologiche primaverili si instaurano sotto l'influenza di un'alta pressione posizionata sull'Europa centrale.

Tale configurazione si traduce in temperature positive durante il giorno e in un gelo notturno poco pronunciato fino a 2400 m slm.

È così che il 26 febbraio, durante un profilo nivologico nei siti di studio, viene rilevata una temperatura dell'aria di + 8 °C e a La Thuile, il 23 febbraio, viene osservata una vipera, fatto insolito ed esemplificativo delle condizioni meteorologiche di questo insolito periodo invernale.

Dal 3 marzo, la rotazione delle correnti da Ovest favorisce il ritorno di condizioni più tipicamente invernali.

Questo mese vede il passaggio di alcune perturbazioni accompagnate da deboli precipitazioni sul massicio del Monte Rosa. Il manto nevoso è fortemente rimaneggiato da un'intensa attività eolica e le temperature dell'aria risultano pari o inferiori alla media stagionale.

La fine del mese vede il ritorno di un anticiclone sull'Atlantico accompagnato da giornate soleggiate e da un rialzo delle temperature medie giornaliere.

Il primo aprile, l'anticiclone determina la discesa di un sistema depressionario

dalla Francia verso il Mediterraneo che porta aria umida e vento, ma senza precipitazioni sul sito di studio. Dal 4 aprile una depressione centrata sul Mare del Nord porta una netta diminuzione delle temperature, particolarmente sensibile in montagna. Tra il giorno 8 e il 10, una serie di perturbazioni attraversano il territorio valdostano portando nevicate frequenti, anche a bassa quota, ma non particolarmente intense.

A partire dal 10 aprile, una vasta depressione determina un flusso di correnti atlantiche umide che portano nuove nevicate (30 cm). Dopo una breve pausa, una depressione centrata sui Balcani porta un fronte umido verso le Alpi, tipica situazione che genera precipitazioni consistenti. Si registrano 30 cm di neve fresca tra il 17 e il 19 aprile, prima che una nuova perturbazione deponga 50 cm di neve fresca i giorni 20 e 21 aprile.

La fine di aprile e l'inizio di maggio vedono il ritorno di giornate soleggiate e l'aumento generale delle temperature su tutta la regione. Il tempo rimane stabile fino al giorno 8 maggio, grazie alla presenza di un potente anticiclone posizionato sulla Danimarca.

Dal 10 maggio, l'instabilità atmosferica aumenta nettamente sulla Valle d'Aosta e su tutte le Alpi occidentali; il passaggio di numerose perturbazioni portano 20 giorni di pioggia, che purtroppo daranno luogo a fenomeni alluvionali in Piemonte e Valle d'Aosta tra il 29 e il 31 maggio.

La neve nel sito di studio è rimasta al suolo fino ad inizio giugno, ma per lo studio in oggetto i rilievi sono terminati il 9 maggio.

## RISULTATI E DISCUSSIONE

## Struttura del manto nevoso Temperatura

Dall'analisi dei dati raccolti, si è notato come l'esposizione intervenga in modo diretto sulla temperatura della neve, modificando quella degli strati superficiali e, quindi, influenzando indirettamente il valore del gradiente termico (Figura 3). Per quanto riguarda gli strati superficiali (si considerano i primi 30 cm) si è generalmente osservato un riscaldamento nel sito esposto a Sud e sul piano e un raffreddamento nel sito esposto a Nord. Durante i periodi freddi l'influenza della temperatura dell'aria può risentirsi fino a un metro di profondità nel manto nevoso, che comunque mantiene il suo potere isolante sul substrato.

Questa intrusione di freddo, più marcata a Sud e sul piano, dovuta probabilmente alla presenza di cristalli di tipo 3 con maggiore densità e conducibilità termica, genera l'instaurarsi di gradienti termici locali forti ed eventualmente la formazione di sottili strati di cristalli sfaccettati (che possono indebolire e destabilizzare il manto nevoso).

In media, le temperature basali dell'intera stagione sono risultate differenti nei tre siti:-0,4 °C a Sud, -0,8 °C sul piano e -1,5 °C a Nord. Questo fatto si può spiegare chiamando in causa una maggiore e migliore efficienza del flusso geotermico, che risulta più intenso a Sud e sul piano. Infatti, d'estate, questi suoli immagazzinano più calore e quindi ne rilasciano, a parità di flusso geotermico in maggiore quantità d'inverno, riscaldando la base del manto nevoso. I differenti valori di temperatura basale definiranno gradienti termici e quindi metamorfismi differenti nei tre siti. L'isotermia è stata osservata a Sud dal primo profilo (26 febbraio 2008), a causa delle anomali condizioni meteorologiche riscontrate nel mese di febbraio e tipiche, invece, della stagione primaverile, mentre le condizioni tipicamente invernali di marzo hanno instaurato, temporaneamente, condizioni favorevoli alla crescita cinetica da gradiente di temperatura. L'isotermia precoce può avere conseguenze sui processi di fusione e sul ciclo di rilascio dei nutrienti. In corrispondenza del sito in piano, l'isotermia è stata raggiunta a fine aprile 2008, 15 giorni prima rispetto al sito a Nord, dove si è instaurata ad inizio maggio.

> Fig.4 Colonna di ghiaccio: si noti la dimensione notevole.





Fig.5 Composizione cristallografica media del manto nevoso nei tre siti.

#### Caratteristiche cristallografiche

Nel sito a Nord, in tutti i profili nivologici realizzati è stato rilevato uno strato basale di 20-30 cm caratterizzato da cristalli a calice (tipo 5). Anche sul piano, in tutti i profili, era presente uno strato basale di 30-50 cm formatosi in seguito a metamorfismo da gradiente medio ed elevato: cristalli a calice e sfaccettati (tipo 5 e 4). Il maggior spessore dello strato basale sul piano, rispetto al sito a Nord, può essere legato al fatto che la temperatura della neve fosse più vicina agli 0 °C, migliorando così l'efficienza dei processi di metamorfismo da gradiente di temperatura (costruttivo). Nel sito a Sud, la base del manto nevoso era inizialmente costituita da grani arrotondati (tipo 3), che si sono trasformati rapidamente in grani da fusione e rigelo (policristalli di tipo 6). Tale trasformazione potrebbe essere consequenza delle elevate temperature del 14 marzo 2008, che hanno umidificato il manto nevoso; l'acqua di fusione ha percolato fino alla base del manto nevoso prima di rigelare, legando i cristalli tra di loro. Durante questo episodio sono state osservate colonne di ghiaccio di notevoli dimensioni (Figura 4). Sono state, anche, rilevate croste di ghiaccio vicine alla base del manto nevoso, contrariamente a quanto osservato nel sito a Nord e sul piano, dove la fusione non è mai stata abbastanza intensa da raggiungere la base del manto nevoso.

In superficie il manto nevoso nei tre siti si è mostrato molto variabile, con presenza di croste da vento, neve fresca, croste da fusione e rigelo, etc.: nessun sito è stato caratterizzato da un unico tipo di neve. In diverse occasioni, erano presenti però, al momento dei tre rilievi nivologici nella medesima data, un sottile strato di Firn Spiegel nel sito a Sud e di brina di superficie in quello a Nord. Inoltre, si è osservato che la neve fresca (tipo 1) e le particelle parzialmente frammentate (tipo 2) si sono conservate più a lungo a Nord e che numerose croste sono state ritrovate a Sud e sul piano, conseguenza di più cicli di fusione/ rigelo. Le caratteristiche del manto nevoso sui tre differenti siti (in particolare quelle suddette) sono strettamente legate all'esposizione.

La Figura 5 riassume la composizione me-



#### Umidità e durezza della neve

Nel sito a Nord è stata rilevata presenza di acqua liquida limitatamente alla superficie del manto in corrispondenza di due episodi di rialzi termici anomali e a fine stagione, con l'avvento di temperature positive dell'aria. Nel sito sul piano la situazione è rimasta immutata per tutta la stagione, tranne che in corrispondenza degli stessi due episodi di rialzi termici, quando l'umidità è aumentata anche più in profondità, raggiungendo la base del manto nevoso, con presenza di acqua mescolata a neve, rilevata durante il primo e l'ultimo profilo della stagione. In corrispondenza di tali periodi, a Sud, negli strati basali è stata rilevata la presenza di neve umida, ma mai neve mista ad acqua, come invece nel sito in piano. Probabilmente, la pendenza del sito a Sud ha permesso all'acqua di migrare verso il piano, dove invece è ristagnata prima di infiltrarsi nel suolo, senza mai riscontrare uno strato basale di ghiaccio.

Negli strati superficiali, nei siti a Sud e sul piano, l'umidità è risultata molto più elevata che nel sito a Nord, soprattutto dopo il 10 aprile 2008, quando si sono instaurate condizioni meteorologiche decisamente primaverili (Figura 6).

Per quanto riguarda la durezza della neve, misurata con il "Test della mano", le principali differenze osservate si ritrovano alla base del manto nevoso, dove i cristalli a calice nei siti a Nord e sul piano hanno evidenziato una resistenza molto bassa (valori pari a 1 e 2), mentre nel sito a Sud,

Fig. 6 Evoluzione dell'umidità della neve nel sito a Nord (a), sul piano (b) e a Sud (c).







in seguito al rigelo dell'aqua, la resistenza si manteneva elevata (valori compresi tra 5 e 6) su quasi un metro di spessore. Negli strati superficiali la resistenza è risultata bassa in corrispondenza di tutti e tre i siti, ma per motivi differenti.

Nel sito a Nord la resistenza era bassa per la presenza di neve fresca o neve ventata, mentre in quello a Sud e sul piano la bassa resistenza era legata ai processi di riscaldamento, dovuto ad irraggiamento solare.

## STABILITÀ DEL MANTO NEVOSO

Non si sono osservate grandi differenze in merito all'indice di stabilità, tranne in primavera inoltrata, guando la stabilità è risultata minore a Sud. Si ipotizza che lo strato superficiale fosse meno stabile a Sud, in quanto l'alto contenuto in acqua liquida diminuiva la coesione tra i grani. Seppur non sia stata riscontrata una grande diversità nei valori dell'indice di stabilità tra i tre siti, è però interessante notare la differenza significativa nello spessore di neve coinvolto nel distacco: nel sito a Nord in media è stato di 56 cm con un massimo di 120 cm, mentre nel sito a Sud di soli 18 cm. Nell'analizzare la struttura del manto nevoso durante il test di compressione (Jamieson, e Johnston, 1997), si sono identificati 4 tipi di manto (Figura 7) tra i 10 descritti da McClung e Schaerer (1996). Nel sito a Nord il profilo del riquadro C mostrato in Figura 7 rappresenta più del 50% dei casi: è favorito dalla conservazione di neve asciutta negli strati superficiali a debole coesione (neve fresca o soffiata). Il profilo del riquadro A



descrive i distacchi dovuti alla presenza di cristalli a calice alla base di un manto nevoso relativamente coeso (38% dei casi). Una pressione meccanica di sufficente intensità (passagio di uno sciatore) può provocare uno sprofondamento/ crollo dell'intero manto nevoso (Figura 8). Nel sito a Sud il caso più frequente è stato il distacco di uno strato di neve umida (profilo del riguadro D in Figura 7), perchè favorito dall'intenso irraggiamento solare, con il 64% dei casi; inoltre, anche il profilo del riquadro C rappresenta una frazione importante (36%) dei casi ed è favorito dalla formazione di numerose croste da fusione/rigelo che fungono da piano di slittamento per gli strati superficiali. La variabilità di questi risultati evidenzia una grande differenziazione nell'evoluzione dei fenomeni valanghivi alla scala naturale.

### CARATTERISTICHE CHIMICHE Profili di pH

## Profili di pH

Dai grafici di Figura 9 si osserva come all'inizio del mese di marzo il pH medio diminuisca nel sito a Nord e sul piano (0,5 in 10 giorni) mentre aumenti in quello a Sud. L'aumento del pH a Sud è probabilmente imputabile al processo di fusione che ha determinato il rilascio preferenziale di alcune specie chimiche acide su altre (*Preferential Elution*, Kuhn et al., 1998). Nei siti a Nord e sul piano è possibile ipotizzare che l'abbassamento del pH sia legato alle basse temperature dei giorni 3, 4 e 5 marzo 2008, cha favoriscono la ritenzione dell'anidride carbonica, perché







meno volatile (Pecci et al., 2006). Dopo quest'episodio, il pH medio aumenta in ogni sito (in modo più rapido a Nord e sul piano), anche se una nevicata tardiva apporta un strato di neve più acido in superficie (20 cm). L'aumento del pH in prossimità della base del manto nevoso è legato a scambi di soluti ed alla concomitanza di neutralizzazione tra manFig. 7 Differenti tipi di struttura del manto nevoso rilevati

il 4 marzo 2008.

nei profili nivologici. Fig. 8 Test di compressione: esempio di rottura alla base del manto avvenuta

160 С 150 140 130 120 110 Ĵ 100 90 i della neve 80 70 Altezza 60 50 40 30 20 10 -20 -10 0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 t (giorni)

Fig. 9 Evoluzione del pH della neve nel sito a Nord (a), sul piano (b) e a Sud (c).

Fig. 10 Evoluzione della Conducibilità Elettrica della neve nel sito a Nord (a), sul piano (b) e a Sud (c).





to nevoso e substrato. Durante il mese d'Aprile, il pH si abbassa generalmente, in accordo con guanto osservato in molti studi di chimica del manto nevoso (ad esempio Kuhn et al., 1998). Questo fenomeno (noto come "spring deposition", secondo Maupetit et al., 1995; Kuhn et al., 1998) è riconducibile alla transizione tra le stabili condizioni atmosferiche invernali e quelle primaverili, caratterizzate invece da moti convettivi che determinano il trasporto di masse d'aria dalla pianura (quindi ricche di soluti) alla testata delle valli alpine, causando un'incremento nella deposizione di specie chimiche sul manto nevoso. L'ipotesi è ulteriormente confermata dal fatto che in tale periodo le precipitazioni siano state determinate da masse d'aria provenienti da Sud-Est (Pianura Padana), sicuramente caratterizzate da pH più acidi a causa delle attività antropiche. A fine stagione il pH medio inzia ad aumentare, inizialmente nel sito a Sud (15 aprile 2008), quindi in quello sul piano (24 aprile 2008) ed infine in quello a Nord (2 maggio 2008), in coincidenza con il processo di fusione incipiente. L'incremento del pH durante la fusione è imputabile ancora al fenomeno di eluzione preferenziale. Alcuni studi mostrano infatti che le specie chimiche acidificanti (NO3<sup>-</sup>, SO4<sup>2-</sup>) vengono rilasciate per prime, causando un innalzamento del pH nel manto nevoso (Kuhn et al., 1998). Si nota, anche, che per l'intero periodo le variazioni di pH hanno rispettato una gerarchia spazio-temporale, secondo la quale i processi procedevano da Sud verso Nord e verso il piano.

Profili di Conducibilità Elettrica Si osserva dai grafici di Figura 10 come l'intero manto nevoso sia caratterizzato da basse CE e come tali valori vadano decrescendo fino al giorno 8 marzo 2008. Tali andamenti, confermati anche dai pattern del pH, permettono di identificare lo ionic pulse all'interno dei manti nevosi dei tre siti indagati, con un effetto meno pronunciato in quello a Nord.

Le temperature dell'aria relativamente elevate di fine febbraio 2008 hanno determinato uno ionic pulse anticipato rispetto a quanto accade di norma a queste quote. In questo caso i suoli gelati possono rimanere tali in superficie e i nutrienti rilasciati dalla fusione possono andare incontro a ruscellamento e non essere trattenuti dal suolo, con una perdita netta di nutrienti e potenziali effetti acidificanti sulle acque di superficie (Williams e Tonnessen, 2000). Considerando i due ultimi inverni, si nota una tendenza che vede l'alternanza di periodi relativamente caldi (ad esempio il 19 genario 2007 con 20 °C a Torino) ad altri piu freddi.

Queste situazioni potranno ripetersi più frequentemente rispetto al passato, con consequenze ancora parzialmente sconosciute ma con un sicuro effetto sul ciclo biogeochimico dei nutrienti nei fragili ecosistemi alpini.

I grafici, inoltre, mostrano un incremento della conducibilità che riflette un apporto chimico nei giorni precedenti il 2 aprile 2008. È interessante notare come nel sito sul piano l'incremento si osservi in superficie, mentre in quelli a Sud e a



Nord appena sotto la superficie. Dai profili stratigrafici si rileva che nei siti a Nord e a Sud gli strati superficiali sono composti da neve ventata che probabilmente si è sovraimposta agli strati interessati da deposizione. Sempre all'inizio di aprile si osserva, anche, un'interessante ripartizione delle specie chimiche lungo i profili. Nel sito a Sud la CE massima si ritrova alla base del manto nevoso, inducendo a ritenere, quindi, che le specie chimiche siano state eluite fino alla base del manto, a causa del processo di fusione.

Nel sito sul piano, invece, le specie si sono accumulate in superficie, senza evidenze di eluizione verso la base del manto, mentre in quello a Nord sono equamente distribuite lungo il profilo. Un nuovo ionic pulse è riscontrabile nei giorni intorno al 10 aprile 2008 e coincidente con temperature dell'aria relativamente elevate. Tale fenomeno è responsabile del rilascio della quasi totalità della specie chimiche nei manti nevosi dei siti a Sud e sul piano, dove la CE media diminuisce di più di 20 microS/cm in pochi giorni, mentre la diminuzione è molto più limitata in quello a Nord (5 microS/cm), ad indicare un rilascio molto inferiore rispetto agli altri due.

Il grafico dell'evoluzione della Conducibilità Elettrica nel sito a Nord, ritenuta l'esposizione più adatta per studiare le deposizioni chimiche, essendo quella in cui il processo di fusione avviene più lentamente, dimostra che le precipitazioni di aprile 2008 hanno arricchito di specie chimiche il manto nevoso per effetto di "spring deposition". Nei siti a Sud e sul

50

piano questo fenomeno è meno visibile, poiché la neve appena depositata va incontro quasi immediatamente al processo di fusione e gli ioni vengono quindi velocemente allontanati verso la base del profilo e progressivamente rilasciati al suolo.

Alla fine dell'inverno (24 aprile 2008) si osserva un forte *ionic pulse* nel sito a Nord, mentre a Sud e sul piano avviene il rilascio delle ultime specie ancora presenti nella neve. Analogamente a quanto osservato per il pH, la CE diventa nuovamente confrontabile sui tre siti.

## CONCLUSIONI

Questo studio dimostra la grande influenza dell'esposizione sulle proprietà, sia fisiche che chimiche, del manto nevoso. L'esposizione agisce direttamente (conservazione della neve fresca, fusione e rigelo) e indirettamente (formazione di cristalli a calice e croste in profondità) sulla struttura del manto nevoso. Le osservazioni svolte sul campo, supportate da analisi statistiche, hanno dimostrato come gli strati basali di un sito localizzato in un'area in piano siano paragonabili a



Fig. 11 Schema riassuntivo dei principali fenomeni fisici che influiscono sulla struttura del manto nevoso in funzione dell'esposizione.

quelli di un sito esposto a Nord, mentre i suoi strati più superficiali siano simili a quelli di un sito esposto a Sud (Figura 11). Questi risultati preliminari, supportati da ulteriori studi in condizioni geografiche e climatiche diverse, potrebbero risultare molto utile ad estendere le caratteristiche del manto nevoso rilevate durante i profili nivologici effettuati nei campi neve in piano ai versanti circostanti. I risultati di questo studio confermano la validità della metodologia di valutazione della stabilità del manto nevoso attualmente utilizzata dai servizi valanghe dell'arco alpino, in quanto la realizzazione di profili nivologici nei classici campi neve in piano permette di ottenere una visione abbastanza soddisfacente della struttura del manto nevoso presente anche sui versanti.

## **Bibliografia**

Anderton, S.P., White, S.M. e Alvera, B. (2003). Evaluation of spatial variability in snow water equivalent for a high mountain catchment. Hydrological Processes, 18(3), 435-453.

Barber, D.G., Iacozza, J. e Walker, A.E. (2003). Estimation of snow water equivalent using microwave radiometry over Arctic first-year sea ice. Hydrological Processes, 17(17), 3503-3517.

Birkeland, K.W., Hansen, K.J. and Brown, R.L. (1995). The spatial variability of snow resistance on potential avalanche slopes. Journal of Glaciology, 41(137), 183-190.

Bocchiola, D. e Rosso, R. (2207). The distribution of daily snow water equivalent in the central Italian Alps. Advances in Water Resouces, 30(1), 135-147.

Cagnati (2004), Strumenti di misura e metodi di osservazione nivometeorologici. AINEVA. 133 pp.

Colbeck, S.C., Akitaya, E. Armstrong, R., Gubler, H., Lafeuille, J., Lied, K., McClung, D. e Morris, E. (1990). The international classification for seasonal snow on the ground. Wallingford, Oxon, International Association of Scientific Hydrology. International Commission on Snow and Ice.

Filippa G., Freppaz M., Williams M.W., Zanini E. (submitted). Major Element Chemistry in Alpine Snowpacks of the Western Alps (Vallee d'Aosta). Water, Air and Soil Pollution, submitted.

Jamieson, B. e Johnston, C. (1997). The compression test for snow stability. Proceedings. of the 1996 Int. Snow Sci. Workshop, Banff, Canada, 118-125.

Kronholm, K. (2004). Spatial variability of snow mechanical properties with regard to avalanche formation. Ph.D. Dissertation, Department of Geography, University of Zurich. 187 pp. Kuhn, M., Haslhofer, J., Nickus, U. e Schellander, H. (1998). Seasonal development of ion concentration in a high alpine snowpack. Atmospheric Environment, 32, 4041-4051.

McClung, D. e Schaerer, P. (1996). Manuale delle valanghe, Zanichelli

Maupetit, F., Wagenbach, D., Weddeling, P. e Delmas, R. (1995). Seasonal fluxes of major ions to a high altitude cold alpine glacier. Atmospheric Environment, 29, 1–9.

Nickus, U., Kuhn, M., Novo, A. e Rossi, G.C. (1998). Major element chemistry in alpine snow along a north-south transect in the Eastern Alps. Atmospheric Environment, 32(23), 4053-4060.

Pecci, M., D'Aquila, P., Valt, M., Cagnati, A., Corso, T., Crepaz, A., Crepaz, G., Gabrieli, J., Praolini, A., Meraldi, E., Berbenni, F., Freppaz, M., Dellavedova, P., Filippa, G. (2006). Profilo chimico-ambientale del manto nevoso. Neve e Valanghe, 58.

 Pielmeier, C. (2003). Textural and mechanical variabilità of mountain snowpacks. Ph.D. Dissertation, University of Bern. 127 pp.
Puxbaum, H. e Wagenbach, D. (1994). High Alpine Precipitation Chemistry. In: Borrel P.M. et al., Proceedings of the EUROTRAC Symposium 94, eds: 597-605.

Ufficio Neve Valanghe, Regione autonoma Valle d'Aosta, Rendiconto Nivometeorologico 2007-2008.

Williams, M.W. e Tonnessen, K.A. (2000). Critical loads for inorganic nitrogen deposition in the Colorado Front Range, USA. Ecological Applications 10 (6), 1648-1665.