

# ALTEZZA AL DISTACCO DELLE VALANGHE

Un approccio regionale per la stima delle altezze al distacco nel calcolo dinamico delle valanghe, applicato per due casi di studio in Lombardia

## **Alberto Riboni**

Ingegnere, Politecnico di Milano, Dip. DIAR

## **Betty Sovilla**

PhD, Istituto Federale per lo Studio della Neve e delle Valanghe di Davos

## **Daniele Bocchiola**

Ricercatore in Idrologia e Costruzioni Idrauliche Politecnico di Milano, Dip. DIAR  
Autore corrispondente  
Tel. 022399 6292  
daniele.bocchiola@polimi.it

## **Renzo Rosso**

Professore di Idrologia e Costruzioni Idrauliche Politecnico di Milano, Dip. DIAR

Il calcolo dinamico delle valanghe per assegnati periodi di ritorno richiede come input la definizione dell'altezza al distacco. Tale valore viene solitamente valutato utilizzando una distribuzione statistica dei valori estremi, la cui definizione richiede la conoscenza dei valori massimi di altezza di neve per diversi anni. Data la scarsità dei dati di accumulo nivale (dell'ordine di una decina o poco più di anni), specialmente in rapporto ai periodi di ritorno considerati, dell'ordine dei 300 anni, le distribuzioni ottenute possono in alcuni casi presentare una scarsa affidabilità. Si propone qui un metodo regionale, del tipo "altezza indice", per la determinazione del valore di altezza al distacco per assegnato periodo di ritorno, basato sull'utilizzo combinato dei dati di precipitazione nevosa registrati dalle stazioni di rilevamento in Lombardia nell'ultimo decennio. Tale approccio permette una stima basata su campioni più estesi, rispetto ai classici metodi locali (fino a 140 anni di dati equivalenti). Si adotta la suddivisione in regioni delle Alpi Lombarde già ricavata in un precedente studio. Si determinano le curve di crescita regionali, che mostrano una distribuzione del tipo EV1 (distribuzione del Valore Estremo di primo tipo), o di Gumbel e permettono la stima affidabile delle altezze attese al distacco fino ad un periodo di ritorno di 300 anni. Si propongono inoltre due formule regressive, una per ogni regione, per stimare le altezze medie ("altezze indice") di precipitazione nelle 72 ore, a partire dalle caratteristiche geo-morfologiche del sito. La metodologia viene poi applicata per due casi di studio, il versante orientale della Grigna Settentrionale (LC) e il Monte Vallecetta (SO). Analizzate le topografie e esaminate le carte CLPV per ottenere le informazioni relative ai massimi eventi storici registrati, si procede nella definizione dei parametri di calcolo per le simulazioni monodimensionali, condotte con Aval-1D®, sviluppato dal team di Studio della Dinamica delle Valanghe dell'SLF, l'Istituto Federale per lo Studio della Neve e delle Valanghe di Davos (CH). Si affronta un'analisi di sensitività sui principali parametri variabili in ingresso per le simulazioni, con particolare attenzione alle altezze al distacco. Si valutano le distanze di arresto calcolate, alla base della definizione delle zone di pericolo, in dipendenza dalla variazione di tali parametri. Tale procedura mostra la dipendenza della zonazione dall'input in termini di altezza stimata al distacco per un dato periodo di ritorno. Il metodo regionale può portare a stime maggiormente affidabili di tali altezze, soprattutto per elevati periodi di ritorno, consentendo di conseguenza un guadagno in termini di affidabilità nella definizione delle zone di pericolo.



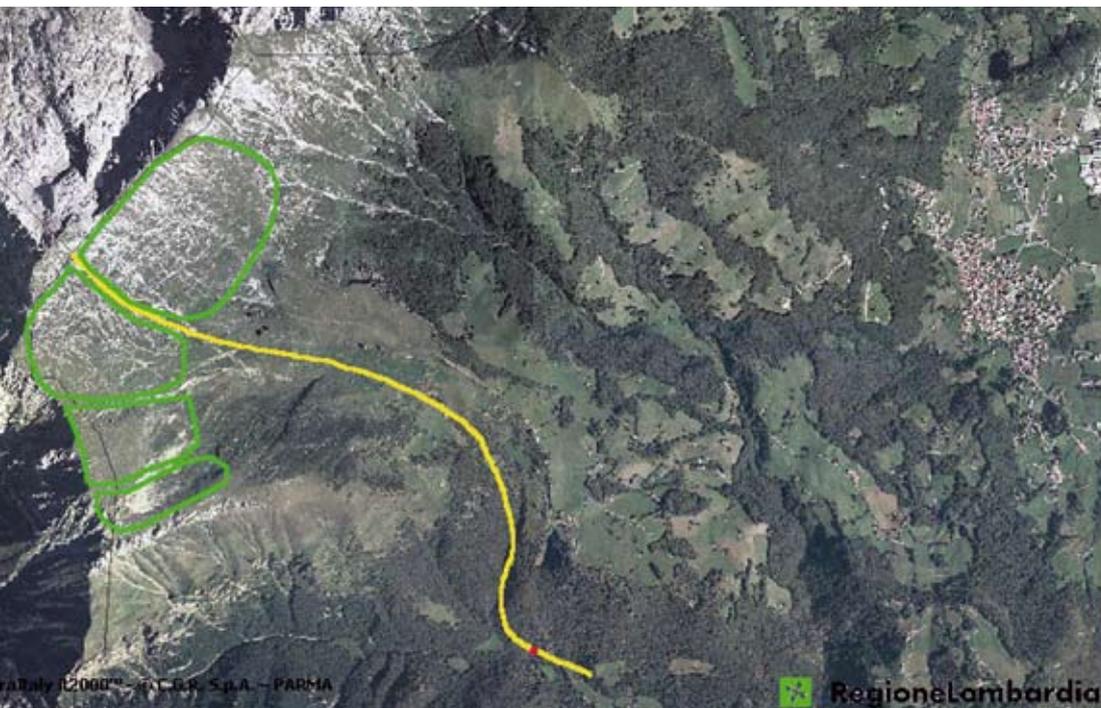


Figura 1 - Il versante orientale della Grigna Settentrionale, in giallo evidenziato un percorso rappresentativo della valanga, dalla cima della Grigna a sinistra fino a valle; in rosso evidenziato l'endmark storico (CLPV), in verde le zone di distacco. A destra in alto è visibile il comune di Pasturo.

Figura 2 - (pagina a lato, sopra) Il canale del Rio Vallecetta; in giallo è evidenziato il percorso che parte dalla cima del Monte Vallecetta, attraversa il canale e arriva fino alla valle dell'Adda; in rosso è evidenziato l'endmark storico (CLPV), e in verde le zone al distacco studiate.

Figura 3 - (pagina a lato, sotto) La suddivisione nelle due regioni della zona montuosa lombarda; i punti indicano la posizione delle stazioni di rilevamento. (Martinelli et al., 2004).

## INTRODUZIONE

Le moderne tecnologie di calcolo costituiscono un supporto fondamentale nelle procedure di mappatura del pericolo valanghe. L'utilizzo di modelli numerici opportunamente sviluppati e calibrati consente di determinare, a partire da date condizioni iniziali ed al contorno, le grandezze di interesse per la definizione dei livelli di rischio, ossia la lunghezza del percorso valanghivo, dal distacco alla zona di arresto, nonché le pressioni esercitate dalla massa nevosa.

Particolarmente critica per il corretto funzionamento di tali modelli è la raccolta di informazioni nel sito in esame, necessaria al fine di fornire ai modelli di valanga gli input necessari.

In questo studio si considerano due zone di valanga individuate sul territorio lombardo, in particolare il versante orientale della Grigna Settentrionale (LC) e il Monte Vallecetta (SO).

Le simulazioni sono condotte con Aval-1D, sviluppato dal team di Studio della Dinamica delle Valanghe dell'SLF, l'Istituto Federale per lo Studio della Neve

e delle Valanghe di Davos.

Il modello richiede delle scelte precise dei dati di input effettuate dall'utente. Un dato particolarmente importante è l'altezza di neve al distacco, che viene legata in fase di simulazione al valore del massimo annuale di accumulo nevoso per 72 ore di precipitazione consecutive, per un dato periodo di ritorno,  $H_{72}(T)$ .

Per la determinazione di tale valore, si propone qui un approccio regionale. Si adotta la suddivisione in regioni omogenee delle Alpi Lombarde già ricavata in un precedente studio (Martinelli et al., 2004).

Per ricavare la larghezza del profilo di scorrimento, si introduce nello studio un modello bidimensionale (Aval-2D), atto a determinare la massima area di espansione della valanga simulata. Analizzate le topografie ed esaminate le carte CLPV per ottenere le informazioni relative ai massimi eventi storici registrati, si procede nella definizione dei parametri di calcolo per Aval-1D.

Allo scopo di valutare la sensibilità della procedura di mappatura del pericolo valanghe agli

input iniziali si affronta un'analisi sui principali parametri variabili in ingresso:

- altezza di neve al distacco
- larghezza del profilo
- coefficienti di attrito

Partendo dai dati scelti come riferimento, si studiano gli effetti delle variazioni degli stessi sugli output del modello. Le distanze di arresto e l'estensione della zona rossa calcolate sono alla base delle definizioni delle zone di pericolo, e una variazione di pochi centimetri dello spessore della frattura iniziale può portare ad una zonazione del rischio sovrastimata (o peggio ancora sottostimata) di centinaia di metri. Allo stesso modo, la definizione delle larghezze del profilo e dei coefficienti di attrito può portare a distanze di arresto o pressioni dinamiche inaffidabili, con il conseguente impatto sulla zonazione

## PRESENTAZIONE DEI CASI ANALIZZATI

Sono stati scelti due casi studio, il sito valanghivo della Grigna Settentrionale in provincia di Lecco e il Monte Vallecetta a Bormio, in provincia di Sondrio.

Tali studi sono in precedenza stati considerati, ad esempio, in due tesi di laurea (Liusso e Invernizzi, 1997; Gianella, 1996). Per una descrizione approfondita dei due casi si rimanda inoltre a Riboni, 2004.

**Grigna Settentrionale (LC).** Il sito valanghivo di interesse è il versante orientale della Grigna Settentrionale (detta anche Grignone). La zona di distacco (Figura 1) può essere suddivisa in due settori; il primo, osservando la zona dalla sinistra orografica alla destra comprende un pendio orientato Est-SudEst con pendenza media attorno ai 35°, compreso tra la vetta della Grigna e la Bocchetta del Nevaio,

e a valle scende fino alla zona delle Baite Comolli. Il secondo settore, delimitato dallo Zucco di Chignoli e la vetta della Grigna, è suddivisibile in tre zone di distacco che hanno in comune poi la zona di scorrimento, la Foppa del Ger.

**Monte Vallecetta (SO).** Il monte Vallecetta e il canalone omonimo che costituisce la zona di scorrimento fanno parte del Comune di Valdisotto, a sud di Bormio. Il percorso della valanga può essere così descritto: la zona di distacco principale è un ampio anfiteatro compreso tra la cima del Monte Vallecetta, la Cima Bianca e le dorsali che da esse partono (Figura 2). L'anfiteatro si restringe scendendo di quota fino ad un vero e proprio salto situato a 2400 m s.l.m. per poi arrivare all'imbocco dello stretto canale che costituisce la zona di scorrimento vera e propria. Raramente si assiste ad eventi che coinvolgano tutta la zona sopraccitata ma spesso si verificano distacchi localizzati, che non arrivano oltre il termine della parte ad "anfiteatro" (come si può vedere anche dalla CLPV). La zona di scorrimento è il canalone del Rio Vallecetta, facilmente individuabile in prossimità del cambio di pendenza e di morfologia situato alla quota di circa 2100 m s.l.m. alla fine della zona di distacco. La zona di arresto è il vasto conoide formato dal Rio Vallecetta, situato dove il versante della montagna raccorda con il fondovalle, con un percorso aperto di circa 600 m.

## ANALISI NIVOMETRICA: L'APPROCCIO REGIONALE

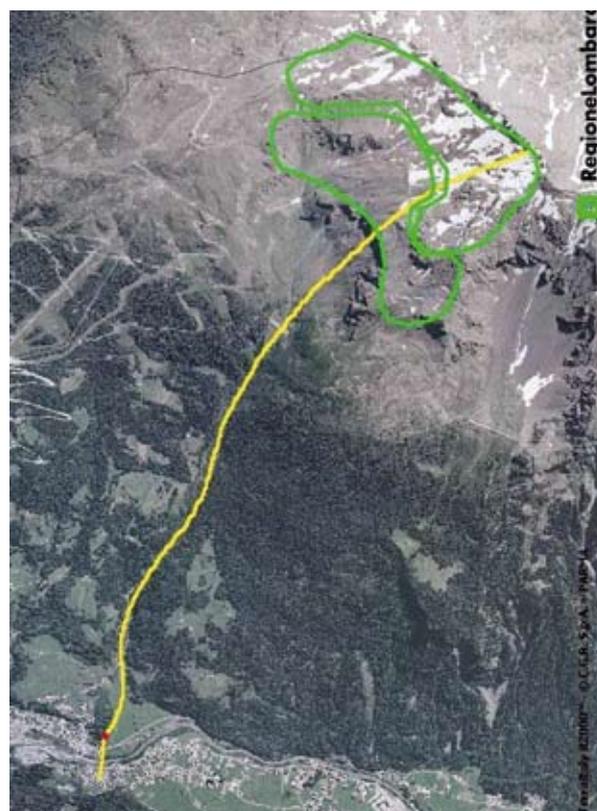
Il dato di input necessario per la zonazione del rischio è lo spessore di neve al distacco relativo ad un tempo di ritorno trecentennale, che permette di

simulare valanghe estreme, e quello legato ad un tempo di ritorno trentennale atto a simulare valanghe più frequenti e per verificare l'estensione della zona rossa. I dati di partenza sono le serie storiche fornite dal Centro Nivo-Meteorologico di Bormio e dalla Regione Lombardia, per le 28 stazioni di rilevamento distribuite sul territorio lombardo. In Figura 3 tali stazioni sono rappresentate, raggruppate nelle due regioni di appartenenza individuate in un precedente studio (Martinelli *et al.*, 2004). La regola attuale di definizione dello spessore al distacco prevede il calcolo dell'aumento dell'altezza del manto nevoso in un periodo di tre giorni consecutivi di precipitazioni. Presupposto per tale analisi è l'elevato numero di dati di altezza del manto nivale. Per le stazioni considerate il numero medio di annate (stagioni invernali) disponibili è pari a 10, e non sempre queste serie sono complete.

Data l'esigua disponibilità di dati che risulta dalle circostanze sopra dette, è opportuno ricorrere ad una metodologia di tipo regionale.

L'approccio regionale è stato originariamente introdotto nel

campo dell'idrologia delle piene e parte dall'ipotesi di poter sostituire il tempo con lo spazio, considerando i valori di massima annuale in diverse stazioni come provenienti da una unica distribuzione statistica (si veda *p.es.* Bocchiola *et al.*, 2004). Tale approccio vale purché si considerino i valori riscaldati per un opportuno valore, detto *indice*, variabile da stazione a stazione. La relazione che ne risulta per le



### Carta



Tabella 1. Parametri delle distribuzioni di Gumbel osservate per le due regioni.

Tabella 2. Medie locali per i due siti stimate tramite le equazioni di regressione.

Tabella 3. Altezze al distacco con tempo di ritorno T=300 anni per i due siti valanghivi, stimate tramite approccio regionale e corrette per la pendenza (si veda il Manuale di Aval-1D) e relativa incertezza di stima.

altezze di neve è la (1) riprodotta nell'insero qui sotto.

Il *fattore di crescita*  $x(T)$  è comune per l'intera regione e rappresenta la componente di variabilità statistica del processo di accumulo della neve. L'*altezza indice*  $H_{72}^i$  rappresenta in pratica il valore atteso (media) della distribuzione delle altezze massime annuali e cambia da sito a sito. Tale valore può essere determinato con differenti metodi a seconda della disponibilità di dati (si veda *p.es.* Bocchiola *et al.*, 2003)

### Stima della curva di crescita

Sfruttando la suddivisione del territorio montuoso lombardo nelle due regioni dette si sono valutate le relative curve di crescita. In particolare, si è valutata l'altezza indice per ogni stazione tramite una semplice operazione di media campionaria e si sono poi valutati i quantili adimensionalizzati  $x(T)$ . Tramite il metodo momenti (si veda *p.es.* Kottegoda and Rosso, 1997) si è valutato l'adattamento della distribuzione dei valori estremi del primo tipo EV1, alle distribuzioni campionarie  $x(T)$  così ottenute. L'adattamento ha fornito risultati positivi, come si può vedere in Figura 4 e 5 (per una più approfondita verifica di adattamento e confronto con le distribuzioni locali si veda Riboni, 2004). La distribuzione EV1 è nella forma riportata in (2) e (3) nell'insero qui a lato.

I parametri delle distribuzioni per le due zone sono in Tabella 1. Le distribuzioni ottenute permettono di ottenere stime dei quantili di altezza nivale adimensionali  $x(T)$  per periodi di ritorno maggiori rispetto a quelli ottenibili con l'analisi locale. In particolare si può affermare (Benson, 1962 e Committee on Techniques for Estimating Probabilities of Extreme Floods, 1988) che l'orizzonte previsionale affidabile sia all'incirca pari a  $2n$ , con  $n$  numero di

anni equivalenti a disposizione. Poiché nelle singole stazioni la media dei dati osservati presenti è pari a 10 anni, la previsione affidabile è dell'ordine dei 20 anni. Utilizzando invece l'approccio regionale si dispone di un numero di anni equivalenti decisamente superiore (Regione 1, 133 anni; Regione 2, 129 anni) fornendo delle stime affidabili dei valori di spessore di neve legati ad un tempo di ritorno pari a 260 anni, prossimo ai 300 anni richiesti dalla normativa.

### Stima dell'altezza indice

Nei siti non strumentati è necessario valutare il valore dell'altezza indice tramite approcci indiretti. Un approccio possibile è la determinazione di equazioni di regressione basate sui dati disponibili, che si possa estendere a tutto il territorio della regione analizzata. In particolare, è possibile osservare le caratteristiche geomorfologiche legate alla posizione delle stazioni esistenti e studiare che legame esiste tra queste ed il valore della media campionaria dei massimi annuali di accumulo nivale. Tramite un'analisi di regressione di tipo *forward stepwise* (si veda *p.es.* Kottegoda e Rosso, 1997) si giunge alle equazioni di regressione finali riportate rispettivamente in (4) e (5) nell'insero qui a lato.

L'adattamento dell'equazioni ai dati osservati è riportato in Riboni, 2004. Si sono considerate nella regressione altre variabili, quali la pendenza locale, diversi valori di rappresentatività della temperatura e l'esposizione. Tuttavia nessuna di tali variabili sembra apportare un sensibile incremento della varianza spiegata (si è utilizzata una soglia dell'1%).

### Altezze al distacco

Date le equazioni di regressione per la stima dell'altezza indice, è possibile ricavare le altezze

EQUAZIONI	
1	$H_{72}(T) = H_{72}^i x(T)$
2-3	$\hat{x}(T) = u + \alpha \cdot y(T)$ Con $y(T) = -Ln(-Ln((T - 1) / T))$ variabile di Gumbel
4	Per la regione 1 vale la: $\hat{H}_{72}^i = 0.052 \cdot Q + 5.3 \cdot 10^{-4} \cdot N - 1.7 \cdot 10^{-4} \cdot E - 2649$ $R^2 = 0.89$ Con Q=quota [m], E coordinata est [m] e N coordinata nord [m]
5	Per la regione 2 vale la: $\hat{H}_{72}^i = 0.029 \cdot Q + 2.6 \cdot 10^{-4} \cdot N - 7 \cdot 10^{-5} \cdot E - 1300$ $R^2 = 0.79$
6	$\hat{\sigma}_{H_{72}(T)}^2 = \hat{\sigma}_{H_{72}^i}^2 \cdot \hat{\sigma}_{x(T)}^2 + \hat{H}_{72}^i{}^2 \cdot \hat{\sigma}_{x(T)}^2 + \hat{x}^2(T) \cdot \hat{\sigma}_{H_{72}^i}^2$
7	$\hat{\sigma}_{H_{72}^i}^2 = \hat{\sigma}_{H_{72}^i}^2 (1 - R^2)$
8	$\hat{\sigma}_{x(T)}^2 = \frac{\alpha^2}{n} \exp(y(T)) \cdot \exp(-1.823 \cdot k - 0.165)$

### Parametri delle distribuzioni di Gumbel osservate per le due regioni

Parametri Gumbel	$\alpha$ [.]	$u$ [.]
Regione1	0.373	0.810
Regione2	0.334	0.808

### Medie locali per i due siti stimate tramite le equazioni di regressione

Altezza indice	Profilo	Q [m]	N [m]	E [m]	$H_{72}^i$ [m]
Grigna	1a, 1b	2225	5088853	530349	0.945
	2, 3	2175	5088718	530135	0.919
Monte Vallecetta	1	3000	5141308	607856	0.832
	2	2675	5141796	607086	0.735

### Altezze al distacco con tempo di ritorno T=300 anni per i due siti valanghivi, stimate tramite approccio regionale e corrette per la pendenza (si veda il Manuale di Aval-1D) e relativa incertezza di stima

Altezze al distacco T=300	Profilo	Fattore di pendenza [.]	$H_{72}(300)$ [m]	$H_0(300)$ [m]	$\hat{\sigma}_{H_{72}^i}^2$ [m]	$\hat{\sigma}_{x(T)}^2$ [.]	$\hat{\sigma}_{H_{72}(T)}^2$ [m]
Grigna	1a, 1b	0.62	2.775	1.350	0.056	0.367	0.383
	2, 3	0.71	2.690	1.550	0.056	0.367	0.375
Monte Vallecetta	1	0.74	2.260	1.400	0.079	0.328	0.357
	2	0.85	1.997	1.450	0.079	0.328	0.334

al distacco dei due siti di interesse. Come verrà spiegato in seguito, sono stati individuati diversi percorsi possibili per le due valanghe e di conseguenza esistono diversi punti scelti per rappresentare le aree di distacco. Sono state utilizzate le quote e le coordinate medie dei profili per il calcolo dell'altezza indice, riportate in Tabella 2. Le medie locali ottenute moltiplicate per i fattori di scala di Gumbel, restituiscono le altezze al distacco riferite ad una determinata frequenza di accadimento. In Tabella 3 e 4 sono riportati i valori delle altezze al distacco così valutate per tempo di ritorno pari a trecento anni e trenta anni.

### Incertezza di stima

L'approccio regionale permette la definizione del livello di incertezza nella determinazione del valore dello spessore di neve al distacco.

L'errore di stima è dovuto alla presenza di un errore nella determinazione del fattore di scala regionale  $x(t)$  di Gumbel e all'errore presente nella stima della media locale. La varianza totale è riportata nella (6) vedi inserto di pag 26.

La deviazione standard di stima tiene conto di due fattori di incertezza, quello associato alla valutazione del fattore di scala regionale e quella legata alla stima del valore locale, dell'altezza indice; la 6 risulta valida assumendo l'indipendenza dei due fattori. La varianza di stima della altezza indice è data dalla (7) riprodotta nell'inserto di pag 26 con  $\sigma^2_{H_{72}^i}$  varianza osservata del campione delle altezze medie (si veda p.es. Bocchiola *et al.*, 2003). La varianza del quantile per la distribuzione GEV, Generale dei Valori Estremi è dato (De Michele e Rosso, 2001) dalla (8) riprodotta nell'inserto di pag 26 dove  $k = 0$  per la EV1 di Gumbel.

Altezze al distacco con tempo di ritorno $T=30$ anni per i due siti valanghivi, stimate tramite approccio regionale e corrette per la pendenza (si veda il Manuale di Aval-1D) e relativa incertezza di stima							
Altezze al distacco $T=30$	Profilo	Fattore di pendenza [.]	$H_{72}(30)$ [m]	$H_0(30)$ [m]	$\hat{\sigma}^2_{H_{72}}$ [m]	$\hat{\sigma}^2_{x(T)}$ [.]	$\hat{\sigma}^2_{H_{72}(T)}$ [m]
Grigna	1a, 1b	0.62	1.958	0.950	0.056	0.138	0.172
	2, 3	0.71	1.904	1.100	0.056	0.138	0.170
Monte Vallecetta	1	0.74	1.615	1.000	0.079	0.124	0.189
	2	0.85	1.427	1.050	0.079	0.124	0.183

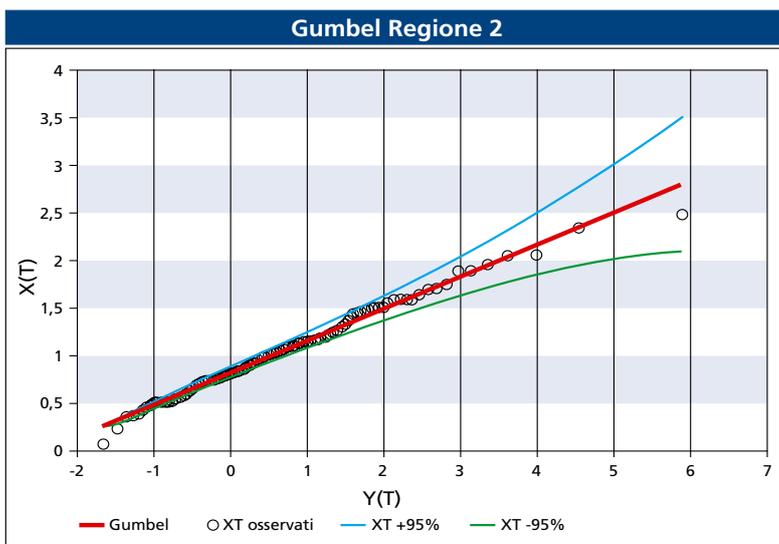
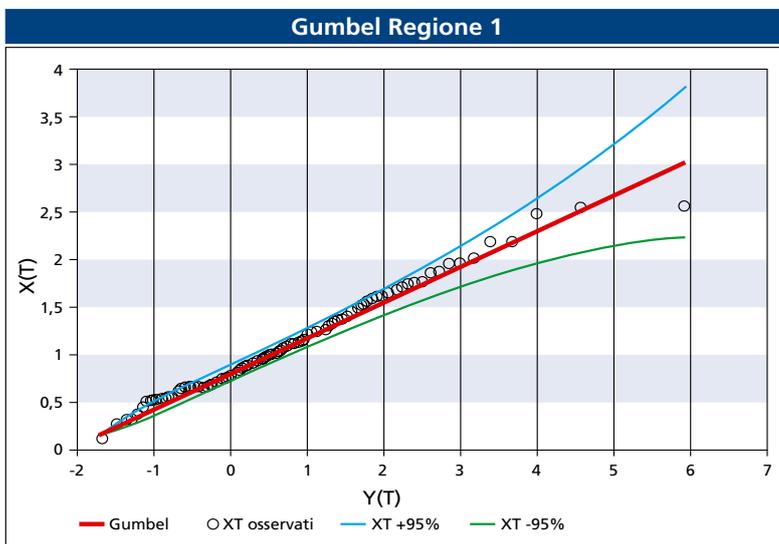


Tabella 4. Altezze al distacco con tempo di ritorno  $T=30$  anni per i due siti valanghivi, stimate tramite approccio regionale e corrette per la pendenza (si veda il Manuale di Aval-1D) e relativa incertezza di stima.

Figura 4. Fattore di scala secondo la Gumbel per la Regione 1. Sul grafico sono rappresentate anche la dispersione dei valori osservati nelle stazioni e le bande di confidenza al 95%.

Figura 5. Fattore di scala secondo la Gumbel per la Regione 2. Sul grafico sono rappresentate anche la dispersione dei valori osservati nelle stazioni e le bande di confidenza al 95%.

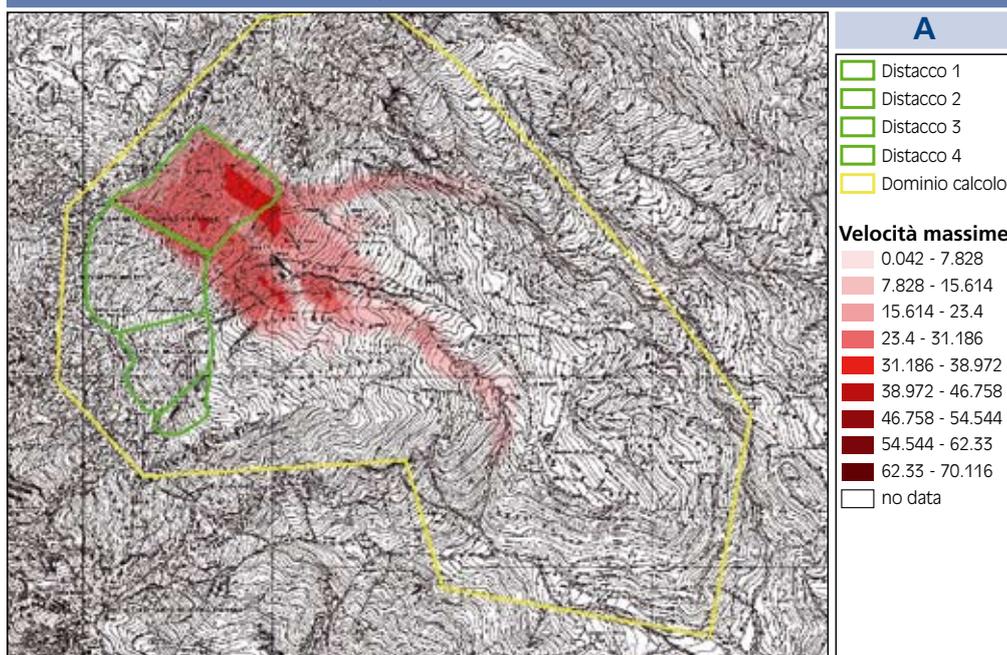
La varianza stimata permette il calcolo delle bande di confidenza del quantile stimato per un qualsivoglia livello di confidenza. Tale informazione è di grande interesse in sede di valutazione dell'affidabilità della zonazione del rischio valanghivo. In Tabella 3 e 4 sono riportati i valori dello scarto quadratico medio  $\sigma$  della altezza indice  $H_{72}^i$ , del quantile dimensionale  $x(T)$  e dell'altezza  $H_{72}(T)$ , calcolati per i due casi in esame.

## USO DI SIMULAZIONI BIDIMENSIONALI PER DEFINIRE I PROFILI DI SCORRIMENTO

Allo scopo di impostare la simulazione monodimensionale, si è condotta una serie di simulazioni bidimensionali utilizzando Aval-2D®. Aval-2D è un modello bidimensionale in fase di sviluppo da parte dell'istituto SLF di Davos, in grado di simulare eventi valanghivi, sfruttando la conoscenza

## Grigna Settentrionale

a) Definizione iniziale delle aree al distacco e del dominio di calcolo; esempio di distribuzione delle velocità da simulazione 2D per la zona di distacco 1.



b) Esempio di output di Aval-2D; si osserva in scala di rossi la distribuzione delle velocità massime generate da un distacco di 200 cm di neve sulla zona di distacco totale. In giallo l'estensione del dominio di calcolo, in verde l'estensione della zona di distacco e i punti indicano i profili di scorrimento individuati.

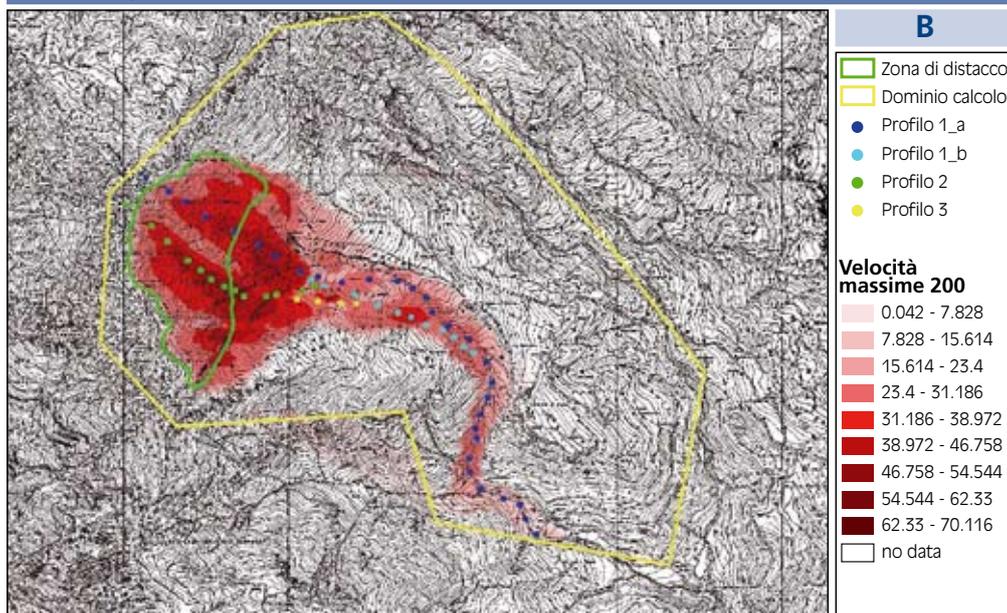


Figura 6 della morfologia del terreno tramite l'uso di un modello digitale tridimensionale. Si ringrazia qui Urs Gruber del SLF di Davos per aver reso possibile l'utilizzo del modello e del software. A differenza di Aval-1D il modello bidimensionale non è calibrato ed i risultati sono da interpretare attentamente. L'utilizzo deve essere per il momento considerato un passaggio preliminare alla

realizzazione delle simulazioni monodimensionali. Il modello Aval-2D è stato usato per individuare in modo corretto i profili di scorrimento della massa di neve nei due siti valanghivi, e successivamente importarli direttamente in Aval-1D. Si ricavano inoltre delle indicazioni sulle larghezze dei profili individuati. Si tratta di osservare quanto la massa in movimento si allar-

ghi sul terreno a disposizione, per assegnare ai profili definiti punto per punto anche un dato di larghezza, che caratterizza le dimensioni della sezione. È da sottolineare che in Aval-2D non viene considerata la componente di viscosità della neve: la massa che si distacca (calcolata come prodotto dell'area di distacco per lo spessore definito in ingresso) rimane costante e in più tende ad occupare gran parte dello spazio a disposizione, ovvero, il flusso che scende a valle tende a seguire la conformazione del territorio in tutti i suoi particolari, comportandosi molto similmente ad un liquido. Nella realtà la massa nevosa non si disperde mai su tutto il pendio a disposizione, poiché esiste una componente viscosa che tende a far occupare al flusso in movimento solo una parte del terreno sul quale scorre.

Output del modello sono la velocità, le pressioni e le altezze del flusso di neve ai vari istanti temporali nei nodi della maglia. Per una spiegazione dettagliata dell'uso di Aval-2D in questo contesto si veda Riboni (2004). I profili ottenuti sono definiti da una serie di punti topografici consecutivi. Sovrapponendo i diagrammi di output ottenuti da Aval-2D alla Carta Tecnica Regionale in scala 1:10000 (con l'aiuto del GIS Arcview®) si scelgono manualmente le posizioni dei singoli punti. Si utilizzano le curve di livello a dieci metri. I punti devono essere ad una distanza minima di 80 metri, massima di 220 metri l'uno dall'altro. Si è posta particolare attenzione nello scegliere i punti nella zona di distacco, la quale non deve superare come lunghezza totale i 500 metri. Per scegliere quelli che poi diventeranno i profili rappresentativi utilizzati per simulare gli eventi valanghivi si

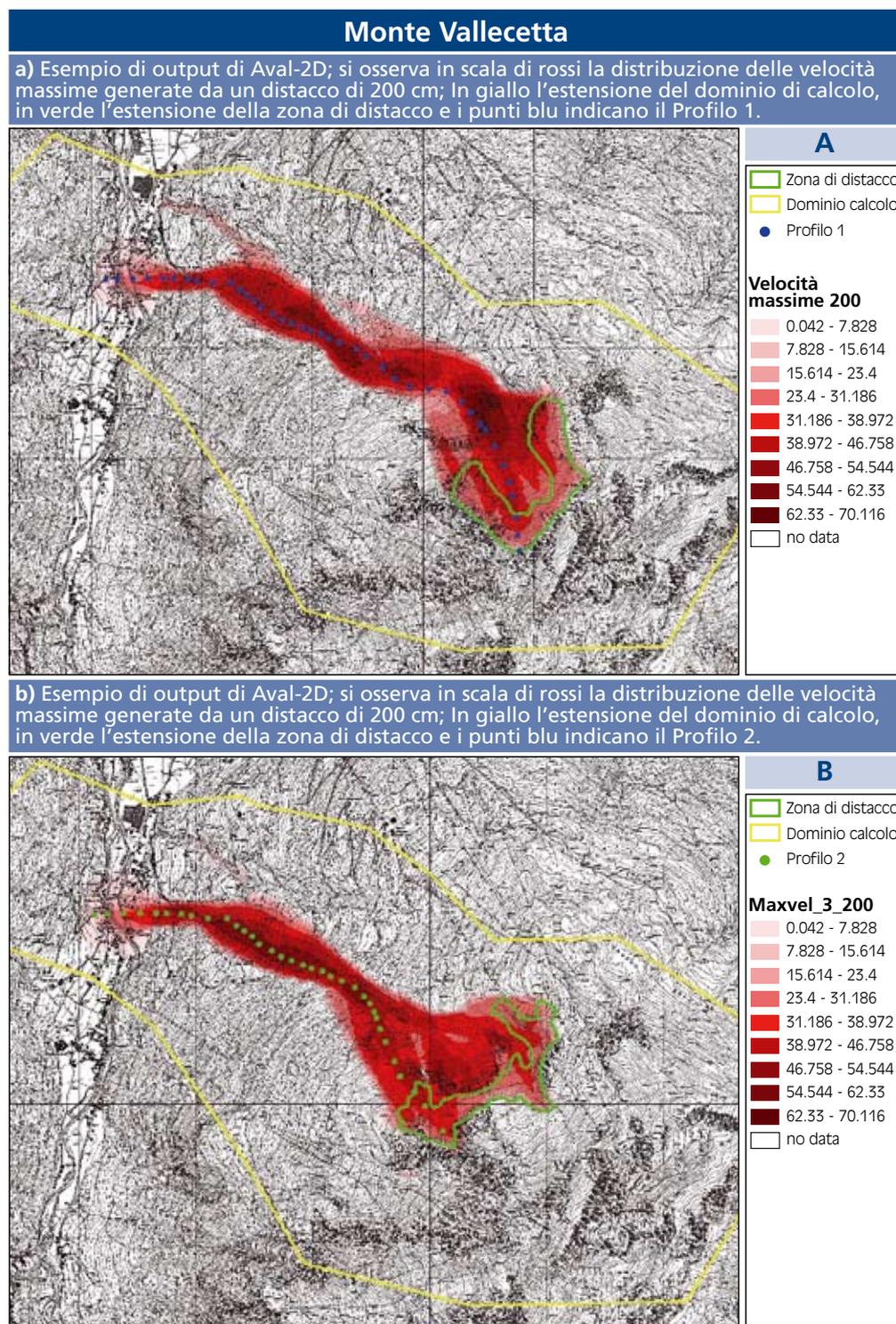
osserva l'andamento dei grafici sopra menzionati. Nelle rappresentazioni dell'andamento delle velocità massime si possono riscontrare delle zone con valori elevati, solitamente associati a pendenze elevate, che si considerano come dei canali preferenziali di scorrimento per il flusso. Dai grafici si studiano le tendenze dei valori e si scelgono delle linee di percorso che poi verranno rappresentate grazie ad una serie di punti topografici consecutivi che potranno essere "letti" da Aval-1D.

La scelta dei profili da usare è quindi in sostanza soggettiva. L'utente dopo un'attenta analisi di tutte le informazioni a sua disposizione può procedere alla selezione dei singoli punti topografici che definiscono il percorso della valanga.

#### Are e di distacco

Si simulano differenti casi di distacchi. Dalla cartografia del pendio si creano in base alle pendenze esistenti, dei poligoni che rappresentino le possibili zone di distacco. L'intera area di distacco, può essere suddivisa a sua volta in sottobacini, per studiare le conseguenze di distacchi limitati e locali.

**Grigna Settentrionale.** Per la zona di distacco della Grigna Settentrionale si individuano cinque poligoni differenti e uno totale che ingloba tutta l'area con pendenze attorno ai 30°-40° (Figura 6a, b). Percorrendo la zona a Sud, la parte di pendio individuata come zona di distacco si suddivide in quattro porzioni contigue che ne coprono tutta l'estensione. Oltre a queste quattro si considera anche una zona di estensione doppia rispetto alle altre, ed infine la totale che ingloba tutto il possibile distacco; tutte le zone di distacco sono comprese tra le quote di 2400 m e 2000 m s.l.m.



**Monte Vallecetta.** Per il sito del Monte Vallecetta si individuano due zone di distacco a quote differenti; salendo dal canale si individua una fascia distribuita per tutta la lunghezza della zona di distacco a quote tra i 2700 m e 2550 m s.l.m. La principale resta però l'area definibile ad "anfiteatro" che si sviluppa dalla cima del Monte Vallecetta fino all'arrivo degli impianti di risalita di Bor-

mio 2000, a quote comprese tra i 3100 m e 2700 m s.l.m. (Figura 7a,b). Lo scopo delle simulazioni è di riuscire a riprodurre il massimo evento registrato nella storia del sito valanghivo. Attraverso lo studio degli effetti di distacchi diversi per dimensioni e posizioni si può capire che tipo di condizioni iniziali può effettivamente portare alla realizzazione di un evento estremo.

Figura 7



### **Le altezze al distacco**

Pur conoscendo le altezze al distacco determinate grazie all'analisi nivometrica, la scelta dei valori di altezza al distacco per le simulazioni bidimensionali è differente. Lo scopo di queste prove è infatti quello di ottenere delle chiare indicazioni riguardanti i percorsi seguiti dalla massa di neve durante la discesa a valle. Per questo si simulano distacchi con diversi spessori, su tutte le aree selezionate di cui si parla nel paragrafo precedente.

**Grigna Settentrionale.** La scelta per le simulazioni riguardanti la Grigna Settentrionale è stata di utilizzare altezze al distacco di 100 cm, 120 cm, 200 cm, 300 cm, 400 cm, 500 cm, per avere una definizione sempre più marcata, all'aumentare dell'altezza inserita, delle distribuzioni delle velocità e della quantità di moto, così da individuare dettagliatamente il percorso del flusso.

**Monte Vallecetta.** Per quanto riguarda le simulazioni della valanga del Monte Vallecetta le

altezze inserite sono state 100 cm, 120 cm, 150 cm, 200 cm. La particolare conformazione del territorio, in questo caso, è tale per cui tutte le altezze di neve considerate per il distacco a monte permettono di ottenere in output distanze di arresto paragonabili a quella dell'evento storico. Già con 100 cm di neve il flusso di massa si arresta solo una volta arrivato a valle, anche per questo è stato ritenuto inutile utilizzare spessori maggiori. Dai grafici di velocità e della quantità di moto è possibile ricavare i profili di moto preferenziali. In particolare, vengono disegnati punto per punto, i profili di scorrimento, seguendo i percorsi evidenziati da valori elevati di velocità e quantità di moto. Ad ogni punto così definito verrà associata una determinata larghezza, che caratterizzerà la sezione di scorrimento definita dal punto stesso.

**Grigna Settentrionale.** I risultati ottenuti da questa serie di simulazioni "di passaggio" portano

per il sito valanghivo della Grigna all'individuazione di due canali principali di scorrimento, che corrono paralleli dalla zona di distacco fino all'imbocco della parte finale fortemente canalizzata (vedere la Figura 6b). Per considerare la topografia complessa nella zona di distacco e nella zona di scorrimento, si sono scelti quattro profili principali, due coppie di profili riferite a due punti diversi della zona di distacco, ma pressoché alla stessa quota si partenzia. Le grosse differenze tra i quattro profili ottenuti si riscontrano nella parte centrale del tracciato, la zona di scorrimento. Si cerca di studiare nel modo più esauriente possibile il comportamento della valanga nel tratto dei due canali centrali, in cui la pendenza diminuisce rispetto alla parte iniziale. Per tutti i quattro profili si utilizza la stessa definizione della zona di distacco, che porta ad ottenere distanze di arresto simili a quelle ricercate. Le larghezze dei profili saranno quindi uguali in partenza, essendo associata a ciascuno di essi la stessa area di distacco.

**Monte Vallecetta.** La valanga del Monte Vallecetta viene simulata con l'aiuto di due profili ricavati dall'analisi dei dati ottenuti dalle simulazioni bidimensionali. I due profili partono da quote diverse. Il primo parte dalla cima del Monte Vallecetta e dopo aver effettuato un salto si immette nel canale che scende verso valle. Il secondo parte da una zona a quota inferiore e non incontra veri salti prima di immettersi nel canale, dove quindi i due profili si sovrappongono, fino all'arrivo a valle, in prossimità della Strada Statale e del Fiume Adda (Figure 7a, b). In questo caso, le aree al distacco selezionate sono due. Il profilo principale (Profilo 1) considera la zona di

distacco che risulta estendersi per tutto l'"anfiteatro". Al Profilo 2 si associa l'area di distacco presente a monte dell'imbocco del canalone.

## SENSITIVITÀ DEL MODELLO AI DATI DI INPUT

### Input del modello Aval-1D

Si descrivono qui in breve le caratteristiche principali e gli input richiesti del modello Aval-1D, utilizzato per l'analisi di sensitività. Si considera qui il solo modulo relativo alle valanghe dense. Aval-1D risolve con un metodo alle differenze finite le equazioni di conservazione della massa, dell'energia e della quantità di moto (si veda ad esempio il Manuale di utilizzo di Christen *et al.*, 2002). L'utilizzo del programma di calcolo prevede una serie di passaggi. In una prima fase devono essere definiti i parametri di input, ossia:

- Lo spessore di neve al distacco, opportunamente trattata in ragione della pendenza locale.
- Il profilo topografico, ovvero una successione di punti topografici caratterizzati da coordinate geografiche e quota. Si consiglia di definire il profilo utilizzando una serie di punti aventi una distanza reale compresa tra gli 80 e i 220 metri. Infatti il modello è sensibile per motivi numerici a piccole irregolarità topografiche che non influiscono in realtà il moto della valanga reale. Nella zona di deposito la differenza di altitudine tra due punti consecutivi non deve essere inferiore ai 20 metri (punti con differenze di 10 metri solo con pendenze inferiori ai 5°).
- La larghezza della valanga in ogni sezione.
- L'area della zona di distacco.
- I parametri di attrito  $\mu$  ed  $\zeta$  per ogni parte del profilo. I parametri di attrito variano in base al

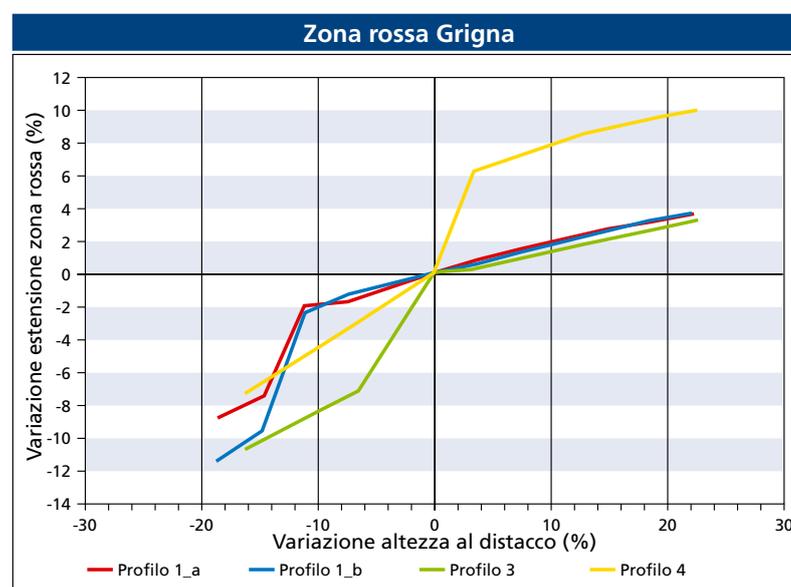
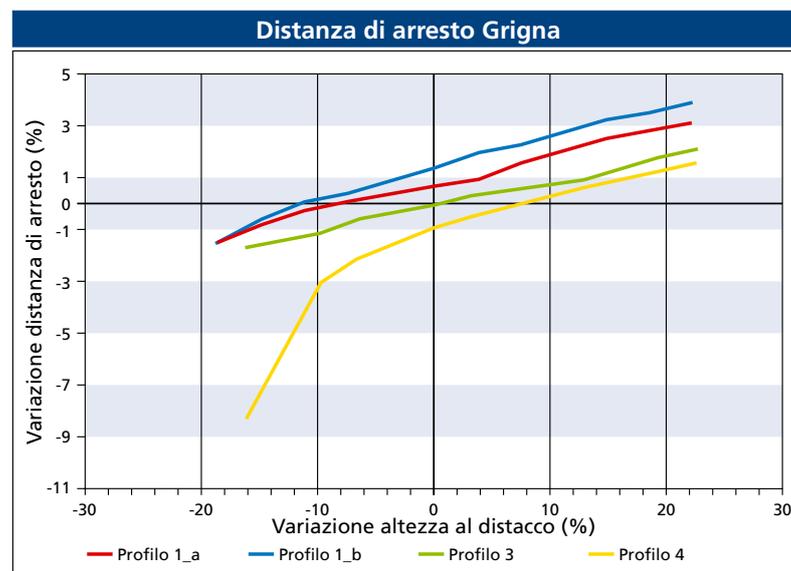


Figura 8

a) Effetto della variazione dell'altezza al distacco sulle distanze di arresto dei 4 profili della Grigna Settentrionale.

b) Variazione dell'estensione della zona rossa in caso di variazione dell'altezza al distacco; analisi per i 4 profili della Grigna Settentrionale.

volume della valanga, in base all'altitudine, alla canalizzazione, alla rugosità della topografia e in base al tempo di ritorno e si valutano tramite opportune tabelle (si veda il Manuale).

- Il grado di canalizzazione lungo il percorso. Esistono tre differenti possibilità: parti di versante, parti canalizzate e parti fortemente canalizzate (gully). La definizione del valore dei parametri di attrito dipende anche da questa caratteristica del percorso (si veda il Manuale).

Definiti i parametri di input si può procedere alla simulazione dinamica del comportamento della valanga. I principali dati in uscita di Aval-1D sono la distanza di arresto (ovvero la distanza

percorsa, espressa in metri) e la pressione di impatto.

Tali informazioni sono fondamentali per la procedura di zonizzazione del pericolo, ovvero la perimetrazione di aree interessate dal possibile passaggio della massa di neve. Sembra importante quindi studiare l'influenza dei singoli parametri sugli output del modello, per comprendere dove sia possibile concedersi delle incertezze e dove invece sia necessario ottenere dati precisi, per non compromettere i risultati dell'analisi.

### Studio di sensitività

Si è condotta una serie di simulazioni per studiare la sensitività dei risultati del modello Aval 1-D rispetto alle variazioni dei dati

di input. Si sono considerati due parametri di confronto. Il primo è la distanza di arresto simulata della valanga, mentre il secondo è il limite della zona rossa, definita sulla base del limite dei 30 KPa. Una prima osservazione riguarda la sensitività dei risultati alla scelta del profilo. Poiché infatti non è a priori detto quale percorso sarà seguito dalla valanga, la definizione delle zone di rischio dipende dal profilo scelto. Si devono quindi considerare i differenti profili. Una ulteriore fonte di incertezza riguarda la definizione dei parametri di attrito  $\mu$  ed  $\zeta$ . I loro valori numerici cambiano infatti a seconda della caratterizzazione del tratto preso in esame, se di versante, canalizzato o gully. In questo ambito, si è svolta la selezione delle carat-

teristiche del percorso, a partire da un'analisi delle carte topografiche, per trovare la giusta successione di parti di versante e canalizzate. Tuttavia, sebbene esistano delle regole definite per classificare le parti di pendio, la precisa demarcazione del passaggio tra una zona e l'altra non è sempre di facile determinazione. Permane dunque un certo grado di aleatorietà nella loro definizione. Tale grado di aleatorietà può risultare in una incertezza dei risultati, che il progettista deve considerare.

L'analisi di sensitività condotta considera quindi i tre principali dati di input forniti dall'utente, ossia:

- *Altezze al distacco.* Per la variazione delle altezze al distacco si fa riferimento ai valori calcolati

grazie all'analisi regionale. Si valutano gli effetti di variazioni percentuali dell'altezza tra -25% e +25% rispetto al valore calcolato in Tabella 3.

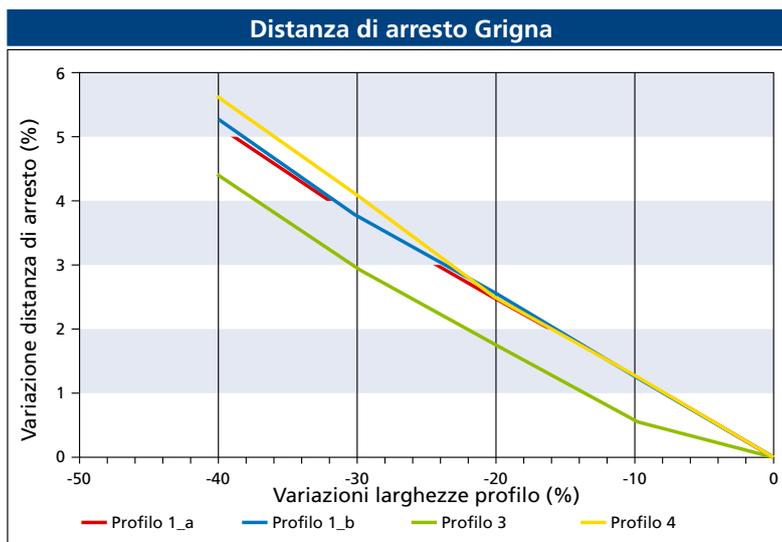
- *Larghezze di scorrimento.* Ad ogni punto dei profili scelti viene assegnato un valore di larghezza della sezione, considerato di riferimento. Per poter osservare l'influenza di tale parametro si procede al parziale restringimento dei profili definiti, variando ad ogni simulazione del 10% il valore delle larghezze dei punti lungo tutto il profilo. Il valore della larghezza della zona di distacco rimane costante in tutto il processo, così da non modificare il volume della massa di neve in movimento. Il restringimento dei profili permette di osservare l'aumento delle velocità e delle distanze di arresto. Con un allargamento dei profili, la massa di neve, avendo più spazio a disposizione, tenderebbe a rallentare. Le distanze di arresto diminuirebbero di conseguenza.

- *Parametri di attrito.* L'ultima serie di variazioni riguarda i parametri di attrito  $\mu$  ed  $\zeta$ .

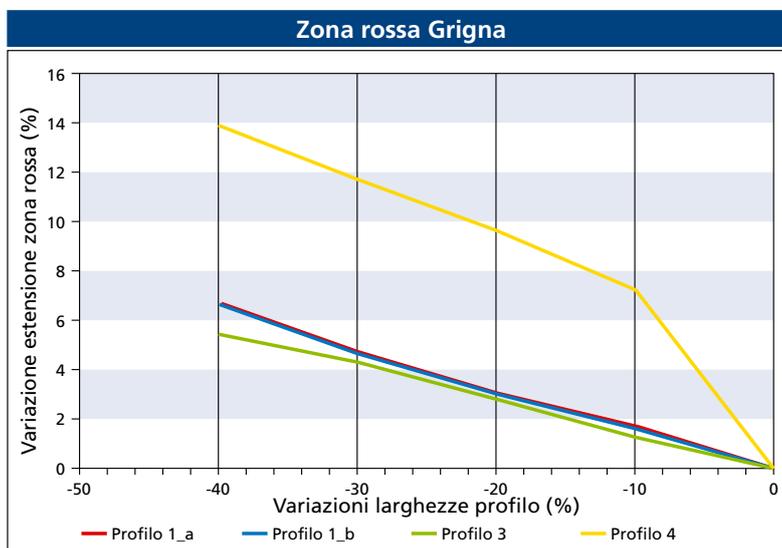
I valori dei coefficienti non possono essere "ritoccati" in maniera diretta, in quanto fissati dalla calibratura del modello. Come detto però, tali parametri dipendono dal tipo di canalizzazione del profilo. I profili individuati sono generalmente definiti come zone di versante nella parte di accumulo e distacco, mentre lo scorrimento avviene in sostanza in una zona canalizzata ed, in alcuni casi, all'interno di gullies. La scelta effettuata è quella di variare l'estensione delle parti centrali canalizzate (le più problematiche per quanto riguarda il sito della Grigna Settentrionale) modificando così in maniera indiretta la distribuzione dei valori dei coefficienti di attrito e influenzando i risultati delle

Figura 9

a) Variazioni delle distanze di arresto per i 4 profili della Grigna Settentrionale, in corrispondenza della diminuzione della larghezza di scorrimento.



b) Variazioni dell'estensione della zona rossa per i 4 profili della Grigna Settentrionale, in corrispondenza della diminuzione della larghezza di scorrimento.



distanze di arresto.

### **Grigna Settentrionale**

Per simulare gli eventi valanghivi che interessano il versante orientale della Grigna Settentrionale sono proposti quattro profili (profilo 1a, 1b, 2 e 3, Figura 6b). I profili 1a e 1b scendono a valle a partire da un punto individuato tra la posizione del Rifugio Brioschi e la Bocchetta del Nevaio e sono identificati da punti aventi la stessa posizione nella zona di distacco di versante, mentre si differenziano su due percorsi diversi nella parte centrale canalizzata. I profili 2 e 3 partono dalla zona compresa tra la cima della Grigna e la Bocchetta del Releccio e si separano nella parte centrale canalizzata. Tutti i profili restano definiti dagli stessi punti nella parte finale del percorso, dove si trova un tratto fortemente canalizzato.

La differenziazione dei percorsi nella parte centrale è studiata per poter analizzare nel modo più dettagliato possibile il comportamento della massa in movimento nei canali della Foppa del Ger e della Foppa di Masone, dove si individua un netto cambio di pendenza, con una conseguente diminuzione della velocità del flusso.

Per tutti i profili si determina, dopo una serie di simulazioni di tentativo, la giusta definizione dei parametri, che portano alla simulazione del massimo evento storico registrato. Queste simulazioni fungono da riferimento per valutare l'entità di tutte le variazioni apportate in seguito.

### **Variazione dell'altezza al distacco**

La definizione delle zone di pericolo è legata alle simulazioni di eventi con tempo di ritorno trecentennale e trentennale, atte a definire l'estensione della zona rossa. Le distanze di arresto finali sono legate ad eventi trecen-

tennali, che superano le distanze percorse da eventi più frequenti. Per studiare la variazione di distanza di arresto e del limite della zona rossa si utilizzano i valori di spessori di neve al distacco con  $T = 300$  anni.

Vengono riportati i risultati adimensionalizzati per i quattro profili della Grigna Settentrionale. In Figura 8a si osservano gli effetti di variazioni percentuali delle altezze al distacco iniziali sui valori delle distanze di arresto finali. Si osserva la presenza di un andamento generale, all'aumentare della quantità di neve considerata per il distacco, seguito da tutti i profili. Si nota come anche per un aumento prossimo al 25% le variazioni delle distanze sono comunque di qualche punto percentuale, che su un percorso di lunghezza totale di 3700 m circa corrispondono ad un massimo di 150 m. Il problema più evidente riguarda la diminuzione dello spessore della frattura; se per i primi tre profili si può osservare un unico trend, per il profilo 3 questo non avviene ed una variazione poco superiore al 15% porta ad un arretramento del punto di arresto del 9% (350 m in meno) valore che comincia ad essere significativo.

Il profilo 3 si comporta in modo anomalo anche considerando le variazioni dell'estensione della zona rossa, in Figura 8b. Le variazioni per i profili 1a e 1b hanno in pratica lo stesso andamento. Il profilo 2 si distacca, ma le variazioni massime in positivo ed in negativo hanno valori simili, attorno al 4% nel caso di aumento dello spessore del 25% e diminuzione del 10% in caso di variazioni dell'altezza del -20%. In caso di diminuzione dell'altezza della frattura si può capire che le velocità del flusso diminuiscono così come le pressioni di impatto. Il limite dei 30 KPa si sposta quin-

di a monte. Per il profilo 3 una variazione positiva dell'altezza di neve provoca una variazione della distanza di arresto paragonabile a quella degli altri profili, mentre per l'estensione della zona rossa i risultati cambiano. L'aumento della velocità dovuto alla presenza di una massa maggiore porta ad una variazione del limite della zona rossa fino a valori del 10% più a valle del punto medio. Un comportamento anomalo si riscontra anche nei casi di diminuzione dello spessore al distacco, ma con valori simili agli altri profili. Una possibile spiegazione di tali risultati è legata alla definizione del profilo 3. La scelta del percorso sulla destra orografica del canale, rispetto alle posizioni più "centrali" degli altri profili influenza il movimen-



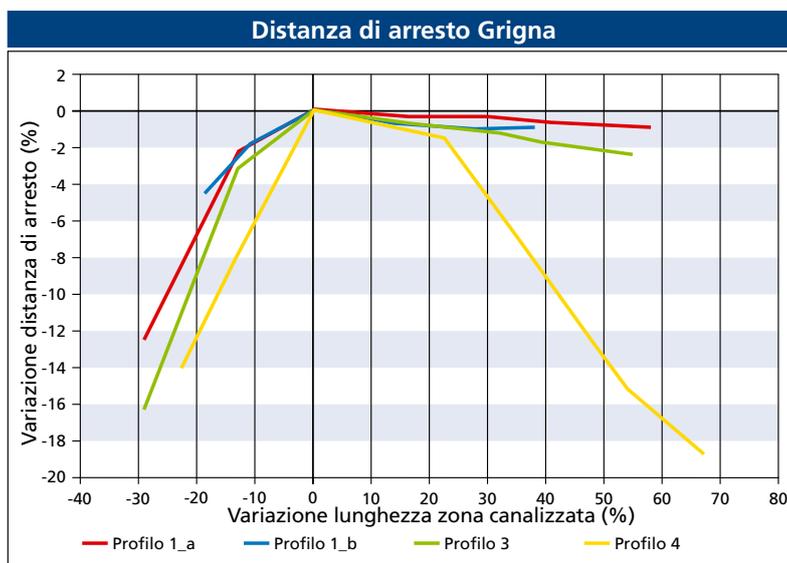
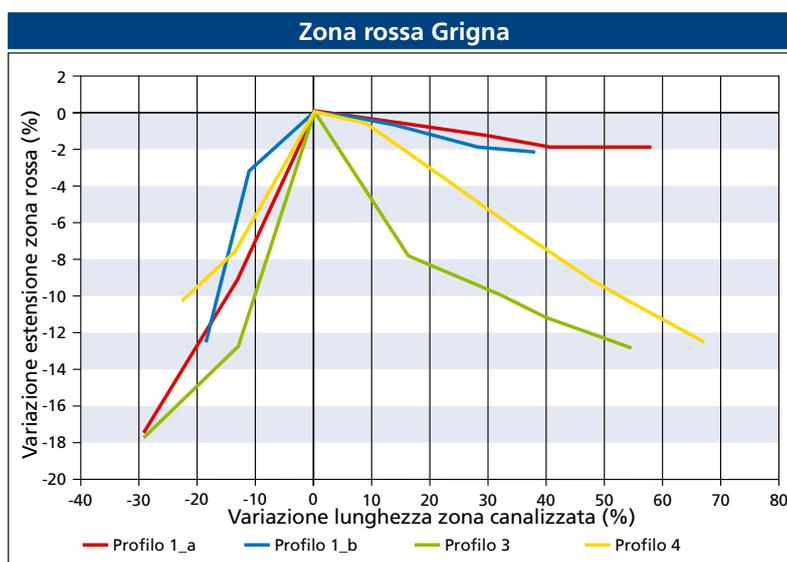


Figura 10

a) Variazione della distanza di arresto finale per i 4 profili della Grigna Settentrionale in funzione della variazione dell'estensione della zona canalizzata.



b) Variazione dell'estensione della zona rossa per i 4 profili della Grigna Settentrionale in funzione della variazione dell'estensione della zona canalizzata.

to del flusso di neve. Nella parte iniziale del canale centrale è presente una zona pianeggiante, adiacente al cambio di pendenza tra zona di distacco e zona di scorrimento. In caso di altezze al distacco minime la massa in movimento non raggiunge una velocità sufficiente ad evitare l'influenza della parte piana, che rallenta notevolmente il flusso transitante. Questo particolare andamento del profilo non è presente negli altri percorsi, e si identifica come la causa dei risultati anomali legati alle simulazioni del profilo 3.

#### **Variazione della larghezza del profilo**

La larghezza del profilo di scorrimento è definita dall'utente. In particolare la scelta qui adottata

è quella di utilizzare i risultati delle precedenti simulazioni bidimensionali. La possibilità di cadere in errore utilizzando larghezze non precise spinge a studiare il campo delle variazioni delle distanze di arresto, in caso si inseriscano nel modello valori di larghezze errati. In Figura 9a si possono trovare i risultati delle simulazioni effettuate diminuendo del 10% ad ogni passaggio le larghezze dei profili iniziali. I quattro profili seguono lo stesso andamento per quanto riguarda la risposta della variazione della distanza di arresto finale. Una riduzione del 40% delle larghezze iniziali di scorrimento porta ad un'estensione massima dell'ordine del 5-6% delle distanze di arresto, ovvero circa 200 m

rispetto ad un valore iniziale di 3700 m. Un restringimento delle sezioni fa aumentare le velocità di scorrimento, e quindi anche le pressioni di impatto. Si ridefinisce quindi l'estensione della zona di pericolo rossa, come si può vedere in Figura 9b.

Anche in questo caso il profilo 3 si distacca negli output dagli altri profili. Ad un restringimento del 10%, si accompagna una variazione del 7%, mentre per tutti gli altri profili si osservano variazioni più contenute. Riprendendo le osservazioni fatte in precedenza, si suppone che il restringimento del profilo porti al manifestarsi di quelle velocità di scorrimento che permettono di "superare" l'ostacolo dovuto alla parte pianeggiante situata tra 1700 e 1600 metri di quota.

È interessante notare come l'estensione della zona rossa vari in modo notevole. Sicuramente le velocità raggiunte dopo il restringimento del profilo permettono di portare l'estensione della zona rossa al livello di quelle definite dal calcolo basato sugli altri profili, ovviamente con una notevole variazione iniziale, essendo calcolata rispetto al valore di riferimento del profilo 3 stesso. Si nota infatti dal grafico di Figura 9b come dopo il primo "salto" ad un valore del 7%, l'andamento delle variazioni del profilo 3 cresca parallelamente agli altri profili.

Riferendosi invece alle distanze di arresto finali, il valore non può comunque variare come l'estensione della zona rossa, visto che la topografia del terreno (nella zona di arresto e deposito le pendenze sono ormai ridotte a dei valori attorno ai 10°) e le caratteristiche di scabrezza (attrito) portano ad arrestare il flusso in prossimità dell'*endmark* fissato, dopo aver percorso una distanza di 3700 metri.

### Variatione dei coefficienti di attrito

Questo tipo di variazione non può essere applicata direttamente sui valori assunti dai coefficienti di attrito  $\mu$  ed  $\zeta$ , che sono fissati dalla calibrazione del modello. I parametri di attrito dipendono però da diversi fattori, quali la dimensione della valanga, la quota della zona interessata, il tempo di ritorno assegnato, e soprattutto la caratterizzazione del livello di canalizzazione del profilo. Quest'ultimo è il legame che può essere sfruttato per lo scopo prefissato. I quattro profili della Grigna sono tutti definiti dalla stessa successione di tratti di canalizzazione, aventi estensioni simili. La parte di distacco è per tutti definita come di versante, dal cambio di pendenza inizia una parte canalizzata che termina per tutti i profili dopo la netta curva a destra all'imbocco dello stretto canale che scende verso valle. In questo punto inizia la parte definita fortemente canalizzata, o gully, che resta tale fino alla zona di arresto ad una quota di 1000 m s.l.m.

La definizione del grado di canalizzazione, pur agevolata tramite delle linee guida, non è sempre univoca, data la difficoltà di individuare un netto passaggio tra le diverse caratteristiche topografiche.

Misurando dal profilo la lunghezza in metri della zona centrale canalizzata, legata a determinati valori di  $\mu$  ed  $\zeta$ , si determina il valore di riferimento, rispetto al quale in seguito si studiano le variazioni di estensione.

Aumentando e diminuendo la lunghezza del tratto canalizzato centrale, si ha naturalmente una nuova definizione dei valori dei coefficienti di attrito, che influisce sugli output della simulazione.

Dato che la definizione delle caratteristiche topografiche deve

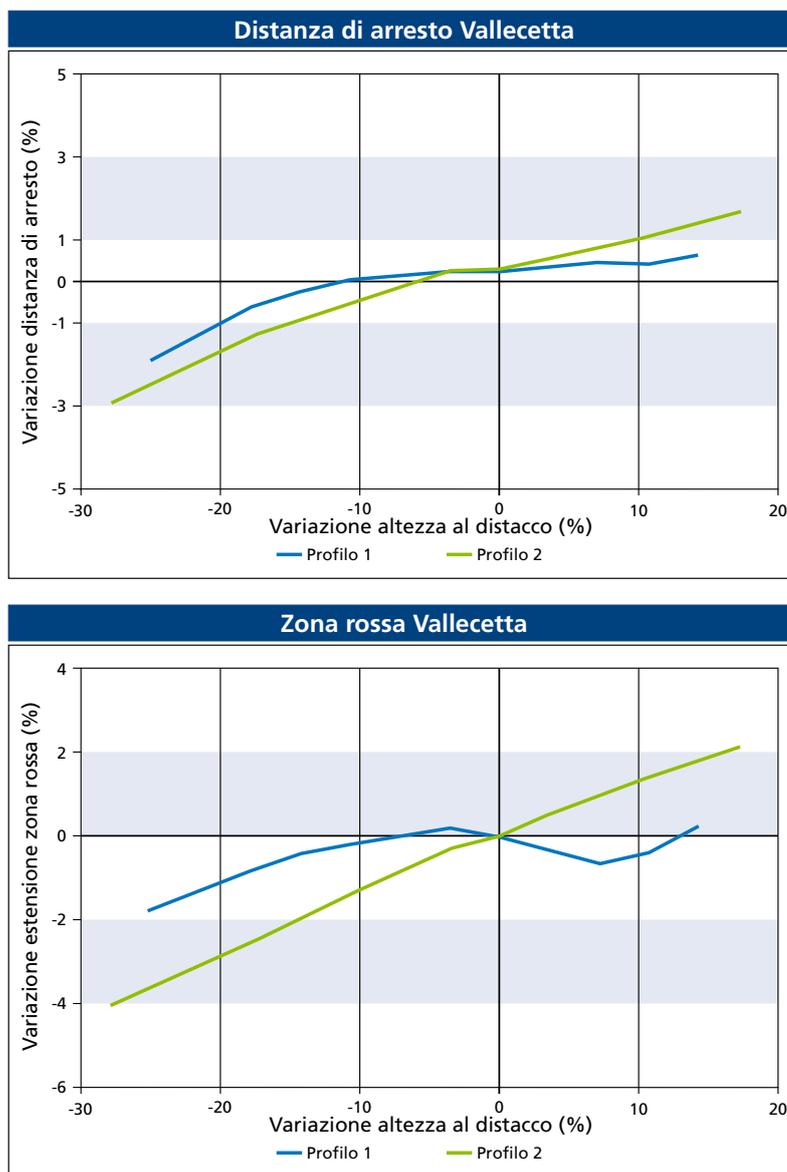


Figura 11

a) Effetto della variazione dell'altezza al distacco sulle distanze di arresto dei 2 profili del sito valanghivo del Monte Vallecetta.

b) Variazione dell'estensione della zona rossa in caso di variazione dell'altezza al distacco per i 2 profili del Monte Vallecetta.

essere il più possibile realistica, non è possibile estendere semplicemente a tutto il profilo la definizione di canalizzato. Per la Grigna si individuano due possibilità, ossia estendere la definizione di canalizzazione a monte, a scapito della parte di versante oppure accorciare la zona canalizzata a valle, definendo una parte fortemente canalizzata più estesa. Questo è possibile in quanto osservando la topografia (Figura 6a) ci si rende conto di quanto sia variabile la definizione della parte centrale di scorrimento dei profili, la zona della Foppa del Ger e della Foppa di Masone, che formano un ampio canale, definibile dal punto di vista della caratterizzazione di

Aval-1D in differenti modi.

Estendere la canalizzazione sostituendo alla definizione di versante una parte canalizzata verso monte, nel profilo reale non provoca grandi variazioni della distanza di arresto (in Figura 10a). Considerando i risultati dei vari profili, l'unico dei quattro che presenta un andamento differente è il profilo 3, che reagisce in maniera estrema alla variazione. Le condizioni particolari del profilo 3 unitamente all'aumento del valore assegnato al parametro di attrito  $\mu$  portano ad un aumento della resistenza al fondo, che quindi può spiegare il fenomeno di arresto anticipato. Di tale influenza risentono in maniera minima gli altri tre

profili, per le scelte effettuate nel posizionamento dei punti topografici. Andando invece a diminuire l'estensione della zona canalizzata centrale si ottengono delle variazioni simili per tutti i profili. Si ottengono dei valori oscillanti tra il -12% e il -16% della distanza di arresto.

Come detto in precedenza, si può interpretare questo fatto con il contemporaneo aumento dell'estensione della parte fortemente canalizzata e il conseguente aumento del valore di  $\mu$ . In Figura 10b è riportato il grafico delle variazioni dell'estensione della zona rossa per i quattro profili. L'andamento generale osservato sia in caso di aumento che di diminuzione della lunghezza della zona canalizzata

porta ad una diminuzione dell'estensione della zona rossa. Si nota una maggiore similitudine di comportamento tra le coppie di profili paralleli nella parte di versante ed il profilo 3 non è particolarmente distante dal profilo 2, con il quale ha in comune la prima parte di percorso. In questo caso entrambi i profili tendono ad ottenere distanze di arresto del 10% più corte se si raddoppia l'estensione della parte canalizzata verso monte, mentre una variazione del 30% di quest'ultima porta ad una diminuzione dell'estensione del limite dei 30 KPa del 18%.

#### Monte Vallecetta

Le simulazioni della valanga del Monte Vallecetta sfruttano due profili (identificati come profilo 1

e profilo 2) che, a differenza dei profili della Grigna, partono da zone diverse e si sovrappongono in un secondo momento nella parte di percorso fortemente canalizzata, fino alla zona di espansione a valle, al termine del canale del Rio Vallecetta e fino al Fiume Adda. Anche per il Monte Vallecetta sono necessarie una serie di simulazioni "preliminari" di riferimento, per il calcolo delle variazioni degli output nei calcoli successivi.

#### Variazione dell'altezza al distacco

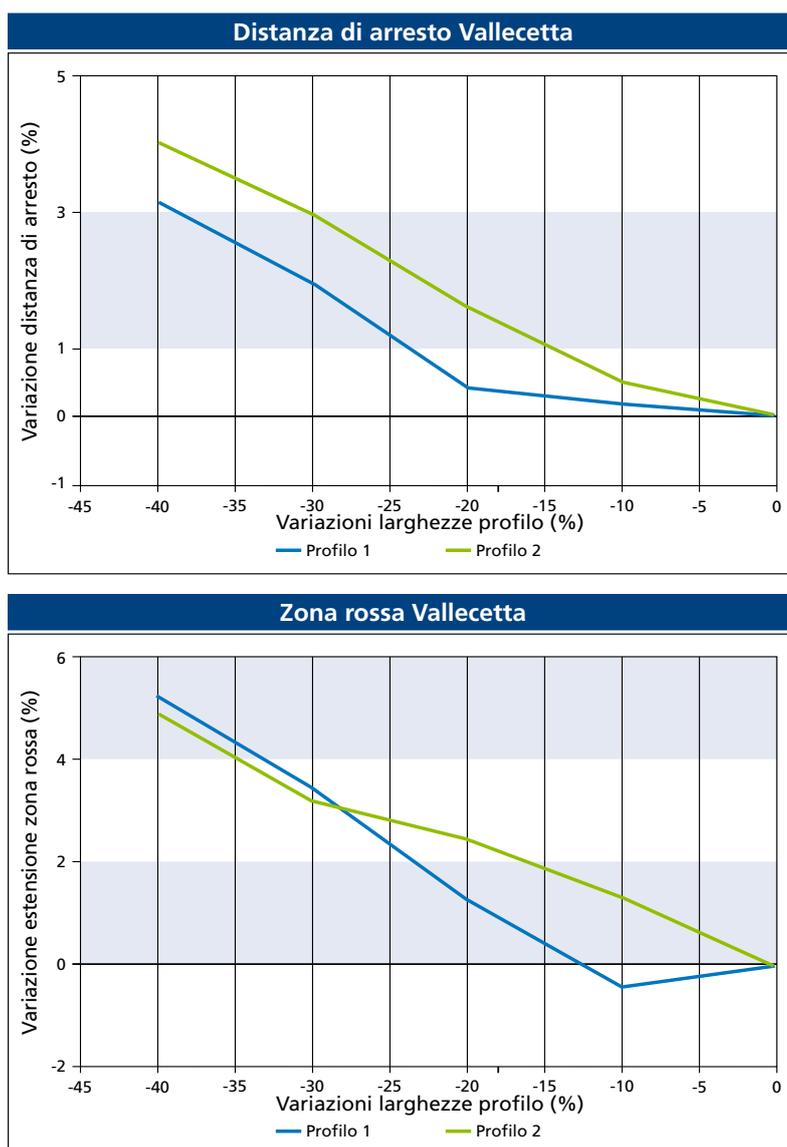
Pur avendo i due profili zone di distacco differenti per posizione e quota, i risultati delle due serie di simulazioni sono riportati sullo stesso grafico in Figura 11a, in quanto si può riscontrare un trend comune negli andamenti. I valori assoluti delle variazioni sono minimi. Un aumento dell'altezza al distacco del 20% porta a variazioni non superiori al 2%, praticamente ininfluenti su un tracciato come quello del profilo 1, lungo ben 4500 m. La conformazione del profilo influenza i risultati di questa analisi di sensitività. La lunghezza notevole, il forte dislivello totale ed il lungo tratto di canale stretto costringono la massa distaccata ad un preciso percorso per la discesa a valle, lasciando poche possibilità di dispersione laterale.

Il profilo 1 ha un percorso complesso, ed è difficile stabilire in che modo la topografia influenzi gli output. Dalla zona di distacco a 3100 m s.l.m. la massa di neve scende a valle seguendo un'ampia curva verso sinistra; arrivata ad una quota di 2500 m incontra un salto di 100 m di dislivello per poi proseguire fino all'imbocco del canale. Seguendo il percorso del canale giunge fino a valle, dove si trova la zona di arresto, definita da dove il canale si allarga in prossimi-

Figura 12

a) Variazione delle distanze di arresto in dipendenza dalle variazioni della larghezza del profilo, Monte Vallecetta.

b) Variazione dell'estensione della zona rossa in funzione della variazione della larghezza del profilo, Monte Vallecetta.



mità di Piazza. Il profilo 2 ha un percorso più lineare e non deve affrontare variazioni di pendenza improvvise particolari. Questo può spiegare l'andamento regolare delle variazioni, sia per quanto riguarda la distanza di arresto che per l'estensione della zona rossa. In Figura 11b si nota appunto il legame decisamente lineare tra variazione dell'altezza al distacco e variazione dell'estensione della zona rossa. Diverso è il comportamento del profilo 1 che, se per la variazione delle distanze di arresto finali si comporta in modo paragonabile al profilo 2, per la variazione dell'estensione della zona rossa reagisce con dei risultati oscillanti. Per un aumento dell'altezza al distacco si trova una diminuzione dell'estensione della zona rossa, salvo poi risalire in seguito ad altri aumenti dello spessore. La banda di valori in cui sono incluse le variazioni va da 1 a 5 punti percentuali. Le variazioni reali si possono quindi riportare ad un valore vicino ai 100-150 m, che basterebbero per creare problemi alla Strada Statale 38, che percorre la valle dell'Adda (si veda la Figura 2).

#### **Variazione della larghezza del profilo**

Come per il caso della valanga della Grigna si procede alle simulazioni che comportano la diminuzione progressiva delle larghezze del profilo. Dalla larghezza iniziale si arriva a sezioni ristrette del 40%. Questo cambiamento provoca l'aumento delle velocità e il conseguente avanzamento verso valle del limite della distanza di arresto. In Figura 12a si notano variazioni massime del 4% che portano la massa ad arrestarsi addirittura sul versante opposto della vallata rispetto alla fine del canale, oltrepassando la Statale e il letto dell'Adda. I due profili hanno

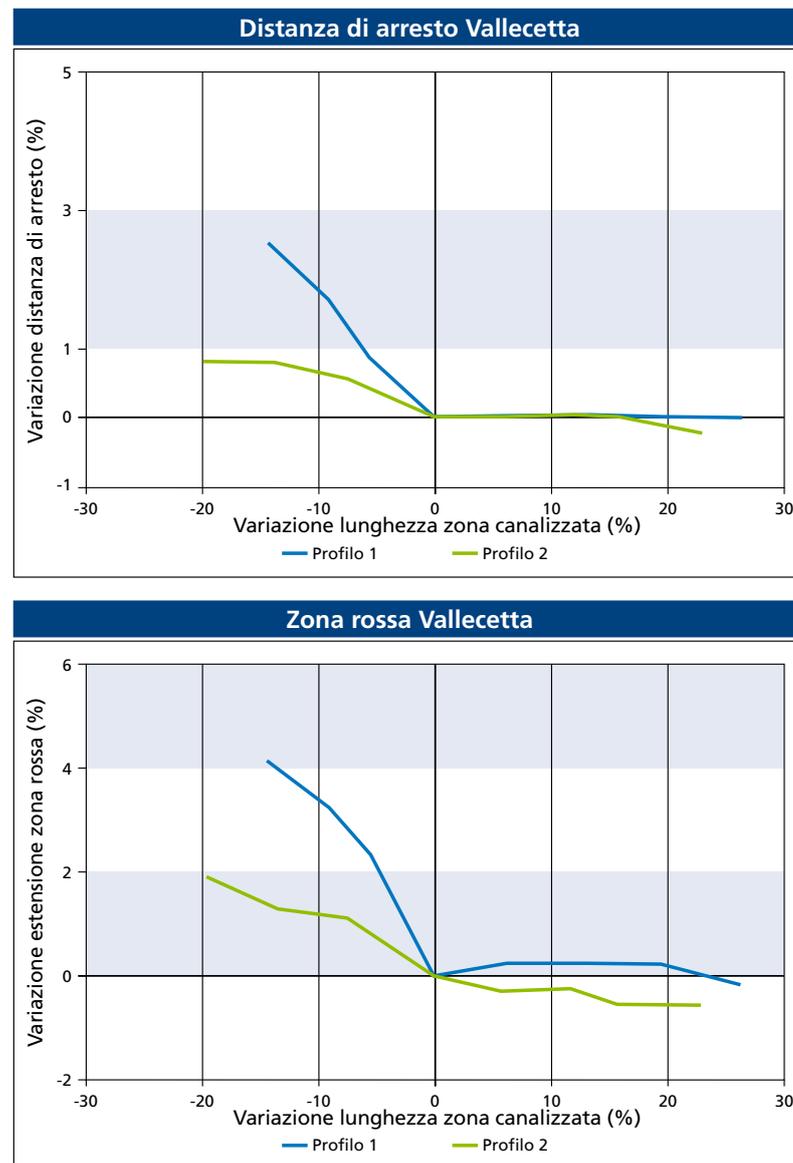


Figura 13

a) Variazione della distanza di arresto in funzione della variazione dei parametri di attrito, Monte Vallecetta.

b) Variazione dell'estensione della zona rossa, in dipendenza della variazione dei parametri di attrito, Monte Vallecetta.

comportamenti simili e arrivano ad una variazione massima paragonabile.

Un problema di maggiore entità si riscontra invece per l'estensione della zona rossa. Il comportamento del profilo 1 è difficile da interpretare. Se la distanza di arresto tende naturalmente ad aumentare all'aumento delle velocità, lo stesso dovrebbe succedere anche per la zona rossa e la sua estensione. Il grafico di Figura 12b invece riporta un'estensione della zona rossa minore di quella di partenza, anche se il profilo viene ristretto del 10%. L'unica spiegazione di tale comportamento, è legata alle particolari caratteristiche topografiche del profilo scelto come

rappresentativo. La complessità del profilo 1 può quindi essere ritenuta un fattore influente sugli output delle simulazioni.

#### **Variazione dei coefficienti di attrito**

I due profili scelti sono completamente differenti nella parte iniziale del percorso, e se nel caso dei quattro profili della Grigna è stato possibile impostare una definizione unica del grado di canalizzazione, una scelta del genere non è applicabile ora. Si sceglie quindi una diversa definizione iniziale per i due profili. Il profilo 1 è definito in successione da una parte di versante, una parte canalizzata e termina con un'ultima parte ancora di versante. La zona di distacco del

profilo 2 è sempre definita come di versante, ma la parte centrale è fortemente canalizzata, per arrivare infine nella zona di arresto che rimane descritta come canalizzata. Questo tipo di scelta è forzata, per arrivare a delle simulazioni che si arrestino in prossimità dell'*endmark* storico. Pur esistendo queste differenze, si sceglie di rappresentare i risultati adimensionalizzati sugli stessi grafici in Figura 13, dove si possono paragonare gli andamenti simili delle risposte dei due profili.

Pur essendo diverse le definizioni di canalizzazione, la scelta consiste ancora nel variare l'estensione della zona centrale (canalizzata o gully) aumentando la lunghezza a monte o diminuendo quella a valle. Questo assecondando le possibilità imposte dalla topografia, ovvero sfruttando l'incertezza che può esistere nel definire i limiti di una zona di versante o di una zona canalizzata.

In Figura 13a è riportato l'andamento della variazione dei dati

di distanza di arresto per una variazione della definizione di canalizzazione della parte centrale. Un'estensione a monte della canalizzazione (o forte canalizzazione) non provoca variazioni nella distanza di arresto, e porta ad averne minime in riferimento all'estensione della zona rossa (Figura 13b).

Più forti variazioni si hanno in caso di diminuzione dell'estensione a valle nel profilo reale. Nel profilo 1 ciò significa un aumento nella parte di versante finale con una variazione del valore di  $\mu$  che diminuendo determina un valore maggiore di velocità e quindi porta ad un'estensione della zona di arresto. Si ha una variazione massima del 3% rispetto al dato iniziale di distanza di arresto e 4% per l'estensione della zona rossa. Nel profilo 2 invece, una diminuzione della lunghezza della parte centrale comporta un aumento dell'estensione a monte della parte canalizzata, non più di versante. La variazione dei parametri conseguente è in valore assoluto minore della

precedente. Si osserva quindi uno spostamento verso valle della distanza di arresto e del limite della zona rossa, ma più contenuto (variazione dell'1% e del 2%). In conclusione, si capisce che la scelta del profilo 1 ha portato a dei risultati ambigui, non facilmente interpretabili. Ciò anche se inizialmente il profilo sembrava ben rappresentare il percorso massimo della valanga, partendo dal punto più alto del sito giungendo fino a valle.

Analizzando le possibili cause di tali risultati si può pensare alla lunghezza notevole del percorso, dal pendio del Monte Vallecetta fino alla valle sottostante, che copre un dislivello notevole. Si osserva inoltre la presenza di un vero e proprio salto immediatamente prima dell'imbocco del canale, unitamente al lungo tratto da percorrere all'interno del canale stesso. La presenza del canale del Rio Vallecetta, che si estende da quota di 2100 m s.l.m. fino alla quota di circa 1200 m s.l.m. lascia poco spazio alle alternative, tutti i tentativi da effettuare riguardano la definizione del profilo prima dell'imbocco del canale che porta poi il flusso fino a valle. Si può pensare quindi di scegliere un numero di profili differenti che partano dalla grossa area di distacco compresa tra il Vallecetta e la Cima Bianca, ma che poi si ritrovano a scorrere paralleli nel lungo canale che arriva a valle.

## CONCLUSIONI

Lo studio eseguito porta ad alcune interessanti conclusioni. In primo luogo, l'approccio regionale permette una definizione rigorosa, in termini statistici, delle altezze di neve al distacco per periodi di ritorno elevati, in generale non ottenibile tramite una valutazione basata su dati locali.



La definizione di un'unica serie di valori del fattore di scala regionale sembra un passaggio utile per arrivare ad una corretta definizione del valore di altezza di neve al distacco, che influenza il calcolo delle distanze di arresto e delle pressioni di impatto della valanga.

Si può ipotizzare un aumento dell'affidabilità di questa analisi inglobando in futuro un numero crescente di informazioni raccolte sul terreno, portando la serie di anni equivalenti ad un valore più ampio. Per effettuare un paragone con un'altra realtà si può pensare alla differenza esistente tra la serie di oltre 60 anni di dati rilevati dalle stazioni disponibile in Svizzera e la serie di soli 10 anni o poco più di rilevamenti disponibile in Lombardia. L'introduzione di un modello di calcolo bidimensionale, pur semplificato, ed il relativo apporto legato alla determinazione dei profili preferenziali di scorrimento e alle larghezze si rivelano di grande interesse nell'analisi.

Il modello Aval-1D, pur essendo tarato con dati di topografia e di precipitazione svizzeri, si adatta sufficientemente bene alle caratteristiche dei siti italiani utilizzati come casi studio, purché siano definiti correttamente gli input di calcolo. Esiste un dubbio legato alla possibilità effettiva di utilizzare il modello monodimensionale per simulare eventi valanghivi in siti particolarmente complessi dal punto di vista topografico e quindi difficilmente rappresentabili con un singolo profilo monodimensionale.

Si è mostrato inoltre come i risultati dell'applicazione di Aval-1D siano in generale sensibili alla incertezza sui dati di input.

Dopo aver effettuato un certo numero di simulazioni con variazioni dei differenti parametri di input, risulta evidente come

incertezze nei parametri di input possono propagarsi nella definizione delle zone di rischio.

La calibrazione del modello Aval-1D elimina in partenza la possibilità di inserire valori dei coefficienti completamente errati, ma sorge tuttavia il problema della definizione corretta degli input necessari.

Per i profili della Grigna Settentrionale ad esempio si osserva come la variazione dovuta ad una scelta errata delle larghezze sia superiore a quelle dovute ad una scelta non corretta del valore di altezza al distacco. Si sottolinea quindi l'importanza della scelta delle larghezze delle sezioni di scorrimento, arbitraria da parte dell'utente, in quanto l'influenza del dato sui risultati delle simulazioni è notevole. La parte di scorrimento dei profili della Grigna ha un grado di canalizzazione particolarmente difficile da definire. Ipoteticamente, la topografia del terreno consente di associare al tratto canalizzato diverse lunghezze con variazioni anche del 25%. Definizioni diverse portano a differenze massime nelle distanze di arresto di 400-600 metri. Se per la determinazione delle altezze al distacco è stato proposto un metodo di stima affidabile in senso statistico, per la scelta degli altri parametri la decisione rimane legata all'esperienza dell'utente, che con le sue scelte può condizionare l'esito dell'analisi.

Sulla base dei risultati qui mostrati sembra opportuno suggerire un'analisi della robustezza delle soluzioni rispetto ai dati di ingresso. L'approccio qui proposto suggerisce una metodologia per testare la sensitività dei risultati all'inevitabile grado di aleatorietà nelle variabili di input, che il progettista può utilizzare in fase di definizione delle aree a rischio valanghivo.

## RINGRAZIAMENTI

Lo studio qui presentato è stato condotto nell'ambito dello svolgimento della tesi di Laurea dell'Ing. Riboni, svolta sotto la supervisione del Prof. Renzo Rosso, in collaborazione tra il Dip. DIAR del Politecnico di Milano e l'Istituto Federale per lo Studio della Neve e delle Valanghe di Davos, nella persona della Dottoressa Betty Sovilla. Si ringrazia qui il personale dell'Istituto Federale di Davos, in particolare Urs Gruber, per la collaborazione fornita nell'utilizzo del modello bidimensionale.

## BIBLIOGRAFIA

- Benson, M.A., (1962), Factors influencing the occurrence of floods in a humid region of diverse terrain, U.S. Geological Survey Water Supply Pap., 1580B.
- Bocchiola, D., De Michele, C., Rosso, R., (2003), Review of recent advances in index flood estimation, Hydrology and Earth System Sciences, vol 7 (3), 283-296.
- Bocchiola, D., De Michele, C., Rosso, R., (2004), L'applicazione della legge generalizzata del valore estremo GEV all'analisi regionale delle piene in Italia, L'ACQUA, 1, 43-62.
- Christen, M., Bartelt, P., Gruber, U., Filaferro, E., (2002), Aval-1D: Un programma di dinamica delle valanghe per l'uso comune, Manuale di utilizzo di Aval-1D, SLF, Davos.
- Committee on Techniques for Estimating Probabilities of Extreme Floods, (1988), Techniques for estimating probabilities of extreme floods: methods and recommended research, National Academy Press, Washington, D.C.
- De Michele, C., Rosso, R., Uncertainty assessment of Regionalized Flood Frequency Estimates, J. Of Hydrol. Engng, ASCE, 6(6), 453-459, 2001.
- Kottegoda, N.T., Rosso, R., (1997), Statistics, probability and reliability for civil and environmental engineers, Par 6.2, Mc-Graw-Hill Publishing Company, New York.
- Liusso, M., Invernizzi, T., (1997), Studio del sito valanghivo della Grigna Settentrionale, Tesina di Laurea, Facoltà di Ingegneria, Politecnico di Milano.
- Martinelli, O., Modena, D., Bocchiola, D., Rosso, R., (2004), La risorsa idrica nivale: La valutazione sulla montagna della Lombardia, Neve e Valanghe, 51, 44-57.
- Gianella, A.M., (1996), Le zone esposte al pericolo valanghe L'area del Monte Vallecetta nel bormiese, Tesi di Laurea, Corso di studi in scienze geologiche, Università degli studi di Milano.
- Riboni, A., (2004), Uno studio sulla mappatura del pericolo valanghe nelle alpi lombarde, Tesi di Laurea, Mat. 638155, Politecnico di Milano.