Università degli Studi di Udine
Università degli Studi di Trieste

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN SCIENZE E TECNOLOGIE
PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

PROVA FINALE

La pericolosità da valanga calcolata e visualizzata

Un modello numerico-geografico

Candidato:
Luca Iacolettig

Relatore:
prof. Federico Cazorzi

Correlatori:
dr. Betty Sovilla, Ph.D.
sig. Daniele Moro

Anno Accademico 2015–2016

La pericolosità da valanga calcolata e visualizzata. Un modello numerico-geografico.
Tesi di Laurea Magistrale
Copyright © 2016–2017, Luca Iacolettig

Università degli Studi di Udine, Università degli Studi di Trieste
Corso di Laurea Magistrale in Scienze e Tecnologie per l'Ambiente e il Territorio
Curriculum Gestione del Territorio

Quest'opera è stata rilasciata con licenza Creative Commons Attribuzione 3.0 Italia.
Per leggere una copia della licenza visita il sito web
http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/it/

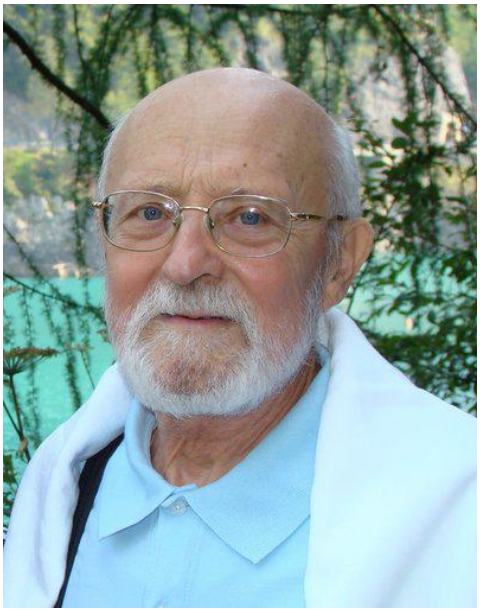
Questo scritto è stato compilato con LaTeX su Windows rielaborando un *template* di Lorenzo Pantieri (www.lorenzopantieri.net).

I nomi commerciali, i loghi e i marchi registrati menzionati appartengono ai rispettivi proprietari. Le citazioni da altre opere che, per errore, fossero prive di riferimento esplicito appartengono ai rispettivi autori.

Citazione: Iacolettig, Luca [2017], *La pericolosità da valanga calcolata e visualizzata*, Corso di Laurea Magistrale in Scienze e Tecnologie per l'Ambiente e il Territorio, Tesi di Laurea Magistrale, Università degli Studi di Udine, Università degli Studi di Trieste, anno accademico 2015-2016, p. 134

Contatto autore:
✉ luca@iacolettig.it

Alla cara memoria
del M° Claudio Basso



1937–2009

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato reso possibile grazie alle molte persone che hanno contribuito fattivamente in modi e circostanze diversi, ma ogni eventuale imprecisione od errore è imputabile solamente al sottoscritto.

Prima di tutti, ringrazio la dott.ssa Betty Sovilla del wsl — *Institut für Schnee- und Lawinenforschung* slf di Davos per aver preso a cuore questa ricerca, per i preziosi consigli e l'inestimabile aiuto: a lei devo la maggior parte di questo lavoro. Ringrazio il prof. Giovanni Fonseca, che ha aiutato con solerzia nelle parti matematico-statistiche della tesi. Grazie al prof. Nicola Casagli, al dott. Massimiliano Nocentini ed al dott. Pinuccio d'Aquila per varie informazioni e materiali sulla valanga di Rigopiano ed a Renato Palmieri del soccorso alpino di Cave del Predil per le informazioni sulla valanga del Medon (Sella Nevea). Un caloroso ringraziamento va a Daniele Moro, Gabriele Amadori, Luciano Lizzero e Sergio Buricelli dell'ufficio valanghe di Udine, per avermi seguito nel tirocinio, ponendo le basi di questo lavoro, e per la revisione di più parti dello scritto. Ringrazio il dott. Igor Chiambretti, il dott. Anselmo Cagnati, Flavio Berbenni e Alfredo Praolini (aineva), dr. Jürg Schweizer e Andreas Stoffel (slf) e Patrick Nairz (*Lawinenwarndienst Tirol*) per molte e utili informazioni e riferimenti bibliografici. Mio fratello Tommaso ha aiutato in modo sostanziale nella fase più prettamente informatica della tesi: di questo lo ringrazio, conscio di essergliene debitore. Un aiuto indiretto, ma fondamentale, nell'uso di LaTeX è venuto dal dott. Lorenzo Pantieri, l'autore del *template* alla base della composizione tipografica di questa tesi di laurea. Ringrazio sentitamente tutti coloro che hanno rivisto in più parti il manoscritto ed in particolare, oltre ai miei cari, gli amici e colleghi Federico, Claudia, Laura e Claudio. Domando perdono a coloro dei quali non dovessi ricordarmi: a tutti esprimo la mia sincera gratitudine.

Al termine degli studi universitari, un affettuoso pensiero va alla persona cui devo probabilmente la maggior parte della mia educazione: il maestro Claudio Basso, per me semplicemente *nonno*. Questa tesi è dedicata alla sua imperitura memoria.

Borgnano, 10 marzo 2017 L. I.

Sommario

I bollettini valanghe informano sul pericolo di valanghe in maniera qualitativa, iconografica e testuale, senza un'evidenza geografica dettagliata delle zone realmente pericolose. Nel tentativo di superare questa limitazione, è stato sviluppato un modello numerico per visualizzare e quantificare automaticamente le zone pericolose previste dagli esperti, offrendo loro un supporto oggettivo. Il modello, infatti, calcola la predisposizione al distacco di valanghe a lastroni secondo le condizioni nivometeorologiche del momento. I parametri del modello, frutto dell'estensione di un algoritmo esistente, sono stati determinati analizzando i bollettini e mediante un'indagine rivolta a professionisti del settore. Sono stati integrati la stabilità del manto nevoso, le esposizioni e le quote ritenute più pericolose, e una maschera della copertura nevosa dai limiti variabili; inoltre, il modello calcola la frazione dei pendii ripidi più pericolosi in un'area. I casi di studio riportati illustrano le differenze rispetto al modello originale. Non sono tuttavia considerate le valanghe a debole coesione, né lo studio reologico della dinamica delle valanghe: in futuro, la ricerca dovrebbe integrare questi fattori e, migliorati i parametri ed effettuate più simulazioni, il modello andrà validato per renderlo pienamente operativo.

Parole chiave: valanga, sistemi informativi geografici (GIS), pericolosità, manto nevoso, modellazione

Abstract

Avalanche bulletins use graphics, text and icons in order to (qualitatively) inform about avalanche hazard, but it lacks detailed geographical evidence that localises the truly dangerous areas. Attempting to overcome this limitation, a numerical model was developed to support avalanche forecasters: it automatically visualises and quantifies dangerous areas, thus providing objective data, by calculating slab avalanches release propensity according to current snow and weather conditions. The model extends an existing algorithm; its parameters were determined by analising avalanche bulletins and through a survey addressed to professionals. Several parameters have been integrated, such as snowpack stability, dangerous aspects and altitudes, and a snow cover mask with changeable boundaries; furthermore, the model calculates the amount of dangerous steep slopes in a given area. Some case studies show the differences between the original model and the new one. However, this model takes into account neither loose snow avalanches, nor avalanches dynamic. Hence, future research should focus on the coupling of these factors with the algorithm. By improving the parameters, performing further simulations and through a final validation, the model could be fully applied.

Keywords: avalanche, Geographic Information Systems (GIS), hazardness, snowpack, modeling

Zusammenfassung

Lawinenlageberichte (Lawinenbulletins) unterrichten über Lawinengefahr nach qualitativer Art mit Ikonen und Text; trotzdem ist es nicht offenbar, wo die wirkliche gefährliche Orte liegen. Dafür wurde ein numerisches Modell entwickelt, um die Lawinenwarner zu helfen. Es visualisiert und quantifiziert automatisch die gefährliche Orte und liefert objektive Daten: das Modell berechnet die Auslösungsveranlagung der Schneebrettlawinen nach die zeitgemäße Schnee- und Wetterbedingungen. Die Parameter des Modells, das sich über ein bestehende Algorithmus gründet, wurden durch eine Analyse der Berichte (Bulletins) und eine Untersuchung zu Schnee- und Lawinenprofis bestimmt. Neue Parameter wurden integriert, wie Schneedeckestabilität, gefährliche Hangexpositionen und Höhenlagen, und veränderliche Schneegrenze; außerdem, das Modell berechnet wieviele steile Gebiete gefährlich sind. Einige Fallstudien zeigen die Unterschiede zwischen das originale und das neue Modell. Dieses Modell zieht jedoch in Betracht weder Lockerschneelawinen, noch Lawinendynamik: die Forschung sollte in Zukunft diese Faktoren integrieren. Wenn die Parameter verbessert werden und nach zahlreiche Simulationen, wird man müßen, das Modell validiern, um es ganz gültig zu machen.

Schlüsselwörter: Lawine, geographisches Informationssysteme (GIS), Gefahr, Schneedecke, Modelierung

Indice

Acronimi principali viii

Elenco dei simboli ix

1 Introduzione 1
- 1.1 Motivazione . . . 1
- 1.2 Stato dell'arte . . . 2
  - 1.2.1 Valanghe . . . 2
  - 1.2.2 Bollettino valanghe . . . 8
  - 1.2.3 Modelli esistenti . . . 12
- 1.3 Obiettivo . . . 14

2 Metodi e dati 15
- 2.1 Indagini esplorative . . . 15
- 2.2 Logica fuzzy . . . 16
  - 2.2.1 Applicazione a modelli naturali . . . 18
- 2.3 Modello di base . . . 18
  - 2.3.1 Parametri . . . 19
  - 2.3.2 Modellazione con logica *fuzzy* . . . 24
- 2.4 Dati utilizzati . . . 26

3 Risultati 29
- 3.1 Fattori importanti nelle previsioni . . . 29
- 3.2 Modello . . . 33
  - 3.2.1 Visione d'insieme . . . 33
  - 3.2.2 Parametri . . . 35
  - 3.2.3 Correzione delle PRA . . . 42
  - 3.2.4 Pendii ripidi pericolosi . . . 43
  - 3.2.5 Esempio d'uso . . . 47
- 3.3 Casi di studio e validazione . . . 52
  - 3.3.1 Rigopiano . . . 54
  - 3.3.2 Incidente del Medon . . . 58

4 Discussione 62
- 4.1 Modello . . . 62
  - 4.1.1 Differenze col modello originale . . . 62
  - 4.1.2 Parametri . . . 63

4.1.3 Pendii ripidi pericolosi 66
4.1.4 Altri limiti 68
4.2 Validazione 69

5 Conclusioni **71**

A Approfondimenti **73**
A.1 Valanghe: fattori per il distacco 73
A.2 Bollettini valanghe: grado di pericolo 83
A.2.1 Fattori 83
A.2.2 Determinazione e validazione del grado di pericolo 84
A.2.3 Opportunità e limiti 90

B Codice **92**
B.1 Algoritmo 92
B.2 Validazione 104
B.2.1 PRA in CLPV 104
B.2.2 PRA di Rigopiano 105
B.3 Regressione non-lineare 106

C Indagine **107**
C.1 Questionario 107
C.2 Esiti 112
C.2.1 Quota 112
C.2.2 Esposizione 114
C.2.3 Acclività 116

D Bollettini valanghe **119**

Bibliografia **123**

Acronimi principali

AINEVA Associazione Interregionale di coordinamento e documentazione per i problemi inerenti alla NEve e alle VAlanghe

CLPV Carta di Localizzazione Probabile delle Valanghe

DTM Digital Terrain Model
Modello Digitale del Terreno

EAWS European Avalanche Warning Services
Servizi di avviso valanga europei

GIS Geographyc Information System
Sistema Informativo Geografico

MTD Mass Transport and Deposition
Trasporto e deposizione di massa

PRA Potential Release Area
Area di distacco potenziale

SLF WSL — Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF
WSL — Istituto per lo studio della neve e delle valanghe SLF

Elenco dei simboli

Questa lista descrive i principali simboli che verranno usati più avanti nel lavoro.

α	Acclività, come angolo di inclinazione in gradi
β	Esposizione, come angolo rispetto al nord
a, b, c, d	Parametri della funzione di appartenenza a campana generalizzata
h, i, l, s, t	Valori di quote $z(x)$ definite dall'utente
$\overline{\mathrm{HS}}$	Profondità media della neve
p	Frazione dei pendii ripidi pericolosi (con $\mu'_{\mathrm{PRA}}(x) > 0.5$)
S	Scala del calcolo del modulo del vettore *ruggedness* (R)
§	Paragrafo (*section*)
u	Frazione delle PRAb contenute nella CLPV
$z(x)$	Quota della cella x

Funzioni

$\mu_A(x)$	Funzione di appartenenza *fuzzy* generica dell'elemento x all'insieme A
$\mu_{\mathrm{PRA}}(x)$	Funzione di appartenenza *fuzzy* di x alla classe "aree potenziali di distacco" (*Potential Release Area*, PRA) impiegata da Veitinger et al. [2016]
$\mu'_{\mathrm{PRA}}(x)$	Come la precedente, ma corretta da altri fattori
$\mu_{\mathrm{PRA}}(\alpha)$	Funzione di appartenenza *fuzzy* dell'acclività α alla classe PRA
$\mu_{\mathrm{PRA}}(I(S))$	Funzione di appartenenza *fuzzy* dell'indice *wind shelter* alla classe PRA
$\mu_{\mathrm{PRA}}(R)$	Funzione di appartenenza *fuzzy* del modulo del vettore *ruggedness* R alla classe PRA
$\mu_{\mathrm{PRAb}}(x)$	Funzione di appartenenza booleana della cella x alla classe PRAb

$\mu_{\mathrm{CLPV}}(x)$	Funzione di appartenenza booleana della cella x alla classe CLPV
$f_B(x)$	Funzione di appartenenza booleana della copertura forestale
$f_{\mathrm{w}}(z(x))$	Funzione *fuzzy* per pesare l'indice *wind shelter*
$f_{\mathrm{n}}(z(x))$	Funzione booleana del limite della neve
$f_{\mathrm{z}}(z(x))$	Funzione *fuzzy* delle quote pericolose
$f_{\mathrm{ss}}(x)$	Funzione booleana dei pendii ripidi
Indici	
$I(S)$	Indice *wind shelter*
$I_{\mathrm{w}}(S)$	Indice *wind shelter* pesato
R	Modulo del vettore *ruggedness*
Statistica	
C_{v}	Coefficiente di variazione
IQR	*Interquartile range* (scarto interquartile)
N	Numerosità del campione
σ	Deviazione standard
$\bar{x}$	Media

La pericolosità da valanga calcolata e visualizzata

Un modello numerico-geografico

Luca Iacolettig

Prefazione

Le valanghe hanno da sempre rappresentato un pericolo per l'uomo.

Negli ultimi anni, con la maggior frequentazione della montagna a scopo ricreativo, ad ogni stagione invernale veniamo puntualmente raggiunti da notizie di incidenti dovuti a valanghe. Nel marzo 2016 sei scialpinisti persero la vita nelle Alpi Pusteresi; nel gennaio 2017, una grande valanga seppellì l'Hotel Rigopiano, in comune di Farindola (Pescara), col tragico bilancio di 29 morti. Solo per citare due casi di grande risonanza mediatica. Ci si potrebbe domandare: «possibile che nessuno gli abbia avvisati? Non hanno letto le previsioni?». Purtroppo non è così semplice... Sebbene le valanghe siano degli eventi deterministici, ancor oggi non è possibile prevedere se, dove e quando avverrà un distacco.

Durante il tirocinio che ho svolto presso l'ufficio valanghe della Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia è sorta l'idea, grazie al coordinatore Daniele Moro, di sviluppare uno strumento per consentire ai previsori valanghe di visualizzare la pericolosità da valanga in maniera più dettagliata rispetto a come viene fatto negli attuali bollettini.

Ciò che segue nelle prossime pagine è un tentativo di rendere realtà questa idea.

Capitolo 1

Introduzione

Curiosamente la norma ISO 5966 richiede che l'introduzione non sia numerata o che sia numerata come capitolo 0. Da noi questa raccomandazione viene disattesa quando non si tratta di rapporti internazionali.

Marco Parsini

Questo capitolo introduce alla lettura. Il paragrafo 1.1 fornisce la motivazione del lavoro svolto. Il paragrafo 1.2 illustra lo stato attuale delle conoscenze su valanghe e bollettini valanghe, in particolare sulla classificazione morfologica delle valanghe (1.2.1), illustrando i contenuti dei bollettini (1.2.2) ed esponendo i principali modelli esistenti a base GIS per la previsione e lo studio delle valanghe (1.2.3). Il paragrafo 1.3 chiude il capitolo, dichiarando l'obiettivo del lavoro e delinandone la struttura.

1.1 Motivazione

I bollettini di avviso valanghe sono strumenti per informare ed allertare qualsiasi soggetto potenzialmente esposto al pericolo di valanghe.

I bollettini valanghe in Europa sono formati, generalmente, da una parte iconografica ed una testuale, con simboli e glossario uniformi e condivisi tra i servizi di avviso valanghe europei (*European Avalanche Warning Services*, EAWS). L'informazione più importante del bollettino è quella sul pericolo di valanghe, informazione sintetizzata dal *grado di pericolo* della scala europea del pericolo da valanga, in maniera generalmente iconografica. La parte testuale riporta informazioni scritte riguardanti, ad esempio, quote, versanti, esposizioni geografiche e morfologie critiche per il distacco di valanghe per un certo territorio in un dato momento.

Tuttavia, queste aree vengono solamente espresse a parole ed il grado di pericolo, uniformemente assegnato ad un'area estesa, non consente di localizzare le zone pericolose. In altre parole: non vi è evidenza geografica di pendii, esposizioni e quote identificate come potenzialmente pericolose, né esiste una loro quantificazione numerica, rimanendo queste informazioni espresse in maniera iconografica e testuale.

Attualmente i previsori dei servizi di avviso valanghe si basano in gran parte sulla propria esperienza e non esiste un modello che consenta loro di calcolare e visualizzare geograficamente le aree pericolose da essi previste nei bollettini.

La *Struttura stabile centrale per l'attività di prevenzione del rischio da valanga* (ufficio valanghe) della Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia ha espresso l'esigenza di visualizzare e calcolare tali aree per supportare il compito dei previsori.

1.2 Stato dell'arte

1.2.1 Valanghe

Definizione

Esistono diverse definizioni del termine *valanga*.

Il vocabolario di Devoto e Oli [1987] scrive: «massa di neve che, staccatasi dall'alto di un pendio e rotolando verso il basso, assume dimensioni sempre maggiori trascinando e sommergendo quanto incontra lungo il percorso». L'utilizzo di *pendio* sembra circoscrivere l'evento ad ambienti naturali; tuttavia, una valanga può mantenere le stesse dimensioni durante il suo percorso e non rotolare affatto.

McClung e Schaerer [1996] definiscono *valanghe* come «masse[1] di neve in caduta, a volte contenenti rocce, terra o ghiaccio». Questa definizione, di carattere volutamente molto ampio, comprende sia le gigantesche valanghe himalayane, che la caduta a terra di neve da un tetto: entrambe sono infatti masse di neve in caduta.

Schweizer, Jamieson e Schneebeli [2003] offrono questa definizione:

> *Le valanghe sono masse nevose che discendono rapidamente pendii scoscesi. Possono contenere rocce, terra, vegetazione, o ghiaccio.*[2]

L'avverbio *rapidamente* è importante, in quanto caratteristica peculiare delle valanghe: la durata del movimento di una valanga è dell'ordine dei secondi. Esistono movimenti, sempre di masse nevose, che possono tuttavia durare mesi, come la *reptazione* del manto nevoso.

A volte, con una sineddoche, capita di impiegare il termine *valanga* per riferirsi all'intero processo di movimentazione delle masse nevose, o al loro accumulo. Ad esempio, la Carta di Localizzazione Probabile delle Valanghe (CLPV), non è una carta dove sono riportate delle masse nevose, bensì una carta dove viene cartografato l'intero perimetro interessato dal loro movimento.

I termini *slavina* e *lavina* vengono considerati sinonimi di valanga e identificano il medesimo fenomeno naturale [Pegani 1997].

[1] Il termine *massa* va qui inteso nell'accezione di *insieme di materia di forma non definita, considerata un tutto unico* [vedi Devoto e Oli 1987; Sabatini e Coletti 2003]. Altrimenti, con l'accezione fisica di *quantità di materia* si può ottenere un bizzarro sillogismo...

> Una massa di neve in caduta è una valanga;
> una nevicata è una massa di neve in caduta;
> una nevicata è una valanga.

[2] «*Snow avalanches are snow masses that rapidly descend steep slopes. They can contain rocks, soil, vegetation, or ice.*»

Tabella 1.1: Classificazione morfologica delle valanghe [UNESCO 1981, modificato]

Zona	Criterio	Caratteristiche	Denominazione
Distacco	Modalità d'innesco	Da un punto	Val. a debole coesione
		Da una linea	Valanga a lastrone
	Posizione strato debole	Nel manto nevoso	Valanga di superficie
		Al suolo	Valanga di fondo
	Acqua liquida nella neve	Assente	Valanga di neve asciutta
		Presente	Valanga di neve bagnata
Scorrimento	Morfologia del percorso	Pendio aperto	Valanga non confinata
		Gola o canalone	Valanga incanalata
	Forma del movimento	Nube di neve polverosa	Val. di neve polverosa
		Scorrimento al suolo	Valanga radente
Accumulo	Scabrezza in superficie	Grossolana	Accumulo grossolano
		Fine	Accumulo fine
	Acqua liquida nella neve	Assente	Accumulo di val. asciutta
		Presente	Acc. di val. bagnata
	Altri materiali	Non apparenti	Valanga pulita
		Detriti rocciosi, terra, rami, alberi	Valanga contaminata

Classificazione

Ogni valanga presenta una zona di distacco, una di scorrimento ed una di accumulo. La zona di distacco è l'area in cui la neve instabile si frattura e comincia a muoversi. La zona di scorrimento è l'area sottostante la zona di distacco che collega quest'ultima con l'area dove si accumula la valanga. La zona di accumulo (o deposito) è l'area dove avviene una rapida decelerazione, la neve si accumula e la valanga si arresta [McClung e Schaerer 1996].

Basandosi su queste tre zone, la Commissione Internazionale Neve e Ghiaccio dell'UNESCO ha classificato le valanghe secondo criteri morfologici (tab. 1.1): vengono considerati, tra gli altri, il meccanismo d'avvio (cioè il tipo di distacco), la forma di movimento, il contenuto di acqua nella neve e la posizione della superficie di scorrimento. Questa classificazione è illustrata graficamente dalla figura 1.1.

Viene ora approfondita la suddivisione delle valanghe secondo il tipo di distacco: valanghe a debole coesione e valanghe a lastroni.

Valanghe a debole coesione Una valanga di neve a debole coesione (fig. 1.2a) prende avvio da un punto situato in uno strato superficiale del manto; la neve, che può essere sia asciutta che bagnata, ha una coesione bassa o nulla [Schweizer, Jamieson e Schneebeli 2003]. Il meccanismo iniziale del collasso è analogo allo scivolamento rotazionale di sabbie o suoli senza coesione, ma avviene con volumi minori ($< 1\,\mathrm{m}^3$) rispetto a quelli necessari per l'innesco di frane [Perla 1977].

Le valanghe a debole coesione si formano negli strati superiori e all'inizio trascinano con sé neve in superficie. Iniziato lo scorrimento della valanga, la neve degli strati interni, soprattutto se bagnata, può mettersi in movimento assieme a quella di superficie. Le valanghe di neve bagnata a scarsa coesione possono essere molto più grosse di quelle a neve asciutta [McClung e Schaerer 1996].

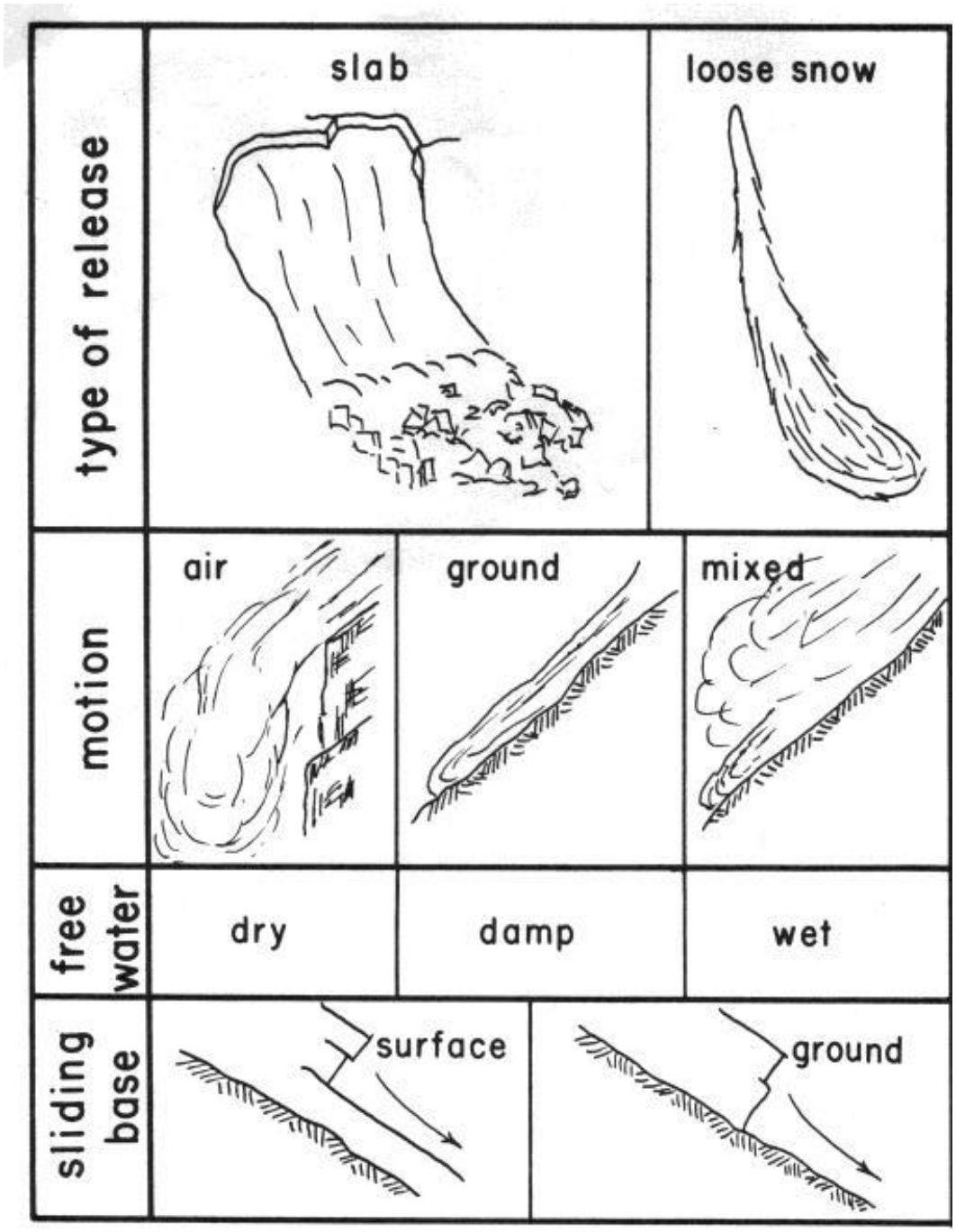


Figura 1.1: Classificazione delle valanghe. Secondo il tipo di distacco (*type of release*), si hanno valanghe a lastrone (*slab avalanche*) o a debole coesione (*loose snow avalanche*); secondo il movimento (*motion*), valanghe polverose (*air*), radenti il terreno (*ground*) o miste (*mixed*); secondo il contenuto di acqua (*free water*), valanghe asciutte (*dry*), bagnate (*wet*), ed eventualmente umide (*damp*); secondo la superficie di scorrimento (*sliding base*), valanghe di superficie (*surface*) o di fondo (*ground*).
[www.avalanche.org]

(a) Debole coesione **(b)** Lastrone

Figura 1.2: Valanghe secondo il tipo di distacco.
[www.avalanches.org], [www.anchorageavalanchecenter.org]

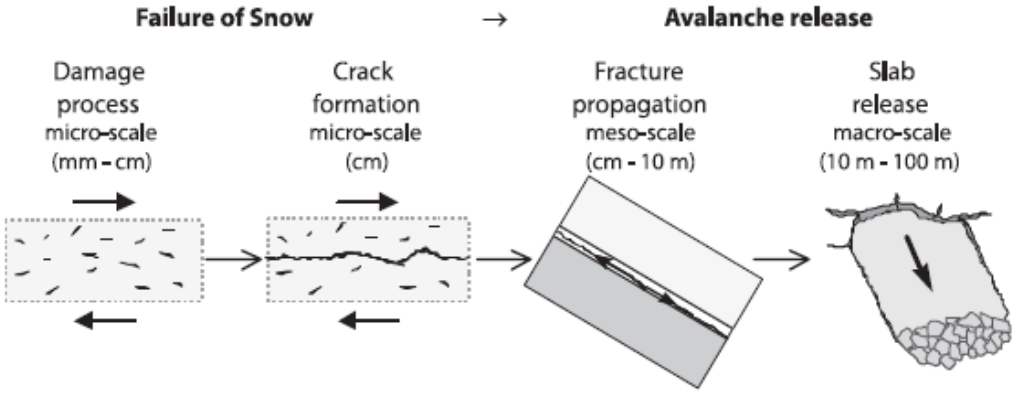


Figura 1.3: Modello concettuale del distacco di una valanga a lastrone di neve asciutta [Schweizer e Jamieson 2004]. Il collasso della neve (*failure of snow*) inizia con un processo di danno (*damage process*) alla micro-scala che forma una fessura (*crack formation*). Il distacco della valanga (*avalanche release*) avviene grazie alla propagazione della frattura (*fracture propagation*) generata nelle fasi precedenti, portando infine al distacco del lastrone (*slab release*).

Valanghe a lastroni Una valanga a lastroni (fig. 1.2b), la più pericolosa per l'incolumità delle persone [McClung e Schaerer 1996], è causata dal distacco di un lastrone coeso su un esteso piano stratigrafico di debolezza [Gaume et al. 2016; Schweizer, Jamieson e Schneebeli 2003]; un esempio di strato debole è la brina di superficie prodotta durante una notte fredda ed inglobata nel manto da una nevicata. Nella figura 1.3 è schematizzato il processo di collasso della neve che porta al distacco di una valanga a lastroni.

Il rapporto osservato tra larghezza e spessore di un lastrone varia tra 10 e 10^3: ciò vuol dire che un lastrone alto 50 cm può essere largo da 5 a 500 m. Lo spessore di un normale lastrone è mediamente < 1 m [Schweizer e Jamieson 2001]; Perla [1977], in un campione di 193 misurazioni, ha rilevato uno spessore massimo di 4.2 m ed uno minimo di 0.08 m.

Questo genere di valanghe presenta analogie col collasso planare di pendii rocciosi,

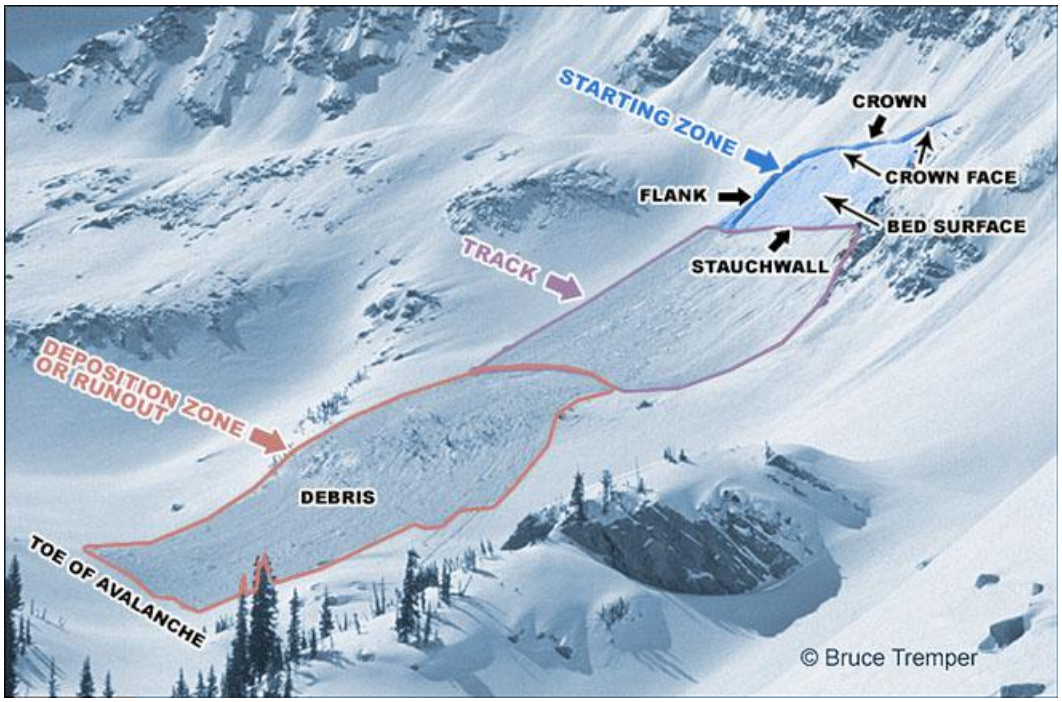


Figura 1.4: Zonizzazione di una valanga a lastrone. Essa prende origine da una zona d'avvio (*starting zone*) dove si possono riconoscere un coronamento (*crown*) e la sua fronte (*crown face*), una superficie di scorrimento (*bed surface*), un fianco (*flank*) ed un piede del lastrone (*Stauchwall*), il limite inferiore della zona di distacco; la valanga prosegue lungo un percorso (*track*) e si esaurisce in una zona di deposizione o fine corsa (*deposition zone or runout*), composta dall'accumulo (*debris*) e dal piede della valanga (*toe of avalanche*). [www.snowboarditalia.it]

come ad esempio la frana del monte Toc del 1963 nell'invaso del Vajont [Paronuzzi e Bolla 2012]: in entrambi i casi, il movimento non avviene per ribaltamento rotazionale, bensì per scivolamento planare. Inoltre, sia per questo tipo di frane che per le valanghe a lastrone, è necessaria la presenza di uno strato di debolezza per innescare il movimento [Schweizer, Jamieson e Schneebeli 2003].[3]

Le principali zone di una valanga a lastroni, coerenti con la letteratura scientifica [McClung e Schaerer 1996; Perla 1977; Schweizer, Jamieson e Schneebeli 2003], sono schematizzate nella figura 1.4.

Il distacco di una valanga a lastrone può avvenire per:

1. rapido sovraccarico della superficie (persone, esplosivi...);
2. sovraccarico graduale ed uniforme (es. precipitazioni);
3. modifiche delle caratteristiche del manto, senza sovraccarico (es. riscaldamento della superficie).

La differenza principale tra questi meccanismi è la maggior o minor importanza del sovraccarico a provocare il distacco [Schweizer, Jamieson e Schneebeli 2003].

[3] Nel caso del Vajont, questo fu uno strato di argille spesso 5–15 cm [Kilburn e Petley 2003].

Il sovraccarico è qualunque forza che grava sul manto nevoso: può essere rappresentato da un animale, un masso che cade, uno scialpinista in salita... Tutti questi sovraccaricano il manto proporzionalmente alla propria forza-peso. Lo stesso peso della neve superficiale grava sugli strati sottostanti del manto e, secondo l'acclività del pendio, favorisce maggiormente la componente normale o la componente tangenziale del vettore forza-peso. La prima determina la compressione (assestamento) del manto, la seconda è la deformazione di taglio. I veri responsabili della formazione delle valanghe sono quest'ultima e le sollecitazioni di taglio: esse sono le forze destabilizzanti, mentre le forze normali di compressione (assestamento) contribuiscono alla stabilità del manto [McClung e Schaerer 1996]. Föhn [1987] ha formalizzato questi concetti formulando un indice di stabilità S corretto secondo l'equazione

$$S = \frac{\tau_\mathrm{s}}{\tau_{xz}} = \frac{2(c + \tan\phi\sigma_z)}{\rho g h \cdot \sin 2\psi} \tag{1.1}$$

dove τ_s è la resistenza media al taglio dello strato più debole, τ_{xz} la componente dello sforzo di taglio parallela al pendio, c la resistenza al taglio misurata (coesione, in Pa), ϕ l'angolo di attrito interno dello strato più instabile, ρ la densità della neve, ψ l'angolo d'inclinazione del pendio e $\sigma_z = \rho g h \cdot \cos\psi$ la pressione normale al pendio. Lo stesso Föhn [1987] ha definito un ulteriore indice di stabilità S' che integra l'influenza di sovraccarichi esterni secondo l'equazione

$$S' = \frac{\tau_\mathrm{s}}{\tau_{xz} + \Delta\tau_{xz}} \tag{1.2}$$

dove $\Delta\tau_{xz}$ è il massimo sforzo di taglio nello strato debole a causa di sovraccarichi esterni.

Gaume et al. [2016] hanno proposto, per le valanghe provocate da sciatori, un nuovo indice di stabilità S_p che considera non le tensioni, bensì le lunghezze per l'avvio e la propagazione della frattura secondo l'equazione

$$S_\mathrm{p} = \frac{a_\mathrm{c}}{l_\mathrm{sk}} \tag{1.3}$$

dove a_c è la lunghezza critica della frattura per la sua propagazione e l_sk è la lunghezza della frattura provocata dallo sciatore. Alti valori di l_sk e/o bassi valori di a_c portano a bassa stabilità e viceversa.

I fattori che influenzano tanto il rafforzamento quanto il sovraccarico del manto nevoso sono le caratteristiche del terreno, quali acclività ed esposizione dei pendii, altitudine, presenza di bosco e scabrezza del terreno, e fattori meteorologici come le precipitazioni (in particolare la nuove nevicate), il vento e la temperatura [McClung e Schaerer 1996; Schweizer, Jamieson e Schneebeli 2003]. Si rimanda all'appendice A per approfondimenti.

Una precisazione riguardo al distacco: con un manto nevoso particolarmente instabile, è possibile provocare il distacco a distanza di un lastrone anche quando ci si trova fuori dal suo perimetro, ad esempio su una superficie piana o poco inclinata. Sono frequenti casi di valanghe a lastroni provocate da sciatori che percorrono una zona apparentemente sicura, a poi la frattura per trazione si verifica a monte di costoro: questo significa che il cedimento interno si è propagato verso l'alto [McClung e Schaerer 1996].

1.2.2 Bollettino valanghe

Il bollettino valanghe è uno strumento informativo.

Esso ha le caratteristiche tipiche di un avviso: indica infatti il pericolo di valanghe in un determinato territorio e fornisce al pubblico un quadro sinottico dell'innevamento, dello stato del manto nevoso e delle condizioni meteorologiche [AINEVA 2011]. Se intercorre più di un giorno tra l'emissione di due bollettini, possono essere riportate delle previsioni sull'andamento del pericolo; la previsione viene effettuata su base meteorologica, ipotizzando il possibile sviluppo del manto nevoso.

A chi si rivolge

Il bollettino si rivolge a tutte le persone che possono essere esposte al pericolo di valanga e/o sono responsabili della sicurezza di altre persone: residenti in centri abitati di montagna, personale dei servizi di sicurezza degli impianti di risalita, guide alpine, personale del soccorso, sciatori, scialpinisti, alpinisti, ...

Precisazione Si definisce *pericolo* l'evento calamitoso che può colpire una certa area [Valsecchi et al. 2015]. Un terremoto, un'eruzione vulcanica, una frana, una valanga... rappresentano dei pericoli. Il pericolo viene descritto dalla probabilità che l'evento si verifichi (*pericolosità*) e dalle sue dimensioni previste [SLF 2015]. Il *rischio* rappresenta le possibili conseguenze del pericolo, cioè il danno che si può attendere (effetto) [Valsecchi et al. 2015]: il rischio dipende dalla pericolosità dell'evento e dalla vulnerabilità del sistema. Per questo, il rischio presuppone l'esistenza di persone o beni esposti al pericolo [SLF 2015].

Il bollettino valanghe descrive il pericolo, cioè il solo fenomeno naturale, e la sua probabilità di accadimento (pericolosità), *non* il rischio.

Storia I primi bollettini valanghe d'Europa furono emessi in Svizzera nel 1936 dalla Federazione svizzera di sci, basandosi su osservazioni della Commissione per lo studio della neve e delle valanghe. Nel 1945 [SLF 2015] il servizio di prevenzione valanghe, e con questo l'emissione dei bollettini, passò all'Istituto per lo studio della neve e delle valanghe SLF (WSL — *Institut für Schnee- und Lawinenforschung* SLF) di Davos, tutt'ora uno dei massimi centri di riferimento in questo campo.

In Italia, la pubblicazione sistematica dei bollettini valanghe iniziò nell'autunno del 1967 ad opera della Commissione neve e valanghe del Club Alpino Italiano (CAI); nel 1969, con l'istituzione del Servizio Valanghe Italiano del CAI, venne pubblicato il primo *bollettino valanghe nazionale* [Silvestri 1973]. Nel 1983 venne fondata l'Associazione Interregionale di coordinamento e documentazione per i problemi inerenti alla NEve e alle VAlanghe (AINEVA); da allora, l'AINEVA coordina il lavoro dei centri regionali e provinciali che si occupano di pericolo valanghe ed emettono i bollettini.

Contenuti

Il bollettino funge da base per valutare il pericolo di valanga. I suoi contenuti sono strutturati secondo la *piramide dell'informazione* (fig. 1.5): dapprima vengono fornite le informazioni più semplici e rilevanti (grado di pericolo, punti pericolosi...) e successivamente quelle più specialistiche e dettagliate.

Le informazioni contenute nel bollettino valanghe riguardano [SLF 2015]:

Figura 1.5: «I contenuti del bollettino valanghe sono strutturati secondo la piramide dell'informazione: l'importante innanzitutto. Con i livelli successivi aumenta il dettaglio dell'informazione.» [SLF 2015]

1. il pericolo di valanghe, espresso da
   - grado di pericolo
   - parti del terreno più pericolose
   - problema principale (neve fresca, neve ventata, ...)
   - descrizione scritta dettagliata;
2. la struttura e la stabilità del manto nevoso;
3. le condizioni meteorologiche.

Il contenuto più importante è l'informazione sul pericolo valanghe (punto 1 dell'elenco). Esso descrive la *probabilità di distacco* e la possibile entità di una valanga in una regione.

L'elenco sopra riportato è di carattere generale; a seconda dell'ente e delle circostanze al momento dell'emissione, non è necessario che tutti i punti siano contemporaneamente presenti. Alcuni bollettini presentano il solo grado di pericolo per una regione, le quote e le esposizioni critiche, e poche altre indicazioni, mentre altri possono presentare una sola parte testuale. A tal proposito, sono stati effettuati studi di scienza della comunicazione per individuare il metodo ottimale di rappresentazione epistolare e grafica dei contenuti del bollettino: è emerso che le persone sono propense a cogliere immediatamente un messaggio visivo ed a leggere poco il testo.

Base informativa

La base informativa del bollettino è costituita da dati meteorologici e nivologici rilevati manualmente e/o automaticamente, profili stratigrafici e test di stabilità del manto nevoso, previsioni meteorologiche, segnalazioni di distacchi e riscontro sulla valutazione del pericolo da parte di scialpinisti e simili.

Terminologia

La terminologia dei bollettini è condivisa tra i servizi valanghe europei [EAWS 2003]. Il glossario multilingue dei vocaboli più usati nei bollettini valanghe, rifatto nel 2015, è consultabile all'indirizzo `www.avalanches.org` alla pagina *Glossary* (ultima consultazione il 10 marzo 2017).

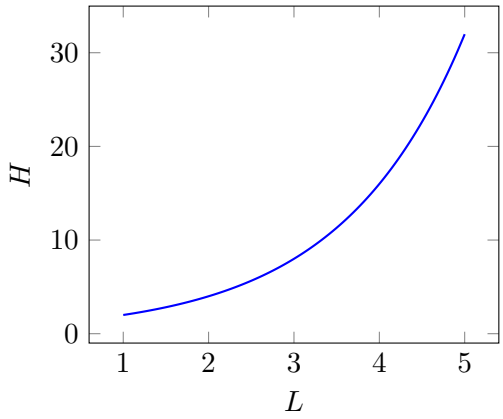


Figura 1.6: Crescita esponenziale: la pericolosità H (in percentuale) raddoppia all'aumentare del grado di pericolo L.

Grado di pericolo

La scala europea del pericolo di valanga

Al VI convegno EAWS di Wild Kreuth (Baviera, aprile 1993) i rappresentanti di Austria, Francia, Germania, Italia, Spagna e Svizzera adottarono una scala unificata del pericolo di valanga che rispondesse alle esigenze di omogeneità e confrontabilità dell'informazione nivometeorologica [Pegani 1997]: la scala europea del pericolo da valanga (tab. 1.2).

La scala è stata perfezionata durante gli incontri del 2001, 2003 e 2005, specialmente per uniformare la terminologia e le procedure da adottare per i bollettini (vedi EAWS 2003).

Cinque gradi di pericolo

Nel 1994 la scala è stata introdotta anche in Canada e negli Stati Uniti d'America [Statham et al. 2010]. Essa è divisa in cinque gradi di pericolo:

- 1-debole
- 2-moderato
- 3-marcato
- 4-forte
- 5-molto forte

La pericolosità H non cresce linearmente col grado di pericolo L [AINEVA 2011], bensì in maniera esponenziale (fig. 1.6). La base dell'esponente non è stata ben definita, ma nella pratica si assume che la pericolosità raddoppi col grado di pericolo ($H = 2^L$) [Munter 2013]. I fattori influenti, la determinazione e la validazione del grado di pericolo possono essere consultati nell'appendice A.2.

Il grado mediano *3-marcato* esprime una situazione di pericolosità superiore, già critica per i fenomeni valanghivi ed i fattori predisponenti il distacco. Per questo motivo, nel 2010, si propose di ridenominare il grado 5 da "molto forte" a "estremo", similmente alla scala di pericolo attualmente in uso in America del nord [Statham et al. 2010], ma il cambiamento non venne effettuato [EAWS 2010].

Tabella 1.2: Scala europea del pericolo da valanga, con indicazioni aggiuntive (fonte: SLF 2015, rielaborato)

Grado	Simbolo	Colore	Stabilità del manto nevoso	Probabilità di distacco	Condizioni[1] e indicazioni per gli sciatori fuori pista
5 molto forte			Il manto nevoso è in generale debolmente consolidato e per lo più instabile.	Sono da aspettarsi molte grandi, e talvolta anche molto grandi valanghe spontanee, anche su terreno moderatamente ripido.	Condizioni molto sfavorevoli. Rinuncia raccomandata.
4 forte			Il manto nevoso è debolmente consolidato sulla maggior parte dei pendii ripidi.	Il distacco è probabile già con debole sovraccarico su molti pendii ripidi. In alcune situazioni sono da aspettarsi molte valanghe spontanee di media grandezza, e talvolta anche grandi valanghe.	Condizioni sfavorevoli. È necessaria molta esperienza nel giudicare la situazione sul fronte valanghe. Limitarsi a zone moderatamente ripide; attenzione anche alle zone di deposito delle valanga.
3 marcato			Il manto nevoso presenta un consolidamento su molti pendii ripidi da moderato a debole.	Il distacco è possibile con un debole sovraccarico soprattutto sui pendii ripidi indicati in bollettino. In alcune situazioni sono possibili alcuni valanghe spontanee di media grandezza e in singoli casi anche grandi valanghe.	Condizioni in parte sfavorevoli. È necessaria esperienza nel giudicare la situazione sul fronte valanghe. Pendii ripidi di quota ed esposizioni indicate sono da evitare il più possibile.
2 moderato			Il manto nevoso è moderatamente consolidato su alcuni pendii ripidi, per il resto è ben consolidato.	Il distacco è possibile soprattutto con un forte sovraccarico sui pendii ripidi indicati in bollettino. Non sono da aspettarsi grandi valanghe spontanee.	Condizioni in buona parte favorevoli. Prudente scelta dell'itinerario, soprattutto sui pendii ripidi di quota e delle esposizioni indicate.
1 debole			Il manto nevoso è in generale ben consolidato e stabile.	Il distacco è generalmente possibile soltanto con un forte sovraccarico su isolati punti sul terreno ripido estremo. Sono possibili solo scaricamenti e piccole valanghe spontanee.	Condizioni in generale sicure.

1 Condizioni: si riferiscono esclusivamente al pericolo di valanghe. Le condizioni della neve (neve polverosa, neve primaverile, crosta non portante) o quelle meteorologiche (nebbia, vento tempestoso), quantunque possano rappresentare un pericolo, non sono contemplate.

1.2.3 Modelli esistenti

Oggigiorno, la previsione e lo studio delle valanghe vengono supportati, data la loro diffusione sempre maggiore, dalla tecnologia dei sistemi informativi geografici (*Geographyc Information Systems*, GIS).

Un esempio risale già al 1996, quando Leuthold et al. visualizzarono geograficamente le informazioni espresse dalla parte testuale del bollettino valanghe svizzero. LAWIPROG, il loro modello, produce mappe di pericolo previsto mediante operazioni tra alcuni parametri di criticità. Per ogni cella della mappa viene così calcolato un indice di pericolo numerico, ma qualitativo.

A fini di previsione, i GIS sono stati impiegati per determinare e descrivere le zone di distacco di valanghe [Bolognesi et al. 1996], per analizzare e visualizzare la distribuzione spaziale delle valanghe [A. Stoffel, Meister et al. 1998], per guidare il processo di avviso e stimare il pericolo di valanghe [Brabec et al. 2001; A. Stoffel, Brabec et al. 2001] anche con dati in tempo reale [Cookler e Orton 2004], per identificare modelli spaziali tipici del pericolo valanghe grazie a dati storici [McCollister et al. 2003] per esaminare la distribuzione spaziale delle valanghe [Hendrikx et al. 2004], per integrare i dati necessari alla valutazione del pericolo valange [Jaedicke et al. 2008], per produrre mappe di pericolo valanghe giornaliere sulla base di dati meteorologici [G. Gruber et al. 2009], per la previsione spazio-temporale del pericolo valanghe con approcci fisici e statistici ai dati nivometeorologici [Pozdnoukhov et al. 2011].

Questi modelli presentano tuttavia degli inconvenienti: adottano parametri semplici, un approccio *discreto* alle analisi ed esprimono i risultati con indici perlopiù qualitativi; inoltre, non consentono di identificare le aree di distacco potenziale di valanghe a scala di dettaglio.

Oltre a prevedere ed informare relativamente al pericolo di valanghe, i GIS vengono largamente impiegati per identificare automaticamente le aree di distacco potenziale delle valanghe (*Potential Release Area*, PRA) o per creare mappe di pericolo potenziale a fini ingegneristici, di simulazione o di pianificazione e governo del territorio.

Per questi fini, grazie alla maggior disponibilità di GIS e di modelli digitali del terreno (*Digital Terrain Model*, DTM), negli ultimi due decenni sono stati sviluppati diversi algoritmi. Essi si basano principalmente su parametri topografici derivabili da un DTM, come l'acclività e l'esposizione geografica dei versanti, e la curvatura del terreno [Maggioni e U. Gruber 2003; Peitzsch et al. 2014; Vontobel 2011]. Altri parametri frequentemente utilizzati sono la copertura forestale e la scabrezza del terreno (ad esempio Blahut et al. 2017). Alcuni algoritmi considerano ulteriori parametri nivometeorologici, come la quota dell'isoterma degli 0 °C [Cía et al. 2014], la durata della copertura nevosa ed un indice di umidità topografica [Pistocchi e Notarnicola 2013].

Tabella 1.3: Parametri topografici, risoluzione del DTM e approccio della classificazione di alcuni algoritmi per il calcolo delle aree di distacco potenziale (PRA) o del pericolo potenziale da valanga.

Autori	Acclività	Curvatura	Scabrezza	Quota	Dist.za creste	Esposizione	Ris.ne DTM [m]	Approccio
Blahut et al. [2017]	•	•	•	•		•	5	Booleano
Boltižiar et al. [2016]	•	•	•	•		•	10	Discreto
Bühler et al. [2013]	•	•	•				5	Booleano
Cía et al. [2014]	•	•					5	Booleano
Ghinoi e Chung [2005]	•	•		•	•	•	20	Continuo
Maggioni e U. Gruber [2003]	•	•			•	•	25-50	Booleano
Peitzsch et al. [2014]	•	•	•	•	•	•	10	Booleano
Pistocchi e Notarnicola [2013]	•	•		•	•	•	10	Continuo
Selçuk [2013]	•		•	•		•	25	Discreto
Vontobel [2011]	•	•	•		•	•	2–25	Booleano
Veitinger et al. [2016]	•		•			○[1]	2	Continuo

1 Questo algoritmo utilizza l'esposizione come parametro per calcolare un indice di riparo dal vento.

Alcuni autori adottano un approccio *discreto* nel classificare i parametri ed i risultati, servendosi di operazioni algebriche tra le variabili geografiche considerate (*map algebra*) ottenendo valori "a gradini" [Boltižiar et al. 2016; Cookler e Orton 2004; Selçuk 2013]; altri autori adottano invece un approccio *continuo*, quale ad esempio quello della logica *fuzzy* [Ghinoi e Chung 2005; Veitinger et al. 2016], mentre la maggior parte adotta un approccio *Booleano*, ottenendo una netta separazione tra le aree potenzialmente pericolose e quelle no.

Una visione d'insieme dei parametri topografici usati da alcuni di questi algoritmi è riportata nella tabella 1.3.

In particolare, il modello di Veitinger et al. [2016] corregge la scabrezza topografica secondo l'altezza del manto nevoso e considera l'effetto eolico su di esso con un apposito indice; questo modello non fornisce un risultato unico bensì, al variare dello spessore della neve e della direzione del vento impostati nei parametri, individua diversi scenari e aree potenziali di distacco. Questo modello adotta la logica *fuzzy*, consentendo di distinguere in maniera continua diversi gradi di predisposizione al distacco. Poiché tali gradi variano tra 0 e 1, essi rappresentano una *probabilità*, e possono essere utilizzati come un indice della pericolosità da valanga.

I modelli citati identificano, tuttavia, le aree solo potenzialmente pericolose, calcolando generalmente gli scenari peggiori per il distacco e il pericolo: il motivo risiede nei fini di questi algoritmi, diversi da quelli di previsione ed avviso propri dei bollettini valanghe.

1.3 Obiettivo

Viste le premesse iniziali a pagina 1, lo scopo di questo lavoro è consentire ai servizi valanghe di visualizzare le aree più pericolose previste dai bollettini, in particolare determinando la zona di distacco di valanghe a lastroni.

Si propone un modello numerico su base GIS che integra i parametri di criticità noti ai servizi di avviso valanghe. L'algoritmo del modello calcola la predisposizione al distacco di ogni cella del DTM dell'area di interesse secondo le condizioni nivometeorologiche del momento. La visualizzazione grafica del risultato avviene tramite un software GIS.

Il modello fornisce inoltre una quantificazione numerica dei pendii ripidi pericolosi, offrendo un dato di supporto ai previsori per la scelta dei gradi di pericolo. Infatti, sebbene i previsori si basino in gran parte sulla propria esperienza, naturalmente soggettiva, il modello proposto vuole essere per loro un supporto oggettivo nella redazione dei bollettini valanghe.

Dopo questo capitolo introduttivo, il contenuto della tesi è strutturato in altri quattro capitoli.

Il secondo capitolo illustra i metodi seguiti per conseguire l'obiettivo prefissato: le indagini esplorative, la logica *fuzzy* ed il modello di Veitinger et al. [2016].

Il terzo capitolo riporta i risultati ottenuti; ci si focalizza in particolar modo sul modello messo a punto, i parametri, le funzionalità e le differenze rispetto al modello originale, anche grazie a dei casi di studio.

Il quarto capitolo commenta criticamente i risultati ottenuti, evidenziando le differenze col modello originale e discutendo sui parametri importanti e sui limiti del nuovo modello.

Il quinto capitolo riassume i risultati più significativi ottenuti e propone sviluppi per la ricerca.

Al corpo del testo seguono poi quattro appendici.

L'appendice A approfondisce alcuni aspetti riguardo alle valanghe e i bollettini valanghe, rendendo conto delle scelte progettuali del modello proposto.

L'appendice B riporta il codice dei programmi scritti, in particolar modo l'algoritmo del modello messo a punto.

L'appendice C riporta i risultati integrali dell'indagine effettuata tramite questionario *a scala di risposta*.

L'appendice D riporta i bollettini valanghe usati per alcune simulazioni effettuate.

Capitolo 2

Metodi e dati

Questo capitolo illustra i metodi e i dati impiegati per conseguire l'obiettivo del lavoro. Il paragrafo 2.1 espone il metodo d'indagine iniziale per ricavare informazioni riguardo alle previsioni dei bollettini valanghe. Il paragrafo 2.2 richiama la teoria della logica *fuzzy*, molto adatta a modellare fenomeni naturali (2.2.1) ed impiegata più avanti. Il paragrafo 2.3 illustra il modello originale che è stato ampliato con questo studio, completo di parametri (2.3.1) e modellazione con logica *fuzzy* (2.3.2). Infine, il paragrafo 2.4 riporta brevemente i dati utilizzati in questo lavoro.

2.1 Indagini esplorative

Analisi dei bollettini

Inizialmente è stata analizzata la parte testuale dei bollettini valanghe emessi dall'ufficio valanghe della Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia dalla stagione invernale 1996–97 alla stagione 2015–16: si volevano rintracciare le caratteristiche geografiche, topografiche, meteorologiche e nivologiche impiegate più di frequente dai previsori per indicare la localizzazione del pericolo di valanghe. Si è prestata particolare attenzione alle caratteristiche elaborabili da un GIS.

In altre parole, si voleva rispondere alla seguente domanda: quali opzioni impiega solitamente il previsore nella parte testuale del bollettino per localizzare il pericolo di valanghe sul territorio?

Questionario

Una volta identificate le "caratteristiche ricorrenti" nei bollettini, considerati i paramentri degli algoritmi esistenti (tab. 1.3) e dopo un confronto con professionisti della neve e delle valanghe, è stata effettuata un'indagine tramite un questionario anonimo *a scala di risposta* [Gamberini et al. 2012] per indagare ulteriormente tre caratteristiche critiche per il distacco di valanghe:

- quota
- esposizione geografica
- acclività dei pendii.

Il questionario (appendice C.1) è stato inviato al personale tecnico di tutti gli uffici AINEVA d'Italia e, in lingua tedesca, al servizio valanghe del Tirolo tramite un modulo Google (`https://docs.google.com/forms?usp=mkt_forms`). Esso era

composto da tre sezioni principali, una per ogni "caratteristica ricorrente"; lo scopo era individuare i fattori più importanti presi in considerazione dai previsori valanghe per definire quote, esposizioni ed acclività ("inclinazioni") critiche.

In ogni sezione si chiedeva di attribuire un punteggio da 0 (nessun importanza) a 5 (molto importante) agli otto fattori di cui si voleva indagare l'importanza:

- neve fresca
- temperatura
- vento
- vegetazione, bosco
- limite della neve
- irraggiamento solare
- stabilità del manto nevoso
- precipitazioni.

L'intervistato poteva inoltre aggiungere dei commenti sotto forma di risposta aperta. La scala di risposta era formata da sei gradi, per cui, in assenza di un grado mediano, si costringeva l'intervistato a prendere una posizione. I gradi, benché epressi con cifre da 0 a 5, non esprimevano delle quantità, bensì erano impiegati come semplici categorie. Sui dati ottenuti dai questionari è stata effettuata un'analisi statistica descrittiva univariata calcolando statistiche d'ordine.

Lo scopo delle indagini esplorative era individuare i fattori più importanti considerati dai previsori; questi sarebbero poi serviti per determinare i dati d'ingresso del modello ideato.

2.2 Logica fuzzy

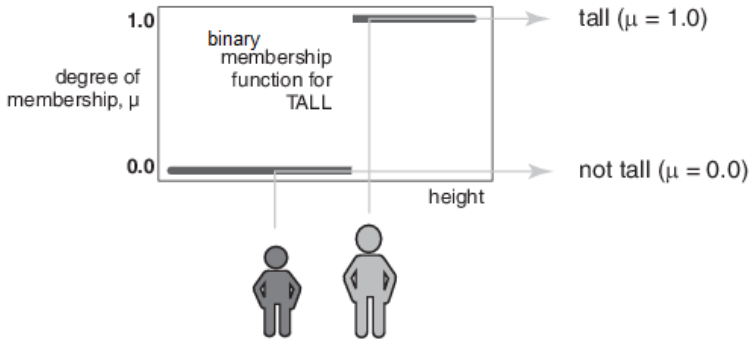
Questo lavoro impiega la teoria degli insiemi *fuzzy* (sfumati), che estende e supera quella classica, i cui insiemi sono detti *crisp* (nitidi). Nella teoria classica, l'appartenenza di un oggetto ad un dato insieme segue la logica *booleana*: l'oggetto appartiene o non appartiene all'insieme, nettamente, senza vie di mezzo. L'insieme "persone più alte di 180 cm" include quelle di 181, 185, 200 cm e non quelle di 160, 179, 180 cm.

Si consideri ora la classe "persone alte": quelle di 200 cm e oltre vi appartengono? Quelle di 170 o 179 cm? In questo caso è impossibile definire dei limiti netti poiché *alte* è una qualità, non una quantità; la classe "persone alte" non costituisce un insieme matematico nel senso classico del termine.

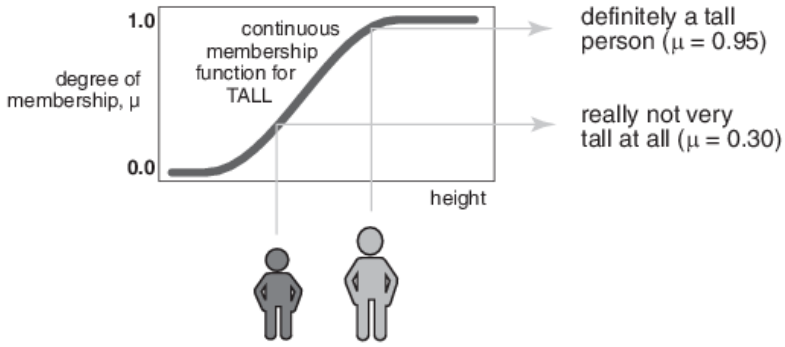
La logica *fuzzy* introduce il concetto di *grado d'appartenenza*.

Definizione 1 (Zadeh)**.** *Un insieme* fuzzy *è una classe di oggetti con un* continuum *di gradi d'appartenenza. Tale insieme è definito da una funzione d'appartenenza (caratteristica) che assegna ad ogni elemento un grado d'appartenenza variabile tra zero e uno.*[1]

[1] *«A fuzzy set is a class of objects with a continuum of grades of membership. Such a set is characterized by a membership (characteristic) function which assigns to each object a grade of membership ranging between zero and one.»* [Zadeh 1965]



(a) Crisp



(b) Fuzzy

Figura 2.1: Confronto tra logica *crisp* e logica *fuzzy* [www.mathworks.com]. **(a)** Nella logica *crisp* i gradi di appartenenza sono *booleani* (0 o 1, senza valori intermedi) e la funzione è definita per parti. **(b)** Nella logica *fuzzy* la funzione è continua ed i gradi di appartenenza variano tra 0 e 1.

Dal punto di vista teorico, un insieme *fuzzy* A nello spazio di oggetti X, dove x è un generico elemento, è definito da una funzione $\mu_A(x)$ che associa ad ogni oggetto di X un numero reale nell'intervallo $[0, 1]$; il valore di $\mu_A(x)$ in x rappresenta il *grado di appartenenza* di x ad A: più $\mu_A(x)$ si avvicina a 1, più alto è il grado di appartenenza di x ad A [Zadeh 1965].[2] *Teoria*

Un esempio renderà le cose più chiare: la classe "persone alte" è un insieme *fuzzy* A. x è un generico elemento dell'insieme X "persone" comprendente tutti gli abitanti della Terra. La funzione caratteristica dell'insieme "persone alte" $\mu_A(x) \to [0, 1]$ associa ad ogni persona (x) un grado di appartenenza al medesimo insieme A: più tale valore si avvicina ad 1, più la persona vi appartiene (è cioè alta). In questo caso, la definizione analitica di $\mu_A(x)$ è soggettiva.

Un confronto grafico tra logica *crisp* e logica *fuzzy* è riportato nella figura 2.1.

[2] Zadeh denota la funzione caratteristica con $f_A(x)$. L'uso della lettera greca μ (*mi*) intende qui richiamare l'iniziale di *membership* (appartenenza), per distinguere questa particolare funzione da una generica.

In quanto numero compreso nell'intervallo $[0, 1]$, il grado di appartenenza delle funzioni *fuzzy* è una *probabilità*, come definita dalla seguente definizione assiomatica.

Funzioni fuzzy e probabilità

Definizione 2 (Kolmogorov)**.** *La probabilità di un evento A è un numero reale $P(A)$ compreso tra 0 e 1 inclusi che rispetti determinate proprietà.*

Si consulti un testo di calcolo delle probabilità per le proprietà che tale numero deve rispettare. Qui basta ricordare che la probabilità:

- assume solo valori non negativi
- assume il valore 1 per l'evento certo
- assume il valore 0 per l'evento impossibile.

In base a questo, se un oggetto di un insieme *fuzzy* assume grado di appartenenza 1, esso appartiene certamente e totalmente all'insieme. Viceversa, se assume grado 0, non vi appartiene per nulla.

2.2.1 Applicazione a modelli naturali

Molti fenomeni naturali vengono difficilmente descritti da criteri o variabili ben definiti. Si pensi alla nuvolosità: il cielo è sereno o coperto durante una giornata di cielo variabile? Con la logica *fuzzy* si può stabilire quanto è nuvoloso: ad esempio, si può esprimere la copertura nuvolosa con un valore compreso nell'intervallo $[0, 1]$: 0 in caso di cielo sereno, 1 in caso di cielo completamente coperto, con tutti i possibili valori intermedi.

La logica *fuzzy* permette di introdurre la conoscenza e le idee dell'esperto in modelli numerici. Diverse decisioni da lui prese, come le previsioni di un bollettino valanghe, contengono una significativa dose d'incertezza; approcciare a problemi simili tramite logica *fuzzy* è pertanto adeguato.

Questa tipo di logica è stato impiegato con successo per cartografare aree franose [Schernthanner 2007], per definire modelli di rischio per valanghe di neve umida [Zischg et al. 2005], per stimare l'area di distacco delle valanghe [Ghinoi e Chung 2005], per stimare il rischio da valanga [Hemetsberger et al. 2002] e per identificare le potenziali zone di distacco di valanghe a lastroni [Veitinger et al. 2016].

La logica *fuzzy* così applicata è una tecnica *soggettiva*: le funzioni caratteristiche degli insiemi vengono determinate, seppur da un esperto, in maniera arbitraria e non necessariamente su base fisica.

2.3 Modello di base

Per questo lavoro ci si è basati sul modello di Veitinger et al. [2016], il cui algoritmo originale si trova all'indirizzo (ultima consultazione il 10 marzo 2017):

`https://github.com/jocha81/Avalanche-release`

Le analisi spaziali dell'algoritmo sono affidate, tramite il pacchetto RSAGA [Brenning 2008], al software GIS *open-source* SAGA (versione 2.1.4).[3]

Tale modello adotta la logica *fuzzy*; in particolare impiega una funzione di appartenenza a campana generalizzata (*generalized bell membership function*) di equazione

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-c}{a}\right)^{2b}} \tag{2.1}$$

per attribuire il grado di appartenenza dei parametri del modello alla classe *aree potenziali di distacco* (*Potential Release Area*, PRA). Questo tipo di funzioni "a campana" sono caratterizzate da un profilo liscio la cui forma è determinata dai suoi parametri: a governa l'ampiezza della curva, b la relativa pendenza e c identifica il centro della curva (è il suo "asse di simmetria").

Nei prossimi paragrafi si illustrano i parametri di questo modello.

2.3.1 Parametri

Acclività

L'acclività (*slope*) di un pendio indica la sua ripidità e viene generalmente espressa come angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale. Essa è il tasso di variazione (*derivata*) della quota z rispetto alla superficie e, se espressa come angolo α, si calcola come segue

$$\alpha = \arctan \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}xy} = \arctan \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \tag{2.2}$$

dove $\frac{\partial z}{\partial x}$ e $\frac{\partial z}{\partial y}$ sono le derivate parziali della quota z rispetto alle componenti x e y. Il valore di α così calcolato è un angolo d'inclinazione espresso in radianti. Per ottenere il valore in gradi, si moltiplica il risultato per $180/\pi$. Similmente, l'esposizione β è definita come rapporto delle derivate parziali:

$$\beta = \arctan \frac{\partial z / \partial y}{\partial z / \partial x} \tag{2.3}$$

Queste definizioni sono coerenti con altre [Zevenbergen e Thorne 1987].

Per calcolare l'acclività, questo modello adotta la parametrizzazione quadratica multi-scala (*multi-scale quadratic parametrization*) di Wood [1996], che consente di calcolare un parametro topografico a diverse scale senza variare la risoluzione del DTM, bensì cambiando l'estensione della finestra mobile usata per il calcolo.

L'appartenenza degli angoli di inclinazione alla classe PRA è stata modellata con una funzione di appartenenze a campana generalizzata (eq. (2.1)) con parametri $a = 8$, $b = 3$ e $c = 40$ (fig. 2.2). Questo modello assegna il massimo grado di appartenenza ($\mu_{\mathrm{PRA}}(\alpha) = 1$) alle inclinazioni comprese tra 35 e 45 °, poiché queste sono le acclività alle quali più facilmente si verificano le valanghe a lastroni (cfr. p. 74). Sotto i 25 e sopra i 60° si assume che non si stacchino valanghe (fig. 2.3).

[3] http://www.saga-gis.org (ultima consultazione il 10 marzo 2017)

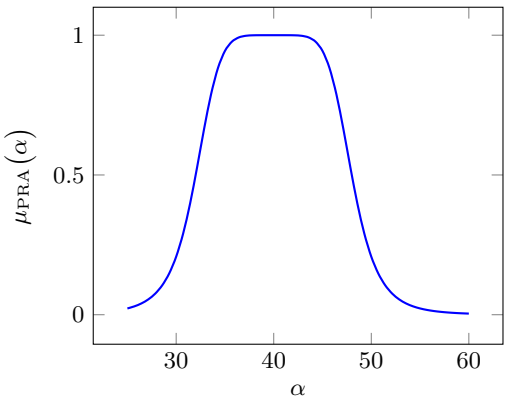


Figura 2.2: Funzione di appartenenza *fuzzy* per l'inclinazione α. $\mu_{\mathrm{PRA}}(\alpha)$ indica il grado di appartenenza dell'inclinazione alla classe *aree potenziali di distacco* (*Potential Release Area*, PRA).

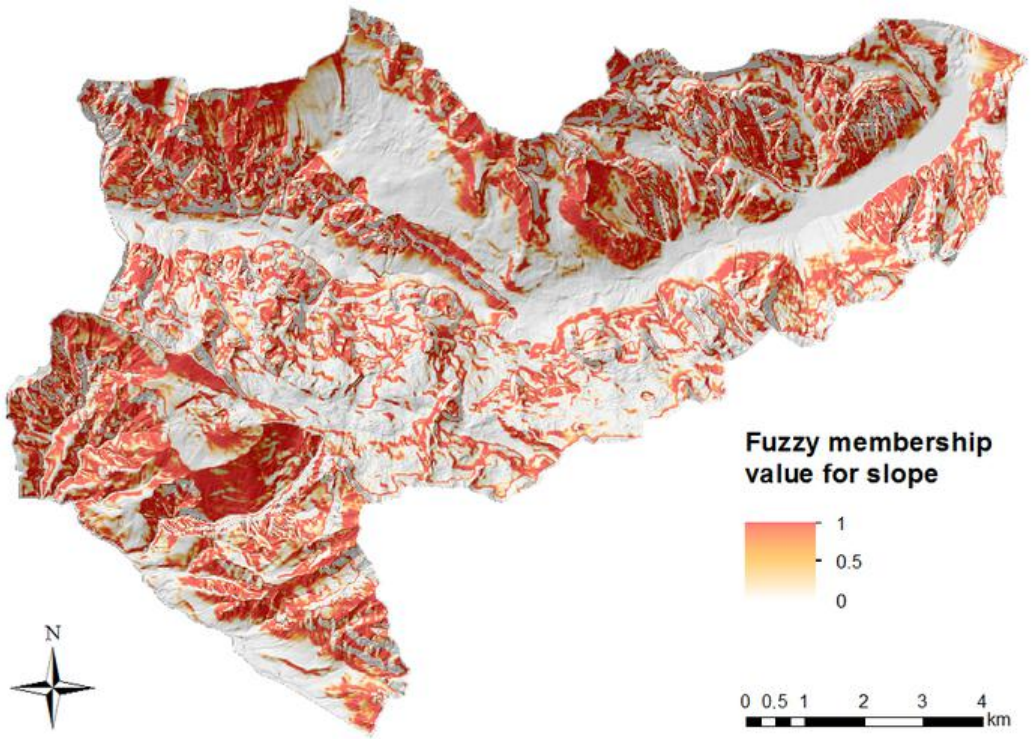


Figura 2.3: Valori di appartenenza *fuzzy* per l'acclività. Colori tendenti al rosso indicano alto grado di appartenenza. Sia alle zone piane che ai pendii molto ripidi viene assegnato basso grado di appartenenza (colore tendente al bianco). L'area è il gruppo del monte Canin.

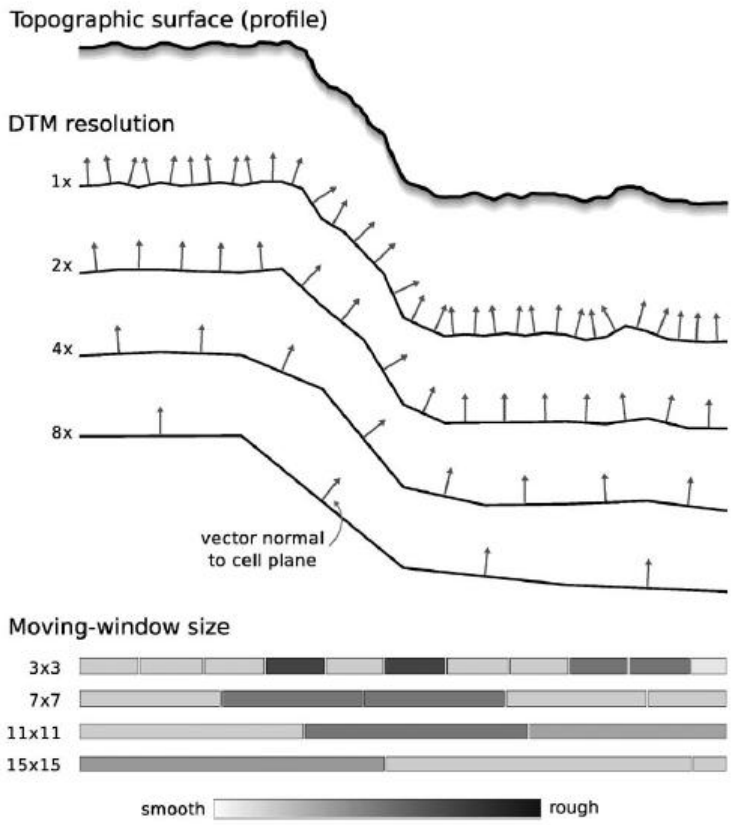
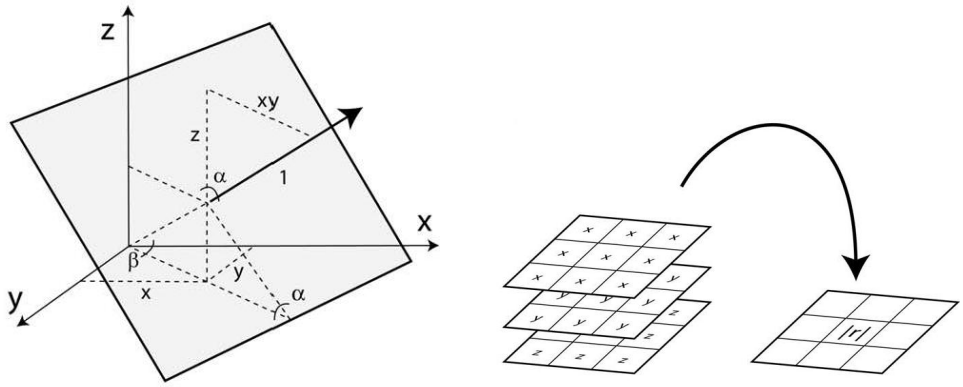


Figura 2.4: Metodo della dispersione dei vettori (*vector dispersion method*) per calcolare la scabrezza superficiale. La superficie topografica (*topogaphic surface*), qui vista di profilo (*profile*) è approssimata da un DTM, ad ogni cella del quale è assegnato un vettore normale al piano della stessa (*vector normal to cell plane*). Il dettaglio dell'informazione sulla scabrezza, per distinguere tra un terreno liscio (*smooth*) e scabro (*rough*) è legato alla risoluzione del DTM (DTM *resolution*) ed alla dimensione della finestra mobile (*moving-window size*) usata per il calcolo. Figura da Grohmann et al. [2010].

Scabrezza superficiale

La scabrezza superficiale (*roughness*) può influenzare la propensione di un'area al distacco di una valanga (cfr. p. 82). Essa diminuisce con l'accumulo di neve, e quest'ultimo decresce all'aumentare dell'acclività. Per modellare la scabrezza di un terreno innevato occorrerebbe un DTM invernale, ma questo generalmente non è disponibile. Per superare tale ostacolo, questo modello adotta un metodo sperimentale innovativo che corregge la scabrezza superficiale di un DTM estivo secondo l'altezza del manto nevoso (impostata dall'utente) e l'acclività del pendio.

Per modellare la scabrezza superficiale del DTM estivo viene impiegato il metodo della dispersione dei vettori (*vector dispersion method*, fig. 2.4): l'irregolarità della superficie topografica è modellata grazie alla variabilità della direzione dei vettori normali alla superficie. In particolare viene impiegato il valore del vettore scabrezza (*vector ruggedness measure*) di Sappington et al. [2007]: in base alle definizioni di



(a) Scomposizione dei versori normali alla cella nelle componenti x, y e z secondo l'inclinazione α e l'esposizione β

(b) Somma delle componenti x, y e z

Figura 2.5: Calcolo del modulo del vettore *ruggedness*. Figure da Sappington et al. [2007]

angolo di inclinazione α (eq. (2.2)) ed esposizione β (eq. (2.3)), i versori normali alla superficie di una cella del DTM vengono scomposti nelle componenti degli assi x, y e z (fig. 2.5a) come segue:

$$z = 1 \cdot \cos\alpha \tag{2.4}$$

$$d_{xy} = 1 \cdot \sin\alpha \tag{2.5}$$

$$x = d_{xy} \cdot \cos\beta \tag{2.6}$$

$$y = d_{xy} \cdot \sin\beta \tag{2.7}$$

Le componenti di ogni cella vengono sommate assieme a quelle delle otto celle vicine usando una finestra mobile (*moving window*), ottenendo un valore r (fig. 2.5b):

$$r = \sqrt{\left(\sum x\right)^2 + \left(\sum y\right)^2 + \left(\sum z\right)^2} \tag{2.8}$$

Il risultato viene quindi normalizzato per il numero delle celle della finestra mobile (nove, nell'algoritmo di Veitinger et al.) e sottratto a 1

$$R = 1 - \frac{r}{9} \tag{2.9}$$

ottenendo R, il modulo del vettore *ruggedness*.

Per calcolare la scabrezza, questo modello impiega una finestra mobile costante di 3×3 celle; la scala del calcolo (cfr. fig. 2.4) è data dalle dimensioni variabili delle celle della finestra usata per calcolare l'acclività e l'esposizione.

Il valore di R varia tra 0 (terreno liscio) e 0.02 (terreno scabro). Un terreno liscio è più propenso al distacco di una valanga, mentre all'aumentare della scabrezza le valanghe diventano improbabili (cfr. p. 82). Perciò il grado di appartenenza della scabrezza $\mu_{\text{PRA}}(R)$ alla classe PRA è stato modellato con una funzione di appartenenza a campana (eq. (2.1)) con parametri $a = 0.01$, $b = 2$ e $c = -0.005$ (fig. 2.6). La funzione assume alti valori (alti gradi di appartenenza) per terreni molto

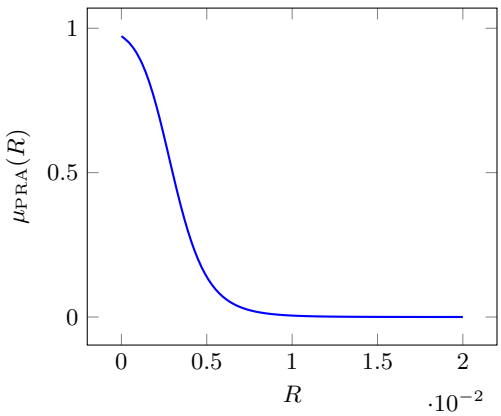


Figura 2.6: Funzione di appartenenza *fuzzy* per la scabrezza. R è il valore del vettore *ruggedness*, $\mu_{\mathrm{PRA}}(R)$ è il grado di appartenenza.

lisci, e decresce fortemente tra 0 e 0.01. Se R assume valori tra 0.01 e 0.02, viene assegnato un basso grado di appartenenza alla classe PRA. Per $R > 0.02$, si assume che le valanghe non possano cadere.

Correzione della scabrezza con la copertura nevosa Come anticipato, questo modello approssima la scabrezza del terreno invernale, addolcita dall'accumulo di neve, usando un DTM estivo. Il processo di *smoothing* (addolcimento, lisciamento) del terreno è legato alla scala del calcolo come funzione della profondità media della neve $\overline{\mathrm{HS}}$ (corretta nei calcoli in base all'acclività) e della sua variabilità. La scala S del calcolo, espressa in numero di celle, è data dalla seguente formula empirica:

$$S = 2 \cdot \left\lceil \overline{\mathrm{HS}}^2 \cdot C_{\mathrm{v}} \right\rceil + 1 \tag{2.10}$$

dove C_{v} è il coefficiente di variazione della profondità della neve, definito come deviazione standard diviso media:

$$C_{\mathrm{v}} = \frac{\sigma(\mathrm{HS})}{\overline{\mathrm{HS}}} \tag{2.11}$$

Nei calcoli dell'algoritmo l'opzione predefinita è $C_{\mathrm{v}} = 0.35$; se invece viene scelto un basso grado di *smoothing*, ad esempio per poca ridistribuzione della neve, C_{v} vale 0.2; in quest'ultimo caso lo spessore della neve assume una bassa variabilità. Ad esempio, se la profondità media delle neve è 2 m ($\overline{\mathrm{HS}} = 2\,\mathrm{m}$) e si sceglie che $C_{\mathrm{v}} = 0.2$ a causa della bassa ridistribuzione della neve, la dimensione della finestra mobile viene calcolata come segue:

$$\begin{aligned} S &= 2 \cdot \left\lceil (2\,\mathrm{m})^2 \cdot 0.2 \right\rceil + 1\,\mathrm{m}^2 \\ &= 2 \cdot \left\lceil 0.8\,\mathrm{m}^2 \right\rceil + 1\,\mathrm{m}^2 \\ &= 2 \cdot 1\,\mathrm{m}^2 + 1\,\mathrm{m}^2 \\ &= 3\,\mathrm{m}^2 \end{aligned} \tag{2.12}$$

Vento

Il vento è un importante fattore nella formazione delle valanghe poiché redistribuisce la neve (cfr. p. 79).

Questo modello utilizza l'indice di riparo dal vento (*wind shelter index*) $I(S)$ di Plattner et al. [2006] (eq. (2.13)), basato su quello di Winstral et al. [2002]:

$$I(S) = \arctan\left(\max\left(\frac{z(x_0) - z(x)}{|x_0 - x|}\right)\right) \quad : x \in S \tag{2.13}$$

dove $S = S(x_0, a, \delta a, d)$ è un sottoinsieme di celle con distanza $\leq d$ ed un intervallo di direzione di $a \pm \delta a$ dalla cella centrale x_0; z è la funzione della quota.

A seconda della direzione principale del vento e della relativa tolleranza, impostata dall'utente, questo indice identifica le zone riparate dal vento (dunque con possibili accumuli eolici) e quelle sopravento. Il valore dell'indice varia tra -1.5 e 1.5; valori negativi indicano un terreno esposto al vento, valori positivi un terreno riparato dal vento (fig. 2.7).

Considerata l'interazione tra il vento e la superficie del terreno nella redistribuzione della neve, Veitinger et al. [2016] ritengono superiore questo indice alle usuali misure di curvatura topografica usati da altri autori [Maggioni, U. Gruber e A. Stoffel 2002; Vontobel 2011]: esso infatti è indipendente dalla direzione della curvatura e l'effetto di riparo può essere derivato dalla direzione del vento.

L'algoritmo usa la funzione `wind.shelter` del pacchetto RSAGA di Brenning [2008]: in questa l'indice viene generalizzato, sostituendo la funzione `max` con la funzione `quantile` di R. Veitinger et al. hanno usato il terzo quartile invece del valore massimo, a causa di possibili sovrastime locali del valore dell'indice.

Questo modello considera i terreni esposti al vento ($I(S) \to -1.5$) non essere aree potenziali di distacco, quelli riparati dal vento ($I(S) \to 1.5$) sì; per questo il parametro viene modellato con una funzione di appartenenza a campana generalizzata (eq. (2.1)) con parametri $a = 2$, $b = 5$ e $c = 2$. La funzione assegna il massimo grado di appartenenza ai pendii riparati dal vento (fig. 2.8).

2.3.2 Modellazione con logica *fuzzy*

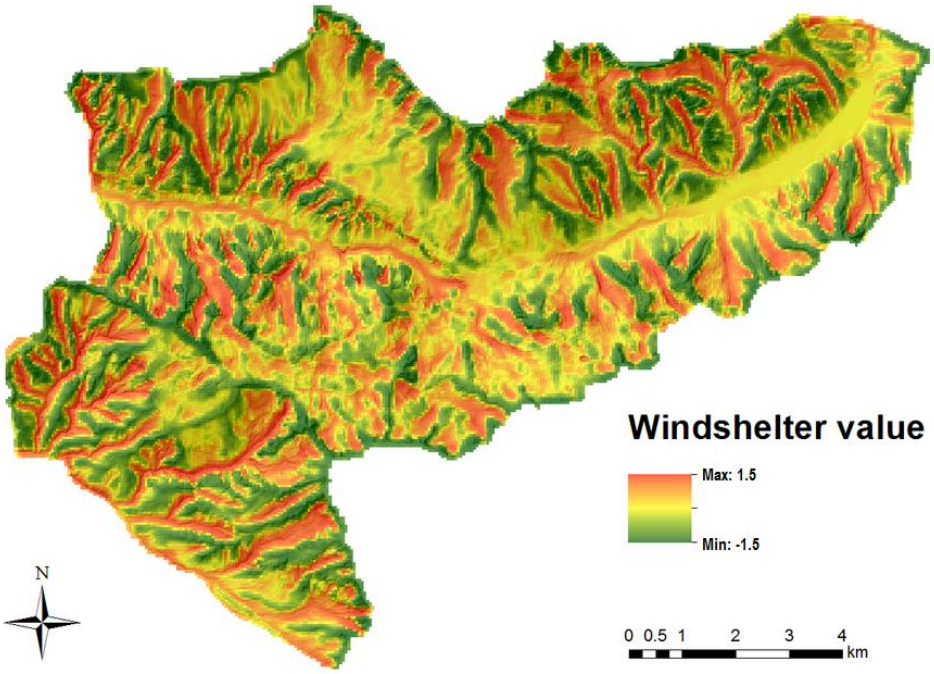
Questo algoritmo modella l'appartenenza di una cella alla classe PRA con l'operatore AND *fuzzy* di Werners [1988], che consente una completa compensazione tra le variabili. L'appartenenza alla classe PRA $\mu_{\text{PRA}}(x)$ è definita come

$$\begin{aligned}\mu_{\text{PRA}}(x) = \gamma \cdot \min(\mu_{\text{PRA}}(\alpha), \mu_{\text{PRA}}(I(S)), \mu_{\text{PRA}}(R)) \\ + \frac{(1-\gamma)(\mu_{\text{PRA}}(\alpha) + \mu_{\text{PRA}}(I(S)) + \mu_{\text{PRA}}(R))}{3}\end{aligned} \tag{2.14}$$

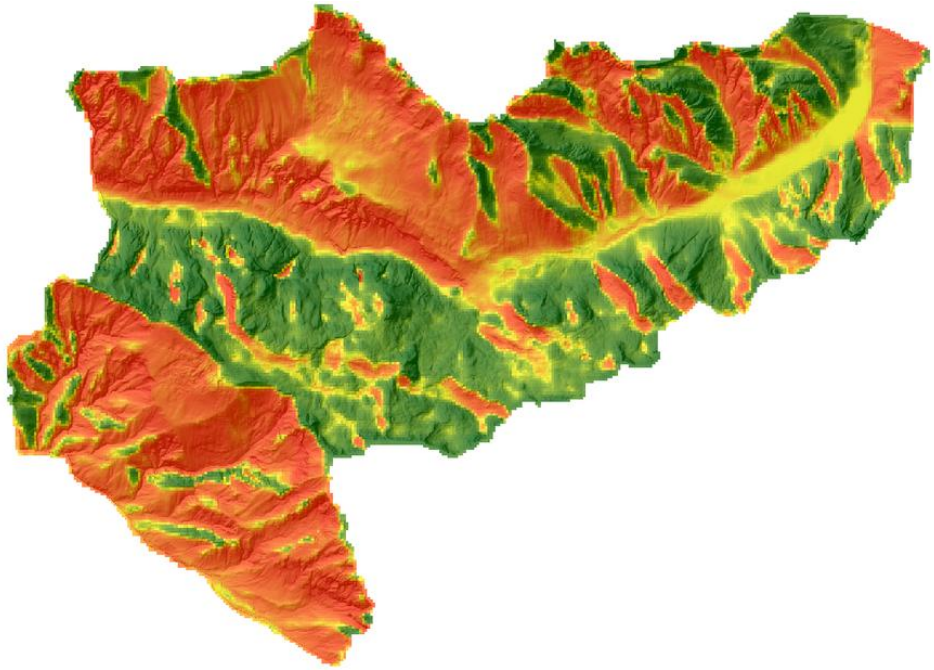
dove $\mu_{\text{PRA}}(\alpha)$, $\mu_{\text{PRA}}(I(S))$ e $\mu_{\text{PRA}}(R)$ sono i tre insiemi *fuzzy* precedentemente definiti e $\gamma \in [0, 1]$ è così definita

$$\gamma = 1 - \min(\mu_{\text{PRA}}(\alpha), \mu_{\text{PRA}}(I(S)), \mu_{\text{PRA}}(R)) \tag{2.15}$$

γ dipende dal più piccolo grado di appartenenza tra i tre insiemi *fuzzy*. Se $\gamma = 1$ allora $\mu_{\text{PRA}}(x) = \min(\mu_{\text{PRA}}(\alpha), \mu_{\text{PRA}}(I(S)), \mu_{\text{PRA}}(R))$, comportandosi come un operatore



(a) Direzione: 0° Tolleranza: 180°



(b) Direzione: 45° Tolleranza: 90°

Figura 2.7: Esempio di calcolo dell'indice *wind shelter*. Colori tendenti al rosso indicano zone riparate dal vento, verde esposte al vento. Nella figura **(a)** non è stata impostata nessuna direzione preferenziale del vento. Si noti come vengano individuate concavità e convessità. Nella figura **(b)** è impostato un vento da nord-est: i versanti sud-ovest diventano riparati dal vento. L'area è il gruppo del monte Canin.

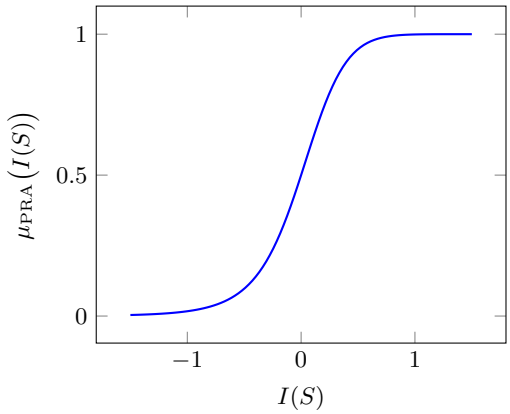


Figura 2.8: Funzione *fuzzy* per l'indice *wind shelter* $I(S)$. $\mu_{\mathrm{PRA}}(I(S))$ è il grado di appartenenza.

minimo, poiché si annulla il secondo addendo dell'equazione (2.14). Viceversa, se $\gamma = 0$ è il primo addendo ad annullarsi e $\mu_{\mathrm{PRA}}(x) = \frac{\mu_{\mathrm{PRA}}(\alpha)+\mu_{\mathrm{PRA}}(I(S))+\mu_{\mathrm{PRA}}(R)}{3}$, ricavando la media aritmetica.

Il risultato di questi calcoli è una carta delle aree di distacco potenziale (PRA, fig. 2.9).

2.4 Dati utilizzati

Per questo lavoro sono stati utilizzati principalmente i DTM della Protezione Civile e la Carta di Localizzazione Probabile delle Valanghe (CLPV) della Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia.[4]

I DTM, ricavati da rilievi LIDAR effettuati negli anni 2006–2010, avevano celle di passo 1 m, erano nel sistema di riferimento Gauss-Boaga fuso Est (codice EPSG:3004) ed in formato ASCII. In ArcGIS, i DTM sono stati *mosaicati* e ritagliati secondo l'estensione dell'area di studio, ricampionandoli con lo strumento *aggregate*, usando la media, per ottenere *raster* con celle di passo 2, 5 e 10 m (fig. 2.10) per migliorare l'efficienza computazionale dei calcoli secondo il dettaglio richiesto.

Le CLPV cartografano le aree dove le valanghe sono scese o potrebbero potenzialmente scendere [Milanese 2010]. Le tre CLPV scaricate (valanghe rilevate, valanghe fotointerpretate, zone pericolose) sono state unite in un unico *shapefile* per includere tutte le geometrie delle tre carte (fig. 2.11). Questo è stato fatto per disporre di un unico *dataset* per le analisi successive. Ad esempio, la carta delle *valanghe rilevate* non riporta le geometrie di alcuni frequenti scaricamenti e valanghe di minori dimensioni, cartografati nelle *zone pericolose*.

Per disporre di dati trattabili come matrici numeriche, tutte le carte sono state convertite in file *raster* con dimensione delle celle pari a quella dei DTM utilizzati, quindi in file ASCII, impostando il punto come separatore decimale.

[4] http://irdat.regione.fvg.it/CTRN/ricerca-cartografia/ (consultato il 10 marzo 2017).

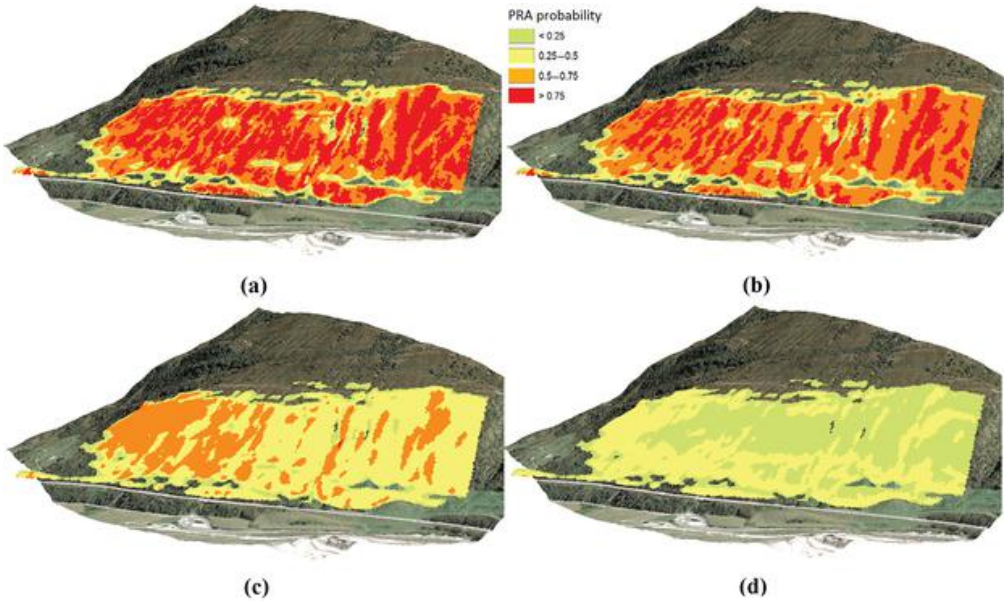


Figura 2.9: Risultati del modello per la valanga del Böschen (Canton Uri, Svizzera). I colori indicano i gradi di appartenenza alla classe PRA. L'altezza della neve è 1.2 m con vento da **(a)** sud, **(b)** sud-ovest, **(c)** ovest e **(d)** nord-ovest. Figura da Veitinger et al. [2016].

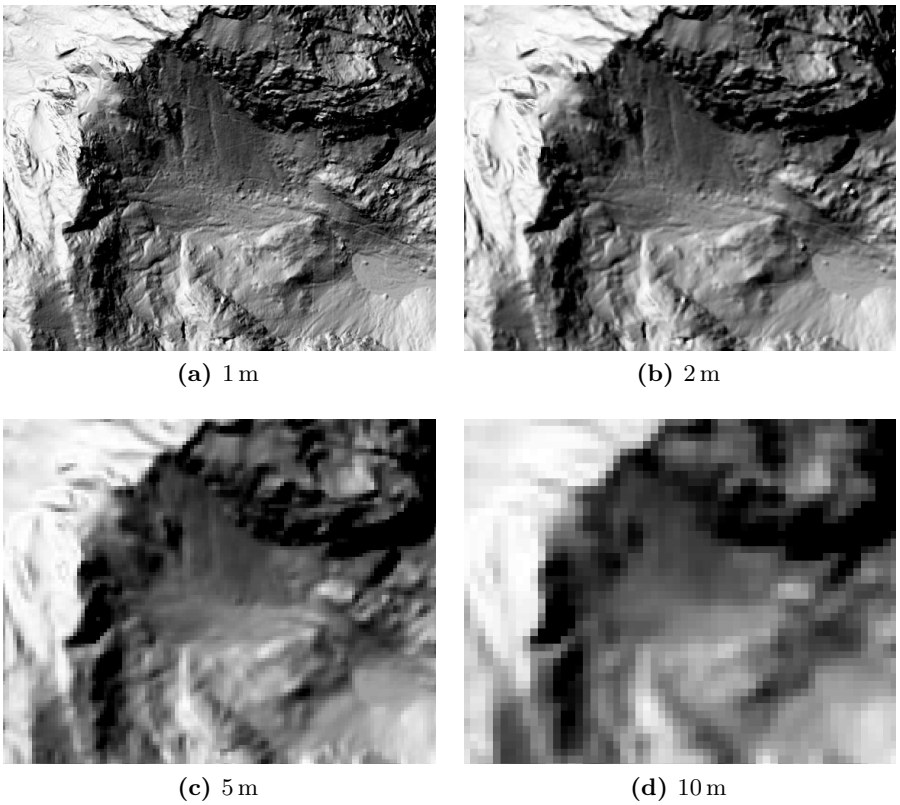


Figura 2.10: Risoluzione dei DTM utilizzati. È inquadrata Sella Bila Pec (gruppo del monte Canin).

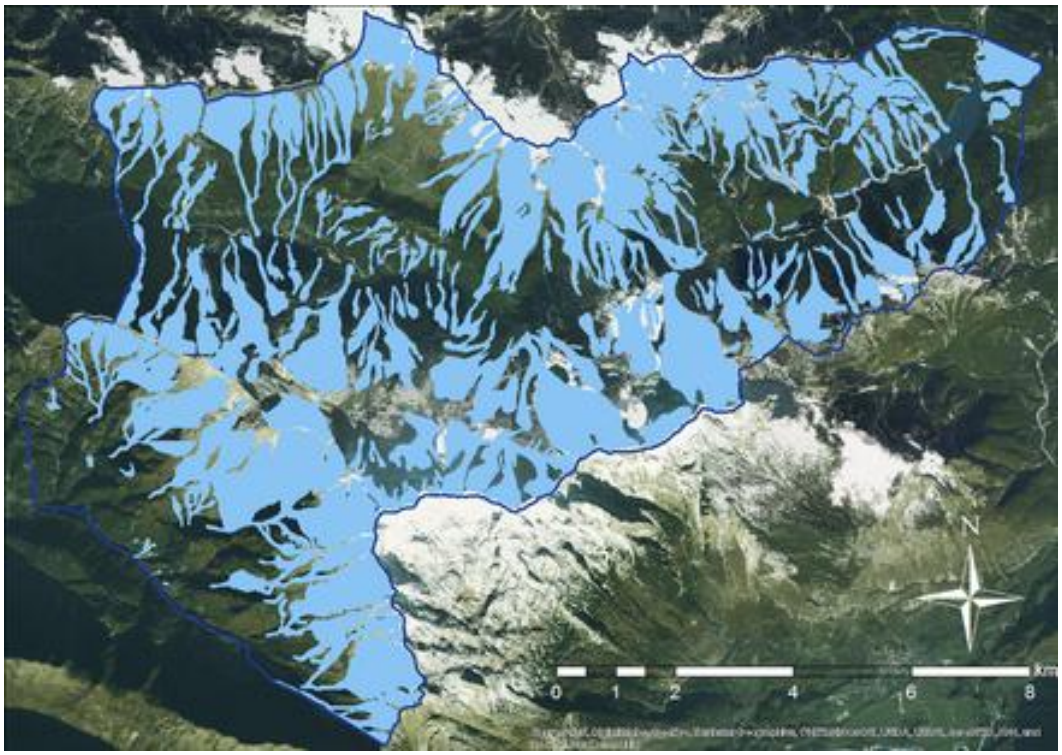


Figura 2.11: *Raster* finale dall'unione delle tre CLPV. L'area è il gruppo del monte Canin.

Capitolo 3

Risultati

Questo capitolo illustra i risultati del lavoro. Il paragrafo 3.1 riporta gli esiti delle indagini esplorative sui bollettini valanghe e del questionario inviato ai previsori. Il paragrafo 3.2 è il nucleo di questo studio: il modello messo a punto per calcolare e visualizzare la pericolosità da valanga. Viene dapprima data una visione d'insieme sul modello (3.2.1), segue l'esposizione dei suoi parametri (3.2.2) e dei dati da esso ricavati (3.2.3) proponendo un'innovativa percentuale (3.2.4), e viene illustrato un ipotetico uso del modello (3.2.5). Il paragrafo 3.3 chiude il capitolo, riportando due casi di studio e analisi statistiche.

3.1 Fattori importanti nelle previsioni

Nella parte testuale dei bollettini valanghe sono considerate sempre determinate caratteristiche per localizzare il pericolo (tab. 3.1). Ad esempio, vi sono riferimenti alla quota con frasi come «sopra i 1800 m sono presenti accumuli di neve ventata» oppure «sono possibili piccole valanghe spontanee oltre i 2000 m». Altre volte viene riportata la quota della nevicata o quella dell'innevamento. Il vento è un'altra caratteristica molto ricorrente, con ripetuti riferimenti alla direzione prevalente dei venti ed alla localizzazione degli accumuli di neve per trasporto eolico.

Riguardo al questionario, su circa quaranta indirizzi di posta elettronica cui è stato inviato, sono state ricevute sedici risposte: quattordici dall'Italia, una dal Tirolo ed una dal Canton Grigioni (Svizzera). I risultati integrali sono riportati nell'appendice C.2; si riporta qui qualche esempio significativo.

Tabella 3.1: Concetti ricorrenti nei bollettini valanghe

Caratteristica	Esempio
Quota	Fino a 2000 m; sopra i 1800 m
Acclività	Sui pendii molto ripidi; tra i 27 e i 30°
Esposizione	A nord; sui versanti al sole
Curvatura topografica	Sotto creste e forcelle; nei canaloni e colatoi
Vento	I venti da est e nord-est; i venti da sud
Bosco	Sopra il limite del bosco

Tabella 3.2: Statistica sui risultati della quota

Indice	Neve fresca	Temperatura	Vento	Veg.ne, bosco	Lim. neve	Irr.to solare	Stab. m. nevoso	Precipitazioni
Mediana	5.00	4.00	5.00	3.00	4.00	3.50	4.00	4.00
IQR	1.00	2.25	1.00	1.25	2.25	2.25	1.25	1.00

Tabella 3.3: Statistica sui risultati dell'esposizione

Indice	Neve fresca	Temperatura	Vento	Veg.ne, bosco	Lim. neve	Irr.to solare	Stab. m. nevoso	Precipitazioni
Mediana	2.50	3.00	4.50	2.00	2.00	3.50	4.00	2.50
IQR	2.00	1.00	1.00	1.00	1.00	3.25	1.00	1.00

L'analisi statistica descrittiva sui risultati ha permesso di determinare i fattori più importanti considerati dai previsori per definire quote, esposizioni ed acclività critiche.

Quote Per le quote pericolose per il distacco di valanghe (tab. 3.2) i fattori con punteggio mediano più alto (mediana = 5) sono il *vento* e la *neve fresca*, entrambi con scarto interquartile (*interquartile range*, IQR) di 1; anche le precipitazioni assumono un'alta mediana con dispersione contenuta (4.5 e IQR = 1). La figura 3.1 riporta le distribuzioni di frequenza di questi tre fattori. Accorpando le classi 4 (importante) e 5 (molto importante) in un'unica classe 4, la mediana sarebbe 4 per il vento, 4 per la neve fresca e 4 per le precipitazioni, con un IQR nullo in tutti e tre i casi.

Esposizioni Per le esposizioni geografiche critiche (tab. 3.3), il *vento* ha la più alta mediana (4.5 e IQR= 1), cui segue la *stabilità del manto nevoso* (mediana = 4 e IQR= 1). La figura 3.2 riporta le distribuzioni di frequenza di questi due fattori. Accorpando le classi 4 e 5, vento e stabilità del manto nevoso avrebbero la stessa mediana (4) e IQR nullo.

Acclività Per le acclività ("inclinazioni") critiche, la *stabilità del manto nevoso* ha la mediana più alta (5) con IQR= 1. La figura 3.3 riporta la distribuzione di frequenza di questo fattore. Accorpando le classi 4 e 5, questo fattore avrebbe mediana = 4 e IQR= 0 e la neve fresca avrebbe mediana = 4 e IQR= 1.25.

Oltre a ciò, sono stati raccolti otto commenti scritti, riportati interamente alle pagine 112–116. Ad esempio, è stato scritto che un fattore importante per le esposizioni critiche è la «direzione di provenienza della perturbazione»; oppure «l'inclinazione critica è relativa alla struttura del manto nevoso.»

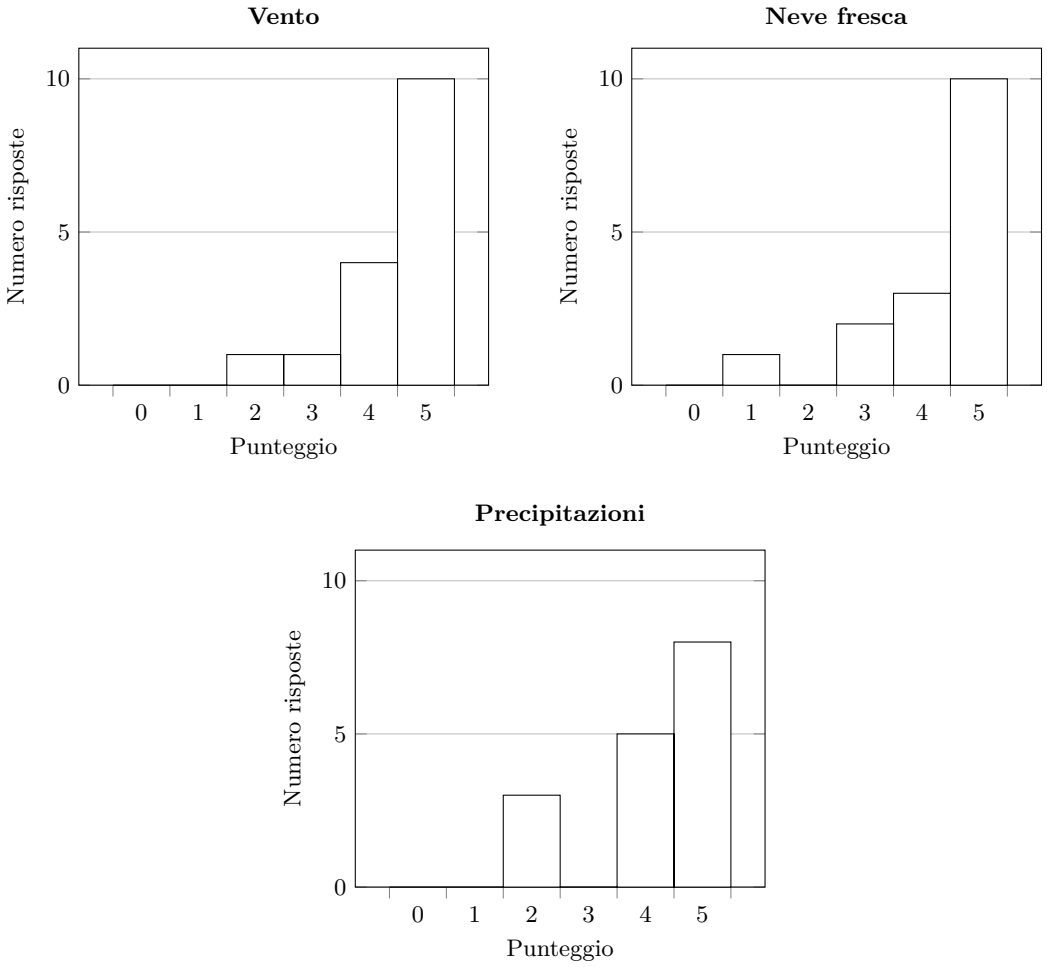


Figura 3.1: Quote critiche: distribuzioni di frequenza dei punteggi assegnati a vento, neve fresca e precipitazioni.

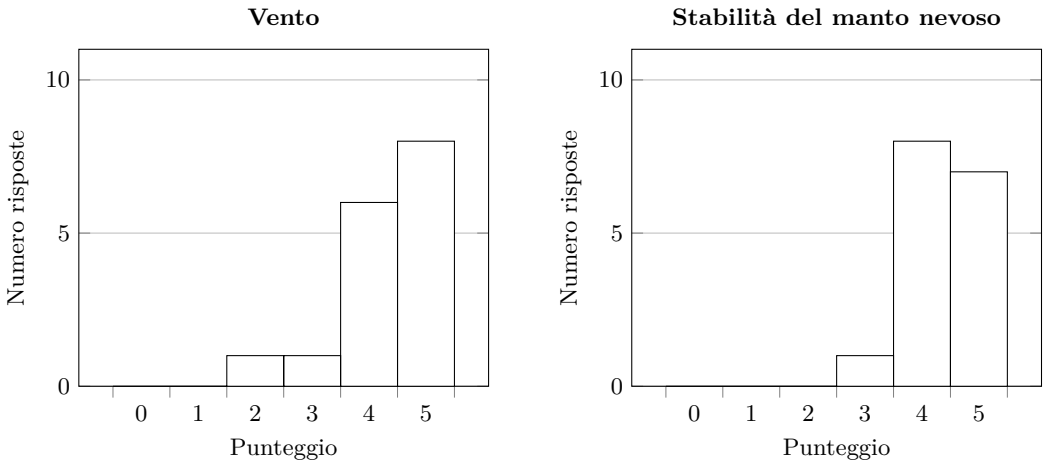


Figura 3.2: Esposizioni critiche: distribuzioni di frequenza dei punteggi assegnati a vento e stabilità del manto nevoso.

Tabella 3.4: Statistica sui risultati dell'inclinazione

Indice	Neve fresca	Temperatura	Vento	Veg.^{ne}, bosco	Lim. neve	Irr.^{to} solare	Stab. m. nevoso	Precipitazioni
Mediana	4.00	3.00	3.00	2.00	2.00	3.00	5.00	3.50
IQR	1.50	1.25	1.00	2.00	2.00	1.00	1.00	3.00

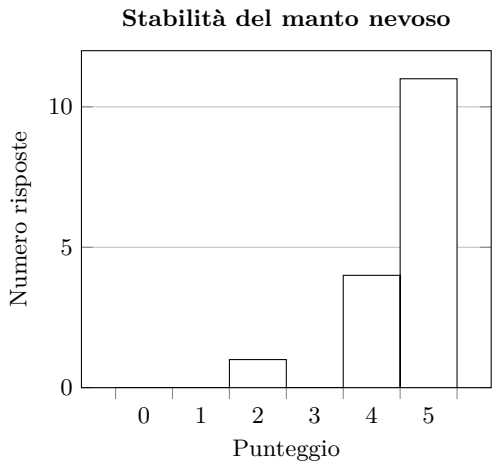


Figura 3.3: Acclività critiche: distribuzione di frequenza dei punteggi assegnati alla stabilità del manto nevoso.

Le "caratteristiche ricorrenti" individuate con l'analisi dei bollettini ed i fattori più importanti ricavati dalla statistica sui questionari hanno permesso di determinare i dati d'ingresso ed i parametri del modello esposto nel paragrafo seguente.

3.2 Modello

3.2.1 Visione d'insieme

Il modello proposto in questo lavoro vuole consentire ai servizi di avviso valanghe di visualizzare le aree più pericolose previste nei bollettini. Per fare ciò, sono state aggiunte nuove funzionalità all'algoritmo di Veitinger et al. [2016] (§ 2.3), permettendo di calcolare e visualizzare automaticamente la propensione al distacco di valanghe a lastroni al variare delle condizioni nivometeorologiche del momento.

Le indagini esplorative (§ 3.1) hanno permesso di determinare i dati d'ingresso del modello. Questi, stabiliti dall'utente, sono: a) grado di stabilità del manto nevoso, b) esposizione critica (opzionale), c) direzione del vento (e sua tolleranza), d) limiti di quota per gli effetti eolici, e) spessore del manto nevoso, f) quote soggette al pericolo di valanghe, g) limiti altitudinali della neve.

Questi dati concorrono a calcolare i cinque parametri del modello: 1) acclività, 2) indice *wind shelter* pesato, 3) scabrezza superficiale, 4) quote potenzialmente pericolose, 5) copertura nevosa. I parametri 1, 2 e 3 vengono elaborati da un operatore *fuzzy* per produrre la carta delle *aree di distacco potenziale* (*Potential Release Area*, PRA), successivamente corretta dai parametri 4 e 5. Un *raster* della copertura forestale può essere fornito per escludere le zone boscate dal calcolo delle zone pericolose.

Con i dati ed i parametri sono stati modellati tutti i "concetti ricorrenti" dei bollettini valanghe ed i fattori importati per determinare acclività, esposizioni e quote critiche (§ 3.1).

L'algoritmo è stato programmato in linguaggio R grazie all'omonimo software libero (versione 3.3.2, `https://cran.r-project.org/`) ed è interamente riportato nell'appendice B.1; la figura 3.4 ne riporta il diagramma di flusso. ArcGIS® 10.4.1 per Desktop (versione di prova) è stato utilizzato per alcune operazioni preliminari sui dati e per visualizzare i risultati.

Nei seguenti paragrafi vengono illustrati i parametri originali del modello. Per il calcolo della scabrezza superficiale e dell'indice *wind shelter* si rimanda al paragrafo 2.3. Le ragioni fisiche della scelta di questi parametri possono essere consultate nell'appendice A.1.

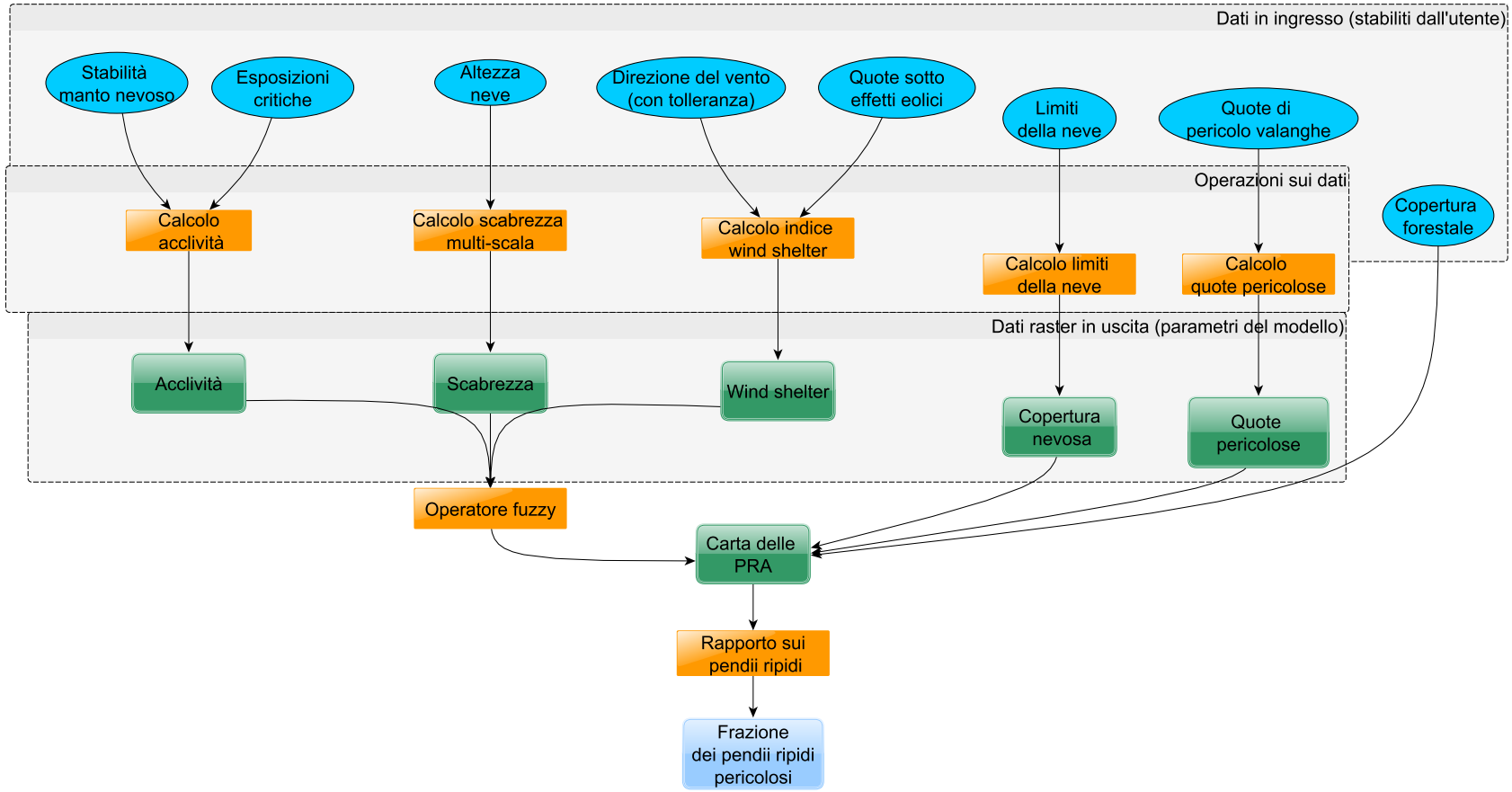


Figura 3.4: Diagramma di flusso dell'algoritmo. Sono riportati i dati in ingresso (blu), le operazioni su di essi (arancione) e i dati*raster* in uscita (verde). L'ultimo dato *raster* in uscita è l'obiettivo del modello: la carta delle aree potenziali di distacco di valanghe (*Potential Release Area*, PRA) secondo le condizioni nivometeorologiche del momento. Il riquadro al termine del diagramma (frazione dei pendii ripidi pericolosi) è un dato costituito da un unico numero espresso come percentuale.

3.2.2 Parametri

Acclività

L'acclività è la più rilevante caratteristica topografica per il distacco di valanghe (p. A.1). Secondo le indagini effettuate, il fattore più importante per definire le acclività pericolose ai fini del bollettino sarebbe la stabilità del manto nevoso, determinata dalla sua struttura (cfr. paragrafo A.2.1).

Per questo motivo, per ognuno dei cinque gradi di stabilità del manto nevoso[1] dalla scala europea del pericolo valanghe (tab. 1.2), è stata definita una funzione di appartenenza *fuzzy* dell'acclività (*slope*) $\mu_{\mathrm{PRA}}(\alpha)$: la funzioni associa ai valori degli angoli di inclinazione α un grado di appartenenza $\mu_{\mathrm{PRA}}(\alpha) \in [0, 1]$ alla classe PRA (fig. 3.5). A parità di altri fattori, dati un grado di stabilità del manto nevoso ed un angolo di inclinazione, più il valore della funzione si avvicina ad 1 più un pendio con quella acclività è un'area di distacco potenziale.

L'espressione analitica impiega la funzione di appartenenza a campana generalizzata (*generalized bell membership functions*, eq. (2.1)), sostituendo però il numeratore 1 con un parametro $d \in]0, 1]$ che determina il massimo della funzione. I parametri delle funzioni sono stati determinati confrontando il metodo di riduzione grafico di Munter [2013], lo studio di Pfeifer [2009] (che sembrerebbe confermare le proposte non empiriche di Munter) ed il parere di esperti.

Tutte le funzioni sono centrate a 40° e, salvo la numero 5, assegnano il massimo grado di appartenenza alle inclinazioni comprese tra i 35 ed i 45°. Sembra infatti che le valanghe si stacchino con angoli di inclinazioni simili, indipendentemente dal grado di pericolo [Harvey 2002, 2015].

La funzione di appartenenza per il grado 4 di stabilità del manto nevoso (curva rossa nella figura 3.5) è quella di Veitinger et al. per il loro parametro *slope*. Della loro funzione sono utilizzati i parametri $a = 8$, $b = 3$, $c = 40$. Le funzioni associate ai gradi 1, 2, 3 di stabilità del manto esprimono situazioni più favorevoli per la stabilità e, nella formulazione di questo lavoro, assegnano gradi massimi di appartenenza < 1: per i gradi 1, 2, 3 e 4 il parametro d vale rispettivamente 0.2, 0.5, 0.9 e 1. Per il grado 5, i parametri della funzione associata sono stati ricavati con una regressione non-lineare tramite la funzione `nls` di R su un insieme di punti noti (appendice B.3). Fissato un b arbitrario di volta in volta per motivi computazionali, è stato scelto il modello di regressione con l'errore standard residuo minimo. Per questa funzione $a = 13$ e $b = 5$.

Stabilito nei dati iniziali uno dei cinque gradi di stabilità del manto nevoso, l'algoritmo del modello seleziona la corrispondente funzione *fuzzy* per i calcolare il grado di propensione al distacco per le varie acclività.

Ad esempio: se si sceglie il grado 1 di stabilità, una cella del DTM con inclinazione 30° ha grado di appartenenza 0.04: questo significa che la cella è al 4% un'area potenziale di distacco. Scegliendo grado 3, per la stessa inclinazione, il valore di $\mu_{\mathrm{PRA}}(\alpha)$ sarebbe 0.17 (17%); col grado 5 sarebbe 1 (100%).

[1] A rigore, si dovrebbe scrivere *per la stabilità del manto nevoso associata ad ogni grado di pericolo della scala...*, poiché il vero grado è quello di pericolo: ad esso sono associate una stabilità del manto ed una probabilità di distacco. Nel prosieguo, per agilità di lettura, si userà la locuzione *grado di stabilità del manto nevoso*.

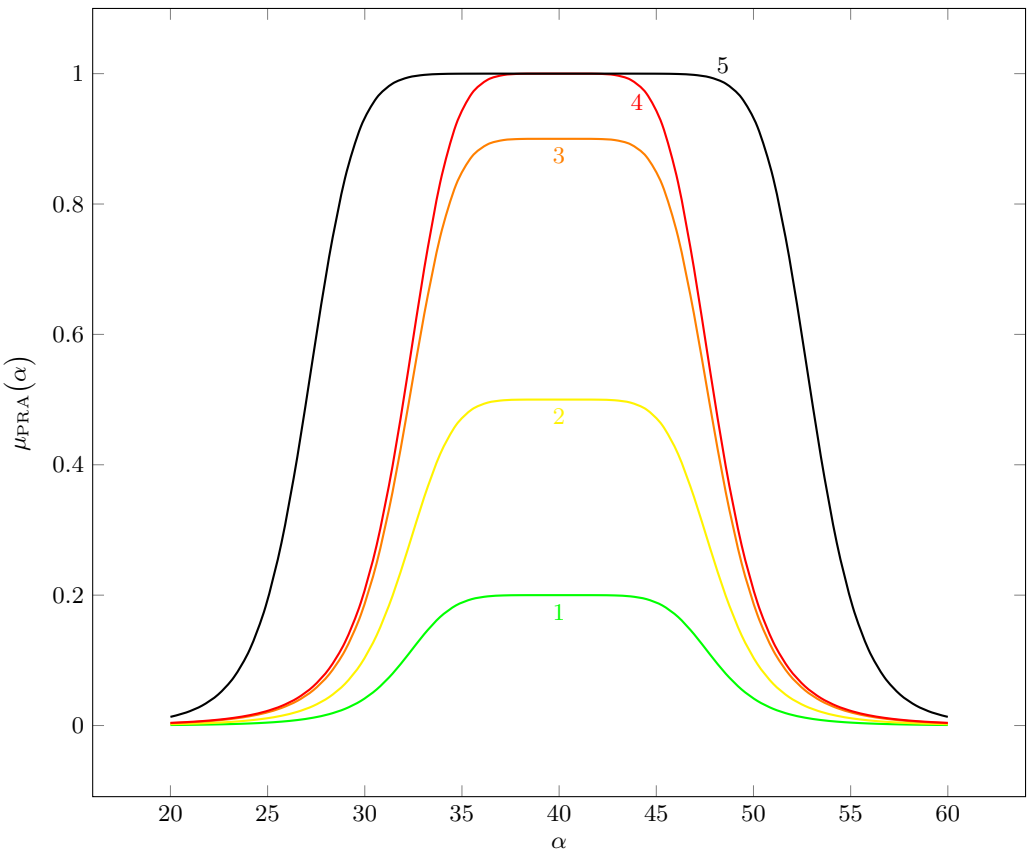


Figura 3.5: Funzioni *fuzzy* per l'inclinazione α per ogni grado di stabilità del manto nevoso: verde per il grado 1, giallo per il 2, arancione per il 3, rosso per il 4, nero per il grado 5. $\mu_{\mathrm{PRA}}(\alpha)$ è il grado di appartenenza dell'acclività alla classe PRA.

Tabella 3.5: Intervalli numerici adottati per le quattro principali esposizioni. I valori degli intervalli coincidono numericamente alla direzione dell'esposizione espressa in gradi sessagesimali.

Esposizione	Intervallo
Nord	$[0, 45] \cup [315, 360]$
Sud	$[135, 225]$
Est	$[45, 135]$
Ovest	$[225, 315]$

In questo modo è stata modellata la variabile propensione al distacco delle diverse acclività al variare della stabilità del manto nevoso (fig. 3.6).

Esposizione Dalle indagini effettuate è risultato che un importante fattore considerato dai previsori per definire le esposizioni critiche, oltre che il vento, è il diverso grado di stabilità del manto nevoso alle varie esposizioni. Infatti, l'esposizione di un versante influisce sulla struttura e la stabilità del manto nevoso; d'inverno, ad esempio, i versanti esposti a nord presentano condizioni più instabili di quelli esposti a sud, a causa del minor irraggiamento solare (cfr. p. 76).

Per questo motivo è stata creata una funzione che assegna una minor stabilità del manto nevoso all'esposizione facoltativamente indicata dall'utente tra i dati in ingresso. Gli intervalli adottati per le quattro esposizioni principali sono riportati nella tabella 3.5.

Per le celle all'esposizione stabilita, ritenuta più pericolosa delle altre, viene utilizzata la funzione *fuzzy* dell'acclività associata ad un grado di stabilità del manto nevoso superiore rispetto a quello inserito. Ad esempio: se il grado di stabilità del manto è 2 e si indicano le esposizioni nord come critiche, per le esposizioni diverse dalle nord verrà utilizzata la seconda funzione *fuzzy* nel calcolo dell'acclività (curva gialla nella figura 3.5), mentre per le esposizioni nord verrà utilizzata la terza funzione, che indica una maggiore propensione al distacco (arancione nella figura 3.5). Se il grado di stabilità è 5 o se non viene indicata alcuna esposizione critica, viene utilizzata la stessa funzione a tutte le esposizioni (la quinta o quella indicata nei dati in ingresso).

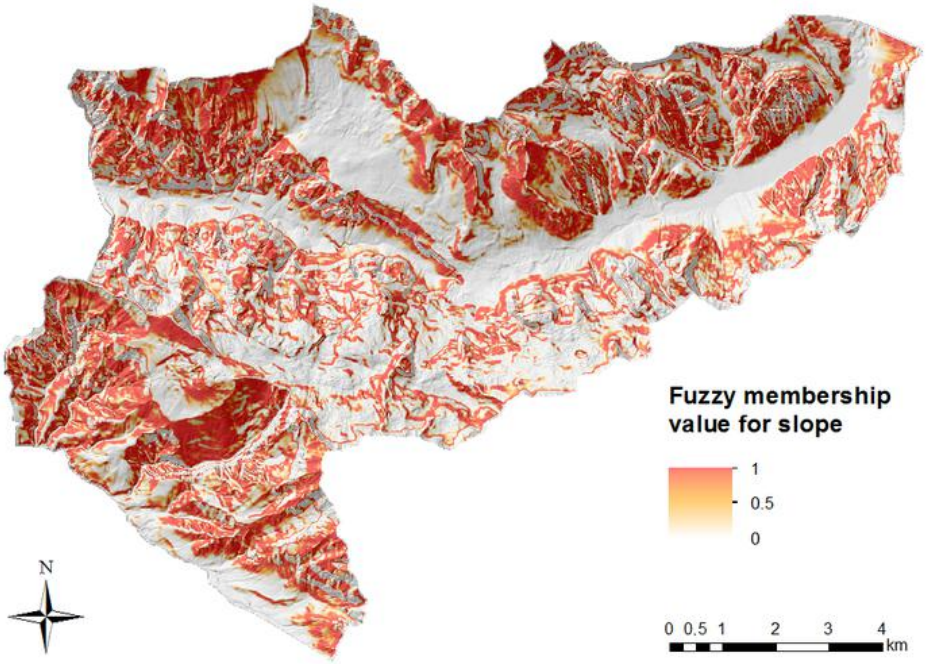
In questo modo è stata modellata la maggior propensione al distacco all'esposizione scelta dall'utente.

Indice *wind shelter* pesato

Secondo le indagini effettuate, il vento influenza considerevolmente le quote e le esposizioni critiche per il distacco di valanghe.

L'attività del vento è stata modellata col parametro *wind shelter* di Veitinger et al. [2016] (p. 24): esso inoltre consente di individuare convessità e concavità, modellando uno dei "concetti ricorrenti" del bollettino: la curvatura topografica (vedi tab. 3.1).

Tuttavia, poiché la velocità del vento aumenta con la quota e per modellare in parte le *quote critiche* (cfr. § 3.1), l'indice *wind shelter* calcolato è stato pesato da



(a) Grado 4

(b) Grado 5

Figura 3.6: Valori della funzione *fuzzy* $\mu_{\mathrm{PRA}}(\alpha)$ con due diversi gradi di stabilità del manto nevoso. La figura **(a)** è la stessa della figura 2.3. Nel caso **(b)** molte più aree assumono un elevato grado di appartenenza alla classe PRA.

una funzione $f_{\mathrm{w}}(z(x))$ definita per parti

$$f_{\mathrm{w}}(z(x)) = \begin{cases} 0 & \text{se } z(x) \leq h \\ m\, z(x) - q & \text{se } h < z(x) < i \\ 1 & \text{se } z(x) \geq i \end{cases} \tag{3.1}$$

dove $z(x)$ è la quota della cella x. Definite dall'utente una quota h, sotto la quale l'influenza del vento è trascurabile, ed una quota i, sopra la quale il vento è influente, l'algoritmo effettua automaticamente una regressione lineare interpolando i punti di coordinate $(h, 0)$ e $(i, 1)$ con una retta, ricavandone coefficiente angolare m ed intercetta q. La funzione assume valore 0 se la quota della cella è minore o uguale alla quota h impostata, 1 se è maggiore o uguale della quota i, altrimenti assume un valore compreso tra 0 e 1.

Il valore dell'indice *wind shelter* $I(S)$ (p. 24) viene quindi pesato in base alla quota $z(x)$ della cella

$$I_{\mathrm{w}}(S) = I(S) \cdot f_{\mathrm{w}}(z(x)) \tag{3.2}$$

dove $I_{\mathrm{w}}(S)$ è l'indice *wind shelter* pesato.

Se $f_{\mathrm{w}}(z(x)) \to 0$ allora $I_{\mathrm{w}}(S) \to 0$, modellando una condizione né riparata né esposta al vento. Se $f_{\mathrm{w}}(z(x)) \to 1$ allora $I_{\mathrm{w}}(S) \to I(S)$, lasciando invariato il valore calcolato dell'indice originario.

L'indice *wind shelter* pesato è stato modellato con la stessa una funzione di appartenenza $\mu_{\mathrm{PRA}}(I(S))$ di Veitinger et al. [2016] (fig. 2.8).

È stato scelto di pesare il valore dell'indice *wind shelter* $I(S)$: così facendo, per un valore di $f_{\mathrm{w}}(z(x)) < 1$, il valore dell'indice pesato $I_{\mathrm{w}}(S)$ tende a 0 (né riparato, né esposto al vento) sia con valori positivi che negativi di $I(S)$, tendendo ad un grado di appartenenza $\mu_{\mathrm{PRA}}(I(S))$ di 0.5.

Viceversa, se si fosse pesato il valore del grado di appartenenza $\mu_{\mathrm{PRA}}(I(S))$, questo tenderebbe a 0 per ogni $f_{\mathrm{w}}(z(x)) < 1$, qualunque sia il valore di $I(S)$; verrebbe modellata una condizione esposta al vento e, nei calcoli successivi, il valore di $\mu_{\mathrm{PRA}}(x)$ tenderebbe a 0, modellando un basso o nullo grado di appartenenza alle aree di distacco potenziale.

Copertura nevosa

Le valanghe possono accadere solo in presenza di neve; grazie alle funzione $f_{\mathrm{n}}(z(x))$ è stata quindi creata una maschera della copertura nevosa (*snow cover mask*) che esclude automaticamente dai calcoli le celle di quota $z(x)$ al di sotto di una certa quota l, definita dall'utente, dove non è presente neve:

$$f_{\mathrm{n}}(z(x)) = \begin{cases} 0 & \text{se } z(x) < l \\ 1 & \text{se } z(x) \geq l \end{cases} \tag{3.3}$$

La funzione assume valore 0 per quote inferiori ad l (senza neve), 1 per quelle uguali o superiori (con neve).

Nell'algoritmo sono state definite quattro variabili, una per ognuna delle quattro esposizioni principali (tab. 3.5), che stabiliscono la quota limite della copertura

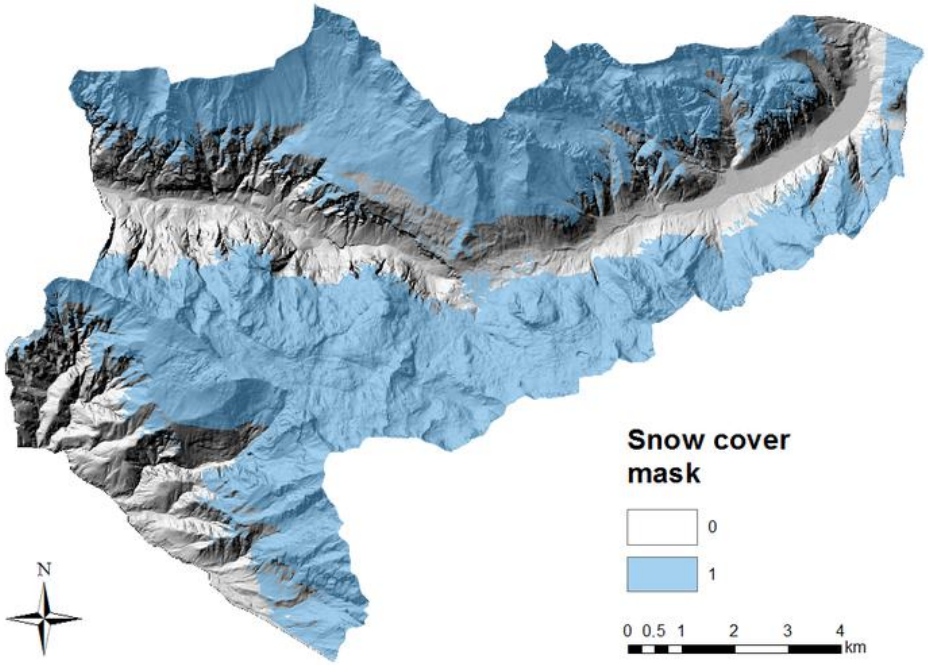


Figura 3.7: Esempio di maschera della copertura nevosa sul gruppo del monte Canin. Le celle assumono valore 1 in presenza di neve, 0 altrimenti. La quota della neve varia a seconda delle esposizioni: in questo caso, nord 1200 m, sud 1500 m, est 1300 m, ovest 1100 m. Le celle con valore 0 vengono escluse dai calcoli.

nevosa alla relativa esposizione. In altre parole: l'algoritmo rende possibile assegnare alle quattro esposizioni principali quattro distinti limiti della neve, rendendo la maschera della copertura nevosa più aderente alla realtà (fig. 3.7). Infatti, capita spesso che la quota della neve sia diversa tra esposizioni, specialmente tra versanti settentrionali e meridionali.

Con questo parametro è stato modellato uno dei fattori più importanti per la definizione delle quote critiche: il limite della neve.

Quote pericolose

Dalle indagini effettuate è stato dedotto che, per definire la quota limite del pericolo valanghe, i previsori considerano principalmente le precipitazioni che apportano neve fresca ed il vento, oltre che ovviamente il limite della copertura nevosa.

Il parametro *quote pericolose* ha modellato i fattori importanti nella definizione delle quote critiche diversi dal vento e dal limite della neve, modellati rispettivamente pesando l'indice *wind shelter* e con la maschera della copertura nevosa.

È stata definita una funzione $f_{\mathrm{z}}(z(x))$ per pesare, a seconda di due quote limite definite dall'utente, il valore della funzione di appartenenza finale $\mu_{\mathrm{PRA}}(x)$ esposta nel paragrafo 3.2.3:

$$f_{\mathrm{z}}(z(x)) = \begin{cases} 0 & \text{se } z(x) \leq s \\ m\,z(x) - q & \text{se } s < z(x) < t \\ 1 & \text{se } z(x) \geq t \end{cases} \tag{3.4}$$

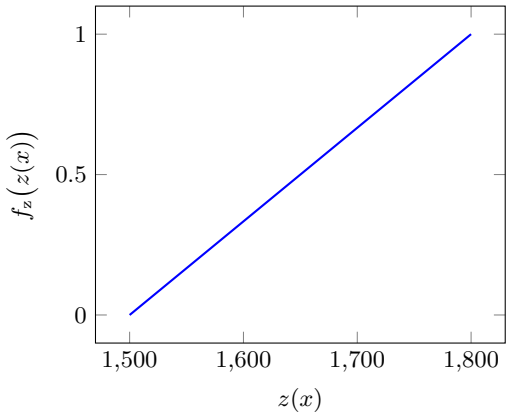


Figura 3.8: Funzione $f_z(z(x))$ per le quote pericolose. $z(x)$ è il valore della quota. In questo caso se $z(x) \leq 1500$ allora $f_z(z(x)) = 0$; se $z(x) \geq 1800$ allora $f_z(z(x)) = 1$.

Il valore di $f_z(z(x)) \in [0, 1]$ in $z(x)$ varia a seconda dei parametri s e t impostati. s è la quota sotto la quale non possono verificarsi valanghe, t la quota sopra la quale possono verificarsi.

Come per la pesatura dell'indice *wind shelter*, l'algoritmo effettua automaticamente una regressione lineare sui punti $(s, 0)$ e $(t, 1)$, ricavando i parametri m e q della retta interpolante. Ad esempio, se $s = 1500$ (sotto a 1500 m non possono accadere valanghe) e $t = 1800$ (sopra i 1800 m sì) vengono calcolati $m = 0.00\bar{3}$ e $|q| = 5$ (fig. 3.8). Da un punto di vista intuitivo, è stato creato un *buffer* della propensione al distacco, la cui ampiezza (in termini di quote) è definita dall'utente (fig. 3.9).

Inoltre, con un'opportuna variabile, è stata inserita la possibilità di scegliere se il pericolo valanghe aumenta al di sopra o al di sotto delle quote s e t impostate. In primavera, ad esempio, l'aumento delle temperature rende le quote basse più pericolose di quelle alte. In questo caso, la regressione lineare viene effettuata sui punti $(s, 1)$ e $(t, 0)$, il verso delle disuguaglianze nell'equazione (3.4) è invertito, $f_z(z(x)) = m\, z(x) + q$ se $s > x > t$ e la funzione $f_z(z(x))$ diventa monotona decrescente.

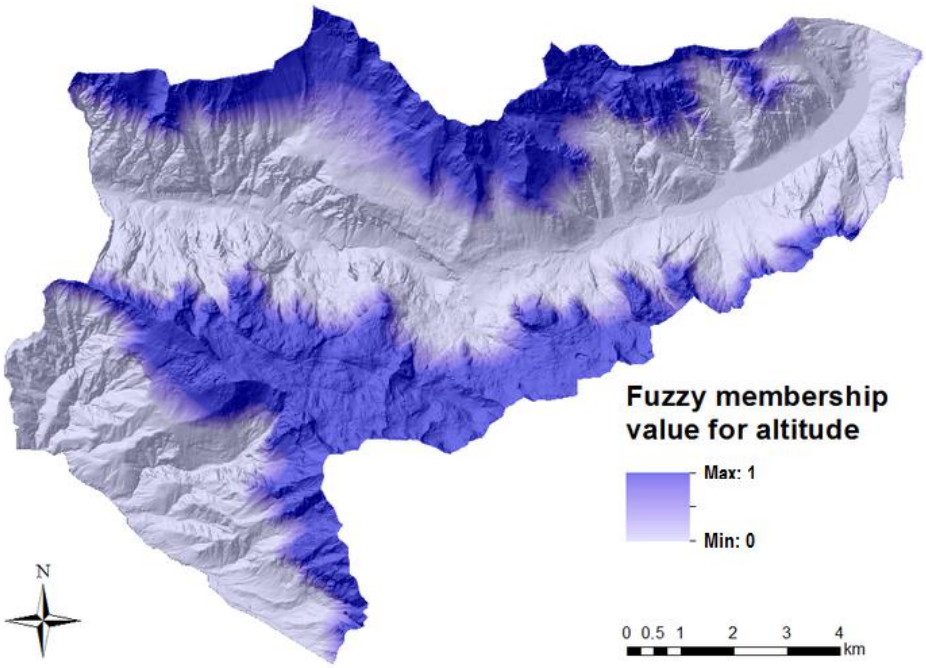
Copertura forestale

Una fitta vegetazione assicura la migliore difesa contro le valanghe [Ciolli et al. 1998]; l'innesco di una valanga è improbabile sotto il limite del bosco (cfr. p. 81). Pertanto, è stata mantenuta la maschera del bosco di Veitinger et al. [2016]: fornendo una matrice booleana all'algoritmo (1 con bosco, 0 altrimenti), quest'ultimo esclude le aree forestate dai calcoli. Definita una funzione

$$f_B(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in B \\ 0 & \text{se } x \notin B \end{cases} \tag{3.5}$$

dove x è una cella del DTM e B è l'insieme "bosco", se $f_B(x) = 1$ la cella x è boscata.

Per ottenere la maschera del gruppo del monte Canin è stata utilizzata la carta di uso del suolo *Corine Land Cover* (vettoriale) della Regione Autonoma Friuli-Venezia



[tbp]

Figura 3.9: Visualizzazione della funzione *fuzzy* per le quote pericolose. In questo caso, le quote sotto i 1500 m assumono valore 0 (assenza di pericolo valanghe), sopra i 1800 m valore 1 (presenza di pericolo). L'algoritmo calcola automaticamente i valori per le quote intermedie (sfumature di colore nella figura).

Giulia in formato *shapefile* aggiornata all'anno 2000 e liberamente scaribile. In ArcGIS sono stati selezionati i poligoni dei boschi di latifoglie, di conifere e misti (codici Corine 311, 312 e 313), assegnando loro il valore 1, e 0 ai restanti poligoni.

La matrice di valori 0 e 1 ottenuta è stata impiegata come maschera delle aree forestate nell'algoritmo (fig. 3.10).

3.2.3 Correzione delle PRA

L'algoritmo calcola il valore di appartenenza delle celle del DTM alla classe PRA col metodo di Veitinger et al. [2016] (eq. (2.14)), tenendo conto che 1) la funzione *fuzzy* dell'acclività $\mu_{\mathrm{PRA}}(\alpha)$ è diversa a seconda del grado di stabilità del manto nevoso prescelto e che 2) l'indice *wind shelter* è stato pesato.

La carta delle PRA ottenuta è stata quindi pesata con la funzione delle quote pericolose $f_{\mathrm{z}}(z(x))$ e corretta con le "maschere" della copertura nevosa $f_{\mathrm{n}}(z(x))$ e della copertura forestale $f_B(x)$:

$$\mu'_{\mathrm{PRA}}(x) = \mu_{\mathrm{PRA}}(x) \cdot f_{\mathrm{z}}(z(x)) \cdot f_{\mathrm{n}}(z(x)) \cdot (1 - f_B(x)) \tag{3.6}$$

ottenendo la funzione di appartenenza corretta $\mu'_{\mathrm{PRA}}(x)$.

Se $f_{\mathrm{n}}(z(x)) = 0$ (cella con assenza di neve) e/o $f_B(x) = 1$ (cella boscata) allora viene applicata una maschera ai risultati e $\mu'_{\mathrm{PRA}}(x) = 0$, modellando una situazione di assenza di propensione al distacco per quella cella. Il compito di $f_{\mathrm{z}}(z(x)) \in [0, 1]$ è invece pesare il valore $\mu_{\mathrm{PRA}}(x)$. Se $f_{\mathrm{z}}(z(x)) = 1$, con $f_{\mathrm{n}}(z(x)) = 1$ e $f_B(x) = 0$

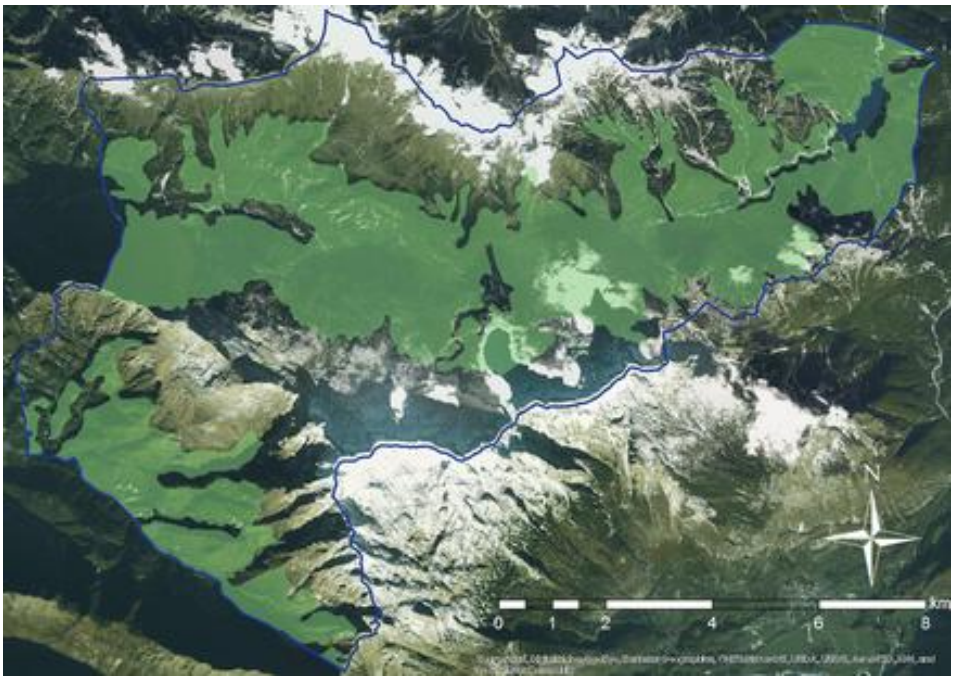


Figura 3.10: Carta della copertura forestale per il gruppo del monte Canin. Le zone forestate, colorate in verde, vengono escluse dai calcoli.

allora $\mu'_{\mathrm{PRA}}(x) = \mu_{\mathrm{PRA}}(x)$, lasciando inalterato il valore. Se invece, ad esempio, $f_{\mathrm{z}}(z(x)) = 0.5$, il valore di $\mu'_{\mathrm{PRA}}(x)$ diventa la metà di $\mu_{\mathrm{PRA}}(x)$, dimezzando la propensione al distacco della cella x.

Riassumendo: l'equazione (3.6) permette di annullare il valore di $\mu_{\mathrm{PRA}}(x)$ in assenza di copertura nevosa e/o in presenza di bosco e di pesarlo a seconda delle quote critiche stabilite dall'utente.

I valori di $\mu'_{\mathrm{PRA}}(x)$ per le celle del DTM utilizzato si concretizzano in una carta *raster* delle aree di distacco potenziale corretta a seconda delle condizioni nivometeorologiche del momento (fig. 3.11): questo era l'obiettivo del modello (ultimo riquadro verde nella figura 3.4).

3.2.4 Pendii ripidi pericolosi

Nei bollettini valanghe, all'aumentare del grado di pericolo (§ 1.2.2) aumenta la diffusione areale prevista dei pendii pericolosi.

Uno dei metodi adottati dai previsori valanghe per stabilire il grado di pericolo di una zona è stimare mentalmente la percentuale dei pendii ripidi pericolosi, cioè di quelli potenzialmente interessati da valanghe.[2] La percentuale stimata viene confrontata con delle classi di percentuali, desunte dell'esperienza e codificate, aiutando a determinare il grado di pericolo (tab. 3.6). Ad esempio, se in un'area si stimano essere pericolosi il 20% dei pendii ripidi, si tenderà ad assegnare a quella regione il grado *2-moderato*.

[2] Altri metodi per determinare e verificare il grado di pericolo si trovano nell'appendice A.2.2.

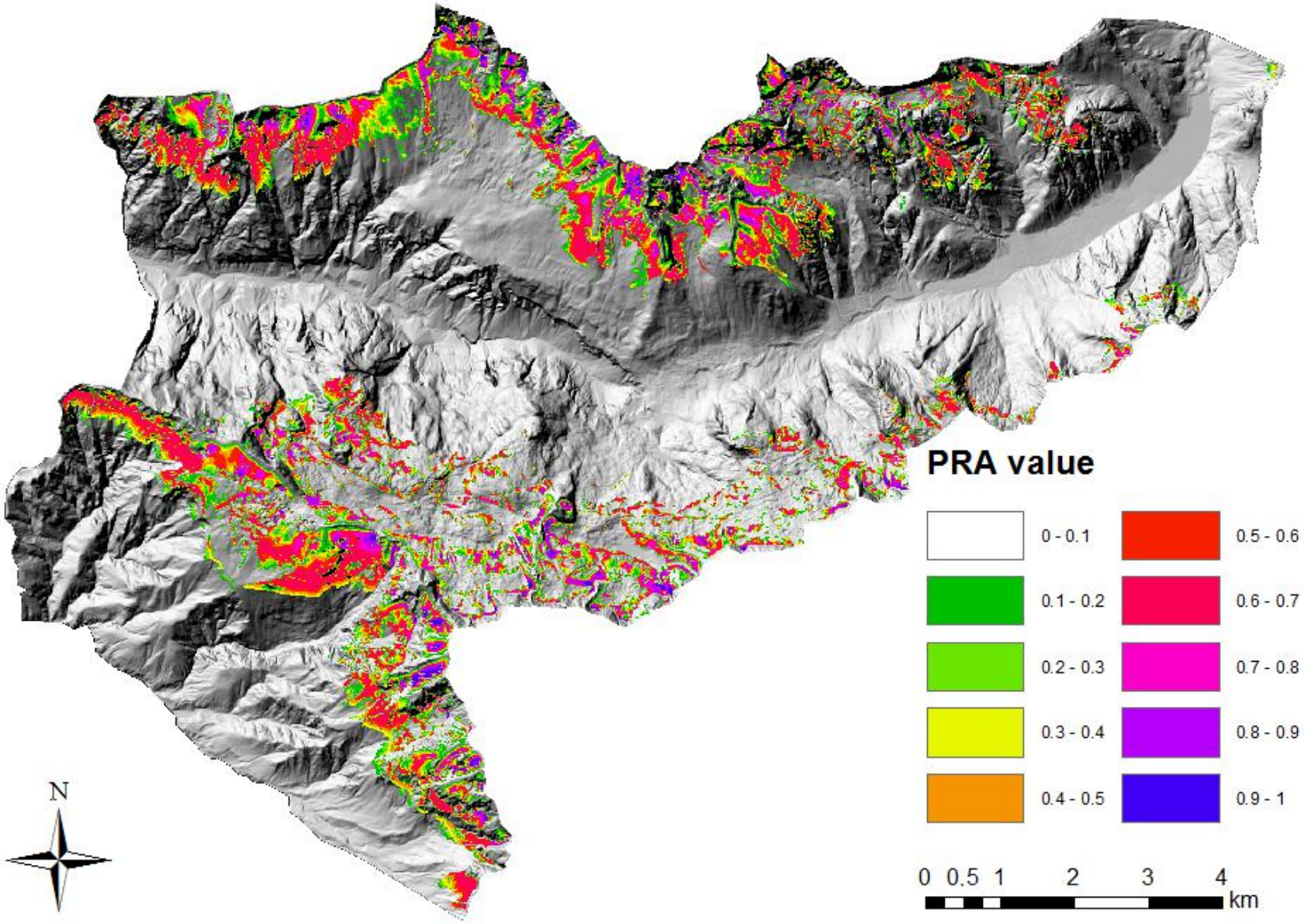


Figura 3.11: Carta delle aree di distacco potenziale (PRA) ottenuta con l'equazione (3.6). I dati in ingresso erano 2 m di neve; grado 2 di stabilità del manto nevoso; esposizioni sud più pericolose; nessuna direzione preferenziale del vento; limiti di quota per gli effetti del vento: 2000 m (superiore) e 1800 m (inferiore); quota limite della neve: nord 1200 m, est 1300 m, sud 1500 m, ovest 1100 m; Quote pericolose: 1600 m (limite superiore) e 1400 m (inferiore). Il calcolo è stato effettuato con DTM a 5 m.

Tabella 3.6: Classi delle percentuali dei pendii ripidi pericolosi associate ai gradi di pericolo

Grado di pericolo	Pendii ripidi pericolosi [%]
5-molto forte	> 66
4-forte	$\gg 30, < 66$
3-marcato	> 30
2-moderato	$\geq 10, \leq 30$
1-debole	< 10

In questo paragrafo si propone una quantificazione numerica dei pendii ripidi pericolosi.

Dal confronto con professionisti della neve e valanghe, si è assunto che un pendio è ripido se ha un inclinazione compresa tra 30 e 60° (vedi tab. A.5 e p. 74) e che è pericoloso se appartiene alla classe PRA per più del 50% ($\mu'_{\mathrm{PRA}}(x) > 0.5$). Calcolando l'area complessiva delle celle con $\mu'_{\mathrm{PRA}}(x) > 0.5$ e dividendola per l'area delle celle con inclinazione nell'intervallo $[30, 60[$ si può ottenere la frazione delle celle "ripide" con propensione al distacco maggiore del 50%, cioè pericolose. La funzione

$$\mu_{\mathrm{PRAb}}(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } \mu'_{\mathrm{PRA}}(x) > 0.5 \\ 0 & \text{se } \mu'_{\mathrm{PRA}}(x) \leq 0.5 \end{cases} \tag{3.7}$$

rende *booleana* la carta delle PRA. Una cella appartiene alla classe PRAb se appartiene alla classe PRA per più del 50%.

I pendii ripidi sono stati selezionati con la funzione $f_{\mathrm{ss}}(x)$:

$$f_{\mathrm{ss}}(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } \alpha \geq 60 \text{ oppure } \alpha < 30 \\ 1 & \text{se } 30 \leq \alpha < 60 \end{cases} \tag{3.8}$$

Il pedice *ss* sta per *steep slopes* (pendii ripidi). Questa funzione assume il valore 1 se l'inclinazione della cella è compresa tra 30 e 60°, estremo superiore escluso, 0 altrimenti. La funzione $f_{\mathrm{ss}}(x)$ viene quindi moltiplicata per la (3.3) e la (3.5)

$$f_{\mathrm{ssc}}(x) = f_{\mathrm{ss}}(x) \cdot f_{\mathrm{n}}(x) \cdot (1 - f_{\mathrm{f}}(x)) \tag{3.9}$$

ottenendo una funzione $f_{\mathrm{ssc}}(x)$ corretta. In questo modo vengono selezionati i soli pendii ripidi con copertura nevosa e senza bosco. In tutti gli altri casi, $f_{\mathrm{ssc}}(x) = 0$.

La frazione dei pendii ripidi pericolosi si ottiene dalla sommatoria di tutti i valori della funzione $\mu_{\mathrm{PRAb}}(x)$ divisa per la sommatoria dei valori di $f_{\mathrm{ssc}}(x)$:

$$p = \frac{\sum_i \mu_{\mathrm{PRAb}}(x_i)}{\sum_i f_{\mathrm{ssc}}(x_i)} \tag{3.10}$$

dove p è la frazione dei pendii ripidi pericolosi. Nei risultati dell'algoritmo è espressa da una percentuale.

In questo modo è stato ottenuto il dato finale nel flusso dell'algoritmo (ultimo riquadro azzurro nella figura 3.4): la frazione dei pendii ripidi pericolosi (fig. 3.12).

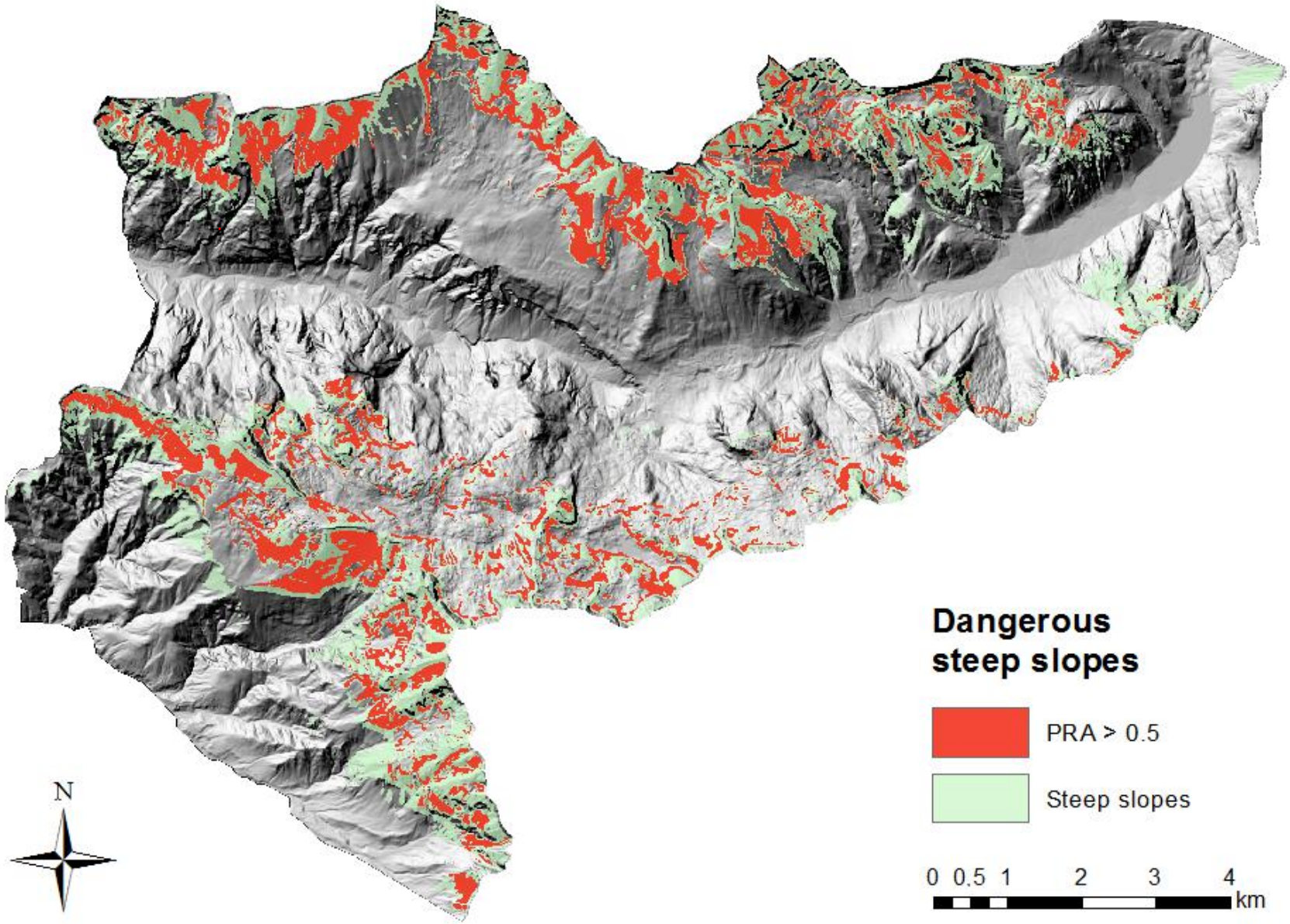


Figura 3.12: Visualizzazione grafica della frazione dei pendii ripidi pericolosi. L'algoritmo calcola il rapporto tra le celle "pericolose" ($\mu'_{\mathrm{PRA}}(x) > 0.5$, rosso nella figura) e quelle appartenenti ad i pendii ripidi (*steep slopes*, angolo di inclinazione $30 \leq \alpha < 60$, verde). In questo, il 39% dei pendii ripidi innevati e non boscati è potenzialmente pericoloso. Il calcolo è stato effettuato sulla carta delle PRA della figura 3.11.

Tabella 3.7: Percentuali calcolate sulle carte esposte nel paragrafo 3.2.5

Figure	Grado s.m.n[1]	PRA in CLPV[2]	DSS[3]
3.14	1	/	0
3.15a, 3.16a	2	93.8	1.6
3.15b, 3.16b	3	81.4	20.1
3.15c, 3.16c	4	83.1	26.5
3.15d, 3.16d	5	78.6	57.8

1 Grado di stabità del manto nevoso.
2 Percentuale del rapporto u tra l'area delle PRA con $\mu'_{\mathrm{PRA}}(x) > 0.5$ all'interno delle CLPV e l'area delle PRA totali.
3 *Dangerous steep slopes*, pendii ripidi innevati e non boscati pericolosi (vedi § 3.2.4).

3.2.5 Esempio d'uso

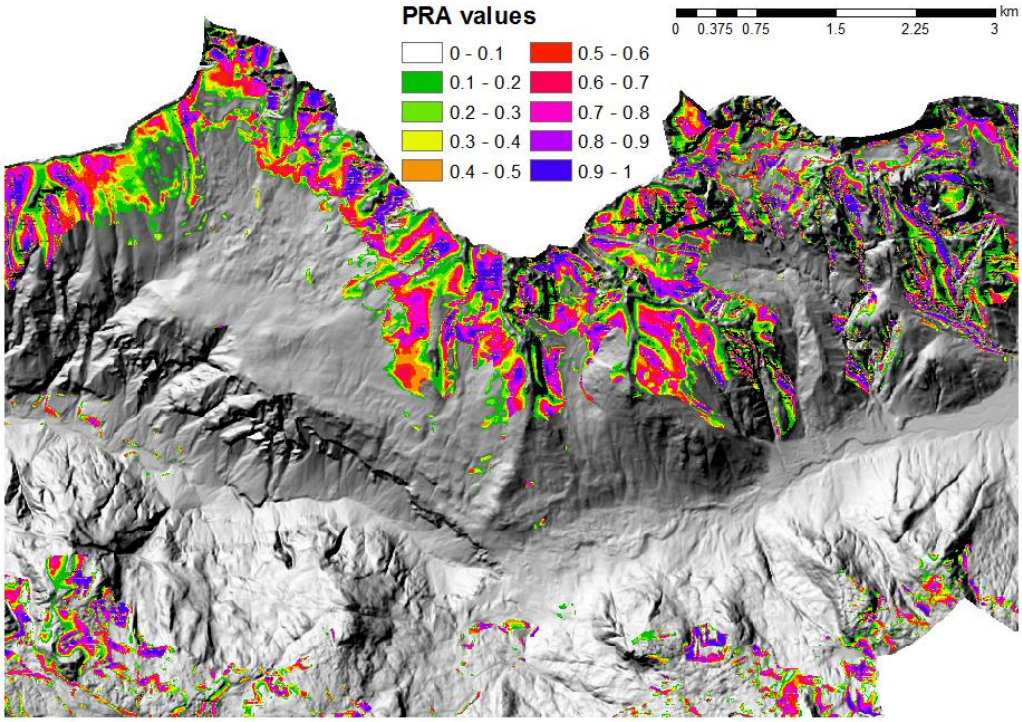
In questo paragrafo si simula un ipotetico uso del modello sul gruppo del monte Canin; esso si trova nel nord-est del Friuli-Veneza Giulia, al confine con la Slovenia, ed è una delle principali mete per gli sport invernali delle Alpi Giulie. I calcoli sono stati effettuati con DTM a 5 m.

Il modello di Veitinger et al. [2016], a parità di direzione del vento ed altezza del manto nevoso, può fornire un solo scenario (fig. 3.13). Il modello proposto può invece fornire diversi scenari. Alcuni esempi sono riportati nelle figure 3.14 e 3.15: le maggiori differenze sono dovute al diverso grado di stabilità del manto nevoso impostato, che determina la funzione *fuzzy* per l'acclività. Gli scenari individuabili, per le possibili combinazioni tra parametri, sono virtualmente infiniti.

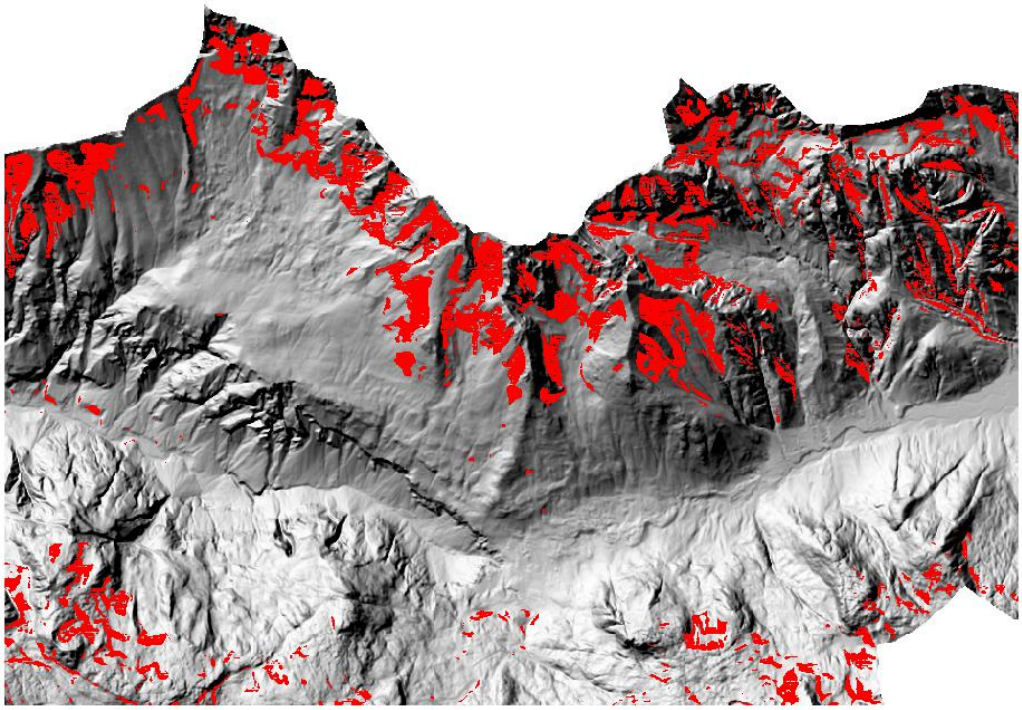
Ad esempio, i parametri della figura 3.15a erano: 2 m di neve, nessuna direzione preferenziale del vento, grado 2 di stabilità del manto nevoso, versanti sud più pericolosi, limiti di quota per l'effetto del vento 2000–1800 m, limite della neve 1100–1500 m (a seconda delle esposizioni) e limiti di quota per il pericolo valanghe 1600–1400 m.

Le carte delle PRA booleane (fig. 3.16) mostrano una differente estensione delle PRA con $\mu'_{\mathrm{PRA}}(x) > 0.5$ rispetto a quella ricavata dal modello originale (fig. 3.13b), a causa del maggior numero di parametri variabili che consentono di modellare diverse condizioni.

Grazie alle carte delle PRA booleane sono state calcolate a) le frazioni delle PRA booleane contenute all'interno della CLPV (vedi § 2.4 ed equazione (3.11)) per verificare la bontà della localizzazione delle PRA dovute al modello originale di Veitinger et al. [2016] e b) la percentuale dei pendii ripidi pericolosi innevati e non boscati (vedi § 3.2.4). Entrambi i dati vengono ottenuti automaticamente dai calcoli alla fine dell'algoritmo (appendice B.1). I risultati degli esempi illustrati sono riportati nella tabella 3.7.



(a) PRA *fuzzy*



(b) PRA> 0.5

Figura 3.13: Carta delle PRA del modello di Veitinger et al. [2016] con 2 m di neve e nessuna direzione preferenziale del vento

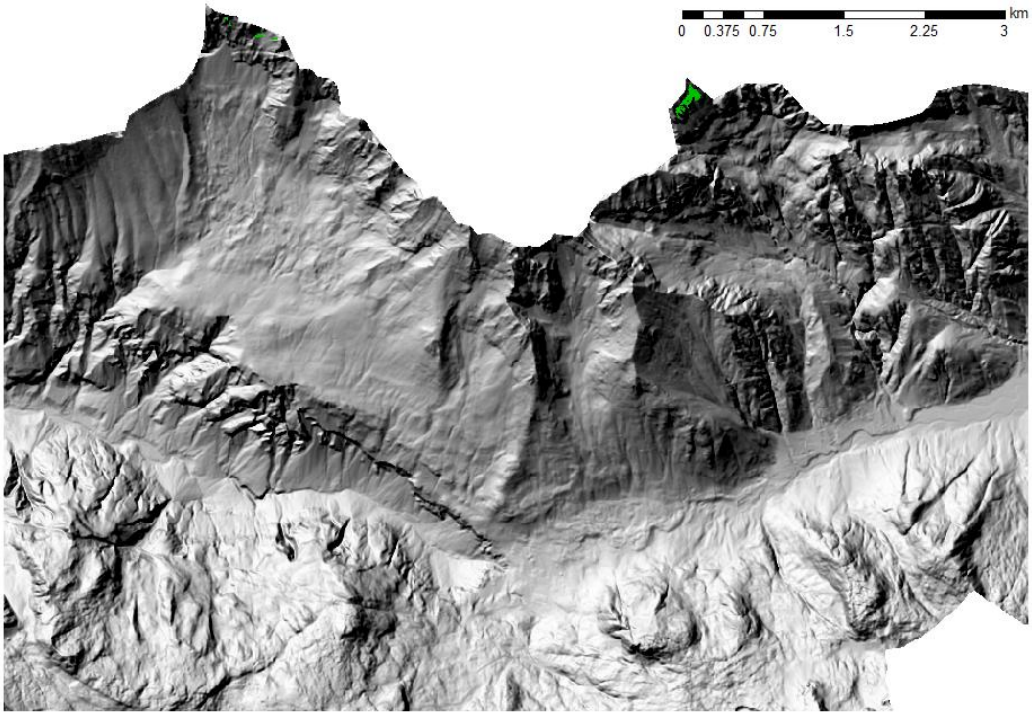
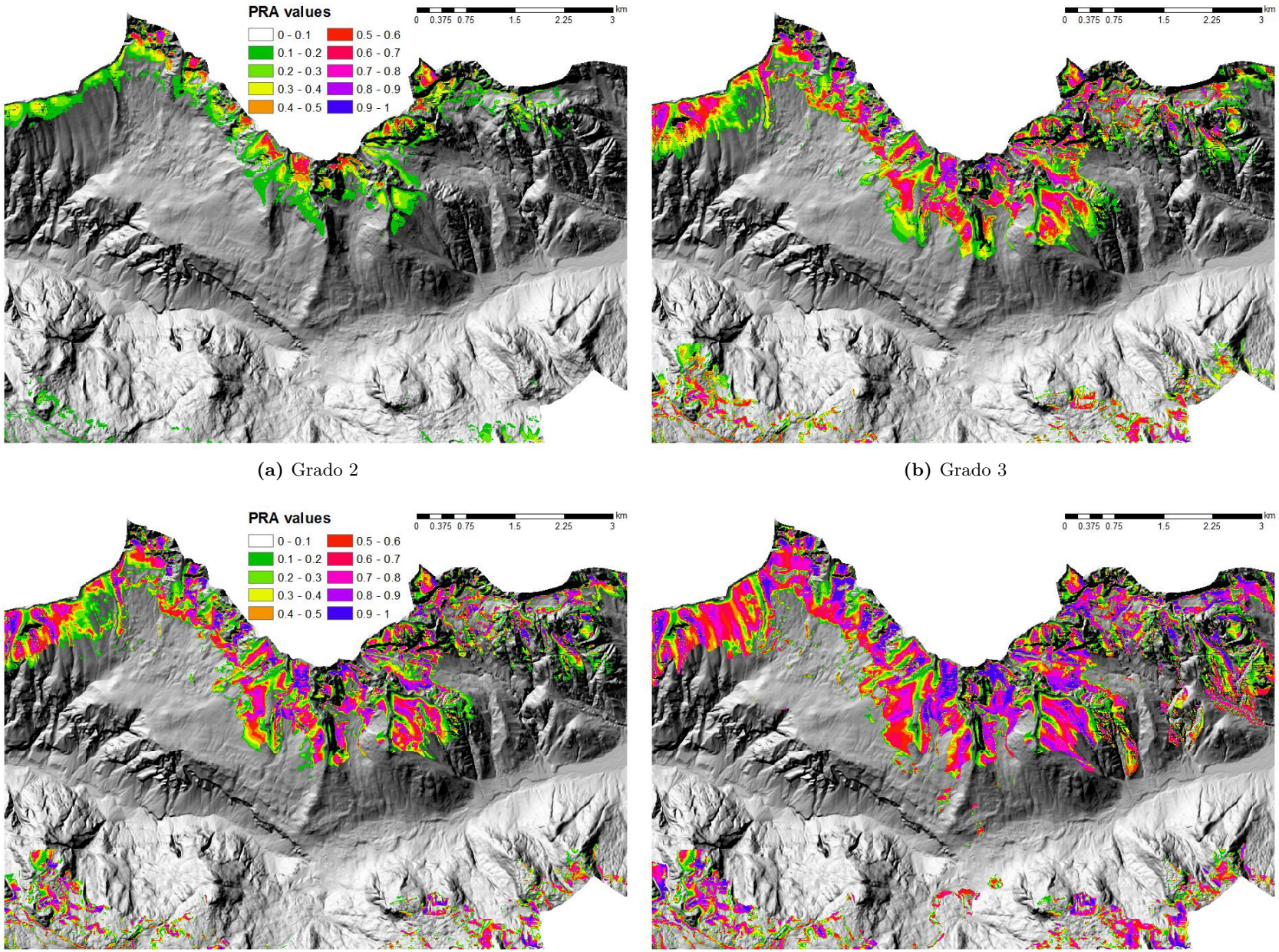


Figura 3.14: Carta delle PRA *fuzzy* del modello proposto con grado 1 di stabilità del manto nevoso. In questo caso vengono individuate solo pochissime ed isolate zone alle quote più alte (in verde) e non ci sono aree con $\mu'_{\mathrm{PRA}}(x) > 0.5$.



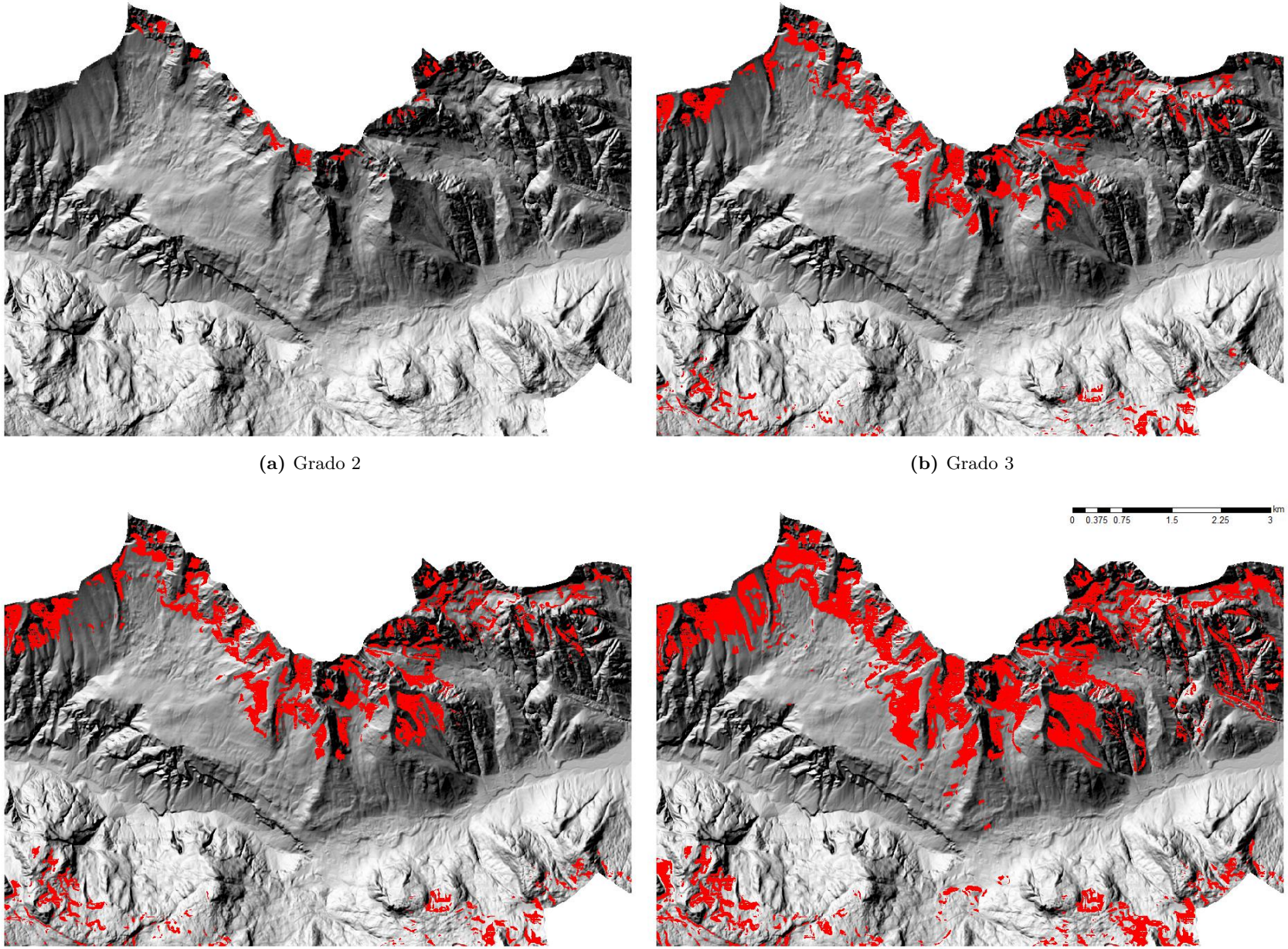
(a) Grado 2

(b) Grado 3

(c) Grado 4

(d) Grado 5

Figura 3.15: Carta delle PRA *fuzzy* del modello proposto con vari gradi di stabilità del manto nevoso



(a) Grado 2

(b) Grado 3

(c) Grado 4

(d) Grado 5

Figura 3.16: Carta delle PRA boolene del modello proposto con vari gradi di stabilità del manto nevoso. Sono cartografate le sole celle con $\mu'_{\mathrm{PRA}}(x) > 0.5$.

Tabella 3.8: Statistica descrittiva sulle simulazioni effettuate. La mediana, lo scarto interquartile (IQR), la media $\bar{x}$ e la deviazione standard σ sono espresse in percentuale. N è la numerosità del campione (numero di simulazioni).

(a) Frazione delle PRA booleane all'interno della CLPV

Grado s.m.n[1]	N	Mediana	IQR	$\bar{x}$	σ
1	3	86.6	2.1	85.6	2.3
2	9	87.4	1.2	87.4	2.5
3	13	85.8	3.6	84.3	3.3
4	8	86.0	1.0	85.5	1.2
5	8	84.7	0.9	84.0	2.3
Totale[2]	41	86.0	1.9	85.3	2.8

1 Grado di stabità del manto nevoso
2 Il totale è minore di 50, poiché in alcuni casi col grado 1 non esistevano aree con $\mu'_{\mathrm{PRA}}(x) > 0.5$

(b) Frazione dei pendii ripidi pericolosi

N	Mediana	IQR	$\bar{x}$	σ
8	0	5.2	4.4	7.6
9	13.6	3.27	14.5	6.8
13	21.4	3.9	21.5	4.3
12	27.6	12.7	31.7	11.7
8	41.2	9.0	42.1	8.5
50	22.27	16.0	23.2	14.5

3.3 Casi di studio e validazione

Il modello proposto in questo lavoro si basa su quello originale di Veitinger et al. [2016], che identifica le zone di distacco di valanghe a lastroni. Per giudicare la bontà del modello originale, verificando la localizzazione delle zone di distacco, si sono confrontati i risultati delle PRA "booleane" ($\mu'_{\mathrm{PRA}}(x) > 0.5$) con la CLPV (vedi § 2.4). Lo scopo era individuare la frazione delle PRA booleane che rientravano nei perimetri della CLPV, per valutare eventuali errori per eccesso o per difetto. Perciò, è stato calcolato il rapporto tra l'intersezione delle PRA booleane con la CLPV (trattate come matrici numeriche) e le PRA booleane. Formalmente, è stato calcolato il rapporto tra la sommatoria dei valori del prodotto della funzione caratteristica delle PRA booleane ($\mu_{\mathrm{PRAb}}(x)$, cfr. p. 45) per la funzione caratteristica delle CLPV e la sommatoria delle PRA booleane:

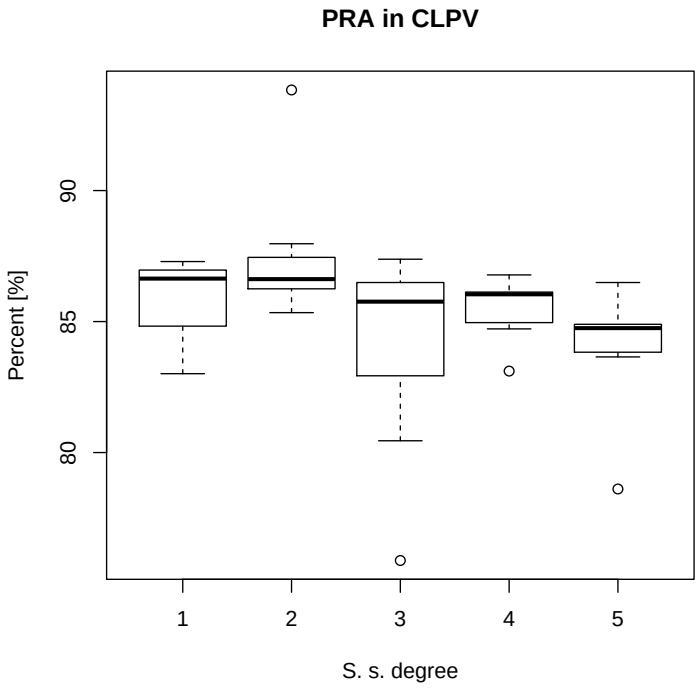
$$u = \frac{\sum_i (\mu_{\mathrm{PRAb}}(x_i) \cdot \mu_{\mathrm{CLPV}}(x_i))}{\sum_i \mu_{\mathrm{PRAb}}(x_i)} \tag{3.11}$$

dove $\mu_{\mathrm{CLPV}}(x)$ è la funzione di appartenenza della cella x alla classe CLPV.[3] Il risultato u è la frazione delle PRA trovate dal modello rientranti nella CLPV. Le linee di codice usato per il calcolo si trova nell'appendice B.2.1.

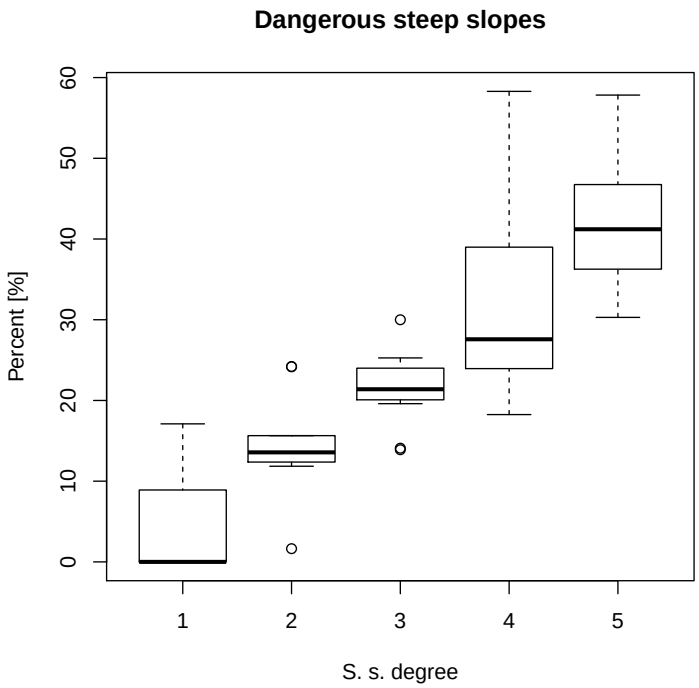
Cinquanta simulazioni sul gruppo del monte Canin e sui casi di studio illustrati nei prossimi paragrafi, variando i parametri in ingresso, hanno mostrato che le zone di distacco rientravano nella CLPV mediamente per il 85.3% con deviazione stadard $\sigma = 2.8\%$. La tabella 3.8a illustra questi risultati, mettendo in relazione le percentuali calcolate con il grado di stabilità del manto nevoso.

Sulle stesse simulazioni, sono state calcolate le percentuali dei pendii ripidi pericolosi (tab. 3.8b). La figura 3.17 illustra con dei *boxplot* la distribuzione dei valori ottenuti dalle simulazioni in relazione ai gradi di stabilità del manto nevoso.

[3] Intuitivamente, il risultato grafico è la carta booleana delle CLPV della figura 2.11.



(a)



(b)

Figura 3.17: *Boxplot* dei dati su **(a)** PRA contenute nella CLPV (*PRA in CLPV*, tab. 3.8a) e **(b)** frazione pendii ripidi pericolosi (*dangerous steep slopes*, tab. 3.8b) in relazione al grado di stabilità del manto nevoso (*s. s. degree*)

Tabella 3.9: Calcoli sui dati della figura 3.20. I numeri sono espressi in percentuale.

	Modello originale	Modello proposto
Distacco coperto da PRA	88.5	87.9
Distacco libero da PRA	11.5	12.1
PRA entro perimetro	36.1	34.5
PRA fuori perimetro	63.9	65.5

Nei prossimi paragrafi si riportano due casi di studio di applicazione del modello, confrontando l'originale di Veitinger et al. [2016] con quello proposto.

3.3.1 Rigopiano

Il 18 gennaio 2017 in comune di Farindola (Abruzzo, Italia centrale), in seguito ad un periodo di intense nevicate sui monti Appennini, una valanga di grandi dimensioni si staccò dalle pendici del monte Siella, nel gruppo del Gran Sasso (fig. 3.18). La valanga si abbattè sul sottostante *Hotel Rigopiano*, in quel momento popolato da decine di persone tra personale e turisti, che venne trascinato per una decina di metri e ricoperto interamente di neve, provocando 29 morti. Il caso fu di rilevanza nazionale in Italia ed i soccorsi si protrassero per molti giorni.

Il bollettino valanghe per quel giorno (appendice D) assegnava il grado di pericolo *4-marcato* al gruppo del Gran Sasso ed indicava tutte le esposizioni e tutte le quote come critiche. I giorni precedenti aveva soffiato vento dai quadranti settentrionali ed orientali e lo spessore medio della neve era circa 2.5 m.

Inserendo questi dati,[4] il risultato del modello è quello della figura 3.19b: la zona di distacco della valanga è caratterizzata da aree con una bassissima propensione al distacco calcolata, seppur leggermente maggiore rispetto a quelle del modello originale (fig. 3.19a), che tuttavia dispone di un minor numero parametri. In entrambi i casi, la zona di distacco della valanga non rientra in aree con $\mu'_{\mathrm{PRA}}(x) > 0.5$ e solo i versanti con esposizione sud-ovest assumono un'alta propensione al distacco (colore viola-blu nelle figure).

Impostando invece nessuna direzione preferenziale del vento e lasciando invariati gli altri parametri, i risultati sono quelli delle figure 3.19c e 3.19d. La zona di distacco della valanga è caratterizzata da un alto grado di $\mu'_{\mathrm{PRA}}(x)$. Entrambi i modelli calcolano un'alta propensione al distacco anche per i versati vicini a quello della tragica valanga: in quei giorni infatti vi furono altre grandi valaghe nella zona che però, non avendo provocato morti, non fecero scalpore.[5]

Estraendo dalle carte delle figure 3.19c e 3.19d l'area con $\mu'_{\mathrm{PRA}}(x) > 0.5$ che interseca la zona di distacco si ottengono le aree riportate nella figura 3.20. Confrontando la zona di distacco con la PRA calcolata è possibile verificare la copertura della zona di distacco con la PRA e la frazione di PRA all'interno o al di fuori della zona di distacco. Le percentuali calcolate sono riportate nella tabella 3.9. Il calcolo è stato effettuato con lo *script* dell'appendice B.2.2.

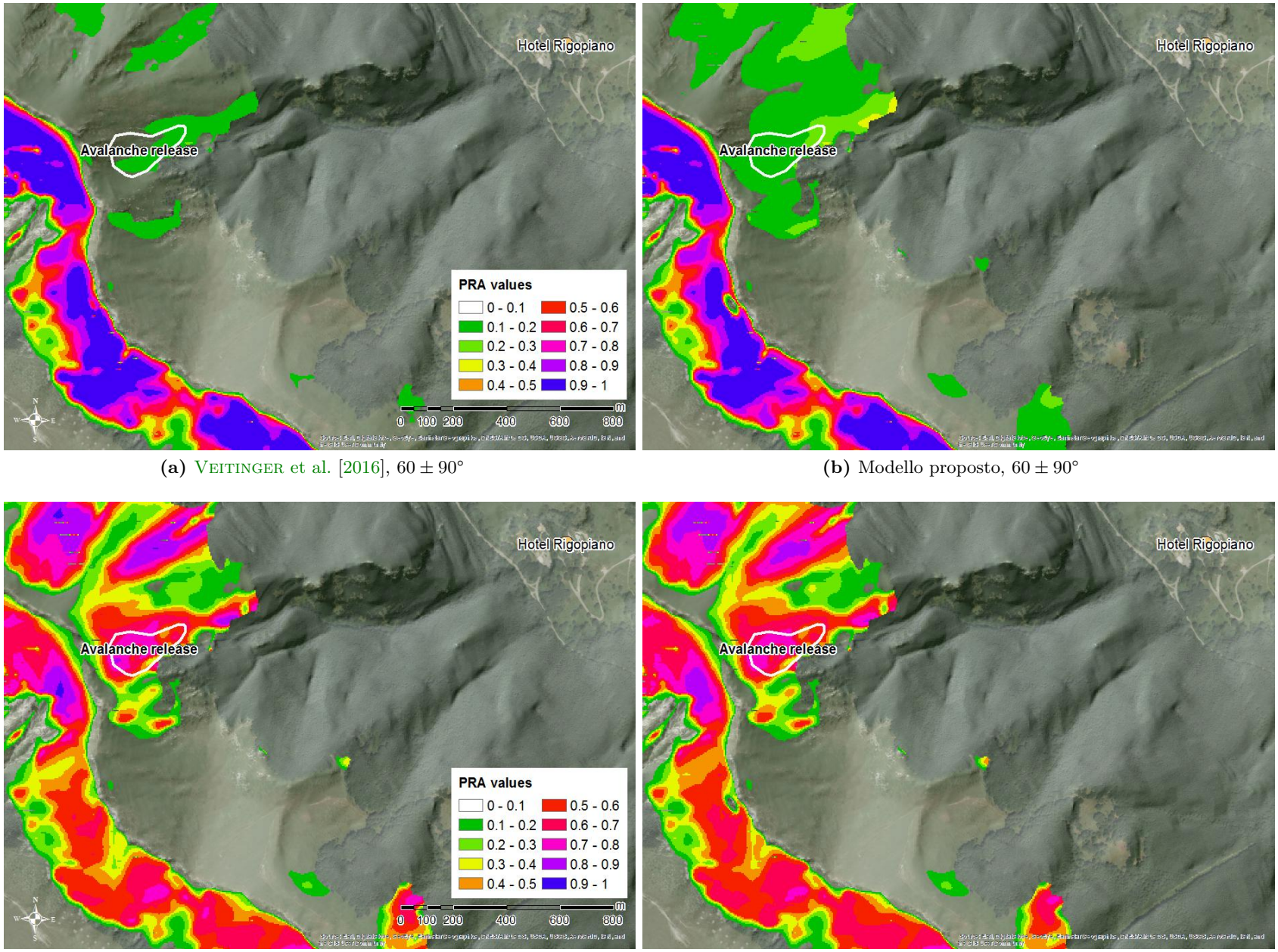
[4] La maschera della copertura forestale è stata ottenuta dalla carta dei tipi forestali della Regione Abruzzo scaricata al link `http://opendata.regione.abruzzo.it/content/categorie-e-tipologie-forestali` (ultimo accesso il 10 marzo 2017).

[5] Comunicazione personale del dott. geol. Pinuccio D'Aquila.

(a)

(b)

Figura 3.18: Zona di distacco della valanga di Rigopiano **(a)** lateralmente e **(b)** frontalmente. In rosso sono segnate le zone riconoscibili del coronamento. Fotografie di Daniele Moro, ufficio valanghe della Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia (25/01/2017).



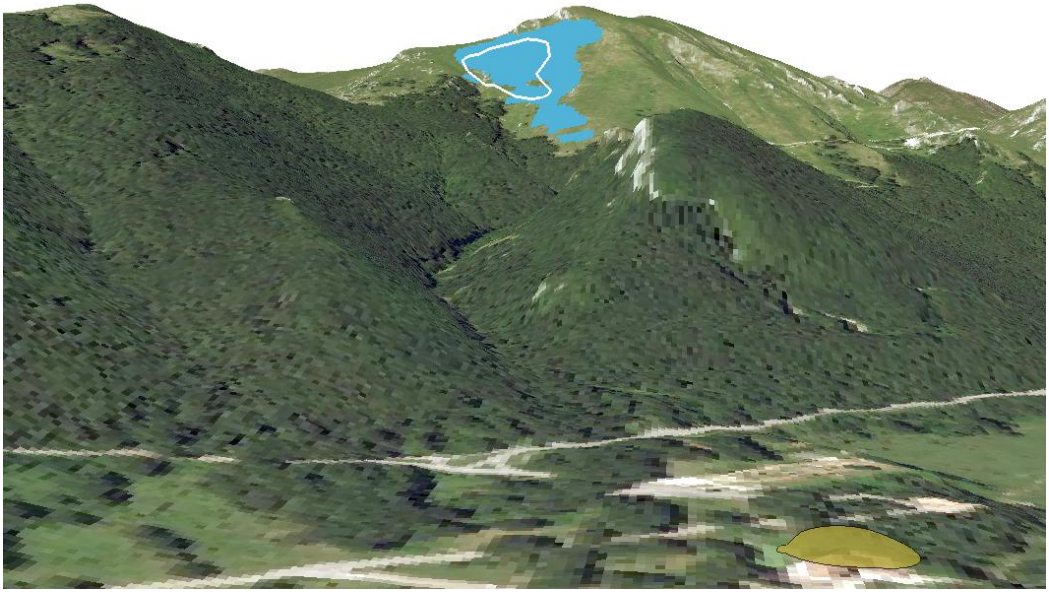
(a) Veitinger et al. [2016], $60 \pm 90°$

(b) Modello proposto, $60 \pm 90°$

(c) Veitinger et al. [2016], $0 \pm 180°$

(d) Modello proposto, $0 \pm 180°$

Figura 3.19: Carta delle PRA per l'area di Rigopiano: confronto tra modello originale e proposto. **(a)** e **(b)** vento da est-nord-est ($60 \pm 90°$), **(c)** e **(d)** nessuna direzione preferenziale. ($0 \pm 180°$). Sono riportate la superficie della zona di distacco della valanga (*avalanche release*, contorno bianco) e l'ubicazione dell'Hotel Rigopiano prima della valanga.



(a) Modello di Veitinger et al. [2016]

(b) Modello proposto

Figura 3.20: PRA calcolate (aree blu e rossa) in confronto alla zona di distacco (perimetro bianco in alto). Il cerchio ocra in basso a destra indica l'ubicazione dell'hotel prima della valanga.

Figura 3.21: Zona di distacco della valanga del Medon. La linea rossa identifica il coronamento del distacco. Foto del Corpo Nazionale Soccorso Alpino e Speleologico, Regione Friuli-Venezia Giulia, Stazione di Cave del Predil.

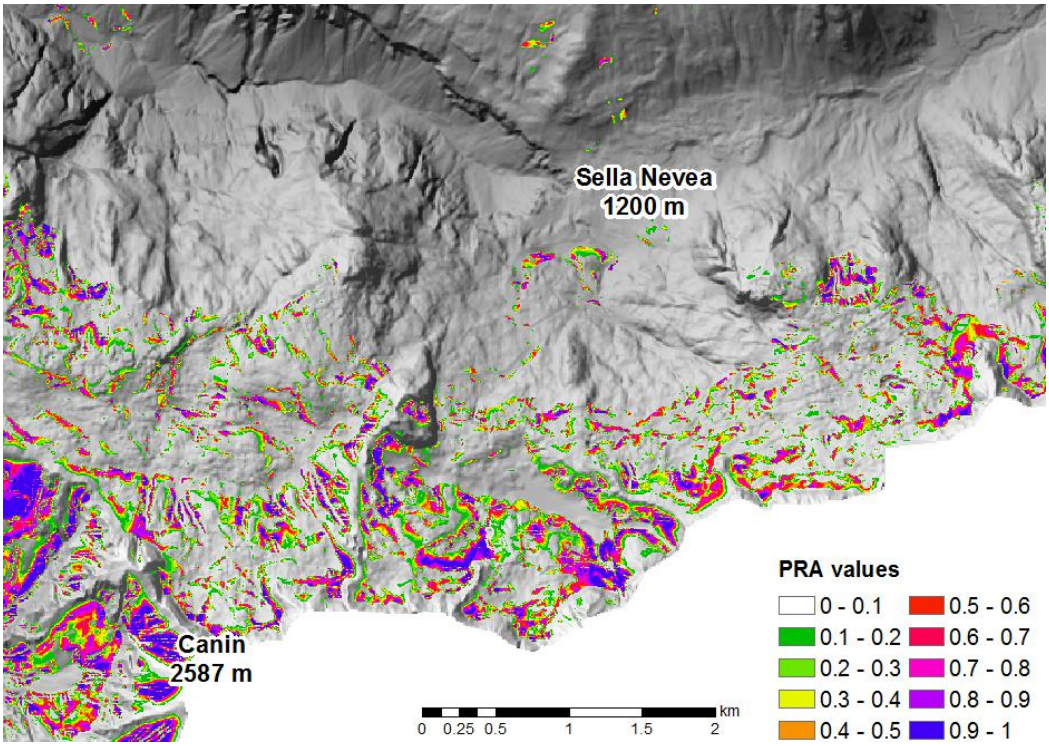
3.3.2 Incidente del Medon

Sabato 4 febbraio 2017, attorno alle ore 11.30, un gruppo di otto persone stava salendo dalla località di Sella Nevea verso sella Prevala (gruppo del Monte Canin, al confine con la Slovenia) lungo l'itinerario "del Poviz" e lontano da piste battute. Nei pressi di Forca sopra Medon, due membri del gruppo provocarono il distacco di una valanga a lastroni dal fronte di circa 200 m che li travolse, provocando in seguito la morte di uno dei due (fig. 3.21).

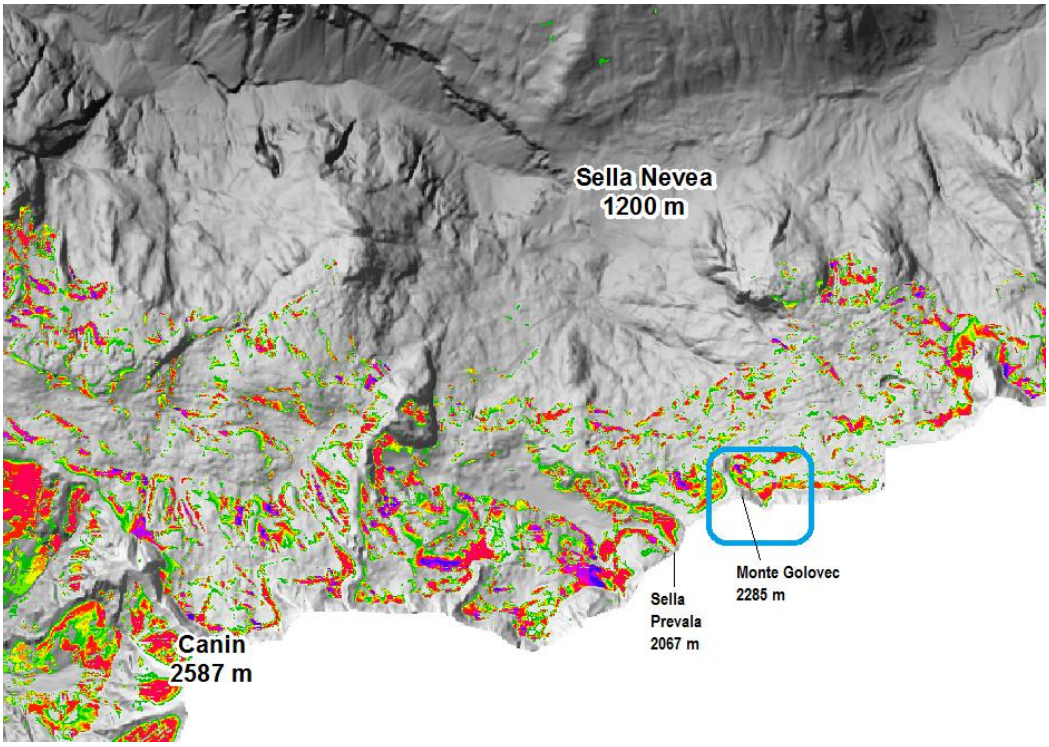
Il bollettino valanghe per quel giorno (appedice D) prevedeva, per l'area del Canin, un grado di pericolo *2-moderato* in aumento a *3-marcato* durante la giornata.

Il giorno precedente era stata effettuata una simulazione col modello proposto per l'intera area del Canin. I dati in ingresso erano: grado 2 di stabilità del manto nevoso, 90 cm di neve, esposizioni nord più pericolose, nessuna direzione prevalente del vento, limite della neve 700–900 m a seconda delle esposizioni. La figura 3.22 riporta la carta delle aree di distacco potenziale per quel giorno calcolate dal modello con un DTM a 5 m. Il 14.56% dei pendii ripidi era interessato da PRA con grado di appartenenza $\mu'_{\mathrm{PRA}}(x) > 0.5$. L'85.1% di queste PRA era contenuto all'interno della CLPV.

In seguito sono state effettuate due simulazioni con DTM a 1 m sulla sola zona dell'incidente. I parametri in ingresso erano gli stessi, salvo la direzione del vento: è stata effettuata una simulazione con nessuna direzione preferenziale ed una con vento da sud (fig. 3.23). Confrontando i modelli originale e proposto sulla simulazione con vento da sud, il modello originale copre il 93.2% della zona di distacco della valanga con aree a $\mu_{\mathrm{PRA}}(x) > 0.5$, mentre il modello proposto il 90.0%. Con questa simulazione, le PRA booleane del modello proposto sono il 70.4% di quelle del modello originale (minor estensione) e, reciprocamente, queste ultime sono il 142% di quelle del modello proposto (maggior estensione) (fig. 3.24).

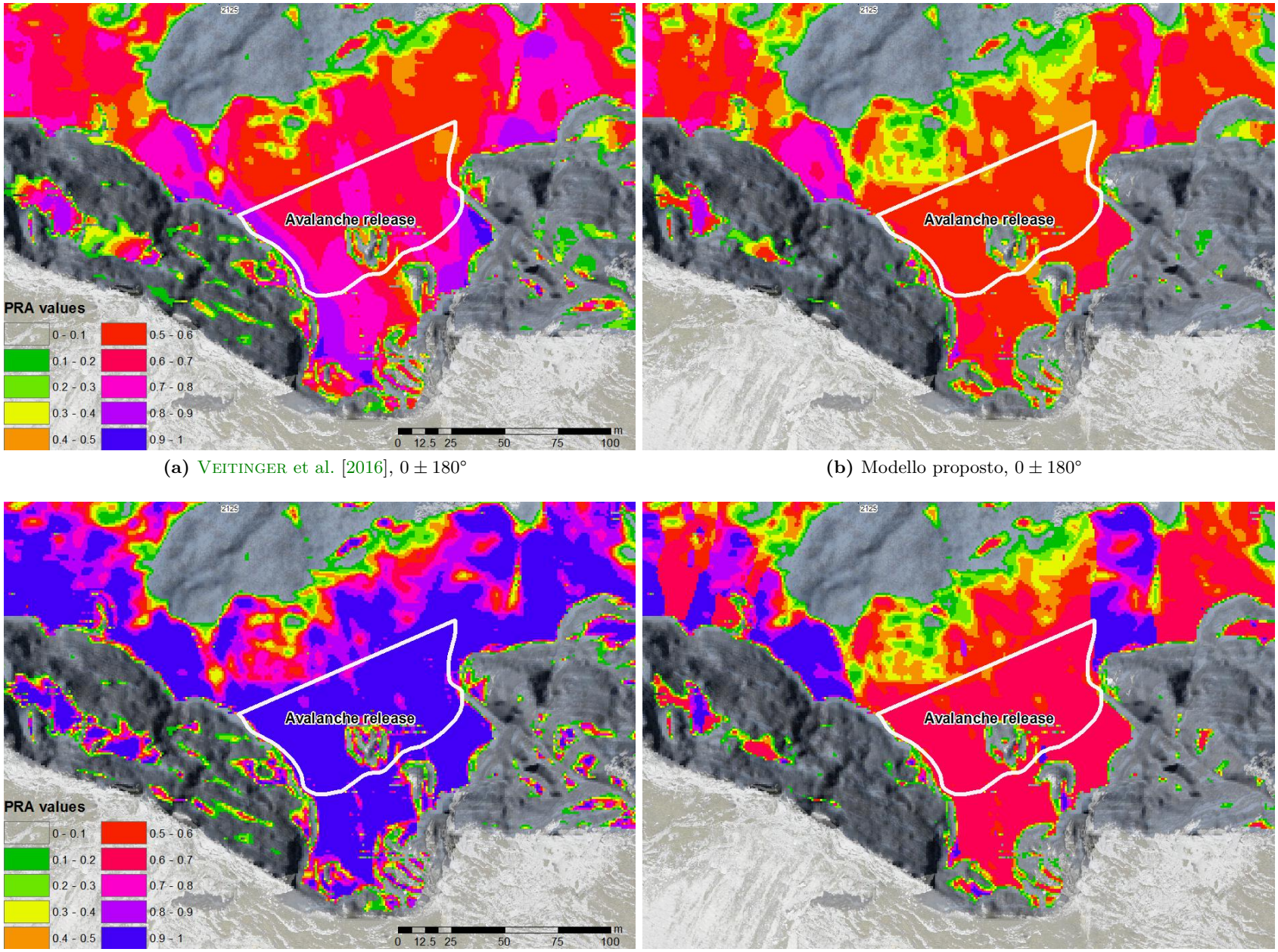


(a) Modello di Veitinger et al. [2016]



(b) Modello proposto

Figura 3.22: Carta delle PRA del gruppo del monte Canin per il 4 febbraio 2017. L'area dove avvenne l'incidente è riquadrata.



(a) Veitinger et al. [2016], $0 \pm 180°$

(b) Modello proposto, $0 \pm 180°$

(c) Veitinger et al. [2016], $180 \pm 30°$

(d) Modello proposto, $180 \pm 30°$

Figura 3.23: Carta delle PRA per l'area del Medon con grado 2 di stabilità del manto: confronto tra modelli. **(a)** e **(b)** nessuna direzione preferenziale del vento ($0 \pm 180°$), **(c)** e **(d)** vento da sud ($180 \pm 30°$). Il perimetro bianco identifica la zona di distacco della valanga (*avalanche release*).

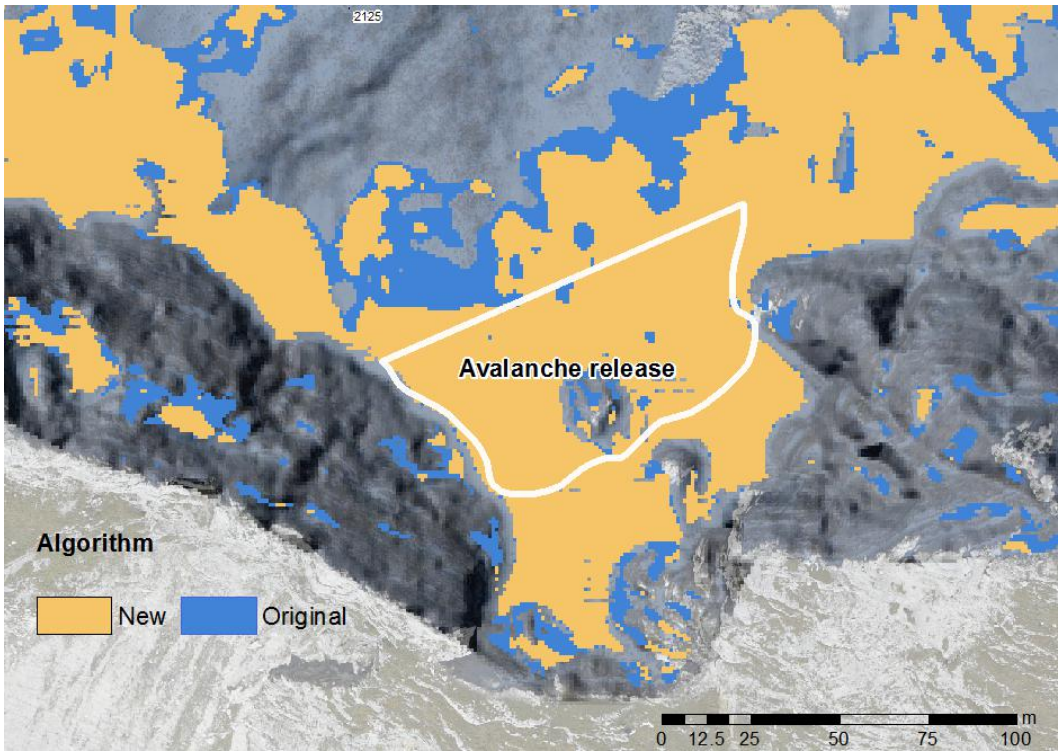


Figura 3.24: Confronto tra modelli: carta delle PRA booleane ($\mu_{\mathrm{PRA}}(x) > 0.5$) per la valanga del Medon. Il risultato dell'algoritmo originale è in azzurro, quello del nuovo algoritmo in ocra. Il perimetro bianco identifica la zona di distacco della valanga (*avalanche release*).

Capitolo 4

Discussione

Dubium sapientiæ initium

Cartesio

Questo capitolo discute i metodi utilizzati ed i risultati ottenuti. Il paragrafo 4.1 fa alcune considerazioni sul modello ideato: ne evidenzia le differenze col modello originale (4.1.1), ne discute approfonditamente due parametri rilevanti (4.1.2), commenta l'innovativa percentuale calcolata (4.1.3) e ne espone altri limiti (4.1.4). Infine, il paragrafo 4.2 discute il principale difetto di questo lavoro: la validazione del modello.

4.1 Modello

4.1.1 Differenze col modello originale

Stabilità del manto

Le differenze più marcate tra il modello originale di Veitinger et al. [2016] e quello proposto sono state ottenute coi gradi 1–3 di stabilità del manto. In questi casi si ottengono PRA con estensioni e valori diversi, molto apprezzabili nelle figure 3.13–3.16. Le PRA identificate dal modello proposto sono una frazione di quelle del modello originale, mentre col grado 5 accade il contrario: l'estensione delle PRA del modello proposto è maggiore, a causa della funzione dell'acclività associata al grado 5 di stabilità del manto, intuitivamente più "larga" delle altre (cfr. fig. 3.5). Col grado 4 i risultati dei modelli si assomigliano molto, poiché la funzione dell'acclività è la stessa; le eventuali differenze sono dovute unicamente ai parametri aggiuntivi del modello proposto.

PRA meno estese

In entrambi i casi di studio analizzati, il modello proposto ricopriva, seppur di poco, una minor superficie della zona di distacco delle valanghe rispetto al modello originale. Si consideri tuttavia che se, per assurdo, un modello ricoprisse tutta l'estensione del DTM utilizzato con aree a $\mu_{\mathrm{PRA}}(x) > 0.5$, il 100% della zona di distacco sarebbe identificata, ma la modellazione sarebbe errata: sarebbero state identificate anche aree per nulla predisposte al distacco. Il modello proposto non ha mostrato miglioramenti nell'identificare le zone di distacco, poiché non era questo il suo obiettivo, che rimane appannaggio del modello originale ed altri simili.

Riassumendo: il modello proposto, in aggiunta a quello originale, modella la stabilità del manto come funzione dell'acclività, modella le esposizioni critiche, pesa l'indice *wind shelter* e le quote a seconda della pericolosità prevista, implementa una maschera della copertura nevosa e ricava automaticamente la frazione dei pendii ripidi pericolosi. Queste nuove funzionalità sono il motivo delle differenze rispetto al modello originale.

Nuove funzionalità del modello

4.1.2 Parametri

Le "caratteristiche ricorrenti" della parte testuale dei bollettini valanghe (tab. 3.1) hanno consentito di determinare i parametri dell'algoritmo. La ripetuta presenza di tali caratteristiche si spiega, tra l'altro, col fatto che i termini utilizzati nei bollettini si rifanno ad un glossario comune e condiviso tra i servizi di avviso valanghe europei (cfr. p. 9).

In particolare, la curvatura topografica, riportata nei bollettini sotto forma di «creste», «forcelle», «canaloni» e simili, viene citata specialmente in relazione al vento: per questo motivo non è stato creato un parametro *ad hoc* per la curvatura, bensì essa è stata resa dall'indice *wind shelter*, ritenuto più adatto a modellare convessità e concavità.

Riguardo al questionario, l'analisi statistica dei risultati è stata così interpretata:

Risultati del questionario

1. le quote critiche per il distacco di valanghe sono fortemente influenzate dall'aumentare dell'intensità del vento proporzionalmente alla quota e, in secondo luogo, dalle nevicate più intense ad altitudini elevate (cfr. p. 77);

2. le esposizioni critiche sono influenzate soprattutto dalla direzione prevalente del vento (che può creare accumuli, cfr. p. 79) e dalla differente stabilità del manto nevoso tra esposizioni diverse;

3. le acclività critiche sono dovute alla stabilità del manto nevoso: ogni fattore che influisce sulla seconda, influisce sulle prime.

Gli esiti del questionario sono stati coerenti con le aspettative e la letteratura su valanghe e bollettini valanghe (vedi appendice A).

I parametri del modello sono stati così implementati con funzioni *fuzzy*: esse hanno permesso di definire in modo matematico le conoscenze dei professionisti. Volendo implementare un modello su base fisica, le variabili in gioco sarebbero troppe: le funzioni *fuzzy* superano questo problema modellando l'esperienza umana, consentendo così di diminuire il numero di variabili.

Nei prossimi paragrafi si commentano due parametri importanti nel modello: l'acclività e l'indice *wind shelter*.

Acclività

Il modello proposto, rispetto all'originale [Veitinger et al. 2016], utilizza cinque funzioni *fuzzy* dell'acclività, una per ogni grado di stabilità del manto. La differenza sostanziale è aver modellato la stabilità del manto (grandezza fisica) grazie alle funzioni dell'acclività. Il modello originale ignora la stabilità del manto e, a parità

di altezza della neve e direzione del vento, produce un unico scenario: il modello proposto ne può produrre diversi, sopratutto grazie a questo nuovo parametro.

All'aumentare del grado viene modellata una maggior propensione al distacco. Ad esempio, col modello originale il grado di appartenenza di una cella liscia (non scabra), sottovento e di inclinazione 35° è $\mu_{\mathrm{PRA}}(x) = 0.97$; col modello proposto ed a parità di parametri, il grado di appartenenza della stessa cella può assumere valori 0.29, 0.62, 0.92, 0.97 e 1.00 rispettivamente coi gradi 1, 2, 3, 4 e 5. In questo caso, lo scarto massimo tra modelli è $0.97 - 0.29 = 0.68$, più della metà: un tale valore è più che sufficiente a far la differenza nel discriminare una situazione di alta propensione al distacco ($\mu'_{\mathrm{PRA}}(x) > 0.5$) ed una di bassa ($\mu'_{\mathrm{PRA}}(x) < 0.5$). Il quarto valore (0.97) è identico tra i due modelli, poiché la funzione usata per il calcolo dell'acclività col grado 4 di stabilità è la stessa del modello originale. Infatti, gli scenari identificati dal modello proposto col grado 4 presentano poche differenze rispetto al modello originale (ad esempio fig. 3.19).

La variabilità numerica tra modelli si manifesta graficamente con le diverse estensione e colorazione delle aree identificate (figg. 3.13–3.16); il fatto è ancora più evidente confrontando le carte delle PRA booleane: all'aumentare del grado vengono identificate aree di estensione sempre maggiore.

Aver modellato la stabilità del manto nevoso con funzioni delle acclività è probabilmente il maggior contributo di questo lavoro.

Problemi

Tuttavia, alcuni problemi devono essere considerati. Le funzioni sono state sì determinate grazie al parere di esperti, ma questi erano in numero molto limitato: sedici risposte ricevute dal questionario sono troppo poco rappresentative, nonostante le persone interpellate siano le più competenti nel settore di neve e valanghe, almeno in Italia. Un'indagine più affidabile richiederebbe un censimento, o almeno un campione più numeroso.

Riguardo al questionario, sono stati ricevuti commenti come «tutti i fattori sopra menzionati hanno una importanza relativa: il loro peso è legato al tipo di correlazione fra di essi» e «in tutte tre le situazioni i fattori singolarmente hanno sempre una importanza relativa e viene fatta una valutazione complessiva che interseca i possibili scenari tra di loro», mettendo in dubbio la rappresentatività generale delle risposte.

È da considerare inoltre che un questionario *on-line* presenta diversi aspetti negativi: non è possibile controllare le caratteristiche e la serietà di chi lo compila, né monitorare il contesto nel quale questa avviene [Gamberini et al. 2012]. Alcune risposte potrebbero essere state superficiali e, tranne alcuni casi, non c'è stato un confronto *a posteriori* su di esse. In altre parole: non è stato possibile verificare se il questionario sia stato compilato secondo la logica di chi lo ha redatto.

Definizione analitica delle funzioni

La definizione analitica delle funzioni dell'acclività, ancorché arbitraria, sarebbe resa più veritiera consultando il maggior numero di professionisti possibile e utilizzando un metodo di convergenza dei risultati.

Con le funzioni proposte vengono identificate (tranne col grado 5) sempre le stesse zone di distacco, variando solamente il valore del grado di appartenenza; al contrario, la descrizione della *probabilità di distacco di valanghe* della scala europea del pericolo (tab. 1.2) localizza la possibilità di distacchi, per gradi bassi, solo su pendii ripidi ed estremamente ripidi; all'aumentare del grado diminuisce l'acclività richiesta per il verificarsi di valanghe.

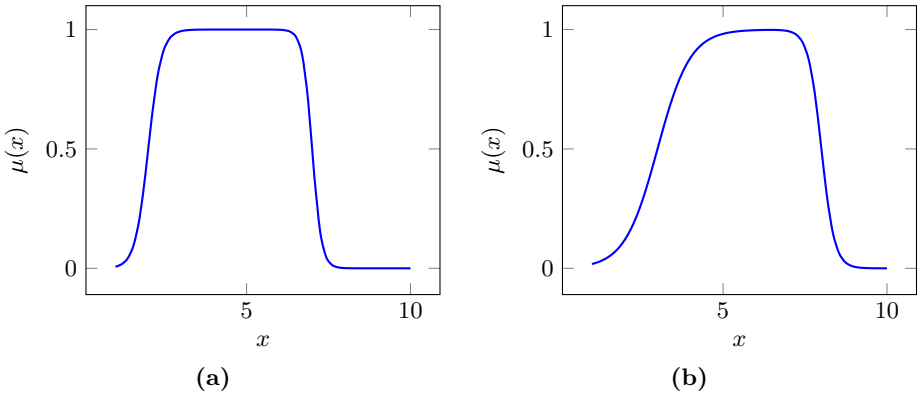


Figura 4.1: Esempio di funzioni asimmetriche: **(a)** differenza e **(b)** prodotto di due funzioni sigmoidali di equazione $\mu(x) = \big(1 + \exp\{-a(x-c)\}\big)^{-1}$.

Le funzioni proposte hanno cercato di modellare la crescita non-lineare della pericolosità all'aumentare del grado di pericolo: l'idea è apprezzabile considerando i massimi delle prime tre funzioni (0.2, 0.5, 0.9, fig. 3.5), ma non quelli delle ultime due, dove il massimo è 1. Una crescita esponenziale, come quella del grado di pericolo, avrebbe richiesto i massimi a 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5 e 1, ma in tal caso solo col grado 5 si sarebbe raggiunto il grado di appartenenza più alto e questo non ha trovato riscontro nel parere dei professionisti interpellati.

Riassunto

Riassumendo: associare ai gradi di stabilità del manto diverse funzioni per le acclività ha fondamento, ma è possibile che la definizione analitica delle funzioni proposte non sia corretta. Le funzioni potrebbero dover essere asimmetriche, nel qual caso si dovrebbe ricorrere al prodotto o alla differenza di due funzioni di appartenenza sigmoidali, e non a campana (fig. 4.1). Per questo è necessario il confronto con più specialisti del settore.

Indice *wind shelter*

Un problema rilevante è sorto con l'indice *wind shelter*. Data una direzione del vento, l'indice identifica le zone sopravento e sottovento. La funzione $\mu_{\text{PRA}}(I(S))$ del modello di Veitinger et al. [2016] assegna grado di appartenenza 0 ai pendii esposti al vento ($I(S) = -1.5$). Se $\mu_{\text{PRA}}(I(S)) \to 0$ allora, per l'equazione (2.14), $\mu'_{\text{PRA}}(x) \to 0$, modellando una propensione al distacco nulla. Ma questa è una forte semplificazione che può condurre a risultati diametralmente opposti alla realtà (figg. 3.19a e 3.19b): se è vero che un pendio sottovento (riparato) è più propenso al distacco di valanghe a causa dei depositi eolici, è falso che un pendio sopravento (esposto) sia completamente esente dal pericolo. Il caso studio a pagina 54 ne è un chiaro esempio.

Limiti dell'indice

Inoltre, il dato di vento in area montana viene reso aleatorio dalla complessità dell'orografia: data una direzione prevalente del vento, l'indice *wind shelter* non considera gli effetti di deviazione locali. Per fare questo occorrerebbe un modello fisico della direzione dei venti, come ad esempio WindNinja [Forthofer et al. 2014], ben più complesso del modello proposto. Ci si scontra coi limiti di questo indice anche in situazioni in cui la fisica gioca un ruolo fondamentale, ad esempio per le

diverse velocità del vento: con basse velocità c'è poca presa in carico della neve, mentre con vento forte questa aumenta, la massa della neve trasportata è maggiore ed aumentano il numero e l'estensione dei depositi di neve ventata. Tuttavia anche con vento forte, ma in presenza di manto trasformato e resistente ("duro"), non vi è alcun trasporto di neve: in questo caso il vento ha un effetto nullo sul manto.

Tali considerazioni sembrano ovvie sapendo che l'indice *windhselter* non è un parametro fisico, ma solo un indice di riparo/esposizione al vento data una direzione prefissata. Questo indice, ed ancor di più la sua funzione di appartenenza, comporta molte e forti semplificazioni di cui bisogna tener conto: per l'utente medio il suo utilizzo potrebbe essere contro-intuitivo e rischia di portare ad errate simulazioni.

Un indice inadatto per modellare il vento

Per questi motivi, si ritiene che questo indice e la relativa funzione di appartenenza del modello originale siano inadatti per modellare l'effetto del vento sul manto nevoso. Data una direzione prevalente, esso rende troppe aree per nulla predisposte al distacco, venendo meno il fine di visualizzazione dei previsori valanghe. Al contrario, con nessuna direzione prevalente del vento, questo indice identifica bene convessità e concavità (fig. 2.7a): lo si ritiene molto adatto a modellare la curvatura topografica, attribuendo alle zone concave un alto grado di appartenenza alla classe PRA.

Riassunto

Riassumendo: l'indice *wind shelter* funziona molto bene senza una direzione prevalente del vento per modellare la curvatura, mentre il suo uso con una direzione prevalente, soprattutto a causa della funzione di appartenenza $\mu_{\mathrm{PRA}}(I(S))$, può portare a modellazioni errate. L'uso dell'indice andrebbe valutato cautamente e solo conoscendo le sue basi matematiche.

4.1.3 Pendii ripidi pericolosi

Attualmente la percentuale dei pendii ripidi pericolosi di un'area viene stimata mentalmente da parte dei previsori. Il modello fornisce un dato numerico, calcolando il rapporto tra l'area delle zone più predisposte al distacco ($\mu'_{\mathrm{PRA}}(x) > 0.5$) e l'area dei pendii ripidi di una regione innevati e non boscati.

Il *boxplot* nella figura 3.17b mostra un'evidente tendenza: la frazione dei pendii ripidi pericolosi aumenta col grado di stabilità del manto nevoso (1 stabile, ... 5 instabile). Questo risultato è coerente con le aspettative: il modello proposto è riuscito a modellare l'incremento dei pendii ripidi predisposti al distacco all'aumentare del grado.

Alta dispersione dei dati

Alcune considerazioni devono tuttavia essere fatte: la dispersione dei dati è contenuta per i gradi 2 e 3 (*outlier* esclusi), mentre è elevata per il grado 1 e specialmente per i gradi 4 e 5, dove il "baffo" dei grafici è piuttosto lungo. Per questi dati, la variabilità della distribuzione è alta: la deviazione standard σ per i gradi 4 e 5 è di 11.7 e 8.5, rispettivamente. Da un lato questo è spiegabile con le molteplici combinazioni possibili dei dati d'ingresso del modello, le quali portano ad individuare scenari molto diversi tra loro, ma dall'altro non si spiega la dispersione molto più contenuta associata ai gradi 2 e 3. Questo effetto potrebbe essere dovuto alla definizione analitica delle funzioni per l'acclività, oppure ad errori nelle cinquanta simulazioni effettuate.

Nonostante questo, la relazione diretta tra percentuale dei pendii ripidi pericolosi e grado di stabilità del manto è apprezzabile ugualmente, anche considerando la massima dispersione dei dati, *outlier* inclusi.

Un'altra fonte di errore riguarda la numerosità del campione: cinquanta simulazioni totali, da otto a tredici per ogni grado (p. 52), sono poche per ottenere un campione rappresentativo. Una statistica più affidabile richiederebbe a) un maggior numero di simulazioni per ogni grado e b) simulazioni con dati reali in ingresso, ma in tal caso il numero di simulazioni per i gradi 4 e 5 sarebbe molto basso, poiché questi gradi vengono dati molto meno di frequente degli altri [SLF 2015]. *Un campione esiguo*

Si noti che la mediana per il grado 1 è 0: questo è dovuto alla funzione dell'acclività per quel grado che tende a far diminuire il valore complessivo di $\mu'_{\mathrm{PRA}}(x)$, spesso al di sotto della soglia 0.5 richiesta per il calcolo dei pendii ripidi pericolosi. In altre parole: più della metà delle volte, con grado 1, i pendii ripidi hanno celle con bassa predisposizione al distacco ($\mu'_{\mathrm{PRA}}(x) < 0.5$) ed il numeratore dell'equazione (3.10) si annulla. Da un altro punto di vista, questo risultato è coerente con le classi di pendii ripidi pericolosi desunte dall'esperienza (tab. 3.6) in quanto $0 < 10$.

Riguardo a queste classi, è stato notato che le percentuali calcolate dal modello sono quasi sempre inferiori in mediana rispetto a quelle della tabella 3.6. Questo può essere dovuto a diverse cause:

Sovrastima o sottostima Le percentuali desunte dall'esperienza potrebbero essere sovrastimate, prendendo in considerazione anche le zone di scorrimento ed accumulo. Inoltre questi dati sono privi di basi numeriche calcolate, essendo solamente stimate "ad occhio"; al contrario, le percentuali calcolate dal modello potrebbero sottostimare, non considerando scorrimento ed accumulo (a patto che le percentuali precedenti lo facciano). Inoltre i parametri del modello originale individuano solo le aree realmente predisposte al distacco: una stima "ad occhio" ingloberebbe nel calcolo anche aree, ad esempio, molto scabre o molto ripide che non possono però staccarsi.

Soglia scelta Coerentemente alla definizione EAWS di evento probabile (p. 83), in questo lavoro si è assunto che un pendio è pericoloso se $\mu'_{\mathrm{PRA}}(x) > 0.5$, se cioè ha un predisposizione al distacco maggiore del 50%. Senza considerare gli errori del modello, è possibile che la percentuale dovuta all'esperienza usi (intenzionalmente o no) una soglia diversa da 0.5. Ad esempio, alcuni previsori adottano la soglia dello 0.66 per gli eventi probabili; in quest'ultimo caso, tuttavia, lo scarto tra le due percentuali aumenterebbe ancora.

Angoli d'inclinazione scelti È stato assunto che un pendio è ripido se con angolo di inclinazione compreso tra 30 e 60°. La percentuale dovuta all'esperienza potrebbe considerare un intervallo leggermente inferiore, come 30–55°, dato che già oltre i 55° le valanghe sono improbabili. In questo caso, diminuendo il denominatore dell'equazione (3.10), le percentuali calcolate dal modello aumenterebbero, avvicinandosi alle altre.

Maschere Con l'equazione (3.9) sono stati selezionati i soli pendii ripidi *innevati* e *non boscati*. Questi ultimi sono stati ottenuti grazie alla maschera della copertura forestale: questa è stata ottenuta da carte di uso del suolo, dunque i possibili errori di digitalizzazione della prima si riflettono sulla seconda. Si consideri la figura 3.10: si possono notare diverse imprecisioni in confronto all'ortofoto. Inoltre, solo un'alta densità di piante previene il distacco di valanghe: eventuali *chiarìe* nel bosco permettono il distacco. Tuttavia, le carte *Maschera del bosco*

di uso del suolo impiegate non riportano chiarìe, quantunque esistenti nella realtà. Oltre a ciò, la densità del bosco non è considerata dalla maschera: in quest'ultima, l'interfaccia tra zone boscate e non boscate è un limite netto, ma nella realtà vi può essere un basso gradiente di densità di piante tra il bosco fitto e le zone prive di bosco. Per questi motivi, le maschere del bosco impiegate sono limitate e possono presentare errori, portando a escludere o includere erroneamente delle aree potenziali di distacco.

Maschera della copertura nevosa

Diversamente dalla maschera del bosco, sempre identica, quella della copertura nevosa varia in base ai dati in ingresso. Più il limite della neve è basso, più pendii ripidi assumono valore 1, aumentando il denominatore dell'equazione (3.10) e diminuendo la percentuale calcolata. Tuttavia è possibile che la percentuale desunta dall'esperienzia venga stimata solo su alcuni pendii ripidi innevati, non tutti: è ragionevole ritenere che un previsore ignori, ad esempio, una ripida chiarìa in un bosco a quota 500 m nell'effettuare la stima. Il modello invece, effettua il calcolo con tutti i pendii ripidi innevati, anche con quelli che, in base alle quote pericolose definite, non sono soggetti a pericolo valanghe: infatti, la pesatura delle quote pericolose fatta per le PRA con l'equazione (3.4) non è stata fatta per i pendii ripidi per la necessità di ottenere una matrice di valori booleani, non *fuzzy*. Questo è uno dei motivi che potrebbe spiegare l'alta variabilità dei dati apprezzabile nel *boxplot* (fig. 3.17b).

Si noti infine che la percentuale dal modello è rappresentativa solo se calcolata su aree vaste: usando un'area limitata, magari a quote elevate e con molte aree a $\mu_{\mathrm{PRA}}(x) > 0.5$, il valore calcolato aumenterebbe molto. Ad esempio, la percentuale dei pendii ripidi pericolosi della figura 3.23d sarebbe 42.3%, sebbene il grado di stabilità del manto fosse solamente 2. Con gli stessi dati in ingresso, ma sull'area del gruppo montuoso intero (fig. 3.22b), la percentuale è 21.9%.

Riassunto

Riassumendo: il modello proposto suggerisce una quantificazione numerica dei pendii ripidi pericolosi, ma l'affidabilità del dato dovrebbe essere verificata con un maggior numero di simulazioni su casi reali ed il suo significato andrebbe valutato da un buon numero di professionisti, correggendo opportunamente l'algoritmo.

4.1.4 Altri limiti

Per i calcoli sulla scabrezza, il modello originale necessita di un DTM ad alta risoluzione (almeno 2 m); nella pratica è possibile usare risoluzioni più basse, ma molti effetti dovuti alla scabrezza vengono persi. In questo studio sono stati usati DTM di risoluzione 10, 5, 2 e 1 m: il tempo richiesto per i calcoli dell'algoritmo e la dimensione dei dati in uscita aumenta proporzionalmente all'estensione del DTM e inversamente alla dimensione delle sue celle. Per aree molto vaste, ad esempio il gruppo del monte Canin utilizzato nei capitoli precedenti, un DTM ad alta risoluzione richiede tempi di calcolo molto lunghi e produce dati in uscita particolarmente "pesanti", nell'ordine dei gigabyte.

La risoluzione del DTM da adottare segue la priorità scelta: dettaglio contro estensione (e/o velocità di calcolo). Per una visualizzazione di dettaglio, il modello dà buoni risultati su aree limitate, mentre impiegando DTM a più bassa risoluzione per aree vaste si perdono le caratteristiche morfologiche più minute.

Un grosso limite del modello è identificare la zona di distacco di sole valanghe a lastroni. Le valanghe di neve a debole coesione, dalla zona di distacco puntiforme (p. 3), non sono modellate. Anche se in maniera minore di quelle a lastroni, le valanghe a debole coesione possono rappresentare ugualmente un pericolo e possono venir citate nei bollettini valanghe. Allo stato attuale, queste valanghe sono ignorate dal modello proposto. La principale difficoltà risiede nel modellare la loro zona di distacco: se è relativamente semplice modellare una superficie, come accade per le valanghe a lastroni, è più difficile modellare dei singoli punti, quali sono le zone di distacco delle valanghe a debole coesione. Questo limite va tenuto in considerazione nell'uso del modello.

Riguardo all'affidabilità degli esiti del modello, si noti che esso *succede* le valutazioni dell'esperto e su di esse si basa: presentando queste ultime un tasso d'incertezza intrinseco, i risultati del modello sono naturalmente incerti. Inoltre il modello non distingue tra debole e forte sovraccarico (p. 84): un'area con alto grado $\mu'_{\mathrm{PRA}}(x)$ calcolato potrebbe generare una valanga in caso di forte sovraccarico, e non farlo con debole. La distinzione tra valanghe spontanee e provocate non è parimenti presa in considerazione.

Infine, si noti che il modello identifica le sole zone di distacco, ignorando quelle di scorrimento ed accumulo: la dinamica delle valanghe non è presa in considerazione. Tuttavia, specialmente per le valanghe spontanee, le zone di scorrimento ed accumulo rappresentano un rischio per l'uomo ed andrebbero considerate. Questo sarebbe possibile integrando nel modello degli algoritmi di dinamica, come quello di trasporto e deposizione di massa (*Mass Transport and Deposition*, MTD) [S. Gruber 2007; S. Gruber et al. 2009].

4.2 Validazione

PRA ottimamente identificate

La validazione del modello originale ha dato ottimi risultati: in media, l' 85.3% delle aree con $\mu_{\mathrm{PRA}}(x) > 0.5$ rientra all'interno della CLPV. In relazione al grado di stabilità del manto, il *boxplot* della figura 3.17a non mostra alcun andamento evidente della percentuale delle PRA contenute nella CLPV all'aumentare del grado; tutti i valori sono poco dispersi rispetto alle rispettive mediane, salvo pochi ed isolati *outlier* che in ogni caso rimangono al di sopra del 75%. Questo rende il modello di Veitinger et al. [2016] decisamente affidabile per modellare le zone di distacco.

La differenza dal 100% è imputabile sia a possibili errori nella modellazione che alla copertura non completa da parte della CLPV (fig. 2.11): essa potrebbe ricoprire solo parzialmente le reali zone valanghive, tralasciando ad esempio valanghe di piccole dimensioni e/o che si trovano in luoghi difficilmente cartografabili, anche con fotointerpretazione.

Inoltre la CLPV cartografa non solo le zone di distacco, ma anche quelle di scorrimento ed accumulo (non considerate dal modello) e si è notato che essa riporta intere aree che non possono essere interessate da valanghe, come pareti verticali e subverticali. Tali aree potrebbero essere eventualmente il bacino di raccolta di neve per una zona di distacco sottostante, ma non zone valanghive.

Imprecisioni nella CLPV potrebbero aver compromesso la fase di validazione.

Mancanza di una vera validazione

Tuttavia, il difetto principale di questo lavoro è la mancanza di una vera validazione del modello proposto. Non è possibile calcolare le coincidenze tra dati simulati e osservati, poiché nella realtà non esiste un'osservazione della predisposizione al distacco: per disporne, cosa molto difficile, si potrebbero fare interpolazioni spaziali (IDW, Kriging, Spline...) di un consistente numero di test di stabilità del manto nevoso (come il *Rutschblocktest*, p. 88), cosa onerosa che necessiterebbe molto tempo ed uno spropositato numero di risorse umane; anche facendolo, si otterrebbe però un dato di stabilità, non un valore di distacco potenziale da confrontare con quelli simulati dal modello. Si noti inoltre che il modello fornisce solamente un grado di appartenenza alla classe "aree di distacco *potenziale*": le aree individuate non necessariamente devono staccare valanghe, bensì possono farlo più probabilmente rispetto ad altre. Questo è il dato simulato.

Giacché non esiste una predisposizione al distacco osservata, i dati osservati per effettuare i confronti possono essere solo distacchi di valanghe reali, le quali interessano tuttavia solo una frazione delle PRA.

Una vera validazione del modello richiederebbe molto tempo e risorse: occorrerebbe un'ampia (pluriennale) base di dati di valanghe rilevate e perimetrate in campo associate al grado di pericolo e le condizioni nivometeorologiche del giorno. Una simile base di dati è attualmente inesistente. Questo servirebbe per verificare l'inclusione delle aree di distacco rilevate nella realtà all'interno delle PRA simulate, come si è cercato di fare coi due casi studio proposti. A tal proposito, si rende noto che le geometrie della zona di distacco delle valanghe "rilevate" dei casi di studio sono state digitalizzate a mano libera sulla base di fonti orali e fotografie, non da ortofoto aeree.[1]

Si consideri infine che una la validazione sarebbe passibile non solo degli errori del modello, ma anche di quelli del rilievo dei dati reali, così come quelli delle previsioni del bollettino valanghe.

Una vera validazione necessita studi più lunghi ed approfonditi di questo lavoro.

[1] Al momento in cui si scrive (10 marzo 2017), buona parte del materiale esistente riguardo alla valanga di Rigopiano (p. 54) è sottoposta a segreto istruttorio per indagini in corso, e pertanto non è stato possibile accedervi. Similmente, la valanga del Medon (p. 58) non è stata rilevata.

Capitolo 5

Conclusioni

Prima regola delle valanghe:
mai finirci dentro

È STATA PROPOSTA un'estensione del modello di VEITINGER et al. [2016] per supportare i servizi di avviso valanghe nella redazione dei bollettini e nella previsione delle valanghe; grazie ad un algoritmo automatizzato ed alla logica *fuzzy*, il modello messo a punto consente di visualizzare geograficamente la previsione redatta a parole, calcolando con valori continui la propensione al distacco di valanghe a lastroni in un'area d'interesse.

I traguardi più importanti di questo lavoro sono:

1. aver modellato la stabilità del manto nevoso in funzione dell'acclività: avendo incluso questo parametro, l'algoritmo potrebbe essere applicato come strumento previsionale;
2. aver quantificato la frazione dei pendii ripidi pericolosi;
3. aver individuato i limiti dell'indice *wind shelter*, almeno come modellato dal modello originale.

Inoltre, sono state modellate quote ed esposizioni critiche grazie ad opportuni parametri ed è stata creata una semplice maschera della copertura nevosa dai limiti variabili a seconda delle esposizioni. Grazie a tutto ciò, l'algoritmo permette di identificare molteplici scenari di pericolosità, modellando le diverse condizioni nivometeorologiche possibili in una stagione.

L'obiettivo prefissato (p. 14) può dirsi raggiunto, ma uno strumento completo ed affidabile per i servizi di avviso valanghe necessita di ulteriore lavoro, sperimentazione e soprattutto validazione. Infatti, i difetti più importanti di questo lavoro sono la numerosità esigua dei campioni usati per le analisi statistiche e la mancanza di una reale validazione del modello proposto. Per questo, successivi lavori dovrebbero concentrarsi sui seguenti punti (in ordine di importanza):

1. consultare un maggior numero di esperti per verificare e correggere le funzioni dell'acclività associate ai gradi di stabilità del manto nevoso e rendere questi ultimi variabili non solo con le esposizioni, ma anche con le quote;

2. considerare l'uso di un indice diverso dal *wind shelter* per modellare il vento; eventualmente impiegarlo per modellare la curvatura topografica, modificando i parametri della sua funzione di appartenenza;

3. modellare non solamente le valanghe a lastroni, ma anche quelle a debole coesione, modificando i parametri dell'algoritmo nella loro espressione analitica;

4. incorporare nel modello algoritmi di dinamica di masse nevose, come MTD [S. Gruber 2007; S. Gruber et al. 2009], per modellare non solo le zone di distacco, ma anche quelle di scorrimento ed accumulo;

5. migliorare la modellazione delle esposizioni pericolose, consentendo di scegliere non solo tra i quattro intervalli delle direzioni cardinali fondamentali (tab. 3.5), ma tra tutti gli intervalli possibili (es. $[0, 135]$, $[175, 320]$, ...);

6. validare il modello "aggiornato" con un fase sperimentale di almeno una stagione invernale ed un alto numero di simulazioni su casi reali per una statistica affidabile;

7. verificare con un maggior numero di professionisti il significato e la validità della percentuale dei pendii ripidi pericolosi, confrontando le percentuali calcolate con quelle desunte dall'esperienza (tab. 3.6);

8. non modellare la vegetazione con maschere binarie, ma con con indici di vegetazione, come il *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), per discriminare in maniera continua tra vegetazione fitta e rada e pesare il dato finale dei calcoli dell'algoritmo.

Dopo questi miglioramenti, il modello potrà essere operativo ed essere usato per affiancare i metodi esistenti di determinazione e validazione del grado di pericolo dei bollettini valanghe (§ A.2.2).

Oltre ai bollettini, il modello potrà venir applicato, ad esempio, in caso di competizioni scialpinistiche: prima di una gara, ad integrazione dei dovuti sopralluoghi sul terreno, il previsore valanghe potrà visualizzare le zone più critiche per il passaggio dei concorrenti e fornire indicazioni puntuali per la sicurezza dell'evento. Il modello potrà inoltre contribuire al sistema di allerta a fini di protezione civile, consentendo di visualizzare la predisposizione al distacco di zone valanghive la cui movimentazione rappresenta un rischio per l'incolumità delle persone e dei beni.

Si tenga presente che un simile modello è indirizzato a professionisti della neve e valanghe che devono interpretarne i risultati in base all'esperienza e conoscendone le basi teoriche. Nelle mani sbagliate, le carte generate possono avere esisti disastrosi, ad esempio infondendo un falso senso di sicurezza anche per situazioni pericolose. Il pubblico, almeno in una prima fase, andrebbe escluso dai potenziali fruitori a causa delle fonti di incertezza presenti tanto nel modello quanto nelle previsioni. Un'analisi statistica dell'incertezza sarà importante nella validazione del modello.

Per sua stessa natura, il modello non potrà sostituire il giudizio dei professionisti e la valutazione *in loco* della pericolosità da valanga che, per ora, rimane ancora appannaggio dell'esperienza umana.

Appendice A

Approfondimenti

Questa appendice approfondisce alcuni aspetti in merito a valanghe e bollettini valanghe. Il paragrafo A.1 illustra i fattori che influenzano la predisposizione al distacco delle valanghe, rendendo conto dei motivi fisici che hanno portato a scegliere i parametri del modello proposto. Il paragrafo A.2.1 illustra i fattori considerati dai previsori nella scelta dei gradi di pericolo, mentre il paragrafo A.2.2 spiega come venga determinato e validato il grado di pericolo dei bollettini valanghe, riportando infine opportunità e limiti della sua applicazione (A.2.3).

A.1 Valanghe: fattori per il distacco

Oltre al profilo stratigrafico della neve, esistono diversi fattori che influenzano tanto il rafforzamento quanto il sovraccarico del manto nevoso. Secondo McClung e Schaerer [1996] e Schweizer, Jamieson e Schneebeli [2003] questi sono:

1. le caratteristiche del terreno (topografiche e vegetazionali):
   - acclività
   - esposizione
   - altitudine
   - bosco
   - scabrezza superficiale
2. i fattori meteorologici:
   - precipitazioni (specialmente la neve fresca)
   - vento
   - temperatura (inclusi gli effetti radiativi).

Al contrario delle condizioni meteorologiche, la topografia di un territorio è un fattore costante nella previsione delle valanghe; in quanto tale, essa viene facilmente incorporata in modelli a base GIS.

Selçuk [2013] suggerisce, attraverso duecento simulazioni, che l'acclività e l'altitudine siano le caratteristiche topografiche più importanti per le valanghe; egli scopre inoltre che le zone a più alta pericolosità da valanga sono quelle a quote elevate con acclività media.

Vengono ora approfonditi i seguenti fattori legati alla topografia: acclività, esposizione, altitudine, vento, bosco e scabrezza del terreno.

Tabella A.1: Indicazioni relative all'angolo d'inclinazione della zona di distacco (da McClung e Schaerer 1996)

Inclinazione [°]	Indicazione
10–25	Valanghe di neve bagnata e di neve fradicia, non frequenti
25–35	Valanghe a lastroni non frequenti; val. di neve bagnata a debole coesione
35–45	Valanghe a lastroni di ogni dimensione
45–55	Frequenti valanghe a lastroni di piccole dimensioni
55–60	Valanghe di neve asciutta a scarsa coesione
60–90	Valanghe rare; frequenti colate di neve in piccole quantità

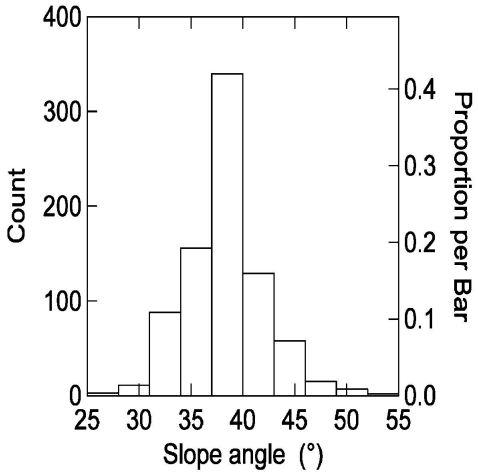


Figura A.1: Angolo d'inclinazione (*slope angle*) nella zona di distacco di valanghe causate dall'uomo. Numerosità del campione $N = 809$, primo quartile 37°, mediana 39°, terzo quartile 41°. Media 38.8°con $\sigma = 3.8°$. Spessore medio dei lastroni 0.49 m con $\sigma = 0.22$ [Schweizer, Jamieson e Schneebeli 2003].

Acclività

L'acclività del pendio (*slope*) è il più importante fattore topografico che influenza il distacco di una valanga [Schweizer, Bartelt et al. 2015]: questa permette l'innesco e l'accelerazione della valanga. Altre caratteristiche del terreno hanno un'importanza secondaria. Sia l'acclività che l'esposizione del versante influenzano il movimento degli strati nevosi. Più un pendio è ripido, più il manto nevoso si muove per una semplice ragione fisica: l'aumento della componente parallela al piano del vettore forza-peso, la quale rappresenta il fattore destabilizzante (vedi pag. 7).

La tabella A.1 riporta i valori degli angoli d'inclinazione della zona di distacco desunti dell'esperienza, ma coerenti con la letteratura scientifica (fig. A.1) [Perla 1977; Schweizer, Bartelt et al. 2015; Schweizer e Jamieson 2001; Schweizer, Jamieson e Schneebeli 2003].

Il distacco di valanghe, nella pratica, non si verifica mai sotto i 10° d'inclinazione. Le valanghe di neve asciutta hanno origine in un punto del pendio con inclinazione $\geq 25°$ (limite critico) [McClung e Schaerer 1996; Perla 1977]. Angoli d'inclinazione minori possono creare valanghe di neve umida, come ad esempio valanghe di slittamento, per le quali è sufficiente un'inclinazione del pendio $\geq 15°$ [Cagnati 2016]. L'intervallo più pericoloso è 28 °–45°, ed in particolare sopra i 35 ° si osserva

Figura A.2: Cima del Cerro Torre, Patagonia, Argentina: la neve aderisce a pareti subverticali. [http://rarebeautifulplaces.blogspot.it/]

una maggior probabilità di distacco [L. Stoffel e Margreth 2012]. Sopra i 45° c'è un'alta frequenza di scaricamenti, ma poco accumulo a causa dell'elevata acclività [Selçuk 2013]. Con inclinazioni maggiori di 60°, le valanghe sono molto frequenti e di piccole dimensioni poiché non è possibile una deposizione di neve importante e duratura [Maggioni e U. Gruber 2003]. Ciò non toglie che trovarsi su pendii estremamente acclivi possa essere ugualmente rischioso: l'alta inclinazione del pendio non ripara infatti da eventuali valanghe generate su pendii sovrastanti.

In altri climi, come nelle zone costiere o nelle regioni himalayane, le valanghe possono verificarsi anche su versanti più ripidi rispetto alle Alpi o alle Montagne Rocciose nordamericane [Veitinger et al. 2016]. Nelle zone costiere, per la vicinanza col mare, le neve ha un alto grado di umidità ed è perciò molto coesa: in questa maniera può aderire a pareti molto ripide per diverso tempo (fig. A.2), mentre nelle Alpi l'aderenza alle pareti per *feltratura* della neve è un fenomeno temporaneo. In Himalaya, invece, la fenomenologia può essere diversa: ad alte ed altissime quote, per la presenza di nevi perenni, può avvenire il distacco di seracchi pensili verticali o addirittura aggettanti (fig. A.3). In questo caso la massa di neve e ghiaccio cade in caduta libera, fino ad incontrare acclività minori della parete, ed innescare allora una valanga sui pendii innevati.

Riassumendo: a fini pratici, versanti con angolo di inclinazione compreso tra 25 e 60° sono potenzialmente in grado di generare valanghe.

L'acclività del pendio determina inoltre la densità di flusso radiativo sul versante.

Figura A.3: Valanga sull'Annapurna, Himalaya, Nepal: il crollo del seracco pensile dà avvio al fenomeno. [http://www.incrediblehimalayas.com/]

Secondo Oke [1987], l'angolo di incidenza ϑ dei raggi solari su un versante di pendenza s ed esposizione (azimuth) ϵ è

$$\vartheta = \arccos[\cos s \cos z + \sin s \sin z \cos(\varphi\epsilon)] \tag{A.1}$$

dove z è lo zenith solare e φ è l'azimuth solare. L'angolo ϑ determina la radiazione solare diretta R_d [$\mathrm{W\,m^{-2}}$] su una superficie inclinata [Cazorzi et al. 2014]:

$$R_\mathrm{d} = R_\mathrm{a} \exp\left\{\frac{-O}{\sin(\pi/2 - z)}\right\} \cos\theta \tag{A.2}$$

dove R_a è la densità di flusso radiativo che giunge ad una superficie perpendicolare ai raggi solari, e è l'eccentricità dell'orbita terrestre (adimensionale) e O la profondità ottica dell'atmosfera (adimensionale). L'angolo ϑ, dunque il valore di R_d, dipende dalla latitudine, dalla stagione e dall'ora del giorno.

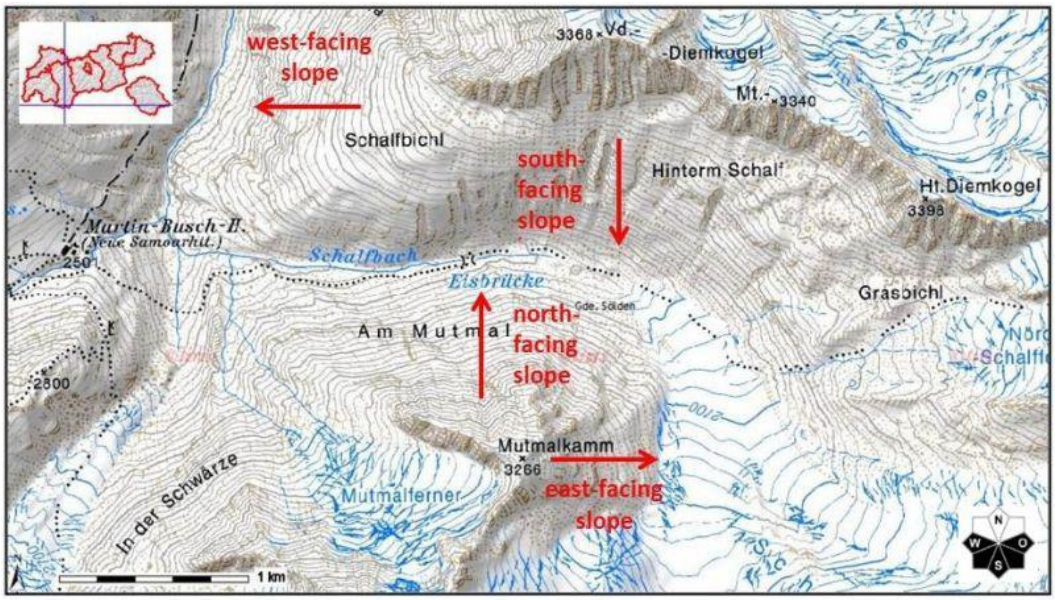
D'inverno, alle latitudini alpine, il sole è basso sull'orizzonte: la densità di flusso radiativo massima si ha per angoli di inclinazione prossimi a 45° [Betetto 2015].

Esposizione

L'esposizione di un versante (*aspect*) è la direzione cardinale verso la quale è rivolta la sua pendenza. Per esempio, un pendio esposto a sud è rivolto verso sud (fig. A.4). Immaginando un osservatore che guarda verso un punto cardinale (per es. nord), il versante di fronte a costui è esposto verso il punto cardinale opposto (sud).

L'esposizione influisce sugli effetti dell'irraggiamento solare, che determina le temperature e le resistenze del manto nevoso [McClung e Schaerer 1996].

Nell'emisfero nord, i versanti meridionali ricevono una quantità di radiazione solare 4–10 volte maggiore rispetto a quelli settentrionali [Betetto 2015]. La neve esposta a sud, avendo più energia a disposizione, va incontro a *metamorfismo distruttivo* più velocemente di quella a nord (fig. A.5): temperature e stabilità del



© Land Tirol, BEV

Figura A.4: Esposizione di un pendio. Sono evidenziati quattro versanti esposti verso ciascuno dei quattro punti cardinali. [www.avalanches.org]

manto sono maggiori rispetto ad un pendio in ombra d'inverno, mentre in primavera si raggiunge l'instabilità più rapidamente.

Alle esposizioni settentrionali, il consolidamento del manto nevoso è più lento: a causa del *metamorfismo costruttivo* (fig. A.6) si formano strati deboli composti da brine di profondità (alla base del manto nevoso), brine superficiali e cristalli sfaccettati. I versanti più ombreggiati corrispondono, il più delle volte nelle Alpi, ai versanti sottovento per quanto riguarda la direzione prevalente del vento.

Alle esposizioni meridionali (soleggiate) si osserva un minor numero di aree di distacco potenziale e di valanghe rispetto alle esposizioni settentrionali (fig. A.7). Questo si spiega generalmente con i diversi spessori e stabilità del manto nevoso tra versanti ombreggiati e soleggiati [A. Stoffel, Meister et al. 1998].

Altitudine

L'altitudine (*altitude*) influisce sulla formazione delle valanghe in quanto le nevicate, il vento e le temperature variano con la quota.

Il manto nevoso è generalmente più spesso ad altitudini elevate per due motivi: 1) in quota nevica più di frequente che a valle a causa delle temperature più basse, salvo inversione termica e 2) l'intensità delle nevicate generalmente aumenta con l'altitudine su montagne di altezza limitata a causa degli effetti orografici; per le cime più alte del mondo, invece, oltre una certa quota si assiste ad una diminuzione delle precipitazioni [McClung e Schaerer 1996].

A quote elevate, le temperature più basse implicano un più lento assestamento del manto, a causa del basso tasso di metamorfismo [Pegani 1997]; i pendii in quota

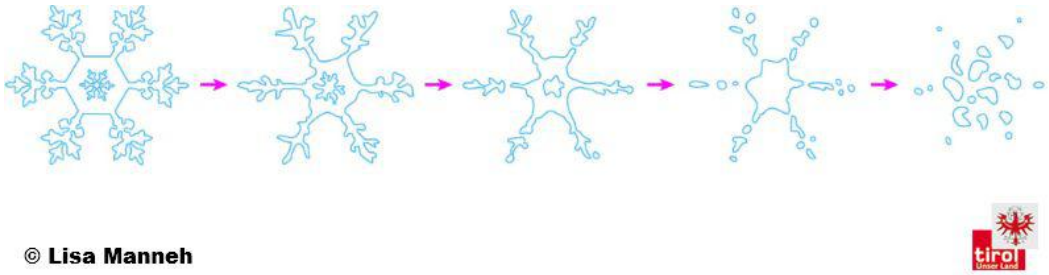


Figura A.5: Metamorfismo distruttivo. I cristalli di neve fresca, diminuendo l'entropia, perdono le ramificazioni, semplificano la loro struttura e diventano grani rotondi. Questo comporta l'assestamento e il consolidamento della neve fresca. [www.avalanches.org]

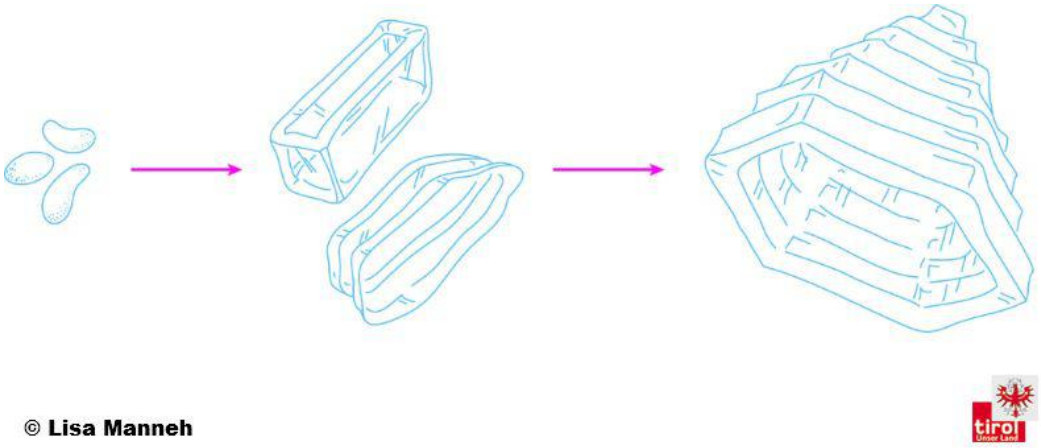


Figura A.6: Metamorfismo costruttivo. I grani di neve crescono in dimensioni, diventando cristalli sfaccettati e calici cavi. I piccoli grani tendono a scomparire, accrescendo progressivamente quelli di grandi dimensioni. Lo strato di neve così trasformato diminuisce in resistenza. Questo tipo di metamorfismo avviene nella prima parte dell'inverno, in zone d'ombra e con una modesta altezza della neve (alto gradiente termico del manto). [www.avalanches.org]

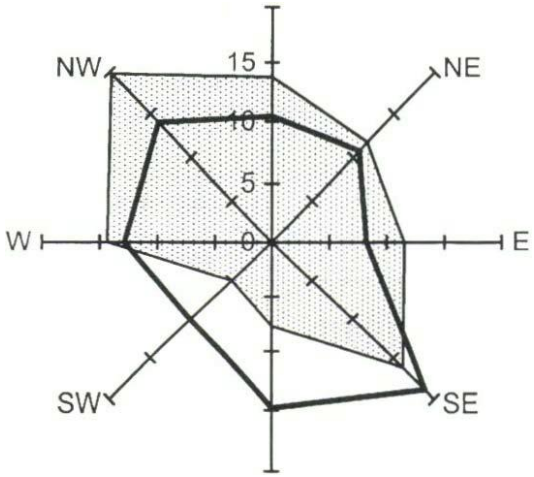


Figura A.7: Frequenza relativa dell'esposizione di valanghe osservate (tratto sottile) rispetto alle aree di distacco potenziale (tratto spesso) [A. Stoffel, Meister et al. 1998].

posso presentare una diversa stratigrafia del manto nevoso, subire effetti diversi da parte del vento ed avere un diverso terreno di fondo. Queste differenze possono causare il distacco di valanghe sui pendii in quota quando vi sono condizioni di stabilità più in basso, e viceversa [McClung e Schaerer 1996].

Vento

Tra i fattori meteorologici, il vento (*wind*) riveste grande importanza nella formazione delle valanghe [Bircham 1995] in quanto rimaneggia gli strati superficiali del manto, arrivando a depositare la neve tre volte più velocemente rispetto ad una semplice nevicata [Cookler e Orton 2004].

La velocità e la direzione del vento variano con la quota e l'orografia della regione, oltre che in base alle caratteristiche della perturbazione nevosa. In genere, alle medie ed elevate latitudini, la velocità del vento aumenta con la quota [McClung e Schaerer 1996].

I versanti sopravento, nei punti dove vi è accelerazione del vento, tendono ad essere erosi dall'azione eolica che mobilizza la neve degli strati superficiali (fig. A.8a); la neve mobilizzata viene in seguito depositata nei versanti sottovento, dove c'è decelerazione, arrivando a formare, cornici (fig. A.9) e lastroni da vento con alta coesione interna e sprovvisti di legami con gli strati sottostanti (fig. A.8b): la condizione ideale per formare grandi valanghe a lastroni.

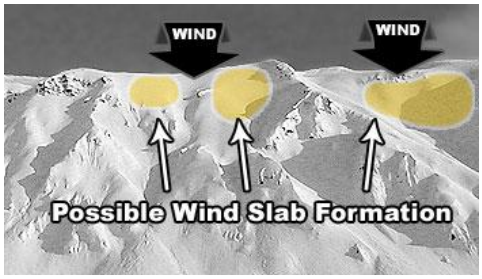
I pendii con maggior accumulo eolico sono quelli che possono dar luogo a valanghe con la maggior probabilità. La neve trasportata dal vento può depositarsi sui versanti sottovento al di là delle creste (fig. A.10a), dietro dorsali orientate perpendicolarmente alla linea di massima acclività dei versanti (carico incrociato, fig. A.10b), su qualsiasi tratto ripido che presenta un avvallamento e dietro file di alberi (cfr. fig. A.11). La velocità e la direzione del vento variano con la quota e le caratteristiche del terreno, oltre che in base alle caratteristiche dei singoli fenomeni meteorici [McClung e Schaerer 1996].

(a) Neve erosa

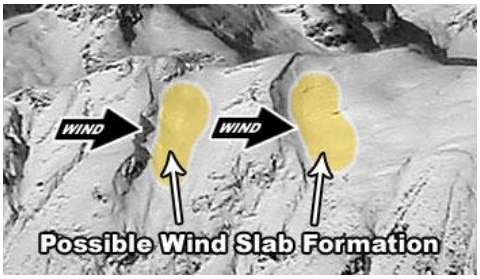
(b) Neve depositata (lastrone da vento fratturato)

Figura A.8: Effetti del vento: **(a)** erosione e **(b)** accumulo. [http://www.fsavalanche.org/wind-slab/]

Figura A.9: Cornice di neve in cresta [http://www.fossombronemeteo.it/]



(a) Carico sotto cresta



(b) Carico incrociato

Figura A.10: Localizzazioni tipiche dei lastroni di neve ventata secondo la direzione prevalente del vento [http://www.fsavalanche.org/wind-slab/]

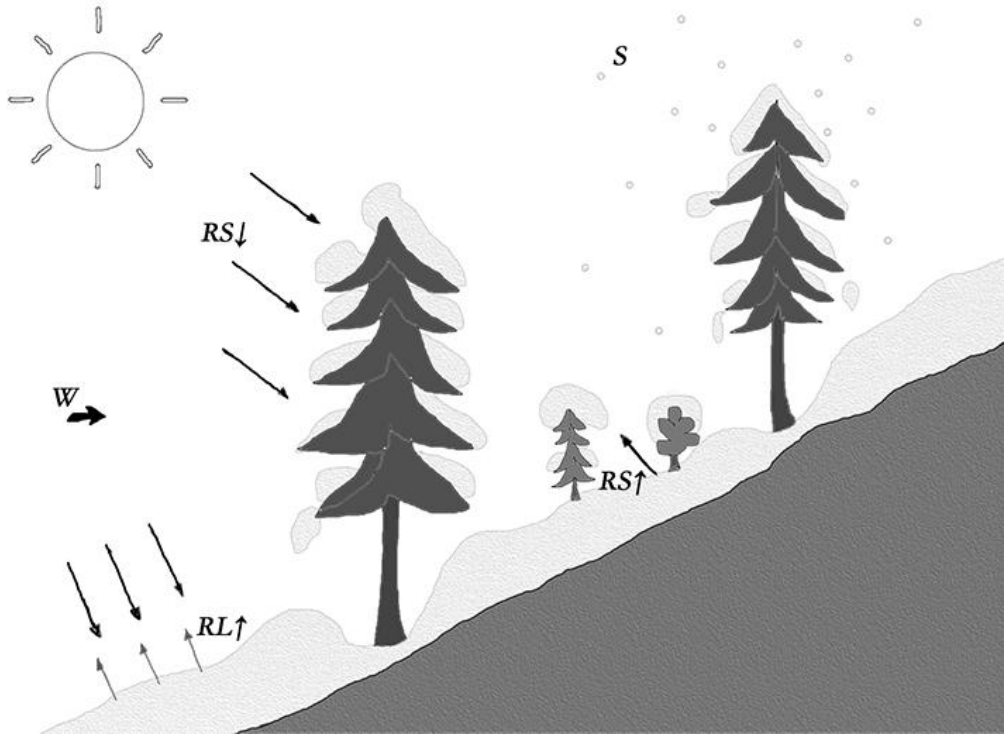


Figura A.11: Effetti del bosco sul manto nevoso [McClung e Schaerer 1996, modificato]. Il bosco, intercettando il vento (W), interrompe ed impedisce il deposito di accumuli eolici. Gli alberi intercettano la nevicata (S), rilasciando poi la neve in blocchi o per fusione. La vegetazione può intercettare tanto la radiazione solare in arrivo (RS↓) che la radiazione solare riflessa dalla neve (RS↑) e la radiazione ad onda lunga emessa dalla Terra (RL↑).

Bosco

L'efficacia di bosco e foreste (*forest*) nella protezione dalla valanghe è oggetto di studio: Teich e Bebi [2009] hanno sviluppato differenti scenari di copertura forestale e identificato le aree di distacco potenziale di valanghe all'interno dei boschi. Essi hanno calcolato il rischio da valanga per ogni scenario: dallo studio emerge che aree denudate nelle parti superiori di un bosco più che raddoppiano il livello di rischio. Infatti, le valanghe a lastroni con una profondità della frattura $> 1\,\mathrm{m}$ possono staccarsi solo in presenza di uno strato debole ininterrotto in un'area larga circa 10 m e lunga 10–20 m [Schweizer, Jamieson e Schneebeli 2003].

Un bosco che cresce su un ripido pendio impedisce la formazione di grosse valanghe poiché influisce sulle caratteristiche del manto nevoso (fig. A.11). Da un punto di vista meccanico, i tronchi degli alberi fungono da strutture di trattenimento e possono impedire la formazione di valanghe a lastroni: in un bosco fitto (> 200 alberi ha^{-1} di diametro $> 16\,\mathrm{cm}$) la neve è troppo irregolare per innescare una valanga [Schneebeli e Meyer-Grass 1993].

Per una protezione efficace, un bosco dovrebbe essere disetaneo (alberi di diverse altezze ed età) con una densità di almeno 500 piante ha^{-1} per pendii di moderata acclività, e di 1000 piante ha^{-1} per quelli più ripidi [McClung e Schaerer 1996].

Figura A.12: Terreno ad alto grado di scabrezza: si notano arbusti, grossi massi, pietraie (Valentintal, Carinzia, 25/4/2016).

Molti modelli GIS per il calcolo delle aree potenziali di distacco (Bühler et al. 2013; G. Gruber et al. 2009; Maggioni 2004; Pistocchi e Notarnicola 2013; Veitinger et al. 2016) si basano sull'assunto che dove è presente bosco fitto non vi possono essere zone di distacco di valanghe: le zone forestate vengono escluse dal modello, applicando una "maschera" ai risultati. Ciò non toglie che una valanga generata altrove possa interessare, nel suo movimento, un bosco.

Scabrezza del terreno

La più importante caratteristica superficiale per il distacco di valanghe è la scabrezza del terreno (*roughness*), cioè la sua irregolarità (fig. A.12).

Un terreno irregolare ha una funzione stabilizzante: esso evita la formazione di estesi e continui strati deboli all'interno del manto [Schweizer, Jamieson e Schneebeli 2003] ed offre un supporto meccanico allo stesso [McClung 2001].

Questo effetto vale fino a che il manto non è abbastanza spesso da annullare le irregolarità della superficie (fig. A.13): l'incremento dello spessore del manto nevoso addolcisce la scabrezza superficiale, diminuendo la variabilità degli strati superficiali del manto nevoso [Mott et al. 2010] ed il supporto meccanico offerto ad un lastrone [van Herwijnen e Heierli 2009]. In questo modo, gli effetti stabilizzanti della scabrezza superficiale scompaiono, o addirittura si invertono [McClung e Schaerer 1996]: viene facilitata la formazione di strati deboli continui e lastroni, che favoriscono la propagazione della frattura che provoca il distacco [Simenhois e Birkeland 2008]. Tutto ciò influenza la dimensione e la posizione delle PRA, specialmente per le valanghe a lastrone [Veitinger et al. 2016].

Nella tabella A.2 sono riportate alcune indicazioni circa il massimo spessore che il manto nevoso può presentare, secondo le caratteristiche della superficie sottostante, affinché non si distacchino valanghe a lastroni.

Le valanghe di slittamento (vedi p. 74), innescate da cause naturali, si verificano più facilmente su rocce lisce ed erba lunga che non su detriti ed erba corta. Sulle Alpi è stato notato che le valanghe si staccano più facilmente dopo che l'erba di pendii non ricoperti dal bosco non viene più sfalciata [McClung e Schaerer 1996].

Figura A.13: Terreno a basso grado di scabrezza. La neve annulla le irregolarità, rendendo i massi appena evidenti (Marmolada, Dolomiti 9/11/2016).

Tabella A.2: Altezza massima della neve in relazione al tipo di terreno per evitare valanghe a lastroni [McClung e Schaerer 1996]

Altezza neve [m]	Tipo di terreno
1.0	Terreno irregolare: detriti permanenti, grosse pietraie, ceppi.
0.6	Terreno mediamente irregolare: arbusti, alberelli, pietraie, superfici irregolari.
0.3	Terreno relativamente regolare: erba, roccia compatta, ghiaioni fini.

A.2 Bollettini valanghe: grado di pericolo

A.2.1 Fattori

I gradi di pericolo dei bollettini valanghe dipendono da vari fattori: stabilità del manto nevoso, probabilità di distacco, frequenza dei pendii critici, eventuale sovraccarico necessario al distacco, dimensioni e tipo di valanghe previste, e acclività dei versanti. Questi termini sono definiti secondo il glossario EAWS (cfr. p. 9).

Stabilità del manto nevoso È la capacità del manto di resistere alle sollecitazioni esterne, data dal rapporto tra la resistenza al taglio del manto e lo sforzo di taglio al quale è sottoposto (vedi eq. 1.1 e 1.2). La stabilità del manto è funzione del *grado di consolidamento* (coesione) dello stesso, dato da qualità e quantità dei legami tra cristalli/grani e tra gli strati. Generalmente, se la stabilità del manto nevoso è buona, cioè la resistenza è alta, il pericolo valanghe è basso e viceversa. L'unica evidenza diretta della stabilità del manto nevoso proviene, eccetto che dall'osservazione delle valanghe, da misure in campo di stabilità [Schweizer e Jamieson 2004]; un esempio di misura è il test del blocco di slittamento (*Rutschblocktest*, p. 88).

Probabilità di distacco Fornisce indicazioni riguardo la probabilità P di accadimento del distacco, distinguendo eventi *probabili* ($P > 0.5$) e *possibili* ($0 < P \leq 0.5$). Dipende direttamente dalla stabilità del manto nevoso e può aumentare applicandovi un sovraccarico.

Tabella A.3: Tipi di sovraccarico [EAWS 2003]

Debole sovraccarico	Singolo sciatore/snowboarder che fa curve dolci, gruppo che rispetta le distanze di sicurezza ($\geq 10\,\mathrm{m}$), singolo escursionista con racchette da neve
Forte sovraccarico	Due o più sciatori/snowboarder che non rispettano le distanze di sicurezza, mezzo battipista, esplosione, escursionista a piedi/alpinista

Frequenza dei pendii critici È la diffusione areale del pericolo. Indica quanti pendii di una determinata regione sono potenzialmente pericolosi.

Sovraccarico È un carico supplementare applicato al manto nevoso [AINEVA 2011]. Si divide in debole e forte (tab. A.3). Questa suddivisione è qualitativa e deve essere ritenuta come indicativa [SLF 2015].

Dimensione delle valanghe Per questa classificazione, si considerano i danni potenziali, l'avanzamento, la lunghezza ed il volume (tab. A.4).[1] La classificazione adottata si basa su quella canadese [McClung e Schaerer 1980].

Acclività L'acclività viene espressa come angolo d'inclinazione di un pendio, misurato su carta 1:25 000 sulla linea di massima pendenza o misurato sul terreno. Nel bollettino vengono indicati gli angoli di inclinazione del pendio come descritto nella tabella A.5.

Inoltre, il distacco viene diviso in a) *spontaneo*, se il distacco di valanga avviene per cause naturali, senza influenza esterna del manto nevoso e b) *provocato*, se viene causato da carichi supplementari sul manto nevoso.

Una bassa stabilità del manto nevoso (dunque un'alta probabilità di distacco) innalza il grado di pericolo. All'aumentare del grado di pericolo aumentano la frequenza dei pendii critici e le dimensioni previste per le valanghe.

A.2.2 Determinazione e validazione del grado di pericolo

Il grado di pericolo dato in un bollettino, per una regione ed in un dato momento, viene valutato dai previsori dei servizi valanghe.

Il metodo convenzionale

Ancora oggi, per questo compito viene utilizzato il metodo cosiddetto *convenzionale* [LaChapelle 1980], un metodo sintetico che consente un'approssimazione della stabilità del manto nevoso e conseguentemente del pericolo di valanghe. Gli elementi fondamentali su cui si basa il metodo sono:

1. un forte determinismo, basato sulla conoscenza dei processi fisici;
2. fiducia nelle fonti d'informazione riguardo a neve, tempo atmosferico e valanghe;
3. un alto grado di competenza sviluppato attraverso l'esperienza empirica.

[1] Nel dicembre 2016, il gruppo di lavoro EAWS stava adeguando la classificazione circa la dimensione delle valanghe. Una versione definitiva è prevista per giugno 2017 (comunicazione personale di P. Nairz, *Lawinenwarndienst Tirol*).

Tabella A.4: Dimensioni delle valanghe sulla base della classificazione canadese [EAWS 2011; SLF 2015, modificato]

Dimensione	Nome	Danno potenziale	Avanzamento	Lunghezza indicativa	Volume indicativo
1	Colata, scaricamento, scivolamento	Relativamente innocua per le persone. Seppellimento improbabile, eccetto quando la zona di deposito è sfavorevole. Attenzione al pericolo di caduta sui pendii estremi	Si ferma su un pendio ripido	10–30 m	10^2 m^3
2	Valanga di piccole dimensioni	Può seppellire, ferire o causare la morte di persone	Può raggiungere il piede del pendio	50–200 m	10^3 m^3
3	Valanga di medie dimensioni	Può seppellire e distruggere automobili, danneggiare autocarri. Può distruggere piccoli edifici e piegare alberi isolati	Può percorrere terreni pianeggianti (nettamente inferiore a 30°) per una distanza < 50 m	> 200 m, < 1 km	10^4 m^3
4	Valanga di grandi dimensioni	Può seppellire e distruggere autocarri pesanti e vagoni ferroviari. Può distruggere edifici più grandi e parti del bosco	Percorre terreni a ridotta acclività (nettamente inferiore a 30°) per una distanza superiore ai 50 m e può raggiungere il fondo valle	1–2 km	10^5 m^3
5	Valanga di dimensioni molto grandi	Può devastare il paesaggio, ha un potenziale distruttivo catastrofico	Raggiunge il fondovalle e le massime dimensioni note	3 km	$> 10^6$ m^3

Tabella A.5: Classi di inclinazione del pendio adottate nei bollettini [EAWS 2003]

Classe	Inclinazione [°]
Poco ripido	≤ 30
Ripido	$> 30, < 35$
Molto ripido	$> 35, < 40$
Estremamente ripido	≥ 40

Al "forte determinismo" di cui al punto 1 sono abbinate le decisioni, ampiamente non-deterministiche, riguardo alle previsioni del momento. Il punto 2 implica l'adozione di una rete informativa molto vasta. Rilevante è l'informazione fornita dall'analisi degli strati del manto attraverso i *profili stratigrafici*: questi consentono di considerare, per via grafica, le caratteristiche fisiche e meccaniche del manto nel punto in cui è stato rilevato il profilo.

Tuttavia, l'elevata variabilità del manto nevoso limita fortemente la rappresentatività spazio-temporale di un rilievo stratigrafico puntuale [Della Mea 2011]. Per questa ragione, la previsione col metodo convenzionale può essere supportata dall'uso di modelli fisici: il più importante e rappresentativo è SNOWPACK [Bartelt e Lehning 2002; Lehning, Bartelt, Brown e Fierz 2002; Lehning, Bartelt, Brown, Fierz e Satyawali 2002; Lehning, Bartelt, Brown, Russi et al. 1999], un modello che consente di simulare lo sviluppo del manto nevoso durante un inverno. Creato principalmente per l'avviso di valanghe, SNOWPACK simula la stratigrafia del manto nevoso e la microstruttura della neve basandosi su dati trasmessi da stazioni meteorologiche automatiche. SNOWPACK è implementato in un software *open source* liberamente scaricabile all'indirizzo `https://models.slf.ch/`.

Modelli fisici

Per contenere la soggettività nell'assegnare i gradi di pericolo, sono state sviluppate nel tempo diverse procedure.

In sede europea, successivamente alla riunione EAWS di Davos del 2005 è stata adottata la *matrice bavarese* (fig. A.14). La matrice, presentata da Zenke [2003] a Monaco di Baviera [EAWS 2003], è ormai integrata nella maggior parte dei flussi decisionali dei servizi valanghe europei [Frigo et al. 2012; Valt 2012].

La matrice bavarese

Essa fornisce un valido supporto al previsore valanghe per determinare oggettivamente il grado di pericolo. La matrice è divisa in due sezioni, una relativa ai distacchi provocati da sovraccarico (parte sinistra) ed una relativi ai distacchi spontanei (parte destra). Incrociando la distribuzione areale dei siti pericolosi e la probabilità di distacco, viene determinato il grado di pericolo in entrambe le situazioni. Di norma, viene scelto il grado di pericolo più alto risultante dal confronto delle due sezioni [Valt 2012].

L'uso regolare della matrice bavarese ha permesso di verificare l'esistenza di scenari di pericolosità intermedi tra i gradi *2-moderato*, *3-marcato* ed anche *4-forte*, portando a formulare 11 gradi di pericolo (1, 2−, 2, 2+, 3−, 3, 3+, 4−, 4, 4+, 5). Per questa ragione è stata proposta l'adozione di nuove icone [Valt e Berbenni 2014], assegnando un fattore d'importanza al grado di pericolo per ogni riquadro della matrice [EAWS 2011].

Müller, Mitterer et al. [2016] hanno proposto di unire i concetti della matrice bavarese con quelli del modello concettuale del pericolo di valanga nordamericano

Bavarian Matrix (auxiliary matrix for preparing the avalanche bulletin)

Distribution of hazards sites	Probability of avalanche release				OR				
	generally only with high additional loads	particularly with high additional loads (possibly also with low additional loads)	already with low additional loads possible	with low additional loads probable		spontaneous release of small-sized avalanches possible	spontaneous release of medium-sized, in some cases large-sized avalanches possible	spontaneous release of many medium-sized, in several cases large-sized avalanches probable	spontaneous release of numerous large-sized, often large-sized avalanches probable
single hazard sites (specifiable in the AR*)	1	2	2	2		1	2		
hazard sites on some steep slopes (specifiable in the AR*)	2	2	3	3		2	3	3	
hazard sites on many/most steep slopes (specifiable in the AR*)	2	2	3	4		2	3	4	4
hazard sites on many/most steep slopes (not definable in the AR*)	2	3	4	4		3	4	4	5
hazard sites also in moderately steep slopes				5			4	5	5

Effective 2011-09-01

Figura A.14: Matrice bavarese [http://www.avalanches.org/eaws/en/main_layer.php?layer=basics&id=4]. Le celle colorate col grado di pericolo sono state approvate il sede EAWS e rappresentano le situazioni più comuni. Le celle col grado di pericolo senza colore sono situazioni poco frequenti, non ancora ben studiate e non approvate. Le celle vuote sono indeterminate e rappresentano situazioni irrealistiche. AR: *Avalanche Report* (bollettino valanghe).

(*Conceptual Model of Avalanche Hazard*, CMAH), il quale esprime in maniera comprensibile il processo di valutazione del pericolo. Il risultato dell'unione è una matrice di valutazione del pericolo di valanga (*Avalanche Danger Assessment Matrix*, ADAM) che consiste in una matrice di probabilità ed una matrice di pericolo. È stato inoltre proposto di integrare nella matrice bavarese l'informazione della dimensione prevista delle valanghe [Müller, Stuckl et al. 2016].

Un uso sistematico e condiviso a livello nazionale ed europeo della matrice bavarese garantisce, oltre alla riduzione della soggettività nella valutazione, una maggior uniformità da parte dei servizi valanghe nell'esprimere il grado di pericolo: in questo modo vengono ridotte le differenze di valutazione tra regioni o Stati confinanti, fornendo un servizio di avviso omogeneo [Frigo et al. 2012].

Il metodo AINEVA

In Italia, un metodo più complesso per determinare e verificare il grado di pericolo emesso dal bollettino è stato sviluppato al centro valanghe di Arabba [Cagnati et al. 1998]. Esso consiste nella raccolta manuale di dati, in più fasi, lungo un itinerario scialpinistico: vengono considerate l'attività eseguita dai rilevatori, l'attività valanghiva osservata (spontanea e/o programmata), viene eseguita una *prova penetrometrica* per valutare la resistenza del manto nevoso ed il test del blocco di slittamento (*Rutschblocktest*) [Frigo et al. 2012].

Ogni fase, spiegata ora in dettaglio, è costituita da una serie di operazioni che portano ad un *indice* di pericolo del tutto simile al *grado* di pericolo della scala europea nei colori e nella numerazione, ma diverso nella logica: l'indice ricavato è, infatti, rappresentativo del solo luogo di rilievo, sebbene quello ottenuto con maggior frequenza da diversi rilievi sia una buona stima del grado di pericolo.

Attività dei rilevatori I rilevatori devono attraversare molti/pochi/nessun pendio ripido, in funzione del pericolo valanghe presente. A seconda dell'attività svolta ed ai distacchi e/o assestamenti del manto percepiti, si determina un indice di pericolo della zona rilevata.

Attività valanghiva Se assente, l'indice di pericolo può essere 1, 2 o 3. Se presente, l'indice viene determinato in funzione della dimensione delle valanghe. L'attività valanghiva viene osservata dal rilevatore sul terreno, e può essere integrata da ulteriori informazioni derivanti da stazioni di rilevamento nell'area.

Prova penetrometrica È un test effettuato con una speciale sonda dotata di massa battente per ricavare il profilo della resistenza del manto. Il profilo ottenuto va confrontato con la classificazione dei profili penetrometrici AINEVA (fig. A.15), ricavando l'indice di pericolo.[2]

Test del blocco di slittamento Il *Rutschblocktest* [Jamieson e Johnston 1992] prevede l'isolamento di un blocco di $2 \times 1.5\,\mathrm{m}$ scavando, ai lati ed a valle, una trincea di $0.5\,\mathrm{m}$ e, a monte, tagliando la neve con un apposito strumento. Per stimare la stabilità del manto, si applica una procedura standard che, con fasi successive, può provocare il cedimento, totale o parziale, del blocco.

In seguito alle quattro prove, il risultato finale è dato dall'indice ricavato dalla prova dell'*attività dei rilevatori* e confermato da almeno un'altra prova.

[2] L'idea di classificare i profili penetrometrici in tipologie standard risale agli anni '80 del XX secolo [De Quervain e Meister 1987; A. Stoffel, Meister et al. 1998].

Classificazione dei profili penetrometrici AINEVA

Tipo di profilo/spessore della neve	30 cm	60 cm	90 cm	120 cm	150 cm	180 cm
1	bc	bc	bc	bc	bc	bc
2	mc	mc	mc	mc	bc	bc
3	bc	bc	bc	bc	mc	mc
4	dmc	dmc	dmc	mc	mc	mc
5	bc	bc	mc	mc	dmc	dmc
6	mc	mc	mc	dmc	dmc	dmc
7	bc	bc	mc	mc	dmc	dmc
8	bc	mc	mc	dmc	dmc	dmc
9	mc	dmc	dmc	dmc	dmc	dmc
10	dmc	dmc	dmc	dmc	mc	mc
11	mc	dmc	dc	dmc	mc	mc
12	bc	mc	dmc	dmc	dc	dc
13	mc	dmc	dc	dmc	dmc	mc
14	dmc	dc	dc	dc	dc	dc
15	mc	dmc	dc	dc	dc	dc
16	dmc	dmc	dc	dc	dc	dmc

Figura A.15: Classificazione dei profili penetrometrici AINEVA. Il grado di consolidamento del manto nevoso si deduce confrontando la stratigrafia effettuata con quelle presenti nella matrice, tenendo conto dello spessore della neve. bc: ben consolidato. mc: moderatamente consolidato. dmc: da moderatamente a debolmente consolidato. dc: debolmente consolidato. Fonte: gruppo previsori AINEVA.

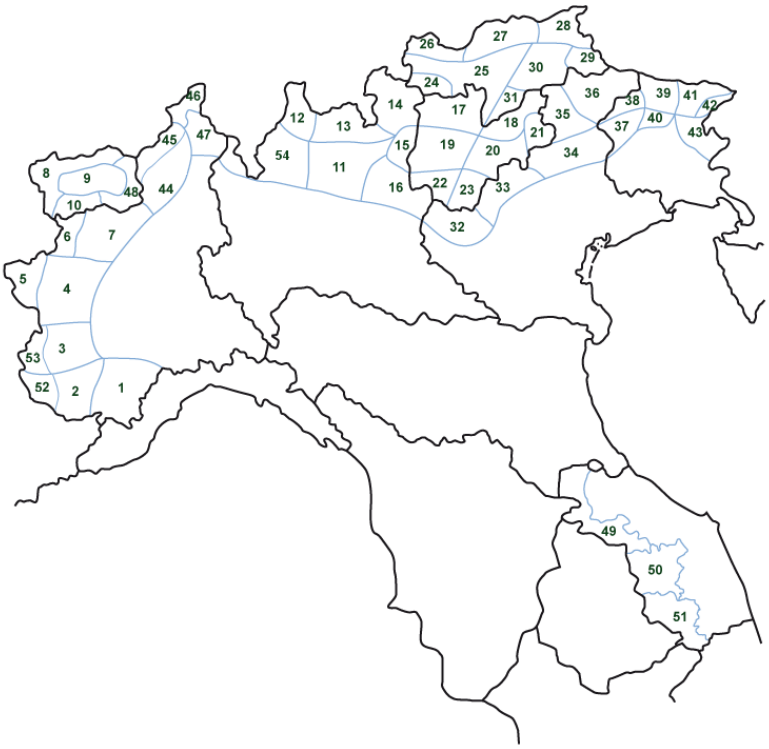


Figura A.16: Zone geografiche AINEVA. I gradi di pericolo del bollettino vengono assegnati ad aree geografiche omogenee [http://aineva.it/bolletti/bollettino1_ok.html].

A.2.3 Opportunità e limiti

Il metodo convenzionale per la previsione delle valanghe si basa sia sulla trattazione deterministica di parametri nivometeorologici sia sull'esperienza empirica del previsore (vedi p. 84): ciò implica un'importante componente soggettiva nel valutare le singole situazioni nell'applicare la scala di pericolo [Frigo et al. 2012].

Errori nelle previsioni

Sia le previsioni meteorologiche che quelle del bollettino valanghe, che in parte si basano sulle prime, possono contenere errori: tale eventualità risiede nella natura stessa delle previsioni [SLF 2015], che è quella probabilistica. Le previsioni possono venir affiancate da un *grado di attendibilità*, solitamente espresso in percentuale.

Il bollettino valanghe si basa su dati limitati: la densità areale delle fonti dei dati grezzi determina il dettaglio dell'informazione fornita dal bollettino.

Il pericolo è valutato a scala regionale

Nel bollettino valanghe possono essere specificate le zone dei pendii in cui sono previsti punti particolarmente critici; ciononostante, le condizioni locali ed i singoli versanti non possono essere valutati dal bollettino [AINEVA 2011]. Attualmente, è possibile prevedere il pericolo valanghe solamente a scala regionale: il grado di pericolo viene assegnato ad aree geograficamente omogenee o gruppi montuosi di estensione $\geq 100\,\mathrm{km}^2$ [EAWS 2010]. Ad esempio, l'AINEVA suddivide l'arco alpino in 50 zone (fig. A.16), l'SLF suddivide la Svizzera in circa 120: i bollettini assegnano, di volta in volta, un grado di pericolo a ciascuna di queste zone.

Per tutti questi motivi, il bollettino *non può sostituire* la valutazione locale del pericolo: spetta all'utente mettere in relazione, sul posto, il grado di pericolo regionale, la possibile attività valanghiva locale ed i relativi effetti [AINEVA 2011; SLF 2015].

Nota conclusiva Si tenga presente che le valanghe non sono un evento casuale: il 90 % degli incidenti è provocato dalla vittima stessa o da altri membri del gruppo.

Il bollettino valanghe è soltanto una delle possibili fonti d'informazione di cui si può entrare in possesso: in qualsiasi decisione devono confluire tutte le informazioni disponibili.

Per minimizzare i rischi sono necessari [SLF 2015]:

- solida formazione sulle valanghe;
- informazioni recenti (da persone del luogo e da osservazioni personali);
- equipaggiamento di emergenza (apparecchio di ricerca travolti in valanga, pala e sonda da valanga);
- comportamento adeguato alla situazione.

Appendice B

Codice

Le parti del sistema che si possono colpire con un martello (sconsigliato) sono chiamate hardware; quei codici di programma che si possono soltanto maledire sono chiamati software

ANONIMO

Questa appendice riporta il codice dei programmi scritti. Il linguaggio utilizzato è R; le scritte precedute da un cancelletto sono commenti al codice e una loro lettura rende comprensibili le operazioni che stanno venendo effettuate.

Il paragrafo B.1 riporta il codice dell'algoritmo messo a punto per il calcolo automatico dei risultati del modello. Ha ampliato l'originale algoritmo di VEITINGER et al. [2016]. Il paragrafo B.2 riporta gli *script* usati per calcolare la percentuale delle PRA all'interno del perimetro della CLPV e le percentuali delle PRA per la valanga di Rigopiano. Il paragrafo B.3 riporta la regressione non-lineare effettuata per calcolare i parametri della funzione associata al grado 5 di stabilità del manto nevoso per il calcolo dell'acclività (vedi § 3.2.2).

B.1 Algoritmo

Il codice è rilasciato sotto licenza GNU GPL versione 3, consultabile al link https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.en.html. Se vuoi redistribuire il codice sorgente, le uniche limitazioni sono:

1. devi dare accesso al codice sorgente
2. devi rilasciare lavori derivati sotto la stessa licenza GPL v3.

```
# PRA definition by Jochen Veitinger 2015
# New features for forecasting purposes by Luca Iacolettig 2016-2017

#### User-defined parameters ####
```

```
## Directories ##
# Common directory path
# You will use a similar directory to load and save your files, maybe...
commonPath = "D:/Progetti/Valanghe/GIS/workspace/Canin"

# Input raster #
# "...[path].../nameofDTM.asc"
inputRas = file.path(commonPath, "dtm/canin1.asc")

# Forest mask #
forest = file.path(commonPath, "forest/forest1.asc")

# Working directory #
# To save intermediate results
work_dir = file.path(commonPath, "ModelOutput/20170204")

# SAGA GIS path
# SAGA directory
SAGApath = "D:/Progetti/Valanghe/Programmi/Tool_ArcGIS_PRA/PRA_definition/
    SAGA-GIS"

# SAGA modules
SAGAmodules = "D:/Progetti/Valanghe/Programmi/Tool_ArcGIS_PRA/PRA_definition/
    SAGA-GIS/modules"

## Model parameters ##
# Snow depth in [m] #
HS = 0.9

# Snowpack stability #
# Type 1, 2, 3, 4 or 5 to define snowpack stability degree (1 stable, 5
    unstable)
sStability = 3

# More hazardous aspect #
# Type "N", "S", "E", "W" to define an higher snowpack stability degree to
    different aspects
# Type "KD" if snowpack stabilty is the same at every aspect
sWhere = "N"

# Smoothing degree #
# Type "Regular" or "Low" to define degree of terrain smoothing (see
    Veitinger's manual)
# "Low"  for low snow distribution, e.g. little wind influence
smooth = "Regular"

# Wind direction in [degrees] #
# N= 0, W =90, S=180
wind = 180
windTol = 180           # wind tolerance in [degrees]

# Altitude limits for wind effect #
zWind1 = 1700           # altitude limit, above which wind effects do
```

```
    matter
zWind2 = 1300           # altitude limit, under which wind effects do not
    matter

# Snow cover limits in [m] above sea level #
sLimN = 700             # northern aspects
sLimE = 800             # eastern aspects
sLimS = 900             # southern aspects
sLimW = 800             # western aspects

# Altitude limits for avalanche hazard #
# These limits provide the buffer dimension for the height fuzzy membership
     function
zLim1 = 1700            # upper limit: above zLim1 there is avalanche
    hazard
zLim2 = 1300            # lower limit: under zLim2 there is not avalanche
    hazard
zwhere = "Above"        # type "Above" or "Under" to define if avalanche
    increases above or under the altitudes limits zLim1 and zLim2

# Name of output raster #
# outPRA = "PRA_fuzzy.asc"
PRA_param <- paste(
        "Snow depth [m]", HS, "Snowpack stability degree", sStability, "More
    hazardous aspects", sWhere, "Smoothing degree", smooth, "Wind direction",
    wind, "Wind tolerance",  windTol, "Altitude limits for wind effect [m]", zWind1,
     zWind2, "Snow cover limits in [m] above sea level (N,E,S,W)" , sLimN, sLimE,
    sLimS, sLimW,
        "Altitude limits for avalanche hazard [m]", zLim1, zLim2, zwhere, "Forest
    mask", forest, "Working directory", work_dir, sep = "\t"
        )
outPRA <- paste("PRA", sep = " ")


#### Using R libraries ####
# Remember to install in R the following libraries before running the
    algorithm!
print("Loading libraries...")

library(sp)
library(gstat)
library(shapefiles)
library(foreign)
library(methods)

library(plyr)
library(raster)
library(RSAGA)


####  Preliminary calculations ####
# Let's run!
```

```
# Working environment
myenv = rsaga.env(workspace = work_dir,
                  path = SAGApath,
                  modules = SAGAmodules)

setwd(work_dir)

# Coordinate reference system
# epsg:3004 is Gauss-Boaga projection, fuse E
sr = CRS("+init=epsg:3004")

print("Begin Calculations...")

# Input raster
asc <- raster(inputRas)
asc.extent <- extent(asc)
asc.res <- res(asc)
head <- read.ascii.grid.header(inputRas)
writeRaster(asc, "outputRas", format = "SAGA", overwrite = TRUE)

####  Experimental function to relate snow depth with scale ####
if (smooth == "Regular") {
  cv = 0.35
} else {
  cv = 0.2
}

i_max = 2 * ceiling(HS ^ 2 * cv) + 1

#### Windshelter index ####

# DTM for windshelter calculation
windRaster <- aggregate(asc, fact = 5, expand = TRUE)

# Wind raster
if (i_max > 2) {
        windRaster_new <- aggregate(asc, fact = 2 * i_max, expand = TRUE)
        windRaster <-
        resample(windRaster_new, windRaster, method = "bilinear")
}

writeRaster(
        windRaster,
        "windRaster",
        format = "ascii",
        datatype = 'FLT4S',
        overwrite = TRUE
)

# Calculate windshelter index
ctrl = wind.shelter.prep(5, (wind * pi) / 180, (windTol * pi) / 180 , 2 * i
    _max)
```

```
focal.function(
  "windRaster.asc",
  fun = wind.shelter,
  prob = 0.5,
  control = ctrl,
  radius = 5,
  search.mode = "circle"
)

f <- list.files(pattern = 'windshelter.asc$', full.names = TRUE)
windshelter <- raster(f)
windshelter <- resample(windshelter, asc, method = "bilinear")

#### Ruggedness ####
# Calculate at different scales
for (i in 1:i_max) {
        # Calculate slope and aspect
        slope_name <- paste("slope", i, sep = "")
        aspect_name <- paste("aspect", i, sep = "")

        rsaga.geoprocessor(
                "ta_morphometry",
                23,
                env = myenv,
                list(
                        DEM = "outputRas.sgrd",
                        SLOPE = slope_name,
                        ASPECT = aspect_name,
                        SIZE = i,
                        TOL_SLOPE = "1.00000",
                        TOL_CURVE = "0.000100",
                        EXPONENT = "0.00000",
                        ZSCALE = "1.000000",
                        CONSTRAIN = FALSE
                )
        )

        rsaga.sgrd.to.esri(
                slope_name,
                slope_name,
                format = "ascii",
                georef = "corner",
                prec = 2
        )

        rsaga.sgrd.to.esri(
                aspect_name,
                aspect_name,
                format = "ascii",
                georef = "corner",
                prec = 2
        )
```

```
        # Create raster object of slope raster
        f <- list.files(pattern = paste(slope_name, ".asc$", sep = ""),
                                        full.names = TRUE)
        slope <- raster(f)

        f <- list.files(pattern = paste(aspect_name, ".asc$", sep = ""),
                                        full.names = TRUE)
        aspect <- raster(f)

        # Convert to radians
        slope_rad <- slope * pi / 180
        aspect_rad <- aspect * pi / 180

        # Calculate xyz components
        xy_raster <- sin(slope_rad)
        z_raster <- cos(slope_rad)
        x_raster <- sin(aspect_rad) * xy_raster
        y_raster <- cos(aspect_rad) * xy_raster

        xsum_raster <- focal(x_raster, w = matrix(1, 3, 3), fun = sum)
        ysum_raster <- focal(y_raster, w = matrix(1, 3, 3), fun = sum)
        zsum_raster <- focal(z_raster, w = matrix(1, 3, 3), fun = sum)

        result_raster <- sqrt((xsum_raster) ^ 2 + (ysum_raster) ^ 2 + (zsum
    _raster) ^ 2)

        ruggedness_raster <- (1 - (result_raster / 9))
        rugg_name <- paste("ruggedness", i, sep = "")

        writeRaster(ruggedness_raster,
                  rugg_name,
                  format = "ascii",
                  overwrite = TRUE)
}

# Correction of snow surface roughness with slope
f <- list.files(pattern = paste("ruggedness", i_max, ".asc$", sep = ""),
                full.names = TRUE)
rugg <- raster(f)

if (i_max > 1) {
        f <- list.files(pattern = paste("slope", i_max, ".asc$", sep = ""),
                                full.names = TRUE)

        slp_coef <- as.matrix(raster(f))
        slp_coef <- 1 - ((slp_coef - 30) / 30)
        slp_coef[slp_coef < 0] <- 0
        slp_coef[slp_coef > 1] <- 1
        slp_coef <- 1 + (slp_coef * (i_max - 1))
        slp_coef <- round(slp_coef, digits = 0)

        for (i in 1:(i_max - 1)) {
                f <- list.files(pattern = paste("ruggedness", i, ".asc$", sep
```

```
    = ""),
                                    full.names = TRUE)
                rugg_i <- raster(f)
                rugg[which(slp_coef == i)] <- rugg_i[which(slp_coef == i)]
        }
}

#### Definition of membership functions #####

# Bell curve parameters for ruggedness #
a <- 0.01
b <- 5
c <- -0.007

# Membership function for ruggedness
rugg1 <- 1 / (1 + ((rugg - c) / a) ^ (2 * b))

# Uncomment following line, if you want 0 values under ruggedness = 0.01
# rugg1[rugg > 0.01] <- 0

# Bell curve parameters for slope #
# Snowpack stability varies according to aspect
asp <- aspect

if (sWhere == "N") {
        asp[asp <= 45] <- 1
        asp[asp > 45] <- 0
        asp[asp >= 315] <- 1
} else if (sWhere == "S") {
        asp[asp > 0] <- 0
        asp[asp >= 135] <- 1
        asp[asp > 225] <- 0
} else if (sWhere == "E") {
        asp[asp > 0] <- 0
        asp[asp >= 45] <- 1
        asp[asp > 135] <- 0
} else if (sWhere == "W") {
        asp[asp > 0] <- 0
        asp[asp >= 225] <- 1
        asp[asp > 315] <- 0
}

# Curve parameters
c <- 40

if (sStability <= 4) {
        a <- 8
        b <- 3
} else {
        a <- 13
        b <- 5
}
```

```
# Function numerator changes according to snowpack stability degree
    sStability
param_switch <- function(i) {
  switch(i,
         0.2,           # sStability = 1
         0.5,           # sStability = 2
         0.9,           # sStability = 3
         1,                     # sStability = 4
         1)                     # sStability = 5
}

# Function numeratore for the choosen sStability
num = param_switch(sStability)
if (sStability <= 4) {
        # an higher snowpack stability degree
        num2 = param_switch(sStability + 1)
} else {
        # if sStability = 5, do nothing
        num2 = num
}

# Create a copy matrix of zeros
slopeMatrix <- as.matrix(slope)
slope1 <- matrix(0,
         ncol = ncol(slopeMatrix),
         nrow = nrow(slopeMatrix))

# Aspect matrix
asp <- as.matrix(asp)
asp[is.na(asp)] <- 0

# Calculate memberhip function for slope
# It varies among aspects with different snowpack stability
for (j in 1:ncol(asp)) {
  for (i in 1:nrow(asp)) {
    if (asp[i, j] == 0) {
      slope1[i, j] <- num / (1 + ((slopeMatrix[i, j] - c) / a) ^ (2 * b))
    } else {
      slope1[i, j] <- num2 / (1 + ((slopeMatrix[i, j] - c) / a) ^ (2 * b))
    }
  }
}

# Uncomment following lines if:
# there are not avalanches under 25 and above 60 degrees
# slope1[slope < 25] <- 0
# slope1[slope > 60] <- 0

# Create a raster of fuzzy memberhip of slope
slope1 <- raster(slope1)
extent(slope1) <- asc.extent
res(slope1) <- asc.res[1]
```

```
writeRaster(slope1,
            "fuzzy_slope",
            format = "ascii",
            overwrite = TRUE)

# Bell curve parameters for windshelter #
a <- 2
b <- 5
c <- 2

windshelter <- 1 / (1 + ((windshelter - c) / a) ^ (2 * b))

# Windshelter index weighting
# Random numbers
set.seed(1872)

# Data for linear regression
x <- c(zWind2, zWind1)
y <- c(0, 1)
df <- data.frame(x, y)

# Linear regression model
lrm <- lm (y ~ x, data = df)
q <- lrm$coef[1]
m <- lrm$coef[2]

# Fuzzy function to weight windshelter
windWeight <- m * asc + q
windWeight[windWeight < 0] <- 0
windWeight[windWeight > 1] <- 1

# Weight windshelter index
windshelter <- windshelter * windWeight

# Windshelter raster
writeRaster(windshelter,
            "fuzzy_windshelter",
            format = "ascii",
            overwrite = TRUE)

#### Fuzzy logic operator ####

minvar <- min(slope1, rugg1, windshelter)
gamma <- (1 - minvar)

PRA <- gamma * minvar + ((1 - gamma) * (slope1 + rugg1 + windshelter)) /  3

# Membership function for height #
# Random numbers generation
set.seed(3872)

# Data
```

```
x <- c(zLim2, zLim1)
if (zwhere == "Under") {
        y <- c(1, 0)
} else {
        y <- c(0, 1)
}
df <- data.frame(x, y)

# Linear regression model
lrm <- lm (y ~ x, data = df)
q <- lrm$coef[1]
m <- lrm$coef[2]

# Fuzzy linear function for height
height <- m * asc + q
height[height < 0] <- 0
height[height > 1] <- 1

# Height raster
writeRaster(height,
            "fuzzy_height",
            format = "ascii",
            overwrite = TRUE)

# Weighting PRA raster with height
PRA <- PRA * height

# Forest mask #
forest <- raster(forest)
PRA <- crop(PRA, forest)
PRA <- PRA * (1-forest)

# Snow cover mask #
# Create a matrix of zeros
snowlim <- matrix(0, ncol = ncol(asc), nrow = nrow(asc))
asp <- as.matrix(aspect)
asp[is.na(asp)] <- 0

# An efficient function for the following calculations
fun <- function(a, b) {
        tmp = 0.00      # temporary value
        if(a >= b){
                tmp <- 1.00
        }
        return(tmp)
}

# Raster matrix
ascMatrix <- as.matrix(asc)
ascMatrix[is.na(ascMatrix)] <- 0

# Calculate snow limit accoring to aspect:
# the previous function is being used
```

```
for(j in 1:ncol(asp)){
        for(i in 1:nrow(asp)){
                if(asp[i,j] >= 315 | asp[i,j] < 45 ){
                        snowlim[i,j] <- fun(ascMatrix[i,j], sLimN)
                } else if(asp[i,j] >= 45 & asp[i,j] < 135 ) {
                        snowlim[i,j] <- fun(ascMatrix[i,j], sLimE)
                } else if(asp[i,j] >= 135 & asp[i,j] < 225 ) {
                        snowlim[i,j] <- fun(ascMatrix[i,j], sLimS)
                } else if(asp[i,j] >= 225 & asp[i,j] < 315 ) {
                        snowlim[i,j] <- fun(ascMatrix[i,j], sLimW)
                }
        }
}

# Snow cover raster
snowlim <- raster(snowlim)
extent(snowlim) <- asc.extent
res(snowlim) <- asc.res[1]

writeRaster(snowlim, "snowlim", format = "ascii", overwrite = TRUE)

# Exclude cells without snow
PRA <- PRA * snowlim

# Final raster #
print("Raster of Potential Release Areas")
PRA.expand <- extend(PRA, asc.extent, value = NA)

# Project raster
proj4string(PRA.expand) <- sr
writeRaster(PRA.expand, outPRA, format = "ascii", overwrite = TRUE)


#### Dangerous steep slopes ####
# Extract PRA > 0.50
PRA.expand[PRA.expand >  0.50] <- 1
PRA.expand[PRA.expand <= 0.50] <- 0

# name of PRA binary raster
outPRA_bin <- paste(outPRA,
                                        "binary",
                                        #PRA_param,
                                        sep = "_"
)

# PRA binary raster
# Project raster
proj4string(PRA.expand) <- sr
writeRaster(PRA.expand,
            outPRA_bin,
            format = "ascii",
            overwrite = TRUE)
```

```
# Calculate PRA area over total DTM area
# exclude NA values at borders
PRA1 <- PRA.expand
PRA1[is.na(PRA1)] <- 0

# crop slope by PRA extent
slope2 <- slope

# Select steep slopes: 0 no steep, 1 steep
# Here, steep slopes are between 30 and 60 degrees
slope2[slope2 >= 60.00] <- 0
slope2[slope2 <  30.00] <- 0
slope2[slope2 >= 30.00] <- 1

# Only steep slopes with snow
slope2 <- slope2 * snowlim

# Without forest
slope2 <- crop(slope2, forest)
slope2 <- slope2 * (1-forest)

# Convert everything to a matrix
PRA1 <- as.matrix(PRA1)
slope2 <- as.matrix(slope2)

# Artificial NA values removing
PRA1[is.na(PRA1)] <- 0
slope2[is.na(slope2)] <- 0

# Sum the 1s
# PRA1 has 1 only in PRA cells
# slope2 has 1 only in steep slopes
PRA_sum <- sum(PRA1)
slp_sum <- sum(slope2)

# Ratio between PRA and steep slopes areas
# Provide the percent with 2 decimal digits
percent <- (PRA_sum / slp_sum) * 100
percent <- round(percent, digits = 2)

print("Percent of snowy steep slopes affected by PRAs [%]")
print(percent)

# Write data
data <- c(inputRas, PRA_param, "Percent of snowy steep slopes affected by PRAs [%]"
    , percent)
write(data, file.path(work_dir, "Data.txt"))

print("Calculations complete!")

# Congratulations, my friend: this is the code ending. Enjoy it! :)

# L.I. 2017.03.08
```

B.2 Validazione

B.2.1 PRA in CLPV

Percentuale delle PRA rientranti nel perimetro della CLPV.

```
# PRA verification by Luca Iacolettig 2017
# How many pixels of PRAs do lie in the avalanche map perimeter?

# Using R library
library(raster)

# Load CLPV raster
avalmap = "D:/Progetti/Valanghe/GIS/workspace/Canin/CLPV/CLPV10.asc"
avalmap <- raster(avalmap)

# Load PRA binary raster
PRAbin = "D:/Progetti/Valanghe/GIS/workspace/Canin/ModelOutput/20170203/PRA_
    binary.asc"
PRAbin <- raster(PRAbin)

# Cropping for same extent
PRA.crop <- crop(PRAbin, avalmap)

# Matrix of PRAbinary
PRAbin <- as.matrix(PRA.crop)
PRAbin[is.na(PRAbin)] <- 0

# Avalanche map Matrix
avalmapbin <- as.matrix(avalmap)
avalmapbin[is.na(avalmapbin)] <- 0

intersection <- avalmapbin * PRAbin
PRAinavalmap <- sum(intersection)

PRAbinarea <- sum(PRAbin)

PRApercent <- (PRAinavalmap / PRAbinarea) * 100
percent <- round(PRApercent, digits = 2)

print("Percent of PRAs areas lying in the avalanche map perimeter:")
print(percent)

print("Done!")

# Script end
# Bye bye!
```

B.2.2 PRA di Rigopiano

Codice usato per calcolare i dati riportati nella tabella 3.9 a pagina 54.

```
### Accident verification

library(raster)

# Load avalanche map raster
avalmap = "D:/Progetti/Valanghe/GIS/workspace/Rigopiano/ModelOutput/verification
    /shpvalanga.asc"
avalmap <- raster(avalmap)

# Load PRA binary raster
PRAbin = "D:/Progetti/Valanghe/GIS/workspace/Rigopiano/ModelOutput/verification/
    prarigli.asc"
PRAbin <- raster(PRAbin)

# Major avalanche map extent
avalmap <- extend(avalmap, PRAbin, value = NA)

# Matrix of PRAbinary
PRAbin <- as.matrix(PRAbin)
PRAbin[is.na(PRAbin)] <- 0

# Avalanche map Matrix
avalmapbin <- as.matrix(avalmap)
avalmapbin[is.na(avalmapbin)] <- 0

PRAbinarea <- sum(PRAbin)
avalsum <- sum(avalmapbin)

# PRA in avalanache map perimeter over avalanche area
intersection <- avalmapbin * PRAbin
PRAinavalmap <- sum(intersection)
PRApercent <- (PRAinavalmap / avalsum) * 100
percent <- round(PRApercent, digits = 2)
print(percent)

# avalanche not given by PRA
npra <- !PRAbin
diff <- npra * avalmapbin
diff <- sum(diff)
percent <- (diff/avalsum) * 100
percent <- round(percent, digits = 2)
print(percent)

# PRA inside avalanche perimeter
PRAbinarea <- sum(PRAbin)
PRApercent <- (PRAinavalmap / PRAbinarea) * 100
percent <- round(PRApercent, digits = 2)
print(percent)

# PRA outside avalanche perimeter
```

```
naval <- !avalmapbin
PRAout <- naval * PRAbin
PRAout <- sum(PRAout)
PRA <- sum(PRAbin)
percent <- (PRAout/PRA) * 100
percent <- round(percent, digits = 2)
print(percent)
```

B.3 Regressione non-lineare

Codice per trovare i parametri della funzione *fuzzy* dell'acclività associata al grado 5 di stabilità del manto nevoso (§ 3.2.2).

```
# Fuzzy membership function for snowpack stability degree 5

# data
x <- seq(20,60,5)
y <- c(0, 0.21, 0.94, 1, 1, 1, 0.94, 0.21, 0)
df <- data.frame(x,y)

# generalized bell function
b <- 5  # set b value a priori
fo <- y ~ 1/ (1 + ((x-c)/a)^(2*b))


# non-linear least squares regression model to find a and c parameters
m <- nls(fo, data = df, start = list(a = 4, c = 35)) # set a and c starts

summary(m)$coef[1]      # a parameter
summary(m)$coef[2]      # c parameter
```

Appendice C

Indagine

C.1 Questionario

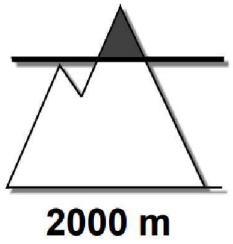
Si riporta di seguito la versione italiana del questionario inviato agli uffici AINEVA d'Italia ed al *Lawinenwarndienst* del Tirolo per indagare i fattori importanti considerati dai previsori nel definire quote, esposizioni ed acclività pericolose. Per evitare di occupare inutili spazi, sono state rimosse le (grandi) immagini che corredavano ciascuno dei singoli fattori cui si chiedeva di attribuire un grado di importanza.

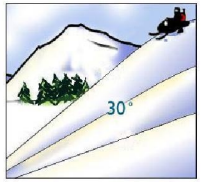
Pericolo localizzato: perché lì?

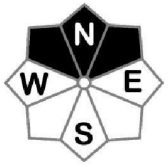
Molti fattori influenzano la localizzazione del pericolo valanghe.

Quali fattori contano per quote, inclinazioni ed esposizioni critiche?

Nelle prossime sezioni, attribuisci un grado di importanza a ciascuno dei fattori, o aggiungine degli altri, secondo la tua esperienza.







La situazione

Hai redatto il bollettino valanghe di oggi.

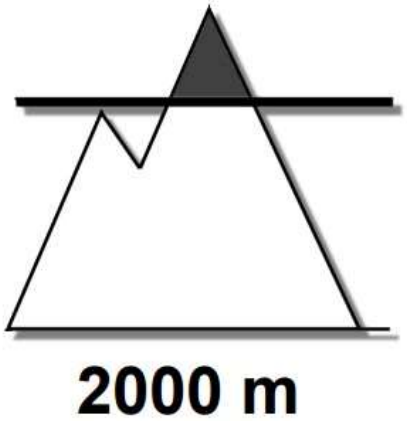
Hai scritto che "il pericolo è localizzato oltre i 2000 m sui pendii più ripidi di 30° esposti da NW a NE".

Questi contenuti non sono creati né avallati da Google.

Google Moduli

Quota

"Il pericolo è localizzato oltre i 2000 m...".



Quanto sono importati i seguenti fattori per definire la quota limite?

Neve fresca

	0	1	2	3	4	5	
Nessuna importanza	○	○	○	○	○	○	Molto importante

Temperatura

	0	1	2	3	4	5	
Nessuna importanza	○	○	○	○	○	○	Molto importante

Vento

	0	1	2	3	4	5	
Nessuna importanza	○	○	○	○	○	○	Molto importante

Vegetazione, bosco

	0	1	2	3	4	5	
Nessuna importanza	○	○	○	○	○	○	Molto importante

Limite della neve

	0	1	2	3	4	5	
Nessuna importanza	○	○	○	○	○	○	Molto importante

Irraggiamento solare

	0	1	2	3	4	5	
Nessuna importanza	○	○	○	○	○	○	Molto importante

Stabilità del manto nevoso

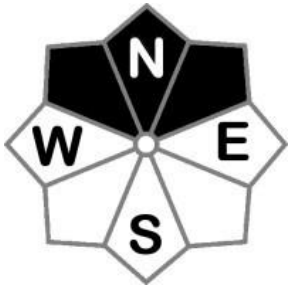
	0	1	2	3	4	5	
Nessuna importanza	○	○	○	○	○	○	Molto importante

Precipitazioni

	0	1	2	3	4	5	
Nessuna importanza	○	○	○	○	○	○	Molto importante

Esposizione

"Il pericolo è localizzato [...] alle esposizioni da NW a NE"



Quanto sono importati i seguenti fattori per definire le esposizioni critiche?

Neve fresca

	0	1	2	3	4	5	
Nessuna importanza	○	○	○	○	○	○	Molto importante

Temperatura

	0	1	2	3	4	5	
Nessuna importanza	○	○	○	○	○	○	Molto importante

Vento

	0	1	2	3	4	5	
Nessuna importanza	○	○	○	○	○	○	Molto importante

Vegetazione, bosco

	0	1	2	3	4	5	
Nessuna importanza	○	○	○	○	○	○	Molto importante

Limite della neve

	0	1	2	3	4	5	
Nessuna importanza	○	○	○	○	○	○	Molto importante

Irraggiamento solare

	0	1	2	3	4	5	
Nessuna importanza	○	○	○	○	○	○	Molto importante

Stabilità del manto nevoso

	0	1	2	3	4	5	
Nessuna importanza	○	○	○	○	○	○	Molto importante

Precipitazioni

	0	1	2	3	4	5	
Nessuna importanza	○	○	○	○	○	○	Molto importante

Pericolo localizzato: perché lì?

Inclinazione

"Il pericolo è localizzato [...] sui pendii più ripidi di 30°..."

Quanto sono importati i seguenti fattori per definire l'inclinazione critica?

Neve fresca

	0	1	2	3	4	5	
Nessuna importanza	○	○	○	○	○	○	Molto importante

Temperatura

	0	1	2	3	4	5	
Nessuna importanza	○	○	○	○	○	○	Molto importante

Vento

	0	1	2	3	4	5	
Nessuna importanza	○	○	○	○	○	○	Molto importante

Vegetazione, bosco

	0	1	2	3	4	5	
Nessuna importanza	○	○	○	○	○	○	Molto importante

Limite della neve

	0	1	2	3	4	5	
Nessuna importanza	○	○	○	○	○	○	Molto importante

Irraggiamento solare

	0	1	2	3	4	5	
Nessuna importanza	○	○	○	○	○	○	Molto importante

Stabilità del manto nevoso

	0	1	2	3	4	5	
Nessuna importanza	○	○	○	○	○	○	Molto importante

Precipitazioni

	0	1	2	3	4	5	
Nessuna importanza	○	○	○	○	○	○	Molto importante

Altro?

Fattori non menzionati che ritieni importanti:

C.2 Esiti

In questo paragrafo sono riportati gli esiti integrali dell'indagine. Per ogni parametro indagato (quota, esposizione, inclinazione) sono riportate la tabella delle risposte e le distribuzioni di frequenza dei fattori cui si chiedeva di attribuire un grado di importanza.

Ad ogni riga delle tabelle corrisponde una compilazione del questionario, la cui data ed ora sono scritte nella prima colonna. Le colonne successive contengono il grado di importanza attribuito ai fattori riportati nell'intestazione delle tabelle. I commenti "a risposta libera", segnalati da un simbolo nella colonna "Altro", sono riportati in calce alle tabelle.

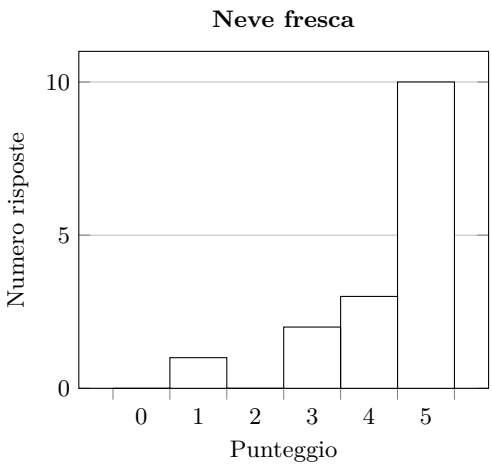
C.2.1 Quota

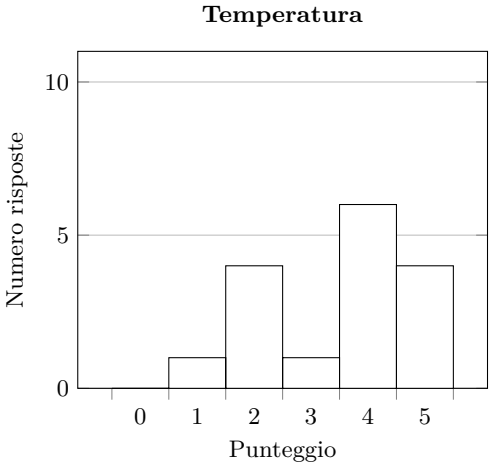
Tabella C.1: Risultati sui fattori per definire le quote critiche

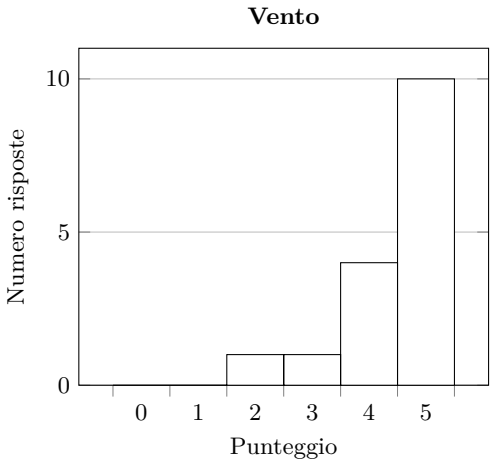
Data e ora	Neve fresca	Temperatura	Vento	Veg.ne, bosco	Lim. neve	Irr.to solare	Stab. m. nevoso	Precipitazioni	Altro
22/12/2016 18.09.14	4	2	3	5	5	0	2	5	
23/12/2016 10.39.32	5	5	5	3	3	3	5	5	
23/12/2016 11.24.04	4	4	5	3	3	4	4	4	*
23/12/2016 12.44.35	5	4	5	3	2	4	3	4	
27/12/2016 9.51.04	4	4	4	2	1	3	5	2	
27/12/2016 9.51.09	5	2	5	2	4	4	4	4	
27/12/2016 10.34.10	3	4	5	4	5	1	3	2	
27/12/2016 11.24.48	1	2	2	1	0	1	4	2	
28/12/2016 8.59.57	5	1	5	5	5	1	1	5	
29/12/2016 16.10.06	5	5	5	4	4	4	5	5	
30/12/2016 10.19.15	5	5	5	3	5	4	3	5	
30/12/2016 10.20.33	5	5	4	4	5	5	3	5	
02/01/2017 10.47.56	3	2	4	2	2	4	4	4	
10/01/2017 9.12.04	5	4	5	3	3	3	5	5	
23/01/2017 16.21.05	5	3	5	4	5	4	4	5	
25/01/2017 15.27.22	5	4	4	3	5	2	4	4	†

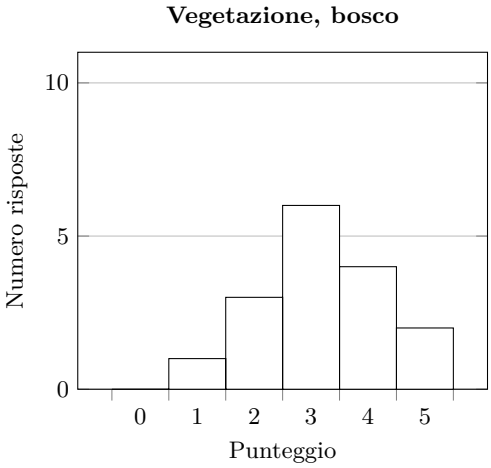
* Conoscenza del territorio, frequentazione del territorio.

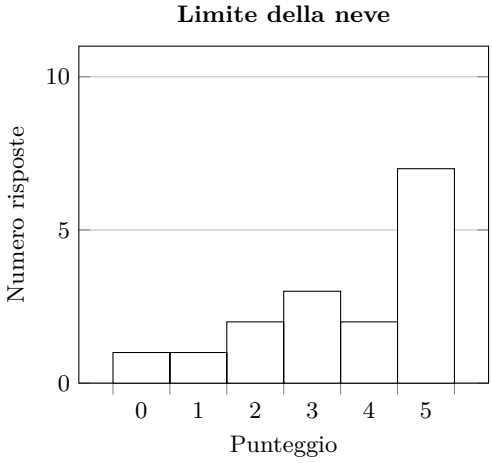
† Tutti fattori sopra menzionati hanno una importanza relativa: il loro peso è legato al tipo di correlazione fra di essi.

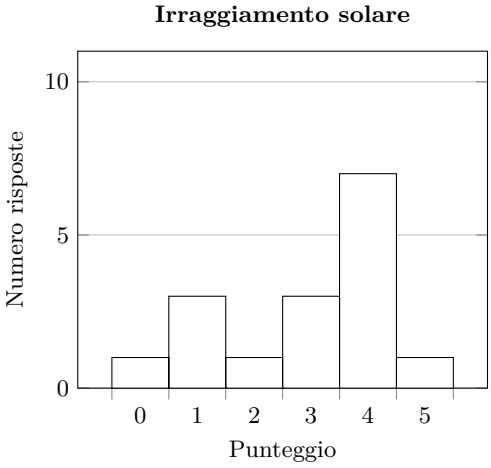

Neve fresca
Numero risposte
0
5
10
0 1 2 3 4 5
Punteggio

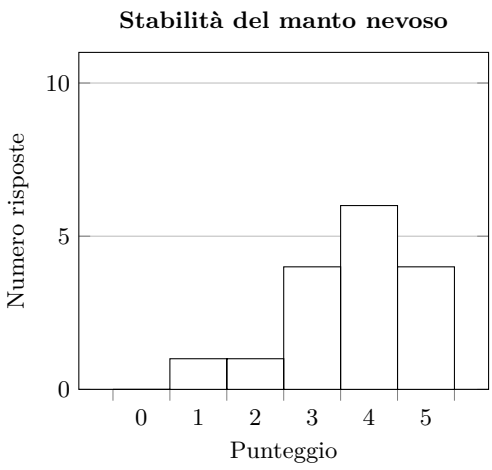

Temperatura
Numero risposte
0
5
10
0 1 2 3 4 5
Punteggio

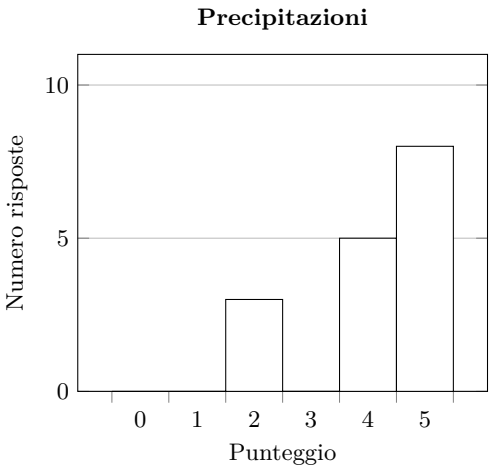

Vento
Numero risposte
0
5
10
0 1 2 3 4 5
Punteggio


Vegetazione, bosco
Numero risposte
0
5
10
0 1 2 3 4 5
Punteggio


Limite della neve
Numero risposte
0
5
10
0 1 2 3 4 5
Punteggio


Irraggiamento solare
Numero risposte
0
5
10
0 1 2 3 4 5
Punteggio





C.2.2 Esposizione

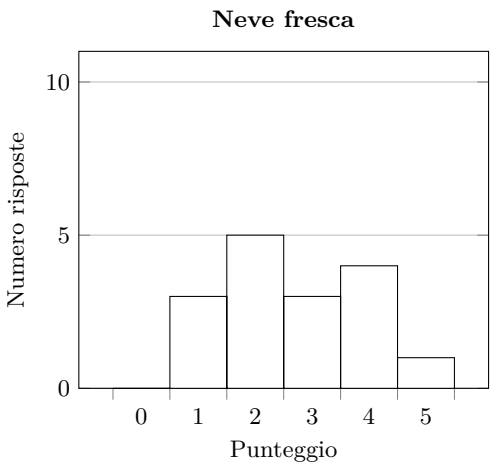
Tabella C.2: Risultati sui fattori per definire le esposizioni critiche

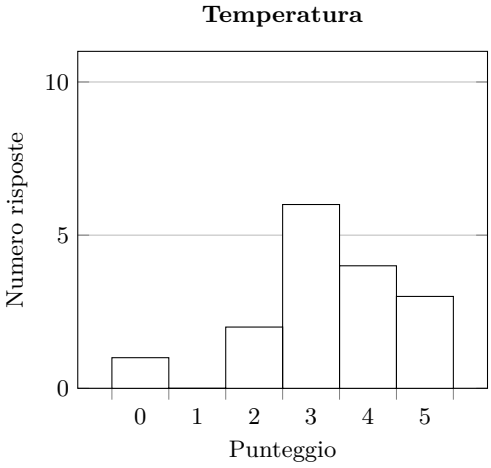
Data e ora	Neve fresca	Temperatura	Vento	Veg.^{ne}, bosco	Lim. neve	Irr.^{to} solare	Stab. m. nevoso	Precipitazioni	Altro
22/12/2016 18.09.14	2	3	5	2	2	5	5	2	
23/12/2016 10.39.32	4	4	5	2	1	5	5	4	
23/12/2016 11.24.04	3	5	4	3	3	4	4	3	*
23/12/2016 12.44.35	4	4	5	1	2	3	4	3	†
27/12/2016 9.51.04	3	4	4	2	2	2	5	3	
27/12/2016 9.51.09	2	5	4	2	2	5	4	2	
27/12/2016 10.34.10	2	3	3	1	1	4	4	2	
27/12/2016 11.24.48	1	3	2	1	0	1	4	1	
28/12/2016 8.59.57	1	0	5	5	1	0	5	0	
29/12/2016 16.10.06	4	3	5	4	3	5	5	4	
30/12/2016 10.19.15	2	5	5	2	2	5	5	2	
30/12/2016 10.20.33	2	2	5	2	3	1	4	3	
02/01/2017 10.47.56	3	2	5	2	1	3	3	2	
10/01/2017 9.12.04	5	3	4	3	2	5	5	4	
23/01/2017 16.21.05	4	3	4	3	2	1	4	3	
25/01/2017 15.27.22	1	4	4	4	1	2	4	1	‡

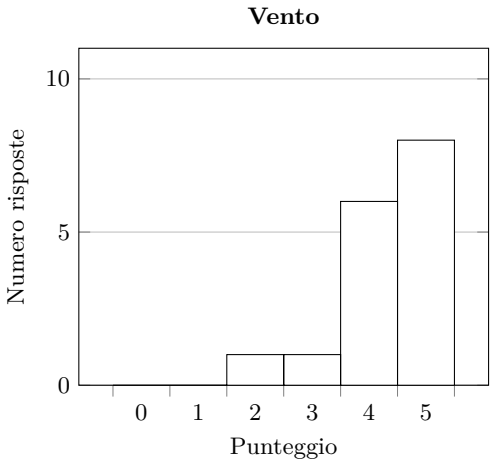
* Tipo di storia del manto nevoso. Struttura del manto nevoso.

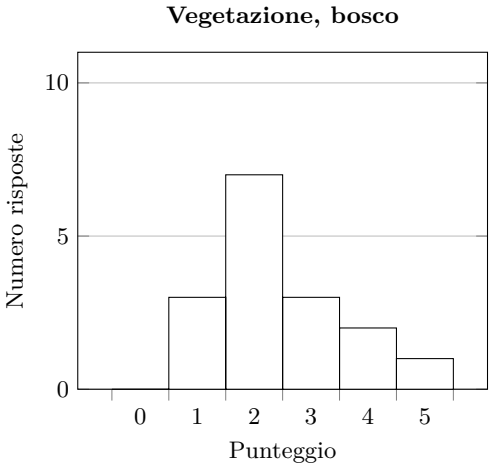
† Direzione di provenienza della perturbazione.

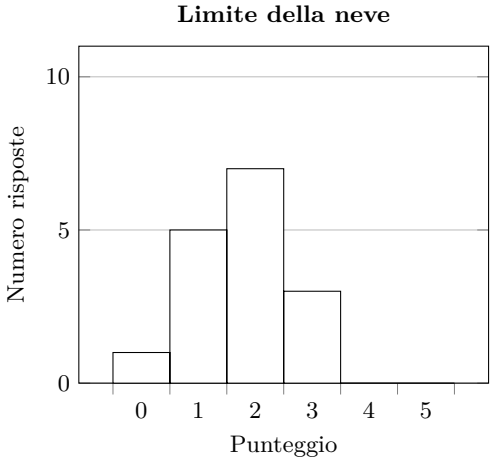
‡ Con l'esposizione prevista il tipo di evoluzione strutturale del manto dovrebbe essere decisivo.

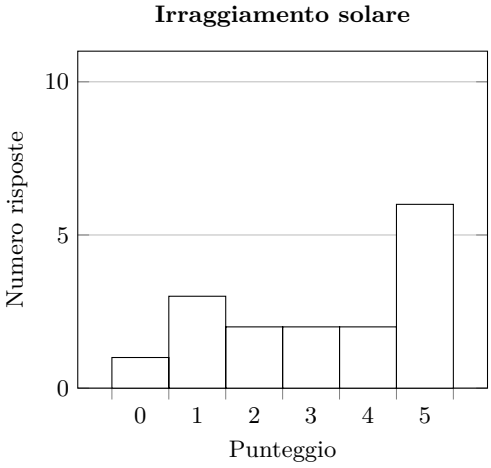

Neve fresca
Numero risposte
10
5
0
0 1 2 3 4 5
Punteggio

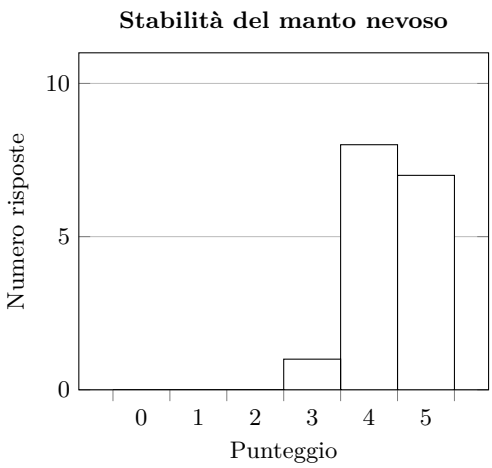

Temperatura
Numero risposte
10
5
0
0 1 2 3 4 5
Punteggio

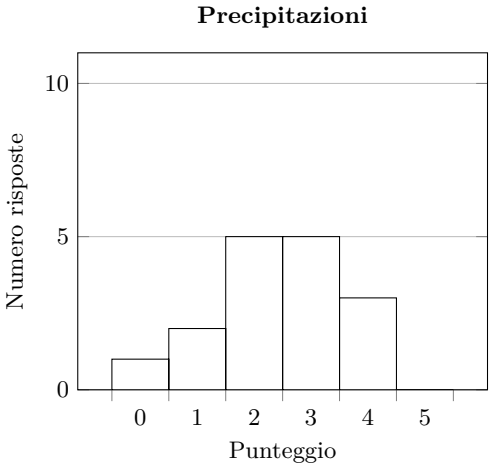

Vento
Numero risposte
10
5
0
0 1 2 3 4 5
Punteggio


Vegetazione, bosco
Numero risposte
10
5
0
0 1 2 3 4 5
Punteggio


Limite della neve
Numero risposte
10
5
0
0 1 2 3 4 5
Punteggio


Irraggiamento solare
Numero risposte
10
5
0
0 1 2 3 4 5
Punteggio





C.2.3 Acclività

Tabella C.3: Risultati sui fattori per definire gli angoli di inclinazione critici

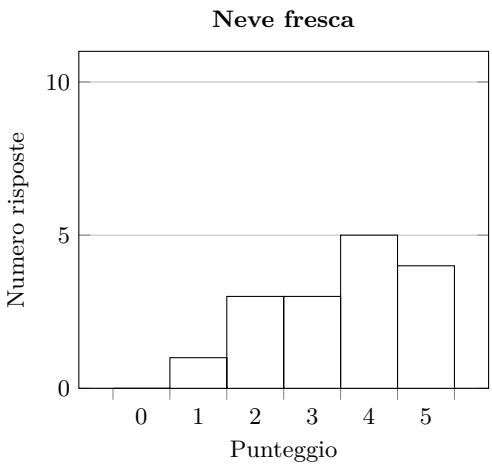
Data e ora	Neve fresca	Temperatura	Vento	Veg.ne, bosco	Lim. neve	Irr.to solare	Stab. m. nevoso	Precipitazioni	Altro
22/12/2016 18.09.14	3	5	3	2	2	2	5	3	
23/12/2016 10.39.32	4	5	5	5	3	3	5	5	
23/12/2016 11.24.04	1	3	1	1	1	1	2	1	*
23/12/2016 12.44.35	3	3	3	1	1	3	5	3	†
27/12/2016 9.51.04	2	3	4	2	3	3	4	4	
27/12/2016 9.51.09	3	2	3	2	2	2	5	2	
27/12/2016 10.34.10	4	3	3	2	2	2	5	2	
27/12/2016 11.24.48	2	1	2	0	0	1	5	2	
28/12/2016 8.59.57	5	4	4	2	0	4	5	5	
29/12/2016 16.10.06	5	4	4	5	4	5	5	5	
30/12/2016 10.19.15	4	4	3	1	3	3	5	4	‡
30/12/2016 10.20.33	5	4	4	3	3	3	5	5	
02/01/2017 10.47.56	2	2	3	1	1	3	4	2	
10/01/2017 9.12.04	5	2	4	3	1	2	5	5	
23/01/2017 16.21.05	4	3	3	4	3	3	4	4	
25/01/2017 15.27.22	4	3	2	3	3	2	4	3	§

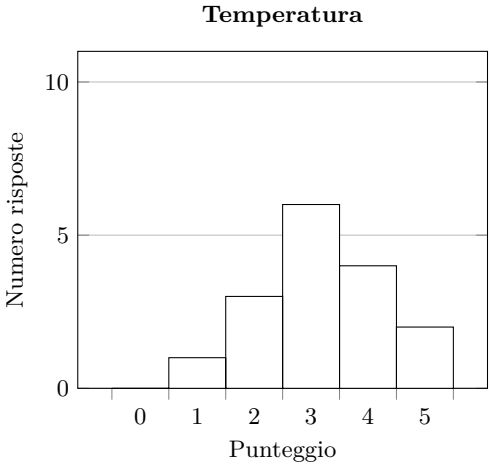
* L'inclinazione critica è relativa alla struttura del mento nevoso. Localizzati — da NW a NE, oltre i 2000 — è una localizzazione nella localizzazione localizzata in forma generica. Tuttavia il previsore vuole descrive un concetto tipico della morologia complessa del suo territorio (caso dolomitico e non della Norvegia). Pochi pendi sfigati in sintesi.

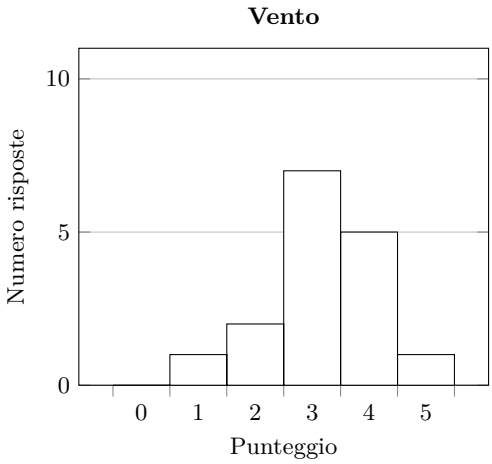
† Conformazione e sviluppo altitudinale del vallone che condizionano gli altri fattori e la loro commistione.

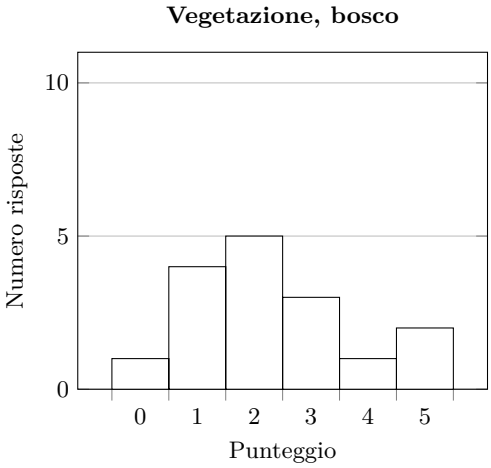
‡ In tutte tre le situazioni i fattori singolarmente hanno sempre una importanza relativa e viene fatta una valutazione complessiva che interseca i possibili scenari tra di loro.

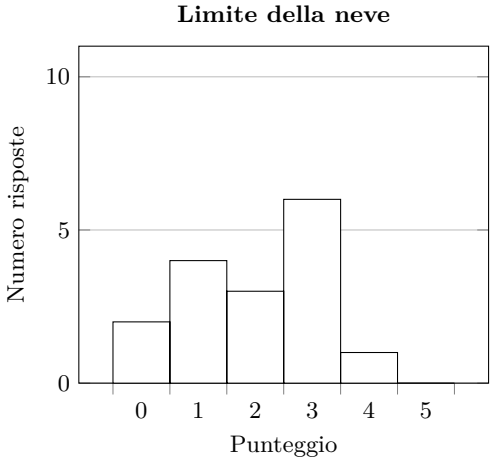
§ Resta il problema del peso relativo di quei fattori.

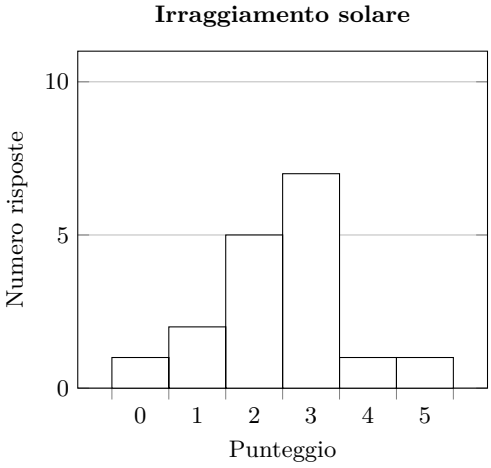

Neve fresca
Numero risposte
0
5
10
0 1 2 3 4 5
Punteggio

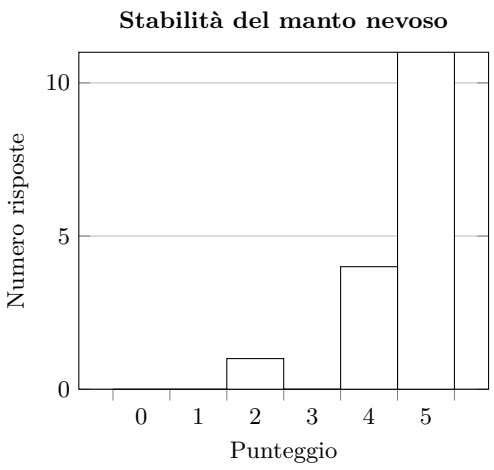

Temperatura
Numero risposte
0
5
10
0 1 2 3 4 5
Punteggio

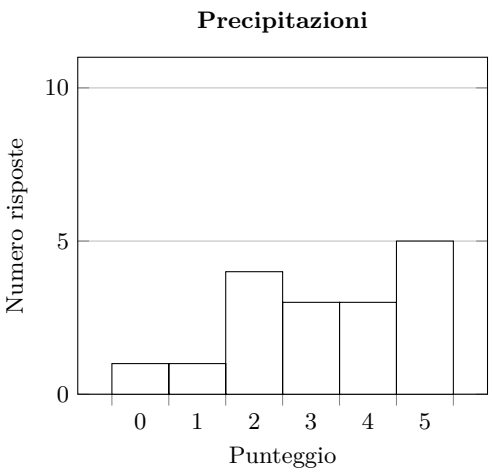

Vento
Numero risposte
0
5
10
0 1 2 3 4 5
Punteggio


Vegetazione, bosco
Numero risposte
0
5
10
0 1 2 3 4 5
Punteggio


Limite della neve
Numero risposte
0
5
10
0 1 2 3 4 5
Punteggio


Irraggiamento solare
Numero risposte
0
5
10
0 1 2 3 4 5
Punteggio


Stabilità del manto nevoso
Numero risposte
10
5
0
0
1
2
3
4
5
Punteggio


Precipitazioni
Numero risposte
10
5
0
0
1
2
3
4
5
Punteggio

Appendice D

Bollettini valanghe

Questa appendice riporta i bollettini valanghe citati ed impiegati nel lavoro.

Il primo bollettino riguarda la valanga di Rigopiano (p. 54) ed è stato emesso dal servizio meteomont (http://www.meteomont.gov.it).

Il secondo bollettino riguarda la valanga del Medon (Sella Nevea, p. 58) ed è stato emesso dall'ufficio valanghe della Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia (http://www.regione.fvg.it/valanghe.htm).

MINISTERO DELLE POLITICHE AGRICOLE ALIMENTARI E FORESTALI

REPVBBLICA ITALIANA

meteomont SERVIZIO NAZIONALE PREVISIONE NEVE E VALANGHE

SETTORE GRANDI MASSICCI APPENNINICI E APPENNINO ABRUZZESE

*BOLLETTINO VALANGHE - EMESSO ALLE ORE 14:00 del **18/01/2017***

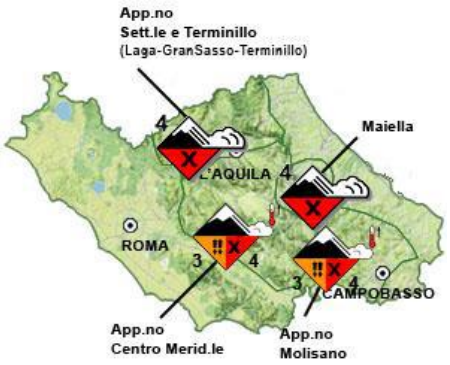
a cura del **COMANDO UNITA' TUTELA FORESTALE AMBIENTALE E AGROALIMENTARE**

in collaborazione con **il Comando Truppe Alpine e il Servizio Meteo dell'Aeronautica Militare**

SITUAZIONE alle 14.00 del 18/01/2017

DISTRIBUZIONE PERICOLO: DA MARCATO 3 A FORTE 4.

TIPO DI PERICOLO: NEVE VENTATA VENTO CON NEVE FRESCA FREDDA, ASCIUTTA E A DEBOLE COESIONE. NEVE VENTATA



SOTTOSETTORE	PROBLEMA	ESPOSIZIONI PIU' CRITICHE	QUOTE PIU' CRITICHE	QUOTA NEVE m.		ALTEZZA NEVE		
				NORD	SUD	NEVE cm.	NEVE FRESCA cm.	QUOTA
LAGA GRANSASSO TERMINILLO		ALL		300	500	089	040	0800
APP.NO CENTRO MERIDIONALE		ALL		900	1200	068	013	1520
MAIELLA		ALL		200	300	100	020	0400
APP.NO MOLISANO		ALL		500	600	103	014	1429

MANTO NEVOSO - Strati di neve fresca asciutta a debole coesione su strati debolmente consolidati. Il manto nevoso è debolmente consolidato e per lo più instabile su tutti i pendii ripidi.

PREVISIONI

	19/01/2017				20/01/2017				21/01/2017			
SOTTOSETTORE	GRADO DI PERICOLO	PROBLEMA	ESPOSIZIONI PIU' CRITICHE	QUOTE PIU' CRITICHE	GRADO DI PERICOLO	PROBLEMA	ESPOSIZIONI PIU' CRITICHE	QUOTE PIU' CRITICHE	GRADO DI PERICOLO	PROBLEMA	ESPOSIZIONI PIU' CRITICHE	QUOTE PIU' CRITICHE
LAGA GRANSASSO TERMINILLO	4		ALL		4		ALL		4		ALL	
APP.NO CENTRO MERIDIONALE	4		ALL		4		ALL		4		ALL	
MAIELLA	4		ALL		4		ALL		4		ALL	
APP.NO MOLISANO	4		ALL		4		ALL		4		ALL	

SCALA EUROPEA DEL GRADO DI PERICOLO VALANGHE

EUROPEAN AVALANCHE WARNING SERVICE

5 - Molto Forte | 4 - Forte | 3 - Marcato | 2 - Moderato | 1 - Debole | No neve | No Info

LEGENDA PROBLEMA

Neve fresca | Neve ventata | Neve vecchia | Neve bagnata | Slittamento | No info

AVVERTENZE

In considerazioni delle avverse condizioni meteorologiche e dei rilevanti cumuli di neve fresca, sono assolutamente da evitare le attività escursionistiche al di fuori delle piste battute e segnalate.

Il bollettino e' realizzato su scala sinottica-regionale (standard EAWS), la sua consultazione non puo' escludere in alcun modo la necessita' di una seria e capace valutazione locale del pericolo (singolo pendio) che puo' essere anche sensibilmente diverso.

REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA
Servizio foreste e Corpo forestale

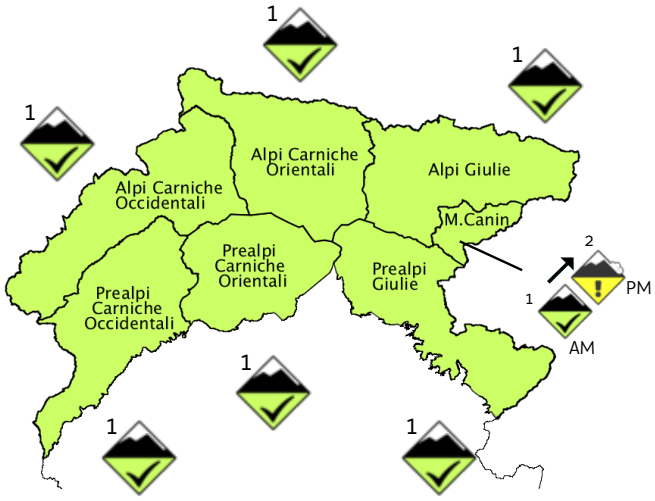
FRIULI VENEZIA GIULIA CORPO FORESTALE

BOLLETTINO VALANGHE
n.22 del 03 febbraio 2017

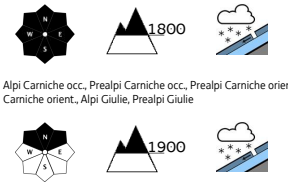
Situazione del 03 febbraio 2017 edizione delle ore 14-prossimo aggiornamento 06-02-2017 ore 14, previsore: GA

attendibilità: 80%

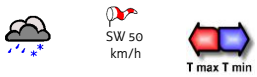
Sulle Alpi Giulie possibili piccoli distacchi provocati a N, sopra i 1900 m.



M. Canin



Alpi Carniche occ., Prealpi Carniche occ., Prealpi Carniche orient., Alpi Carniche orient., Alpi Giulie, Prealpi Giulie



Zero Termico: 1800 m
T.media 1000: 4 °C
T.media 2000: -1 °C

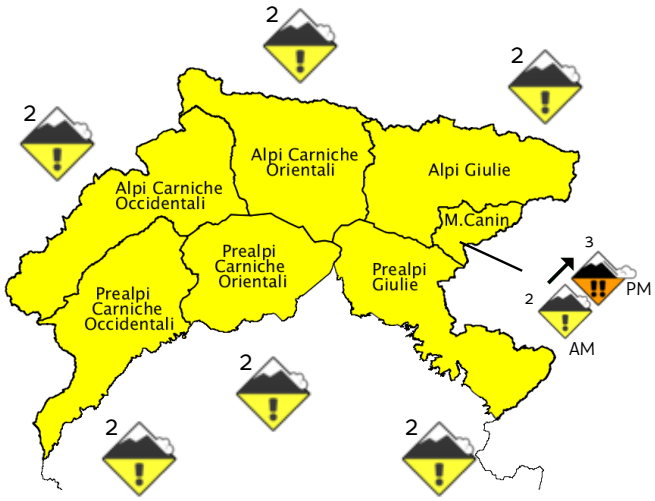
Meteo da OSMER - ARPA FVG:
Precipitazioni diffuse, moderate a occidente da abbondanti ad intense a est. Neve oltre i 1400 m. circa.

Stazione	quota (m)	altezza neve (cm)	neve fresca (cm)	Tmin (°C)	Tmax (°C)
SELLA NEVEA - LIVINAL	1837	61	1	-0,2	0,8
PIANCAVALLO	1280	0	0	3	4,4
RIFUGIO TAMAI -	1750	10	0	-0,6	0,8
TARVISIO	800	3	0	1,7	9,1
VARMOST M.TE SIMONE	1870	15	0	-0,7	4,9

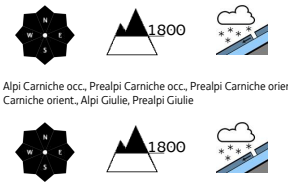
Stato del manto nevoso e pericolo valanghe: Le precipitazioni previste non si sono concretizzate. Le temperature sono aumentate ed il cielo è rimasto coperto. Dalla tarda mattinata di oggi si registrano sporadiche nevicate oltre i 1500 m circa che dovrebbero intensificarsi in giornata (apporti 20-30 cm) con quantitativi superiori sul Canin. Al momento il pericolo di valanghe risulta debole su tutto il territorio. Sulle Alpi Giulie, a nord sopra i 1900 m, sotto il sottile strato di neve recente sono presenti isolati piccoli accumuli di neve ventata. I rari accumuli presenti possono originare piccoli distacchi provocati in genere tali da non costituire pericolo di seppellimento. Dal pomeriggio sui pendii molto ripidi saranno possibili isolati scaricamenti. Grado di pericolo previsto: 1 (debole) su tutto il territorio in aumento a 2 (moderato) dalla sera nell'area del Canin.

Previsione per sabato 04 febbraio 2017, attendibilità: 70%

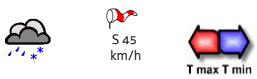
Nuove nevicate anche abbondanti. Pericolo valanghe in aumento.



M. Canin



Alpi Carniche occ., Prealpi Carniche occ., Prealpi Carniche orient., Alpi Carniche orient., Alpi Giulie, Prealpi Giulie



Zero Termico: 1400 m
T.media 1000: 2 °C
T.media 2000: -3 °C

Meteo da OSMER - ARPA FVG:
Al mattino precipitazioni residue. Dal pomeriggio nuove precipitazioni, Quota neve 700 m.

Stato del manto nevoso e pericolo valanghe: Cielo coperto con nevicate abbondanti sopra i 700-900 m. Attesi 20-30 cm di nuova neve sopra i 1500 m, fino a 40 cm sul Canin. Il pericolo valanghe risulterà in aumento nel corso della giornata. In particolare nell'area del Canin, dove le precipitazioni potrebbero risultare intense, saranno possibili valanghe spontanee, localmente anche di medie dimensioni, lungo i percorsi abituali in forte pendenza. Il distacco provocato, nelle zone di accumulo sopra i 1800 m , in particolare a N, potrà avvenire anche con debole sovraccarico. Sul resto del territorio montano, saranno possibili scaricamenti e piccole valanghe spontanee lungo i percorsi abituali in forte pendenza. Sopra i 1800 m, in siti localizzati, principalmente a N sarà possibile il distacco di piccoli lastroni soffici, localmente anche con debole sovraccarico. Grado di pericolo previsto: 2 (moderato) in aumento a 3 (marcato) sul Canin; 2 (moderato) sul resto del territorio.

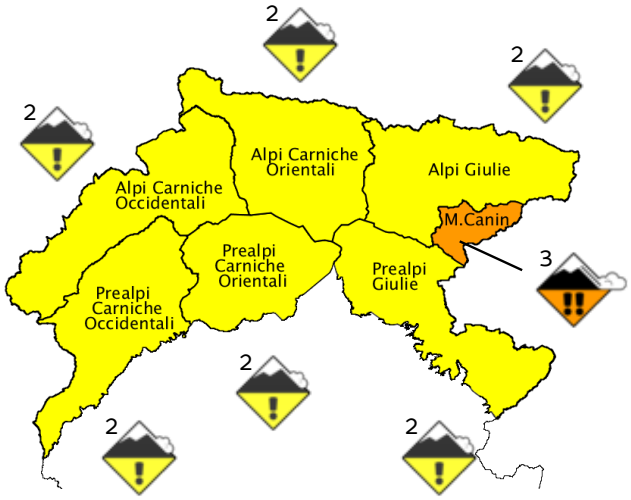
5 Molto forte | 4 Forte | 3 Marcato | 2 Moderato | 1 Debole | No snow | ↑ ↓ aumento/diminuzione pericolo in giornata

REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA
Servizio foreste e Corpo forestale

BOLLETTINO VALANGHE
n.22 del 03 febbraio 2017

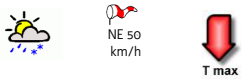
Previsione per domenica 05 febbraio 2017, attendibilità: 70%

Ancora nuova neve. Possibili sia valanghe spontanee che provocate, anche con debole sovraccarico.



M. Canin

Alpi Carniche occ., Prealpi Carniche occ., Prealpi Carniche orient., Alpi Carniche orient., Alpi Giulie, Prealpi Giulie



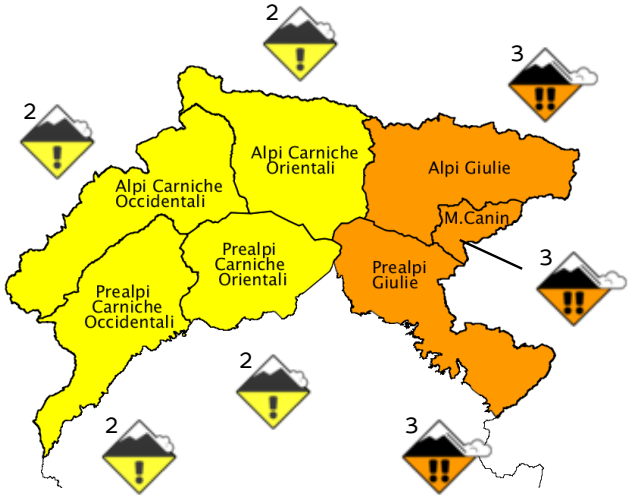
Zero Termico: 1200 m
T.media 1000: 1 °C
T.media 2000: -3 °C

Meteo da OSMER - ARPA FVG:
In giornata variabilità. Dal tardo pomeriggio sera nuove precipitazioni, nevose oltre i 700 m circa.

Stato del manto nevoso e pericolo valanghe: Nuove nevicate dal pomeriggio-sera sopra i 700-900 m. Apporti previsti 5-15 cm. I venti da S in giornata gireranno da NE e intensificheranno. Nell'area del Canin, sopra i 1800 m, in tutte le esposizioni ma soprattutto a Nord, sarà possibile il distacco provocato di lastroni soffici localmente anche con debole sovraccarico. Il distacco spontaneo di valanghe lungo i percorsi abituali in forte pendenza potrà risultare anche di medie dimensioni. Sul resto del territorio montano, la minore quantità di neve presente renderà possibili scaricamenti e piccole valanghe spontanee lungo i percorsi abituali in forte pendenza. Inoltre in siti localizzati, sopra i 1800 m ed in particolare sulle esposizioni N, nelle zone caratterizzate da accumuli da vento, sarà possibile il distacco di piccoli lastroni soffici, localmente anche con debole sovraccarico. Grado di pericolo previsto: 3 (marcato) sul Canin; 2 (moderato) sul resto del territorio.

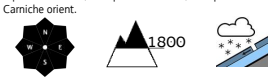
Previsione per lunedì 06 febbraio 2017, attendibilità: 70%

Ancora nuova neve. Possibili sia valanghe spontanee che provocate, anche con debole sovraccarico.



Alpi Giulie, M. Canin, Prealpi Giulie

Alpi Carniche occ., Prealpi Carniche occ., Prealpi Carniche orient., Alpi Carniche orient.



Zero Termico: 1400 m
T.media 1000: 2 °C
T.media 2000: -2 °C

Meteo da OSMER - ARPA FVG:
Precipitazioni diffuse, in genere abbondanti. Quota neve 700-900 m. Dal tardo pomeriggio miglioramento.

Stato del manto nevoso e pericolo valanghe: Cielo coperto con nevicate fino in tarda mattinata (10-30 cm) sopra i 700-900 m e venti sostenuti da NE. I venti previsti e le nuove precipitazioni formeranno nuovi accumuli in tutte le esposizioni in particolare sulle zone orientali della regione. Sulle Alpi e Prealpi Giulie, sopra i 1800 m in tutte le esposizioni, sarà possibile il distacco provocato di lastroni soffici localmente anche con debole sovraccarico. Il distacco spontaneo di valanghe lungo i percorsi abituali in forte pendenza potrà risultare anche di medie dimensioni. Sul resto del territorio montano saranno possibili scaricamenti e piccole valanghe spontanee lungo i percorsi abituali in forte pendenza. Inoltre, in siti localizzati sopra i 1800 m, nelle zone caratterizzate da accumuli da vento, sarà possibile il distacco di piccoli lastroni soffici, localmente anche con debole sovraccarico. Grado di pericolo previsto: 3 (marcato) sulle Alpi e Prealpi Giulie, 2 (moderato) sul resto del territorio.

5 Molto forte | 4 Forte | 3 Marcato | 2 Moderato | 1 Debole | No snow | ↑ ↓ aumento/diminuzione pericolo in giornata

Bibliografia

Opere citate

AINEVA [2011], *I bollettini valanghe AINEVA. Guida all'interpretazione.* AINEVA, p. 20, http://aineva.it/download/guida_bollettino_2012.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato alle p. 8, 10, 84, 90, 91.)

Bartelt, P. e M. Lehning [2002], «A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part I: numerical model», *Cold Regions Science and Technology*, 35, 3, p. 123-145, issn: 0165-232X, doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0165-232X(02)00074-5, [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 86.)

Betetto, C. [2015], *Studio esplorativo sulla probabilità di distacco valanghivo provocato in relazione alla nevosità dell'annata*, Corso di laurea in Scienze per l'Ambiente e la Natura, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Udine, p. 77. (Citato a p. 76.)

Bircham, J.S. [1995], *Avalanche Hazard Forecasting at Mount Hutt*, A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the Degree of Master of Science in Geography, University of Canterbury, New Zealand, p. 137, https://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/2776 [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 79.)

Blahut, J., J. Klimeš, J. Balek, P. Hájek, L. Červená e J. Lysák [2017], «Snow avalanche hazard of the Krkonoše National Park, Czech Republic», *Journal of Maps*, 13, 2, p. 86-90, doi: 10.1080/17445647.2016.1262794. (Citato alle p. 12, 13.)

Bolognesi, R., M. Denuelle e L. Dexter [1996], «Avalanche Forecasting With GIS», in *Proceedings of the 1996 International Snow Science Workshop*, Banff, Alberta, Canada, p. 11-13, http://arc.lib.montana.edu/snow-science/objects/issw-1996-011-013.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 12.)

Boltižiar, M., M. Biskupič e I. Barka [2016], «Spatial avalanche modelling by application of GIS on the selected slopes of Western Tatra Mts. and Belianske Tatra Mts., Slovakia», *Geographia Polonica*, 89, 1, p. 79-90, doi: http://dx.doi.org/10.7163/GPol.0047, [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 13.)

Brabec, B., R. Meister, U. Stöckli, A. Stoffel e T. Stucki [2001], «RAIFoS: Regional Avalanche Information and Forecasting System», *Cold Regions Science and Technology*, 33, 2–3, International Snow Science Workshop 2000, p. 303-311, issn: 0165-232X, doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0165-232X(01)00058-1, [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 12.)

Brenning, A. [2008], «Statistical Geocomputing combining R and SAGA: The Example of Landslide susceptibility Analysis with generalized additive Models»,

in *SAGA – Seconds Out*, a cura di J. Böhner, T. Blaschke e L. Montanarella, Hamburger Beiträge zur Physischen Geographie und Landschaftsökologie, Hamburger Beiträge zur Physischen Geographie und Landschaftsökologie, vol. 19, p. 23-32, http://spatial-analyst.net/book/node/69 [visitato il 03/03/2017]. (Citato alle p. 19, 24.)

Bühler, Y., S. Kumar, J. Veitinger, M. Christen, A. Stoffel e Snehmani [2013], «Automated identification of potential snow avalanche release areas based on digital elevation models», *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 5, p. 1321-1335, doi: 10.5194/nhess-13-1321-2013, [visitato il 01/03/2017]. (Citato alle p. 13, 82.)

Cagnati, A. [2016], «Valanghe da slittamento, studi e prevenzione», *Ecoscienza*, 2 (mag. 2016), p. 50-51, issn: 2039-0432, http://www.arpae.it/cms3/documenti/_cerca_doc/ecoscienza/ecoscienza2016_2/cagnati_es16_2.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 74.)

Cagnati, A., M. Valt, G. Soratroi, J. Gavaldà e C. G. Sellés [1998], «A field method for avalanche danger-level verification», *Annals of Glaciology*, 26, p. 343-346, http://www.igsoc.org:8080/annals/26/igs_annals_vol26_year1998_pg343-346.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 88.)

Cazorzi, F., G. Dalla Fontana e L. Carturan [2014], *EISModel — Energy Index Snow-and-ice Model — Reference guide*, Università degli Studi di Udine, Udine, p. 50. (Citato a p. 76.)

Cía, J. C., A. J. Andrés e A. M. Magallón [2014], «A proposal for avalanche susceptibility mapping in the Pyrenees using GIS: the Formigal-Peyreget area (Sheet 145-I; scale 1:25.000)», *Journal of Maps*, 10, 2, p. 203-210, doi: 10.1080/17445647.2013.870501. (Citato alle p. 12, 13.)

Ciolli, M., S. Tabarelli e P. Zatelli [1998], «3D Spatial Data Integration for Avalanche Risk Management», in *ISPRS Commission IV Symposium on GIS - Between Visions and Application*, a cura di D. Fritsch, M. Englich e M. Sester, p. 121-127, http://www.isprs.org/proceedings/XXXII/part4/ciolli156neu.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 41.)

Cookler, L. e B. Orton [2004], «Developing a GIS avalanche forecasting model using real-time weather telemetry information for the south side of Mt. Hood», in *Proceedings of the 2004 International Snow Science Workshop*, Jackson Hole, Wyoming, USA, p. 145-152, http://arc.lib.montana.edu/snow-science/item/1067 [visitato il 01/03/2017]. (Citato alle p. 12, 13, 79.)

De Quervain, M. e R. Meister [1987], «50 years of snow profiles on the Weissfluhjoch and relations to the surrounding avalanche activity (1936/37-1985/86)», in *Avalanche Formation, Movement and Effec*, Symposium at Davos 1986, p. 196-214, http://hydrologie.org/redbooks/a162/iahs_162_0195.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 88.)

Della Mea, L. [2011], *Influenza dell'esposizione sui processi metamorfici della neve: confronto dell'evoluzione del manto nevoso stagionale al suolo in due diversi siti del M. Lussari (Alpi Giulie occidentali)*, Corso di Laurea Magistrale in Scienze e Tecnologie per l'Ambiente e il Territorio, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Udine, p. 194. (Citato a p. 86.)

Devoto, G. e G.C. Oli [1987], *Nuovo Vocabolario Illustrato Della Lingua Italiana*, a cura di G.C. Oli e L. Magini, Le Monnier & Selezione dal Reader's Digest, Firenze, Milano, isbn: 88-7045-081-3. (Citato a p. 2.)

EAWS [2003], *12º incontro di lavoro del Gruppo di lavoro internazionale dei Servizi previsione valanghe europei*, Verbale dei risultati, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Monaco di Baviera, http://www.aineva.it/previsori/Verbali%20Gruppo%20Internazionale/EAWS2003.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato alle p. 9, 10, 84, 86.)

EAWS [2010], *Results — Meeting of the Working Group of the European Avalanche Warning Services*, ed. by P. Nairz, Innsbruck, http://www.avalanches.org/eaws/en/docs/EAWS_WG_Results.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato alle p. 10, 90.)

EAWS [2011], *Risultati del 16º Meeting dei Servizi Valanghe europei (EAWS)*, Grenoble, http://www.aineva.it/previsori/Verbali%20Gruppo%20Internazionale/16th%20MeetingEAWS/EAWS2011.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato alle p. 85, 86.)

Föhn, P. M. B. [1987], «The stability index and various triggering mechanisms», in *Avalanche Formation, Movement and Effec*, Symposium at Davos 1986, p. 161-181, http://hydrologie.org/redbooks/a162/iahs_162_0161.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 7.)

Forthofer, J.M., B.W. Butler e N.S. Wagenbrenner [2014], «A comparison of three approaches for simulating fine-scale surface winds in support of wildland fire management. Part I. Model formulation and comparison against measurements», *Int. J. Wildland Fire*, 23, p. 969-981, doi: http://dx.doi.org/10.1071/WF12089, [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 65.)

Frigo, B., M.C. Prola e M. Faletto [2012], *Valutazione della stabilità del manto nevoso: linee guida per la raccolta e l'interpretazione dei dati*, Regione Autonoma Valle d'Aosta, p. 113, http://piattaformaclv.regione.vda.it/downloads/docs/manuale4_1007.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato alle p. 86, 88, 90.)

Gamberini, L., L. Chittaro e F. Peternò [2012], *Human-Computer Interaction. I fondamenti dell'interazione tra persone e tecnologie*, Pearson, Milano – Torino, isbn: 978-88-7192-782-4. (Citato alle p. 15, 64.)

Gaume, J, R. Reuter, A. van Herwijnen e J. Schweizer [2016], «A new crack propagation criterion for skier-triggered snow slab avalanches», in *Proceedings of the 2016 International Snow Science Workshop*, Breckenridge, Colorado, USA, p. 484-491, http://www.slf.ch/ueber/mitarbeiter/homepages/schweizj/publications/Gaume_etal_Crack_propagation_skier_triggering_ISSW2016.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato alle p. 5, 7.)

Ghinoi, A. e C.-J. Chung [2005], «starter: a statistical GIS-based model for the prediction of snow avalanche susceptibility using terrain features—application to Alta Val Badia, Italian Dolomites», *Geomorphology*, 66 (mar. 2005), p. 305-325, doi: 10.1016/j.geomorph.2004.09.018, [visitato il 01/03/2017]. (Citato alle p. 13, 18.)

Grohmann, C.H., M.J. Smith e C. Riccomini [2010], «Multiscale Analysis of Topographic Surface Roughness in the Midland Valley, Scotland», *Geoscience and Remoter Sensing*, PP, 99, p. 1-14, doi: 10.1109/TGRS.2010.2053546. (Citato a p. 21.)

Gruber, G., A. Hecke e A. Wieser [2009], «Implementierung eines Modells zur GIS-gestützten Evaluierung der aktuellen Lawinengefahr», in *AGIT-Symposium 2009*, Salzburg, p. 712-721, http://www.agit.at/php_files/myagit/papers/2009/7510.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato alle p. 12, 82.)

Gruber, S. [2007], «A mass-conserving fast algorithm to parametrize gravitational transport and deposition using digital elevation models», *Water Resour. Res.*, 43, p. 8, doi: 10.1029/2006WR004868. (Citato alle p. 69, 72.)

Gruber, S., C. Huggel e R. Pike [2009], «Modelling Mass Movements and Landslide Susceptibility», in *Geomorphometry Concepts, Software, Applications*, a cura di T. Hengl e H.I. Reuter, Developments in Soil Science, Elsevier B.V., vol. 33, cap. 23, p. 527-534, doi: 10.1016/S0166-2481(08)00023-8, http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166248108000238 [visitato il 01/03/2017]. (Citato alle p. 69, 72.)

Harvey, S. [2002], «Avalanche incidents in Switzerland in relation to the predicted danger degree», in *Proceedings of the 2002 International Snow Science Workshop*, a cura di J.R. Stevens, Penticton, BC, Canada, p. 443-448, http://www.slf.ch/praevention/lawinenunfaelle/Publikationen/Harvey_2002.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 35.)

— [2015], «Unschärfen im Risikomanagement auf Skitouren und beim Variantenskifahren», in *Tagungsband zum Internationalen Seminar*, a cura di H.U Rhyner e J. Schweizer, WSL Berichte, Davos (CH), vol. 34, p. 33-38, http://www.wsl.ch/dienstleistungen/publikationen/pdf/15187.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 35.)

Hemetsberger, M., G. Klinger e S. Niederer [2002], «Risk assessment of avalanches. A fuzzy GIS application», in *Computational Intelligent Systems for Applied Research: Proceedings of the 5th International FLINS Conference.* A cura di D. Ruan, P. D'Hondt e E. Kerre, World scientific, p. 395-402, isbn: 981-238-066-3, http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.132.4329&rep=rep1&type=pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 18.)

Hendrikx, J., I. Owens, W. Carran e A. Carran [2004], «Overview of the Spatial Distribution of Avalanche Activity in Relation to Meteorological and Topographic Variables in an Extreme Maritime Environment», in *Proceedings of the 2004 International Snow Science Workshop*, Jackson Hole, Wyoming, USA, p. 299-307, http://arc.lib.montana.edu/snow-science/item/1094 [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 12.)

Jaedicke, C., K. Kronholm, K. Kristensen e S. Bakkehoi [2008], «GIS Aided Avalanche Warning in Norway», in *Proceedings of the 2008 International Snow Science Workshop*, Whistler, British Columbia, Canada, p. 654-659, http://arc.lib.montana.edu/snow-science/item/107 [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 12.)

Jamieson, J.B. e C.D. Johnston [1992], «Experience with Rutschblocks», *The Avalanche Review*, 11, 2 (dic. 1992), http://www.avalanche.org/moonstone/TAR/avi%20review%20articles/Experience%20with%20Rutschblocks.htm [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 88.)

Kilburn, C. R.J. e D. N. Petley [2003], «Forecasting giant, catastrophic slope collapse: lessons from Vajont, Northern Italy», *Geomorphology*, 54, Studies on

Large Volume Landslides, p. 21-32, ISSN: 0169-555X, DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00052-7, [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 6.)

LaChapelle, E. R. [1980], «The Fundamental processes in Conventional Avalanche Forecasting», *Journal of Glaciology*, 26, 94, p. 75-84, https://www.igsoc.org/journal/26/94/igs_journal_vol26_issue094_pg75-84.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 84.)

Lehning, M., P. Bartelt, B. Brown e C. Fierz [2002], «A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part III: meteorological forcing, thin layer formation and evaluation», *Cold Regions Science and Technology*, 35, 3, p. 169-184, ISSN: 0165-232X, DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0165-232X(02)00072-1, [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 86.)

Lehning, M., P. Bartelt, B. Brown, C. Fierz e P. Satyawali [2002], «A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part II. Snow microstructure», *Cold Regions Science and Technology*, 35, 3, p. 147-167, ISSN: 0165-232X, DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0165-232X(02)00073-3, [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 86.)

Lehning, M., P. Bartelt, B. Brown, T. Russi, U. Stöckli e M. Zimmerli [1999], «SNOWPACK model calculations for avalanche warning based upon a new network of weather and snow stations», *Cold Regions Science and Technology*, 30, 1—3, p. 145-157, ISSN: 0165-232X, DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0165-232X(99)00022-1, [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 86.)

Leuthold, H., B. Allgöwer e R. Meister [1996], «Visualization and Analysis of the Swiss Avalanche Bulletin using GIS», in *Proceedings of the 1996 International Snow Science Workshop*, Banff, Alberta, Canada, p. 35-40, http://arc.lib.montana.edu/snow-science/item/1400 [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 12.)

Maggioni, M. [2004], *Avalanche release areas and their influence on uncertainty in avalanche hazard mapping*, Dissertation zur Erlangung der naturwissenschaftlichen Doktorwürde, Universität Zürich, p. 146, http://www.geo.uzh.ch/fileadmin/files/content/abteilungen/gis/research/phd_theses/thesis_MargheritaMaggioni_2005.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 82.)

Maggioni, M. e U. Gruber [2003], «The influence of topographic parameters on avalanche release dimension and frequency», *Cold Reg. Sci. Technol.*, 37, p. 407-419, DOI: 10.1016/S0165-232X(03)00080-6. (Citato alle p. 12, 13, 75.)

Maggioni, M., U. Gruber e A. Stoffel [2002], «Definition and characterisation of potential avalanche release area», in *EGS General Assembly Conference Abstracts*, a cura di A. Tzanis, Proceedings of the 2002 ESRI International User Conference, San Diego, California, USA, vol. 27, http://www.avalanchemapping.org/Repapers/Definition%20and%20characterisation%20of%20potential%20avalanche%20release%20areas.doc [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 24.)

McClung, D.M. [2001], «Characteristics of terrain, snow supply and forest cover for avalanche initiation caused by logging», *Annals of Glaciology*, 32, p. 223-229, DOI: 10.3189/172756401781819391. (Citato a p. 82.)

McClung, D.M. e P. Schaerer [1980], «Snow Avalanche Size Classification», in *Proceedings of the 1980 International Snow Science Workshop*, Vancouver, BC,

Canada, p. 12-30, http://arc.lib.montana.edu/snow-science/item/1202 [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 84.)

McClung, D.M. e P. Schaerer [1996], *Manuale delle valanghe*, Titolo originale: *The Avalanche Handbook*. © 1993. Pubblicato da The Mountaineers Book, Seattle, Zanichelli, p. 248. (Citato alle p. 2, 3, 5-7, 73, 74, 76, 77, 79, 81-83.)

McCollister, C., K. Birkeland, K. Hansen, R. Aspinall e R. Comey [2003], «Exploring multi-scale spatial patterns in historical avalanche data, Jackson Hole Mountain Resort, Wyoming», *Cold Regions Science and Technology*, 37, 3, International Snow Science Workshop 2002, p. 299-313, issn: 0165-232X, doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0165-232X(03)00072-7, [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 12.)

Milanese, M. [2010], *Valutazione con metodi dendroconologici delle aree di massima espansione delle valanghe*, Corso di Laurea in Tecnologie Forestali ed Ambientali, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Padova, cap. 1.2. (Citato a p. 26.)

Mott, R., M. Schirmer, M. Bavay, T. Grünewald e M. Lehning [2010], «Understanding snow-transport processes shaping the mountain snow-cover», *The Cryosphere*, 4, 4, p. 545-559, doi: 10.5194/tc-4-545-2010. (Citato a p. 82.)

Müller, K., C. Mitterer, R. Engeset, R. Ekker e S.Ø. Kosberg [2016], «Combining The Conceptual Model Of Avalanche Hazard With The Bavarian Matrix», in *Proceedings of the 2016 International Snow Science Workshop*, Breckenridge, Colorado, USA, p. 472-479. (Citato a p. 86.)

Müller, K., T. Stuckl, C. Mitterer, P. Nairz, H. Konetschny, T. Feistl, C. Coleou, F Berbenni e I. Chiambretti [2016], «Towards An Improved European Auxiliary Matrix For Assessing Avalanche Danger Levels», in *Proceedings of the 2016 International Snow Science Workshop*, Breckenridge, Colorado, USA, p. 1229-1231. (Citato a p. 88.)

Munter, W. [2013], *3 × 3 Lawinen. Risikomanagement im Wintersport*, 5ª edizione, Tappeiner, p. 223, isbn: 978-3000105203. (Citato alle p. 10, 35.)

Oke, T.R. [1987], *Boundary layer climates*, Second edition, Routledge, isbn: 0-203-71545-4. (Citato a p. 76.)

Paronuzzi, P. e A. Bolla [2012], «The prehistoric Vajont rockslide: An updated geological model», *Geomorphology*, 169–170, p. 165-191, issn: 0169-555X, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.04.021, [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 6.)

Pegani, M. [1997], *Verifiche di stabilità del manto nevoso e pericolosità da valanga nel territorio di Arabba (BL)*, Tesi di Laurea in Geologia Applicata, Università degli Studi di Trieste. (Citato alle p. 2, 10, 77.)

Peitzsch, E.H., J. Hendrikx e D.B. Fagre [2014], «Assessing the Importance of Terrain Parameters on Glide Avalanche Release», in *Proceedings of the 2014 International Snow Science Workshop*, Banff, Alberta, Canada, http://arc.lib.montana.edu/snow-science/item/2137 [visitato il 01/03/2017]. (Citato alle p. 12, 13.)

Perla, R. [1977], «Slab avalanche measurements», *Canadian Geotechnical Journal*, 14, 2, p. 206-213, doi: 10.1139/t77-021. (Citato alle p. 3, 5, 6, 74.)

Pfeifer, C. [2009], «On probabilities of avalanches triggered by alpine skiers. An empirically driven decision strategy for backcountry skiers based on these

probabilities», *Natural Hazards*, 48, 3, p. 425-438, ISSN: 1573-0840, DOI: 10.1007/s11069-008-9270-2. (Citato a p. 35.)

PISTOCCHI, A. e C. NOTARNICOLA [2013], «Data-driven mapping of avalanche release areas: a case study in South Tyrol, Italy», *Natural Hazards*, 65, 3, p. 1313-1330, ISSN: 1573-0840, DOI: 10.1007/s11069-012-0410-3. (Citato alle p. 12, 13, 82.)

PLATTNER, C., L. BRAUN e A. BRENNING [2006], «The spatial variability of snow accumulation at Vernagtferner, Austrian Alps, in winter 2003/2004», *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 39, 2003-2004, p. 43-57, https://www.academia.edu/825084/Plattner_C._L._N._Braun_and_A._Brenning_2004_The_spatial_variability_of_snow_accumulation_on_Vernagtferner_Austrian_Alps_in_Winter_2003_2004._Zeitschrift_f%C3%BCr_Gletscherkunde_und_Glazialgeologie_39_43-57 [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 24.)

POZDNOUKHOV, A., G. MATASCI, M. KANEVSKI e R. S. PURVES [2011], «Spatio-temporal avalanche forecasting with Support Vector Machines», *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 2, p. 367-382, DOI: 10.5194/nhess-11-367-2011. (Citato a p. 12.)

SABATINI, F. e V. COLETTI (a cura di) [2003], *Dizionario della Lingua Italiana*, Rizzoli Larousse, Milano, ISBN: 88-525-0024-3. (Citato a p. 2.)

SAPPINGTON, J. M., K. M. LONGSHORE e D. B. THOMPSON [2007], «Quantifying Landscape Ruggedness for Animal Habitat Analysis: A Case Study Using Bighorn Sheep in the Mojave Desert», *The Journal of Wildlife Management*, 71, 5, p. 1419-1426, ISSN: 1937-2817, DOI: 10.2193/2005-723. (Citato alle p. 21, 22.)

SCHERNTHANNER, H. [2007], «Fuzzy Logic Method for Landslide Susceptibility Mapping, "Rio Blanco", Nicaragua», in *Proceedings of the 9th International Conference on GeoComputation*, National Centre for Geocomputation, National University of Ireland, Maynooth, Eire, http://www.geog.leeds.ac.uk/groups/geocomp/2007/7A-Evolutionary_Computing_and_Fuzzy_Modelling/7A3.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 18.)

SCHNEEBELI, M. e M. MEYER-GRASS [1993], «Avalanche starting zones below the timber line — Structure of forest», in *Proceedings of the 1992 International Snow Science Workshop*, Breckenridge, Colorado, USA, p. 176-181, http://arc.lib.montana.edu/snow-science/objects/issw-1992-176-181.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 81.)

SCHWEIZER, J., P. BARTELT e A. VAN HERWIJNEN [2015], «Snow Avalanches», in *Snow and Ice-Related Hazards*, Risks and Disasters, cap. 12, p. 395-436, DOI: 10.1016/B978-0-12-394849-6.00012-3. (Citato a p. 74.)

SCHWEIZER, J. e J.B. JAMIESON [2001], «Snow cover properties for skier triggering of avalanches», *Cold Reg. Sci. Technol.*, 33, p. 207-221, DOI: 10.1016/S0165-232X(01)00039-8. (Citato alle p. 5, 74.)

— [2004], «Snow stability measurements», in *Proceedings of the International Seminar of Snow and Avalanche Test Sites*, a cura di M. NAAIM e M. NAAIM-BOUVET, 22–23 novembre 2001, Grenoble, France, p. 317-331, http://www.slf.ch/info/mitarbeitende/schweizj/publications/Schweizer_Jamieson_SnowStabilityMeasurements_Cemagref_2004.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato alle p. 5, 83.)

Schweizer, J., J.B. Jamieson e M. Schneebeli [2003], «Snow avalanche formation», *Reviews of Geophysics*, 41, 4, 1016, doi: 10.1029/2002RG000123. (Citato alle p. 2, 3, 5-7, 73, 74, 81, 82.)

Selçuk, L. [2013], «An avalanche hazard model for Bitlis Province, Turkey, using GIS based multicriteria decision analysis», *Turkish J. Earth. Sci.*, 22, p. 523-535, doi: 10.3906/yer-1201-10. (Citato alle p. 13, 73, 75.)

Silvestri, P [1973], «Il servizio valanghe in Italia — formazione e sviluppi», *Novara*, 1, Rivista mensile della Camera di Commercio, Industria, Artigianato e Agricoltura di Novara, http://www.cai-svi.it/wp-content/uploads/2015/07/Servizio-valanghe.-Formazione-e-sviluppi.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 8.)

Simenhois, R. e K. Birkeland [2008], «The effect of changing slab thickness on fracture propagation», in *Proceedings of the 2008 International Snow Science Workshop*, Whistler, British Columbia, Canada, p. 755-760, http://www.slf.ch/schneeinfo/wochenbericht/2012-13/0104/Effect_of_changing_slab_thickness_simenhois_birkeland.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 82.)

SLF [2015], *Bollettini valanghe e altri prodotti dell'Istituto federale. Supporto interpretativo. Edizione 2015.* 16ª edizione, WSL Istituto per lo studio della neve e delle valanghe SLF, p. 51, http://www.slf.ch/schneeinfo/zusatzinfos/interpretationshilfe/interpretationshilfe_i.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato alle p. 8, 9, 11, 67, 84, 85, 90, 91.)

Statham, G., P. Haegli, K. W. Birkelang, E. Greene, C. Israelson, B. Tremper, C. Stethem, B. McMahon, B. White e J. Kelly [2010], «The North American Public Avalanche Danger Scale», in *Proceedings of the 2010 International Snow Science Workshop*, Squaw Valley, California, USA, p. 117-123, http://arc.lib.montana.edu/snow-science/item/353 [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 10.)

Stoffel, A., B. Brabec e U. Stöckli [2001], «GIS applications at the Swiss Federal Institute of Snow and Avalanche Research», in *21st* esri *International User Conference*, Redlands, California, USA. (Citato a p. 12.)

Stoffel, A., R. Meister e J. Schweizer [1998], «Spatial characteristics of avalanche activity in an Alpine valley – a GIS approach», *Ann. Glaciol.*, 26, a cura di International Glaciological Society, p. 329-336, http://www.slf.ch/ueber/mitarbeiter/homepages/schweizj/publications/Stoffel_etal_Spatial_characteristics_avalanche_activity_Zuoz_1998.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato alle p. 12, 77, 79, 88.)

Stoffel, L. e S. Margreth [2012], *Beurteilung von Sekundärlawinen bei künstlicher Lawinenauslösung. Anleitung für die Praxis*, Umwelt-Wissen, 1222, Bundesamt für Umwelt, Bern, p. 62, http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01691/index.html?lang=de&download=NHzLpZig7t,lnp6I0NTU042l2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCGfX18g2ym162dpYbUzd,Gpd6emK2Oz9aGodetmqaN19XI2IdvoaCVZ,s-.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 75.)

Teich, M. e P. Bebi [2009], «Evaluating the benefit of avalanche protection forest with GIS-based risk analyses — A case study in Switzerland», *Forest Ecology and Management*, 257 (apr. 2009), p. 1910-1919, doi: 10.1016/j.foreco.2009.01.046. (Citato a p. 81.)

UNESCO [1981], *Avalanche atlas. Illustrated international avalanche classification*, Natural hazards, International Commission on Snow and Ice, United Nations Educational, Scientific e Cultural Organization, p. 256, ISBN: 92-3-001696-9, http://unesdoc.unesco.org/images/0004/000480/048004MB.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 3.)

VALSECCHI, I.Q., A. CUCCHI e S. HAGOS [2015], «Dalla pericolosità al rischio valanghe», *Neve e Valanghe*, 86 (dic. 2015), p. 38-45. (Citato a p. 8.)

VALT, M. [2012], «5 anni di esperienze con la matrice bavarese», *Neve e Valanghe*, 76 (ago. 2012), p. 4-13, http://www.aineva.it/pubblica/neve76/nv76_1.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 86.)

VALT, M. e F. BERBENNI [2014], «Scenari di pericolo valanghe», *Neve e Valanghe*, 82 (ago. 2014), p. 22-27, http://www.aineva.it/pubblica/neve82/nv82_4.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 86.)

VAN HERWIJNEN, A. e J. HEIERLI [2009], «Measurement of crack-face friction in collapsed weak snow layers», *Geophysical Research Letters*, 36, 23, L23502, ISSN: 1944-8007, DOI: 10.1029/2009GL040389. (Citato a p. 82.)

VEITINGER, J., R. S. PURVES e B. SOVILLA [2016], «Potential slab avalanche release area identification from estimated winter terrain: a multi-scale, fuzzy logic approach», *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16, 10, p. 2211-2225, DOI: 10.5194/nhess-16-2211-2016. (Citato alle p. ix, 13, 14, 18, 22, 24, 27, 33, 35, 37, 39, 41, 42, 47, 48, 52, 54, 56, 57, 59, 60, 62, 63, 65, 69, 71, 75, 82, 92.)

VONTOBEL, I. [2011], *Geländeanalysen von Unfalllawinen*, Masterarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich, p. 101, https://www.geo.uzh.ch/dam/jcr:ff7dda9a-3892-4274-bb95-a932549c8d75/msc_irene_vontobel_2011.pdf. (Citato alle p. 12, 13, 24.)

WERNERS, B. [1988], «Aggregation models in mathematical programming», in *Mathematical Models for Decision Support*, a cura di G. MITRA, H. GREENBERG, F. LOOTSMA, M. RIJKAERT e H ZIMMERMANN, NATO ASI Series, Springer, Berlin, Heidelberg, vol. 48, p. 295-305. (Citato a p. 24.)

WINSTRAL, A., K. ELDER e R. E. DAVIS [2002], «Spatial Snow Modeling of Wind-Redistributed Snow Using Terrain-Based Parameters», *Journal of Hydrometeorology*, 3, p. 524-538, DOI: 10.1175/1525-7541(2002)003<0524:SSMOWR>2.0.CO;2. (Citato a p. 24.)

WOOD, J. [1996], *The geomorphological characterisation of Digital Elevation Models*, Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, University of Leicester, p. 466, http://hdl.handle.net/2381/34503 [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 19.)

ZADEH, L.A. [1965], «Fuzzy sets», *Inform. and Control*, 8, p. 338-353, DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X. (Citato alle p. 16, 17.)

ZENKE, B. [2003], *Die Lawinen-Gefahrenstufen — Wie kommt der Lawinenwarner zu aktuellen Gefahrenstufe?*, Lawinenwarnzentrale im Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, http://www.lawinenwarndienst-bayern.de/download/infothek/vortrag_wklzg_2003_print.pdf [visitato il 01/03/2017]. (Citato a p. 86.)

ZEVENBERGEN, L.W. e C.R. THORNE [1987], «Quantitative Analysis of Land Surface Topography», *Earth Surf. Proc. Land.*, 12, p. 47-56, DOI: 10.1002/esp.3290120107. (Citato a p. 19.)

Zischg, A., S. Fuchs, M. Keiler e G. Meissl [2005], «Modelling the system behaviour of wet snow avalanches using an expert system approach for risk management on high alpine traffic roads», *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 6, p. 821-832, doi: 10.5194/nhess-5-821-2005. (Citato a p. 18.)

Altre opere consultate

Cagnati, A. [2003], *Strumenti di misura e metodi di osservazione nivometeorologici. Manuale per i rilevatori dei Servizi di previsione valanghe*, AINEVA, p. 133.

Costanzo, F. [2012], *Innevamento recente sulle Alpi Orientali e ricerca di relazioni statistiche tra valanghe spontanee a lastroni e parametri nivometeorologici*, Corso di Laurea Magistrale in Scienze Geologiche, Georisorse e Territorio, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Ferrara.

Schweizer, J. e M. Lütschg [2001], «Characteristics of human-triggered avalanches», *Cold Reg. Sci. Technol.*, 33, p. 147-162, doi: 10.1016/S0165-232X(01)00037-4.

Dichiarazione

Dichiaro che questa ricerca è opera mia, ad eccezione delle parti esplicitamente menzionate nel testo, e che questo lavoro non è stato proposto per alcuna qualifica accademica o professionale.

Dichiaro inoltre di aver consultato personalmente tutte le opere citate e presenti nella bibliografia.

Borgnano, marzo 2017

Luca Iacolettig

soli Deo gloria