

**È STATO SVILUPPATO
UN NUOVO STRUMENTO A
SUPPORTO DEI SERVIZI VALANGHE**

la PROPENSIONE al DISTACCO QUANTIFICATA

**Un modello per calcolare e visualizzare
la pericolosità da valanga**

Luca Iacolettig

Autore corrispondente: luca@iacolettig.it
Borgnano, piazza della Repubblica 4,
34071 Cormons GO

Betty Sovilla

WSL Istituto per lo studio della neve e
delle valanghe SLF, Davos, Svizzera

Con il contributo della
Struttura stabile centrale
per l'attività di prevenzione
del rischio da valanga
della Regione Autonoma
Friuli Venezia Giulia e
dell'Università degli Studi
di Udine

I bollettini valanghe sono privi di un'evidenza geografica dettagliata delle zone realmente pericolose. Per questo è stato sviluppato un modello per visualizzare e quantificare automaticamente le zone pericolose previste dai servizi valanghe, offrendo loro un supporto oggettivo. Il modello calcola infatti 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, offrendo un dato utile a determinare il grado di pericolo nei bollettini valanghe. Non sono tuttavia considerate le valanghe a debole coesione, né la dinamica delle valanghe: in futuro, la ricerca dovrebbe integrare questi fattori e, migliorati i parametri, il modello andrà validato per renderlo pienamente affidabile.

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



INTRODUZIONE

I bollettini valanghe presentano generalmente una parte grafica ed una scritta: quest'ultima riporta informazioni riguardo a quote, versanti, esposizioni geografiche e morfologie critiche per il distacco di valanghe. Tuttavia, queste zone vengono indicate solo qualitativamente ed il grado di pericolo, assegnato uniformemente ad un'area estesa, non consente di localizzare le zone realmente pericolose.

In sostanza, non vi è evidenza geografica di pendii, esposizioni e quote identificate come potenzialmente pericolose, né esiste una loro quantificazione numerica.

Da queste considerazioni, nell'ambito della *Struttura stabile centrale per l'attività di prevenzione del rischio da valanga* (ufficio valanghe) della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia è emersa l'esigenza di calcolare e visualizzare geograficamente le aree pericolose previste nei bollettini per supportare il compito dei previsori.

In passato sono già stati sviluppati modelli per esigenze simili: un esempio è LAWIPROG (Leuthold et al., 1996), che visualizzava le informazioni scritte del bollettino valanghe svizzero tramite indici di pericolo numerici ma qualitativi.

Altri modelli sono stati sviluppati, ad esempio, per guidare la gestione del pericolo valanghe all'interno dei comprensori sciistici (Brabec et al., 2001; Stoffel et al., 2001) utilizzando una combinazione tra dati raccolti in tempo reale (Cookler e Orton, 2004; Gruber et al., 2009) e approcci fisico-statistici (Pozdnoukhov et al., 2011). Questi modelli adottano tuttavia un approccio *discreto* ed esprimono i risultati con indici perlopiù qualitativi; inoltre, non consentono di identificare a scala di dettaglio le aree di distacco potenziale delle valanghe (*Potential Release Areas, PRA*).

Oltre a questi, esistono altri modelli per identificare le PRA a fini ingegneristici, principalmente per la stesura di mappe di pericolo per la gestione del territorio nel lungo periodo. Essi si basano su parametri topografici derivabili da un DTM, come l'acclività, l'esposizione geografica, la curvatura del terreno (Maggioni e Gruber, 2003; Peitzsch et al., 2014; Vontobel, 2011), la copertura forestale e la scabrezza del terreno (ad esempio Blahut et al., 2017). Alcuni autori adottano un approccio *discreto* (Boltziar et al., 2016; Selçuk, 2013), altri l'approccio *continuo* della logica *fuzzy* (ad es. Ghinoi e Chung, 2005), ma la maggior parte adotta un approccio *booleano* (del tipo "o 0 o 1"), ottenendo una netta separazione tra le aree potenzialmente pericolose e quelle no.

I modelli citati identificano, tuttavia, tutte le aree potenzialmente pericolose, senza considerare le condizioni reali del manto nevoso, calcolando così gli scenari peggiori per il pericolo.

Recentemente, Veitinger et al. (2014) hanno proposto un approccio per considerare l'effetto del manto nevoso nel calcolo delle PRA. Poiché la distribuzione e l'altezza della neve al suolo hanno effetto sulla scabrezza superficiale del terreno (la quale influenza localizzazione ed estensione delle PRA), Veitinger et al. (2016) hanno sviluppato un metodo per definire diversi scenari di distacco in funzione dell'altezza del manto nevoso (quindi della sua scabrezza superficiale), senza però tener conto della sua reale stabilità.

Nel contesto di questo lavoro, per consentire ai servizi valanghe di visualizzare le aree più pericolose in funzione della stabilità del manto e fornire loro un supporto per determinare i gradi di pericolo, l'algoritmo di Veitinger et al. (2016), è stato

esteso per poter integrare i parametri di criticità noti ai servizi valanghe.

MODELLO ORIGINALE

Il modello qui proposto estende quello di Veitinger et al. (2016), il quale identifica le aree di distacco potenziale di valanghe a lastroni calcolando per ogni cella del DTM la predisposizione al distacco: poiché il suo valore varia tra 0 (predisposizione nulla) e 1 (alta predisposizione), esso rappresenta una *probabilità*, e può essere utilizzato come un indice della pericolosità da valanga.

Tale modello adotta la logica *fuzzy* (Zadeh, 1965), che consente tra l'altro di esprimere matematicamente l'esperienza dei professionisti; in particolare impiega una funzione di appartenenza a campana generalizzata di equazione

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

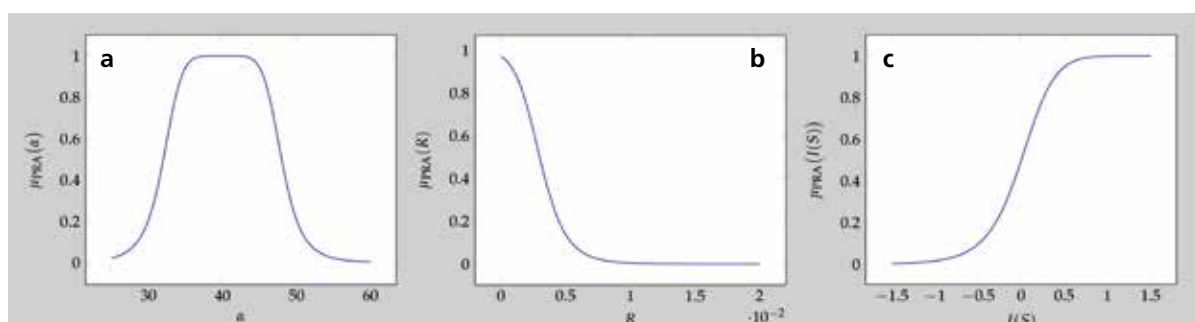
dove a , b e c sono valori variabili, per modellare i parametri ed attribuire loro un grado di appartenenza alla classe *aree potenziali di distacco* (PRA). Più alto è il grado di appartenenza assunto da un parametro in una cella del DTM, maggiore è la propensione al distacco.

I parametri che controllano la definizione del distacco sono tre: l'acclività, la scabrezza superficiale ed un indice di riparo dal vento (*wind shelter*).

Acclività

Com'è noto, le inclinazioni tra 35° e 45° sono le acclività alle quali più facilmente si verificano le valanghe a lastroni (Selçuk, 2013; Stoffel e Margreth, 2012). Il modello di Veitinger et al. (2016), quindi, considera che la propensione al distacco sia massima per valori di pendenza entro questo

Fig. 1 - Funzioni di appartenenza fuzzy per i parametri di Veitinger et al. (2016) modellate con l'equazione (1) per (a) l'inclinazione α (con parametri $a = 8$, $b = 3$ e $c = 40$), (b) la scabrezza R ($a = 0.01$, $b = 2$, $c = -0.005$) e (c) l'indice *wind shelter* $I(S)$ ($a = 2$, $b = 5$, $c = 2$). μ_{PRA} indica il grado di appartenenza di un parametro alla classe PRA.



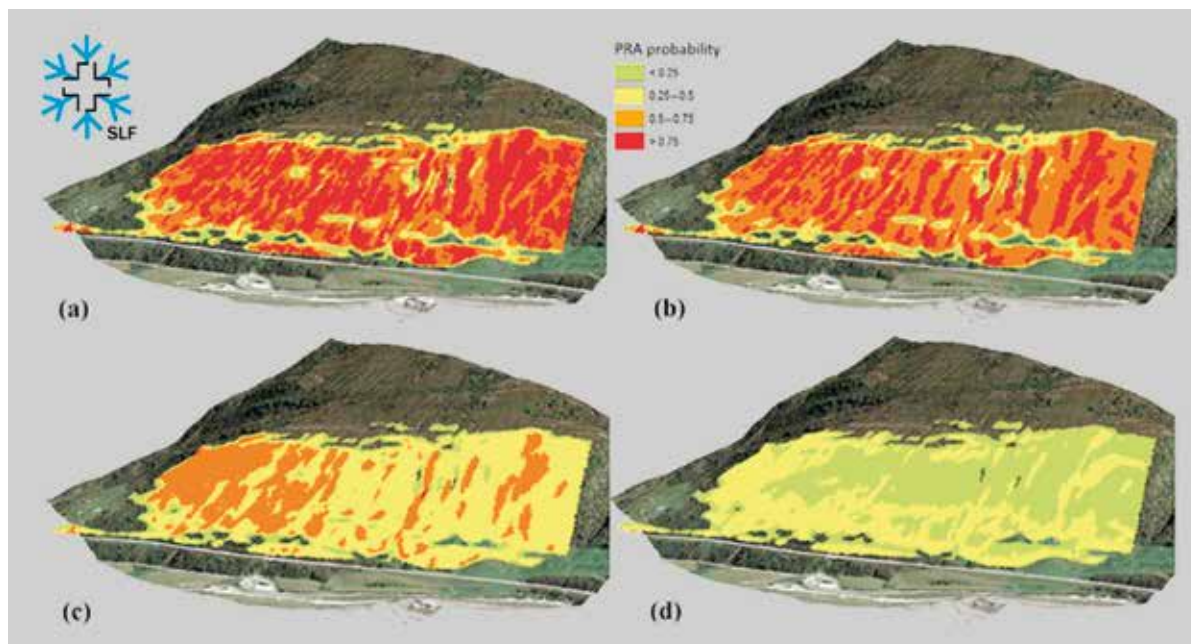


Fig. 2 - Risultati del modello originale per la valanga del Böschchen (Canton Uri, Svizzera). Il versante è esposto a nord-ovest. I colori indicano i gradi di appartenenza alla classe PRA. L'altezza della neve è 1.2 m con vento da (a) sud, (b) sud-ovest, (c) ovest e (d) nord-ovest. Figura da Veitinger et al. (2016).

intervallo e diminuisca gradualmente fino a zero per pendenze maggiori (fino a 60°) o minori (fino a 25°). La figura 1a mostra la curva *fuzzy* che riproduce questa tendenza. Per calcolare l'acclività, questo modello adotta la *parametrizzazione quadratica multi-scala* (Wood, 1996) che consente di calcolare un parametro topografico a diverse scale senza variare la risoluzione del DTM.

Scabrezza

La scabrezza influenza propensione al distacco, localizzazione ed estensione delle valanghe (McClung, 2001; Schweizer et al., 2003) ed è quindi uno dei parametri fondamentali del modello. Recentemente è stato dimostrato che la scabrezza varia in funzione dell'altezza del manto nevoso e della sua variabilità spaziale (Veitinger e Sovilla, 2016; Veitinger et al., 2014). In Veitinger et al. (2016) la scabrezza corrispondente ad uno specifico scenario di altezza media del manto nevoso viene direttamente dedotta dal DTM estivo. La scabrezza viene data dal modulo del vettore *ruggedness R* (Sappington et al., 2007): il suo valore varia tra 0 (terreno liscio, propenso al distacco) e 0.02 (terreno scabro, valanghe improbabili). La figura 1b mostra la funzione *fuzzy* di questo parametro. Il risultato viene infine corretto secondo l'altezza del manto nevoso e la relativa variabilità (impostati dall'utente).

Wind shelter

In Veitinger et al. (2016) i terreni riparati dal vento (sottovento) sono considerati più predisposti al distacco di quelli esposti al vento (sopravento). L'effetto di esposizione/riparo dal vento viene modellato con l'indice *wind shelter* (Plattner et al., 2006; Winstral et al., 2002). A seconda della direzione principale del vento e della relativa tolleranza, il valore dell'indice varia tra -1.5 (terreno esposto al vento) e 1.5 (terreno riparato dal vento). La funzione di questo parametro assegna il massimo grado di appartenenza ai pendii riparati dal vento (fig. 1c).

I tre parametri acclività, scabrezza e indice *wind shelter* vengono quindi elaborati da un operatore *fuzzy* per ottenere una carta delle aree di distacco potenziale, dove ogni cella ha un valore calcolato $\mu_{PRA}(x) \in [0, 1]$ (fig. 2).

MODELLO ESTESO

Per progettare l'estensione del modello di Veitinger et al. (2016), è stato analizzato il testo dei bollettini valanghe ed è stato effettuato un sondaggio tramite questionario, permettendo di determinare quali fattori vengono considerati dai servizi valanghe per definire le pendenze, le esposizioni dei versanti e le quote critiche per il pericolo valanghe. Sulla base di questa indagine, sono stati

definiti i seguenti dati da fornire al modello come input: grado di stabilità del manto nevoso, esposizione critica (opzionale), altezza del manto nevoso, direzione del vento (con tolleranza), limiti di quota per gli effetti eolici, limiti di quota della neve e i limiti di quota per il pericolo valanghe. Questi dati concorrono a calcolare i parametri del modello:

1. acclività
2. scabrezza
3. indice *wind shelter* pesato
4. quote del pericolo potenziale
5. copertura nevosa.

Si può fornire inoltre un raster della copertura forestale per escludere le zone boscate dalle aree di distacco.

Acclività

Poiché dal questionario è emerso che l'acclività critica è fortemente legata alla stabilità del manto nevoso, grazie a giudizio esperto sono state definite cinque funzioni *fuzzy* dell'acclività per modellare diversi gradi di *stabilità* del manto (fig. 3): A (manto stabile), B, C, D, E (manto estremamente instabile), in maniera simile alla stabilità del manto nevoso espressa della scala europea del pericolo valanghe. Tutte le funzioni, salvo la E, hanno il massimo tra 35° e 45°, poiché si è visto che le valanghe provocate si staccano su pendenze simili, indipendentemente dal grado

Fig. 3 - Funzioni fuzzy per l'inclinazione a per ogni grado di stabilità del manto nevoso: verde per il grado A, giallo per il B, arancione per il C, rosso per il D, nero per il grado E. $\mu_{PRA}(\alpha)$ è il grado di appartenenza dell'acclività alla classe PRA.

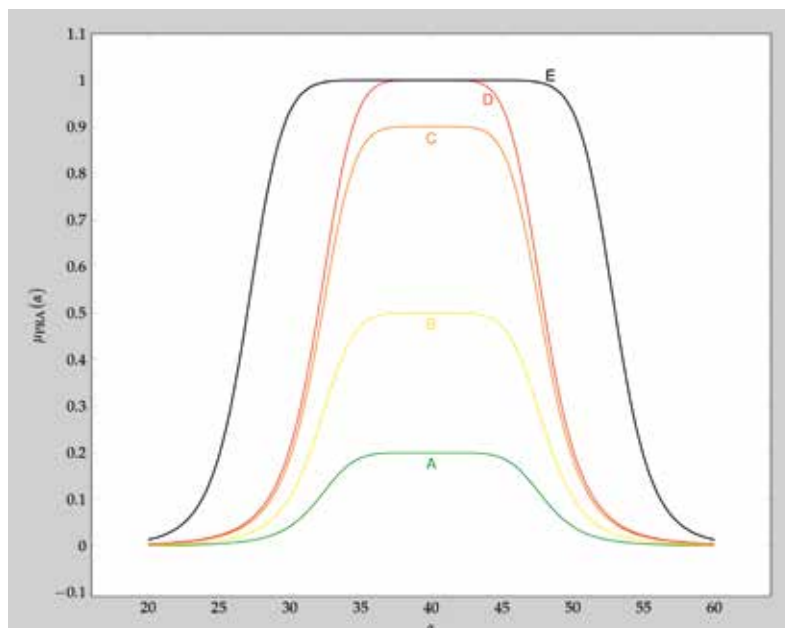
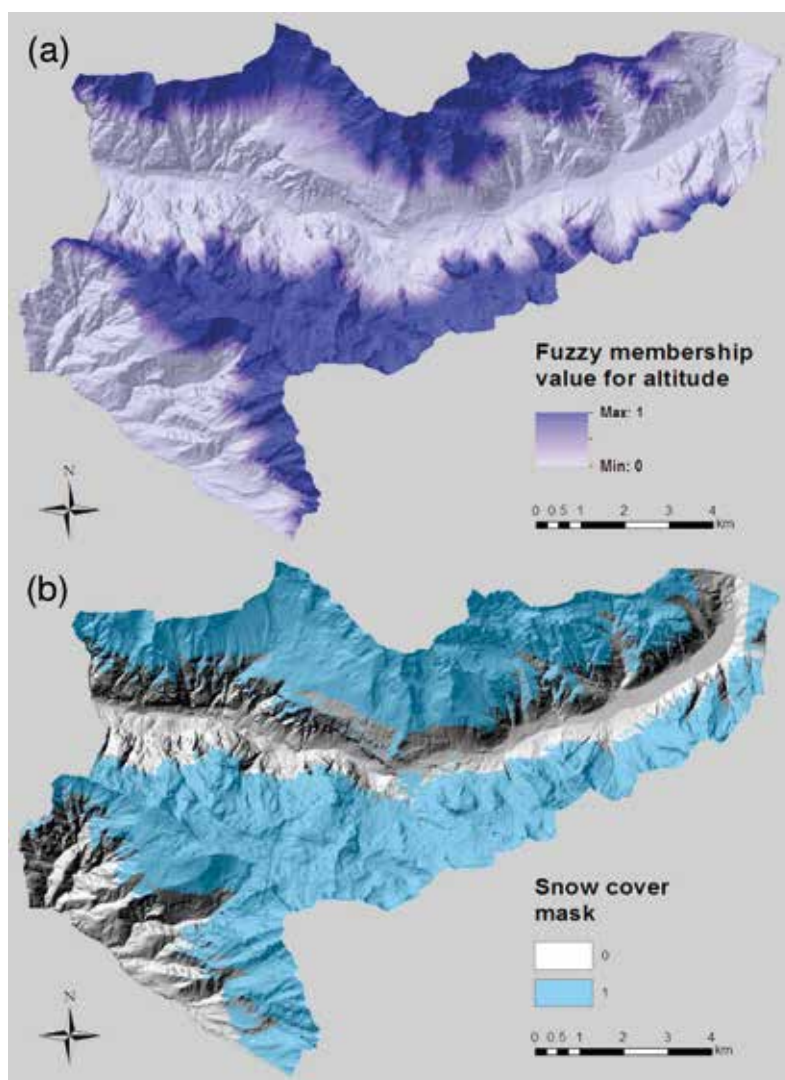


Fig. 4 - a) Visualizzazione della funzione fuzzy per le quote del pericolo potenziale. In questo caso, le quote sotto i 1500m assumono valore 0 (assenza di pericolo valanghe), sopra i 1800m valore 1 (presenza di pericolo). L'algoritmo calcola automaticamente i valori per le quote intermedie (sfumature di colore nella figura); b) 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 dal calcolo delle aree di distacco.



di pericolo (Harvey, 2002, 2015). Per modellare la propensione al distacco in funzione della stabilità del manto nevoso, le curve hanno diversi gradi di appartenenza. Le funzioni *fuzzy* sono calcolate con il

metodo proposto da Veitinger et al. (2016), variando i parametri delle curve. In particolare, la funzione D è quella di Veitinger et al. (2016), mentre vengono modificati i parametri per le funzioni A, B, C ed E.

Ad esempio: con grado A di stabilità, una cella del DTM con inclinazione 30° ha valore 0.04 cioè, per quanto riguarda l'acclività, è una PRA al 4%. Con grado C, alla stessa inclinazione, il valore è 17%. Inoltre, è possibile assegnare ad un'esposizione geografica una minor stabilità: ad esempio, se il grado di stabilità del manto è B e si indicano le esposizioni nord come critiche, per le esposizioni diverse verrà utilizzata la funzione B, mentre per le esposizioni nord la funzione C.

Indice *wind shelter* pesato

La propensione al distacco derivante dal *wind shelter* viene calcolata con il metodo proposto da Veitinger et al. (2016).

Per includere l'aumento della velocità del vento con l'altitudine e le quote alle quali è presente il pericolo, l'indice è stato pesato da una funzione che cresce linearmente da 0 a 1 a seconda di due quote definite dall'utente: una inferiore al di sotto della quale il vento non ha effetto (fattore di peso 0), ed una superiore sopra la quale l'effetto del vento è totale (fattore di peso 1).

Quote del pericolo potenziale

Analogamente all'indice *wind shelter*, è stata definita una funzione crescente linearmente da 0 a 1 per pesare il valore finale di propensione al distacco a seconda di due quote limite definite dall'utente: una quota inferiore sotto la quale le valanghe sono estremamente improbabili (0), una quota superiore sopra la quale possono verificarsi (1). È stato creato cioè un *buffer* della propensione al distacco, la cui ampiezza (in termini di quote) è definita dall'utente (fig. 4a).

Copertura nevosa

Per escludere dal calcolo delle aree di distacco le zone non innevate, è stata implementata una maschera della copertura nevosa con quote variabili a seconda delle esposizioni: l'algoritmo consente di assegnare alle quattro esposizioni principali quattro distinti limiti della neve, rendendo la maschera più aderente alla realtà (fig. 4b).

L'ultimo dato fornito dal modello è la *percentuale dei pendii ripidi pericolosi*: questa viene spesso impiegata per stabilire il grado di pericolo dei bollettini, ma fino ad oggi è stata stimata solo grazie all'esperienza dei previsori: il modello proposto fornisce invece un dato calcolato.

Si è assunto che un pendio è ripido se ha un'inclinazione compresa tra 30° e 60° e che è pericoloso se è più propenso al distacco che no ($\mu_{PRA}(x) > 0.5$). Calcolando l'area complessiva delle celle "pericolose" e dividendola per l'area delle celle "ripide" innestate e non boscate si può ottenere la frazione p delle celle "ripide" con propensione al distacco maggiore del 50% ovvero:

$$p = \frac{\text{numero celle pericolose}}{\text{numero celle ripide}}$$

dove p è la frazione dei pendii ripidi pericolosi, esprimibile in percentuale.

I vari parametri vengono quindi elaborati ed i risultati finali dei calcoli sono (fig. 5):

- una carta raster delle aree di distacco potenziale corretta a seconda delle condizioni nivometeorologiche del momento;
- la percentuale dei pendii ripidi pericolosi.

Il modello di Veitinger et al. (2016), a parità di direzione del vento ed altezza del manto nevoso, può fornire un solo scenario (fig. 6a). Il modello proposto, per le possibili combinazioni tra parametri, ne può invece individuare molti; alcuni esempi sono riportati nelle figure 6 e 7. L'algoritmo open source è stato programmato in linguaggio R grazie all'omonimo software (versione 3.3.2, <https://cran.r-project.org/>) e può essere liberamente richiesto scrivendo a luca@iacolettig.it. La figura 8 ne riporta il diagramma di flusso.

CONCLUSIONI

Si è proposta un'estensione del modello di Veitinger et al. (2016) per supportare la redazione dei bollettini e la previsione delle valanghe. Grazie ad un algoritmo automatizzato, il modello esteso consente di visualizzare geograficamente la previsione delle valanghe, calcolando la propensione

al distacco di valanghe a lastroni per ogni cella del DTM dell'area di interesse secondo le condizioni nivometeorologiche del momento. La visualizzazione grafica del risultato avviene tramite un software GIS.

In particolare il modello consente di:

1. modellare la stabilità del manto nevoso con funzioni dell'acclività. Questa caratteristica rappresenta la differenza più marcata col modello originale: la diversa estensione e colorazione delle aree identificate costituiscono l'evidenza grafica di queste differenze (figg. 6–7). Grazie a questo parametro, l'algoritmo può essere impiegato come strumento previsionale;
2. determinare la frazione dei pendii ripidi

pericolosi, un dato quantitativo offerto ai previsori per supportare oggettivamente la scelta dei gradi di pericolo nella redazione dei bollettini valanghe.

Tuttavia, uno strumento completo ed affidabile necessita di ulteriore lavoro, sperimentazione e, soprattutto, validazione. In particolare, alcuni aspetti vanno considerati: le funzioni *fuzzy* sono state sì determinate grazie al parere di esperti, ma questi erano in numero limitato. Inoltre, il modello esteso identifica sempre le stesse aree di distacco (tranne col grado E), variando solamente il valore di propensione al distacco, mentre la scala europea localizza la possibilità di distacchi, per gradi

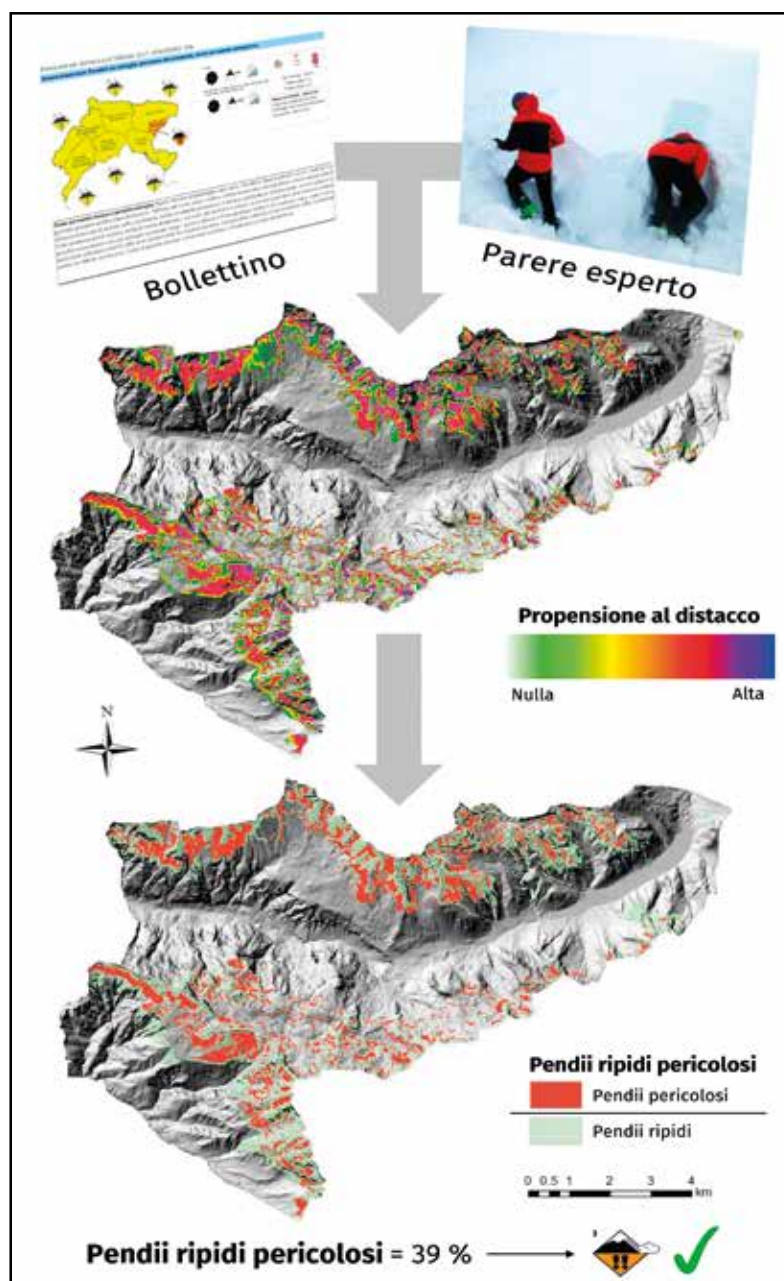
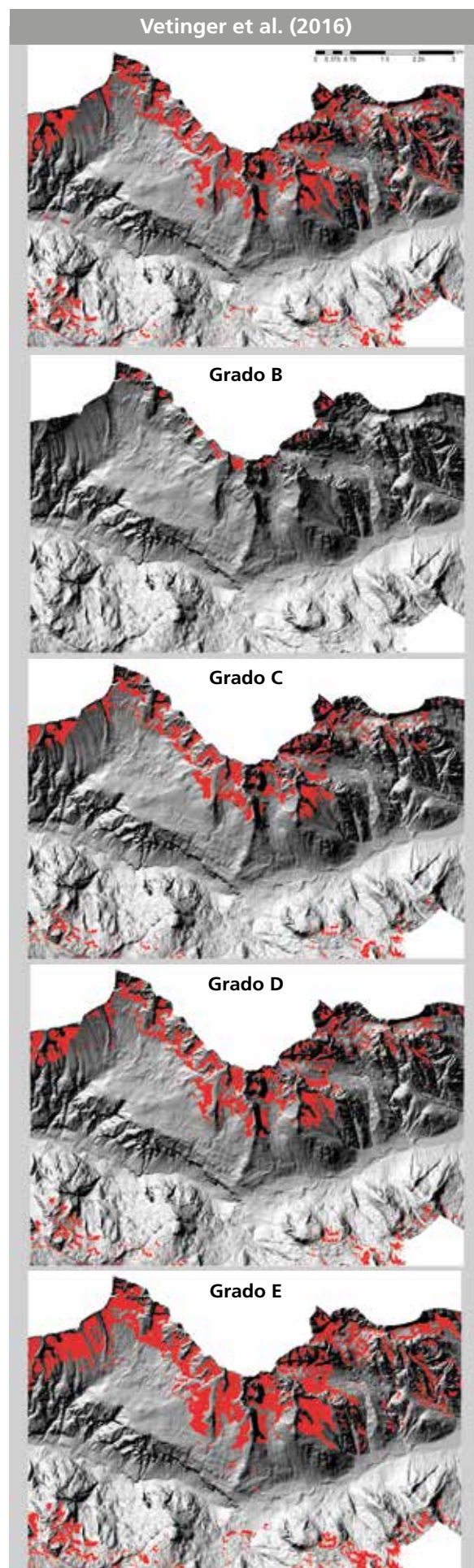
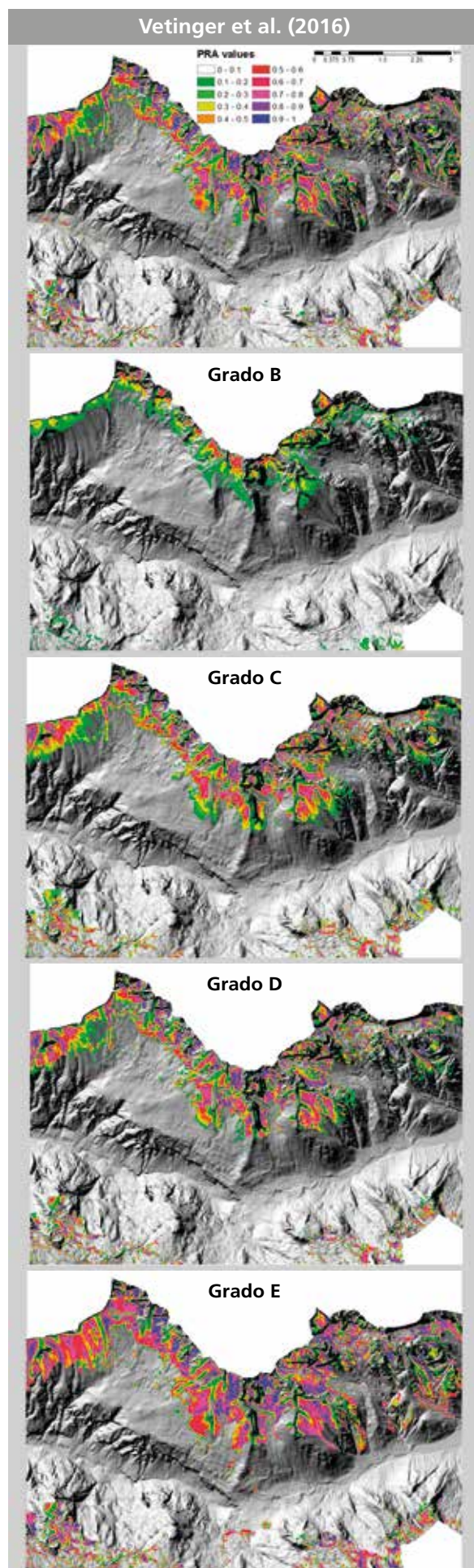


Fig. 5 - Sintesi grafica del modello. Grazie alle informazioni del bollettino ed al parere degli esperti, l'algoritmo produce una carta della propensione al distacco con valori variabili da 0 (propensione nulla, no colore) a 1 (alta propensione, blu scuro) e calcola la percentuale dei pendii ripidi pericolosi: quest'ultima, viene ricavata dal rapporto tra le celle "pericolose" ($\mu_{PRA}(x) > 0.5$, rosso nella seconda figura) e le celle "ripide" (inclinazione $30 \leq \alpha < 60$, verde chiaro). In questo caso, il 39% dei pendii ripidi innestati e non boscati è potenzialmente pericoloso. Il dato ottenuto, previo vaglio critico, suggerisce al previsore il grado di pericolo.

Da sinistra:
fig. 6 - Carte delle PRA fuzzy confrontando il modello originale (Vetinger et al., 2016) con quello esteso al variare dei gradi di stabilità del manto nevoso (più altre combinazioni dei rimanenti parametri).
Dati comuni fra modelli: 2 m di neve e nessuna direzione preferenziale del vento;

fig. 7 - Carte delle PRA booleane ($\mu_{PRA}(x) > 0.5$, "pendii pericolosi") estratte dalla figura 6.



Nella pagina a fronte:
fig. 8 - 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 di distacco potenziale delle valanghe (Potential Release Areas, 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 in percentuale.

bassi, solo su pendii ripidi ed estremamente ripidi. A chi scrive, tuttavia, questo sembra essere in antitesi con quanto riportato da Harvey (2002, 2015) ed il fatto meriterebbe un approfondimento.

In aggiunta, il modello esteso identifica la zona di distacco di sole valanghe a lastroni: le zone di scorrimento ed accumulo, così come le valanghe di neve a debole coesione, non sono considerate.

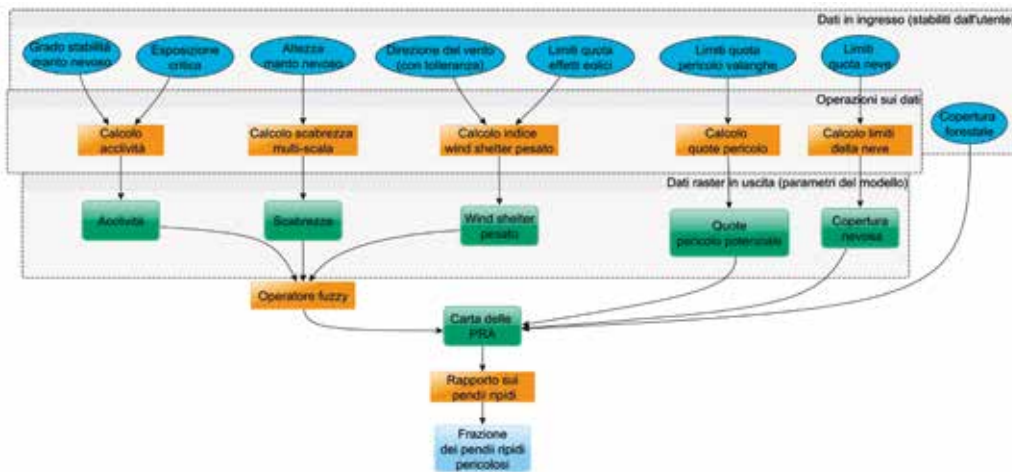
Infine, malgrado esista una validazione del modello base, manca una vera validazione del modello esteso.

È quindi necessario validare il modello con una fase sperimentale presso diversi centri valanghe. Dopo questi miglioramenti, il modello potrà affiancare gli altri metodi di determinazione e validazione del grado di pericolo dei bollettini e, ad esempio, fornire mappe precise per competizioni scialpinistiche o contribuire al sistema di allerta a fini di protezione civile. Il lavoro integrale è consultabile in Iacoletti (2017).

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato svolto in contesto di tesi di laurea presso l'Università degli Studi di Udine sotto la supervisione del prof. Federico Cazorzi, cui si esprime sincera gratitudine. Grazie a prof. Giovanni Fonseca per l'aiuto in matematica e statistica; a prof. Nicola Casagli, dr. Massimiliano Nocentini e dr. Pinuccio d'Aquila per i dati di alcune simulazioni; a Daniele Moro, Luciano Liz-

zero, Gabriele Amadori, Sergio Buricelli, dr. Igor Chiambretti, dr. Anselmo Cagnati, Flavio Berbenni, Alfredo Praolini e il gruppo previsori AINEVA, ing. Patrick Nairz (*Lawinenwarndienst Tirol*), dr. Jürg Schweizer e Andreas Stoffel (SLF Davos) per le utili informazioni e bibliografia; a Tommaso Iacoletti per l'aiuto informatico e grafico; si ringraziano inoltre tutti coloro che hanno rivisto e corretto questo articolo.



Bibliografia

- Blahut, J., J. Klimeš, J. Balek, P. Hájek, L. Červená e J. Lysák (2017), "Snow avalanche hazard of the Krkonoše National Park, Czech Republic", *J. Maps*, 13, 2, p. 86-90, DOI: 10.1080/17445647.2016.1262794.
- Boltžiar, M., M. Biskupič e I. Barka (2016), "Spatial avalanche modelling by application of GIS on the selected slopes of Western Tatra Mts. and Belianske Tatras Mts., Slovakia", *Geo. Pol.*, 89, 1, p. 79-90, DOI: <http://dx.doi.org/10.7163/GPol.0047>.
- Brabec, B., R. Meister, U. Stöckli, A. Stoffel e T. Stucki (2001), "RAIFoS: Regional Avalanche Information and Forecasting System", *Cold Reg. Sci. Technol.*, 33, 2-3, p. 303-311, DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0165-232X\(01\)00058-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0165-232X(01)00058-1).
- Cookler, L. e B. Orton (2004), "Developing a GIS avalanche forecasting model using realtime weather telemetry information for the south side of Mt. Hood", in *Proc. 2004 ISSW*, p. 145-152.
- Ghinai, 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", *Geomorph.*, 66, p. 305-325, DOI: 10.1016/j.geomorph.2004.09.018.
- 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.
- Harvey, S. (2002), "Avalanche incidents in Switzerland in relation to the predicted danger degree", in *Proc. 2002 ISSW*, a cura di J.R. Stevens, Penticton, BC, p. 443-448.
- Harvey, S. (2015), "Unschärfen im Risikomanagement auf Skitouren und beim Variantenski fahren", in *Tagungsband zum Internationalen Seminar*, a cura di H.U. Rhyner e J. Schweizer, WSL Berichte, Davos (CH), vol. 34, p. 33-38.
- Iacoletti, L. (2017), *La pericolosità da valanga calcolata e visualizzata. Un modello numerico-geografico*. Tesi di laurea magistrale, UniUD, UniTS, p. 138, DOI: 10.13140/RG.2.2.27066.18880.

- Leuthold, H., B. Allgöwer e R. Meister (1996), "Visualization and Analysis of the Swiss Avalanche Bulletin using GIS", in *Proc. 1996 ISSW*, Banff, Alberta, p. 35-40.
- 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.
- McClung, D.M. (2001), "Characteristics of terrain, snow supply and forest cover for avalanche initiation caused by logging", *Ann. Glaciol.*, 32, p. 223-229, DOI: 10.3189/172756401781819391.
- Peitzsch, E.H., J. Hendrikx e D.B. Fagre (2014), "Assessing the Importance of Terrain Parameters on Glide Avalanche Release", in *Proc. 2014 ISSW*, Banff, Alberta.
- Plattner, C., L. Braun e A. Brenning (2006), "The spatial variability of snow accumulation at Vernagtferner, Austrian Alps, in winter 2003/2004", *Zeit. Gletsch. Glazial.*, 39, 2003-2004, p. 43-57.
- Pozdnoukhov, A., G. Matasci, M. Kanevski e R. S. Purves (2011), "Spatio-temporal avalanche forecasting with Support Vector Machines", *Nat. Haz. Earth Sys. Sci.*, 11, 2, p. 367-382, DOI: 10.5194/nhess-11-367-2011.
- 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", *Jour. Wild. Manag.*, 71, 5, p. 1419-1426, ISSN: 1937-2817, DOI: 10.2193/2005-723.
- Schweizer, J., J.B. Jamieson e M. Schneebeli (2003), "Snow avalanche formation", *Rev. Geo.*, 41, 4, 1016, DOI: 10.1029/2002RG000123.
- 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.
- Stoffel, A., B. Brabec e U. Stöckli (2001), "GIS applications at the Swiss Federal Institute of Snow and Avalanche Research", in *21st ESRI Int. User Conf. Redlands, California*.
- Stoffel, L. e S. Margreth (2012), *Beurteilung von Sekundär-*

lawinen bei künstlicher Lawinenauslösung. Anleitung für die Praxis, Umwelt-Wissen, 1222, Bundesamt für Umwelt, Bern, p. 62.

- 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", *Nat. Haz. Earth Sys. Sci.*, 16, 10, p. 2211-2225, DOI: 10.5194/nhess-16-2211-2016.
- Veitinger, J. e B. Sovilla (2016), "Linking snow depth to avalanche release area size: measurements from the Vallee de la Sionne field site", *Nat. Haz. Earth Sys. Sci.*, 16, 8, p. 1953-1965, DOI: 10.5194/nhess-16-1953-2016.
- Veitinger, J., B. Sovilla e R. S. Purves (2014), "Influence of snow depth distribution on surface roughness in alpine terrain: a multi-scale approach", *Cryosph.*, 8, 2, p. 547-569, DOI: 10.5194/tc-8-547-2014.
- Vontobel, I. (2011), *Geländeanalysen von Unfalllawinen*, Masterarbeit, UZH, p. 101.
- Winstral, A., K. Elder e R. E. Davis (2002), "Spatial Snow Modeling of Wind-Redistributed Snow Using Terrain-Based Parameters", *J. Hydromet.*, 3, p. 524-538, DOI: 10.1175/1525-7541(2002)003<0524:SSMOWR>2.0.CO;2.
- Wood, J. (1996), *The geomorphological characterisation of Digital Elevation Models*, PhD Thesis, Univ. of Leicester, p. 466.
- Zadeh, L.A. (1965), "Fuzzy sets", *Inform. and Control*, 8, p. 338-353, DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.

Acronimi principali

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

DTM: Digital Terrain Model - Modello Digitale del Terreno

GIS: Geographic Information System - Sistema Informativo Geografico

PRA: Potential Release Area - Area di distacco potenziale