

MAPPE INDICATIVE del PERICOLO VALANGHE SU AREA VASTA

Fabiano Monti¹, **Yves Bühler**²,
Paola Comin³, **Alberto Trenti**⁴,
Ruggero Alberti³, **Alessandro
Wolynski**³, **Angelo Carriero**³,
Luca Dellarole¹, **Luca Vallata**¹,
Laila Compagnoni¹

¹ Alpsolut s.r.l., Livigno, Italy

² WSL Institute for Snow and Avalanche
Research SLF, Davos Dorf, 7260, Switzerland

³ Servizio Foreste e Fauna

Provincia Autonoma di Trento

⁴ Servizio Prevenzione Rischi
della Provincia Autonoma di Trento

INDICATIVE MAPS OF AVALANCHE DANGER ON A LARGE SCALE

The alpine territory, a highly anthropized and densely populated area, has been coexisting for centuries with the avalanche danger and thus preserves a strong historical memory of that. Knowing the avalanche activity that characterizes a region is the basis for the adoption of measures to mitigate risks. Over the years, this led to the drawing up of reliable avalanche danger maps that combine information from the avalanche cadastre with geomorphological studies, information on snow climatology and numerical modelling. The quality and exhaustiveness of these maps are not however the same for the whole territory: the remote areas, those mainly visited in summer periods or those that are rarely affected by avalanche events often have to count on incomplete information.

Moreover, the diffusion of danger prone maps based on site-specific simulations of avalanche dynamics is strongly hindered by costs and time requirements. In the last few years, several automated methods have been developed to define all potential avalanche release areas (PRA) within vast territories and calculate, for each of these, avalanche dynamics simulations. Both PRAs and dynamic simulations can be calculated based on different return times characterised by the specific climatology of snowfalls on the area considered. This work outlines the necessary data and the methods used for the drawing up of indicative maps of avalanche danger, as well as their strengths and limits. It also describes three operational applications: i) the use of indicative maps of avalanche danger to support the PGT (territory government plan) of Livigno municipality; ii) identification of wood as an active protection in Province of Trento; iii) evaluation of possible avalanches within the areas affected by the Vaia storm in the province of Trento.

Il territorio alpino, fortemente antropizzato e densamente popolato, convive da secoli con il pericolo valanghe e ne conserva una forte memoria storica. La conoscenza dell'attività valanghiva che caratterizza una regione è alla base di molte misure per mitigarne i rischi. Negli anni, questo ha portato alla redazione di mappe dei pericoli affidabili che combinano le informazioni del catasto valanghe con analisi geomorfologiche, informazioni sulla climatologia della neve e la modellazione numerica.

La qualità ed esaustività di queste mappe non è, tuttavia, uniforme per tutto il territorio: le aree remote, quelle frequentate prevalentemente nei periodi estivi o quelle sporadicamente interessate da eventi valanghivi spesso dispongono di informazioni incomplete e lacunose. Inoltre, i costi e i tempi per la realizzazione di mappe di esposizione al pericolo basate sulle simulazioni sito-specifiche della dinamica valanghe ne limitano enormemente la diffusione.

Negli ultimi anni sono stati sviluppati degli approcci automatizzati per delimitare tutte le zone potenziali di distacco valanghe (PRA) presenti in territori estesi e colcolare, per ognuna di queste, le simulazioni di dinamica delle valanghe. Sia le PRA che le simulazioni di dinamica possono essere calcolate in funzione di diversi tempi di ritorno caratterizzati dalla specifica climatologia delle nevicate sul territorio in esame.

In questo lavoro sono presentati i dati necessari e le metodologie utilizzate per la realizzazione delle mappe indicative del pericolo valanghe, nonché i loro punti di forza e limiti. Sono, inoltre, mostrate tre applicazioni operative delle stesse: i) utilizzo delle mappe indicative del pericolo come supporto al Piano di Governo del Territorio per il Comune di Livigno; ii) identificazione del bosco con funzione di protezione attiva in Provincia di Trento; iii) valutazione delle possibili valanghe all'interno delle aree colpite dalla tempesta Vaia nella Provincia di Trento.



INTRODUZIONE

Nelle regioni montuose di tutto il mondo le valanghe sono una grave minaccia ed espongono al pericolo persone, edifici e vie di comunicazione. In Italia gli incidenti riguardano soprattutto persone impegnate in attività ricreativo-sportive (si vedano al riguardo le statistiche ALNEVA, <https://www.aineva.it/incidenti/>), tuttavia il singolo episodio più grave degli ultimi 50 anni, è quello che ha coinvolto una struttura alberghiera a Rigo-piano (PE, Abruzzo) il 18 gennaio 2017, causando il decesso di 29 persone che si trovavano "riparate" al suo interno. Al di là di questo tragico evento, si osserva come negli anni siano significativamente diminuite le vittime all'interno di abitazioni o lungo le vie di comunicazione, e ciò grazie soprattutto allo sviluppo di strumenti e infrastrutture sempre più adeguati alla riduzione del rischio.

Nella maggior parte dei Paesi alpini, le carte del pericolo valanghe sono oggi uno strumento essenziale per la riduzione del pericolo (Bühler et al., 2018). Esse si basano sulle informazioni del catasto valanghe, sull'analisi morfologica del terreno, sulle indagini sul campo e sulle simulazioni numeriche delle valanghe combinate alle valutazioni di esperti ossia i Piani delle Zone Esposte a Valanghe (PZEV) (Rudolf-Miklau et al., 2014). Tuttavia, l'approccio classico al problema richiede la presenza di un catasto valanghe molto esteso e articolato e le perizie effettuate da esperti sono molto costose, sia sul piano economico, sia in termini di tempo di realizzazione. Questo ne limita fortemente la diffusione nei territori remoti (dove le informazioni storiche sono limitate) e laddove le implicazioni economiche non hanno consentito l'approfondimento da parte dei professionisti.

Le mappe indicative del pericolo di valanghe, invece, forniscono una visione d'insieme delle zone potenzialmente colpite da valanghe (Bühler et al., 2018). Queste carte hanno un livello di precisione e di dettaglio a volte inferiore rispetto ai PZEV, ma coprono in modo continuo

l'intero territorio e possono fornire un primo indizio sui pericoli potenziali delle valanghe. Le mappe di indicazione di pericolo valanghe offrono la possibilità di indicare tutte le aree potenzialmente a rischio di valanghe e, laddove è necessaria una valutazione più precisa e dettagliata, si potrà quindi procedere con la realizzazione di un PZEV.

COME SI CREA UNA MAPPA INDICATIVA DEL PERICOLO

Per la realizzazione delle mappe indicative del pericolo occorre, innanzitutto, effettuare l'analisi climatica e nivo-meteorologica dell'area di interesse. In questo modo si può valutare se le condizioni nivo-meteorologiche sono uniformi per l'intero territorio o se questo debba essere suddiviso in sotto-zone climatiche omogenee.

Per eseguire le simulazioni di dinamica delle valanghe non è solamente necessario identificare le zone di distacco e la loro posizione, ma anche lo spessore medio di distacco, misurato perpendicolarmente alla pendenza del versante.

Analisi nivo-climatica

Per ciascun sito di rilevamento, campi di misura manuali o stazioni nivo-meteorologiche automatiche, i dati dello spessore di distacco, in funzione dei diversi tempi di ritorno (es. scenario frequente con tempo di ritorno di 10-30 anni o scenario estremo con tempo di ritorno di 100-300 anni), sono ricavati analizzando il massimo annuale della variazione positiva dell'altezza neve in 3 giorni consecutivi (ΔH_{S3}) (Salm et al., 1990).

In relazione alla qualità e al numero dei dati disponibili, l'aggregazione dei parametri così ricavati può essere eseguita seguendo approcci differenti: si possono effettuare delle medie tra i valori puntuali riportati ad una quota di riferimento o effettuando analisi regionali (Cordola and Tecilla, 2015; Kite, 1998; Cunnane, 1989; Maione e Moissello, 1993; Hosking e Wallis, 1997; Lu e Stedinger, 1992).

Preparazione degli strati informativi topografici

È necessario predisporre tutti gli strati informativi topografici propedeutici alla realizzazione delle mappe. Alla base di tutti i calcoli c'è il modello digitale del terreno; la risoluzione consigliata è compresa tra i 5 e 10 m. Occorre poi uno strato informativo riguardante la presenza di una copertura forestale in grado di limitare il distacco di valanghe. In questo caso, il dato migliore è un rilievo LIDAR dal quale è possibile ricavare il grado di copertura del terreno da parte della vegetazione nonché la relativa altezza (in modo da identificare precisamente il bosco in grado di fornire protezione attiva). Qualora il dato LIDAR non fosse disponibile è possibile anche utilizzare degli strati informativi riguardanti l'uso e copertura del suolo, questi devono essere però ad una risoluzione adeguata. Esistono inoltre soluzioni alternative per superare questo problema utilizzando, ad esempio, la combinazione di fotografie aeree nel visibile e immagini satellitari scattate nella banda del vicino infrarosso NIR.

In ultimo, è possibile specificare uno strato informativo riguardante la presenza di infrastrutture antropiche in modo da escludere le stesse dalle aree probabili di distacco valanghe, in quanto la presenza di edifici o strade interrompe la continuità della copertura nevosa in maniera analoga a quella di un bosco efficiente (ad esempio la presenza di un edificio lungo un pendio attorno i 30° esclude che l'edificio stesso possa rappresentare una zona di distacco).

Individuazione automatica delle zone probabili di distacco

Si deve procedere a calcolare tutte le zone probabili di distacco (PRA) in funzione dei differenti tempi di ritorno. Barbolini et al. (2000) e Maggioni e Gruber (2003) hanno avviato indagini per delineare automaticamente il PRA con risoluzioni dei modelli digitali del terreno (DTM) da 25 a 30 metri. Con la disponibilità di algoritmi DTM a più alta

risoluzione spaziale, sono stati sviluppati algoritmi raffinati (Barbolini et al., 2011; Buhler et al., 2013; Chueca Cia et al., 2014; Pistocchi e Notarnicola, 2013; Veitinger et al., 2016).

Ad oggi, il metodo disponibile per il calcolo delle PRA applicabile operativamente su larga scala è quello proposto da Buhler et al. (2018a, b); esso si basa sulla classificazione delle immagini basata su oggetti OBIA sviluppata per la classificazione dei dati di telerilevamento (Blaschke, 2010).

In Tabella 1 sono elencati tutti i dati informativi topografici impiegati come input all'approccio OBIA.

La procedura per l'individuazione delle PRA è sintetizzabile nei seguenti passaggi:

1. Tutte le PRA sono identificate con il software Definiens Developer basato sullo strato Slope binary. Il risultato ottenuto deve essere interpretato come tutte le aree probabili di distacco derivate dalla pendenza del terreno;
2. Queste aree sono raggruppate (segmentate) in poligoni omogenei sulla base delle differenti esposizioni e

cambi di pendenza. Le PRA ottenute sono rappresentative per lo scenario di pericolo frequente;

3. Si procede quindi ad una fase di semplificazione: le PRA con un'area infe-

riore a 500 m² e / o con una pendenza media inferiore a 30° sono quindi eliminate;

4. Tutti i poligoni sono nuovamente segmentati e/o esclusi in base alle carat-

DATO	DESCRIZIONE
DTM	Modello digitale del terreno con risoluzione spaziale di 5 metri.
Hillshade	Rilievo ombreggiato del DTM utilizzato per la visualizzazione.
Slope	Pendenza tra 0° e 90 °
Slope binary	Questo strato binario è una combinazione della pendenza filtrata (> 28 ° e <60 °) e l'imprecisione del terreno. Le aree con rugosità del terreno troppo elevata (Sappington et al., 2007) sono escluse. Le soglie di pendenza delle zone probabili di distacco sono individuate tra i 26°-60° e la soglia per l'esclusione delle aree con rugosità del terreno elevata è ridotta.
Aspect sectors	Questo strato contiene le informazioni sull'esposizione delle celle classificate nei settori Nord, Nord-Est, Est, Sud-Est, Sud, Sud-Ovest, Ovest e Nord-Ovest.
Fold	Questo strato è una versione migliorata della curvatura del terreno e descrive la concavità delle celle del raster; questo strato è importante per individuare i forti cambiamenti nella curvatura del terreno che delineano le aree probabili di distacco.
Density	Per questo strato sono state analizzate circa 5000 aree di attacco valanghe mappate manualmente provenienti da tutta la Svizzera per quanto riguarda: pendenza, curvatura e rugosità. Da quest'analisi, è stata derivata una funzione di densità, che fornisce informazioni su quanto un pixel sia simile a quelli vicini presenti nelle zone di distacco.
Forest	Livello foresta binario (0 = no foresta, 1 = foresta). Questo strato viene utilizzato per eliminare le zone probabili di distacco che ricadono all'interno di un bosco con caratteristiche strutturali idonee alla difesa attiva.
Infrastructures	Livello binario (0 = no infrastrutture, 1 = infrastrutture). I tratti delle vie di comunicazione in galleria sono stati esclusi.

Tabella 1 - Dati derivati dal modello digitale del terreno impiegati come input nell'approccio OBIA.

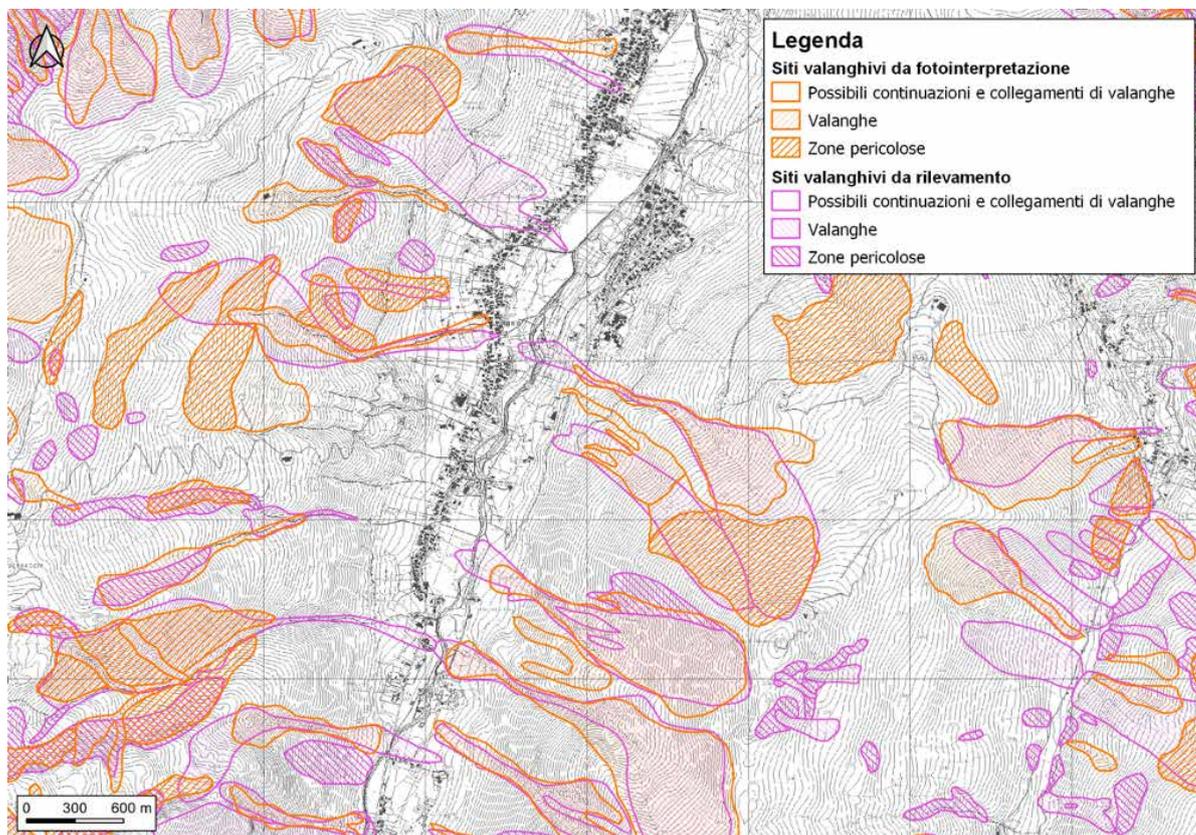


Fig. 1 - Esempio di carta di Localizzazione Probabile delle Valanghe (CLPV).

Fig. 2 - Esempio delle PRA calcolate per uno scenario estremo (a) e uno scenario frequente (b). In grigio sono indicate le PRA individuate all'interno delle zone attualmente forestate (in cui il bosco svolge la funzione di prevenzione attiva del distacco valanghe), in azzurro le PRA in territorio non coperto da bosco maturo.

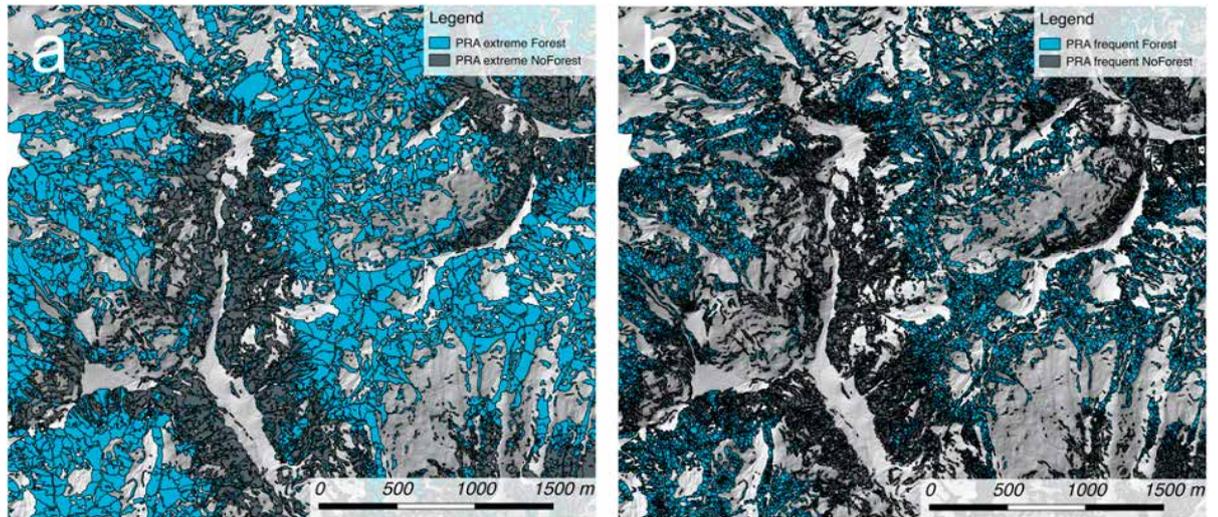
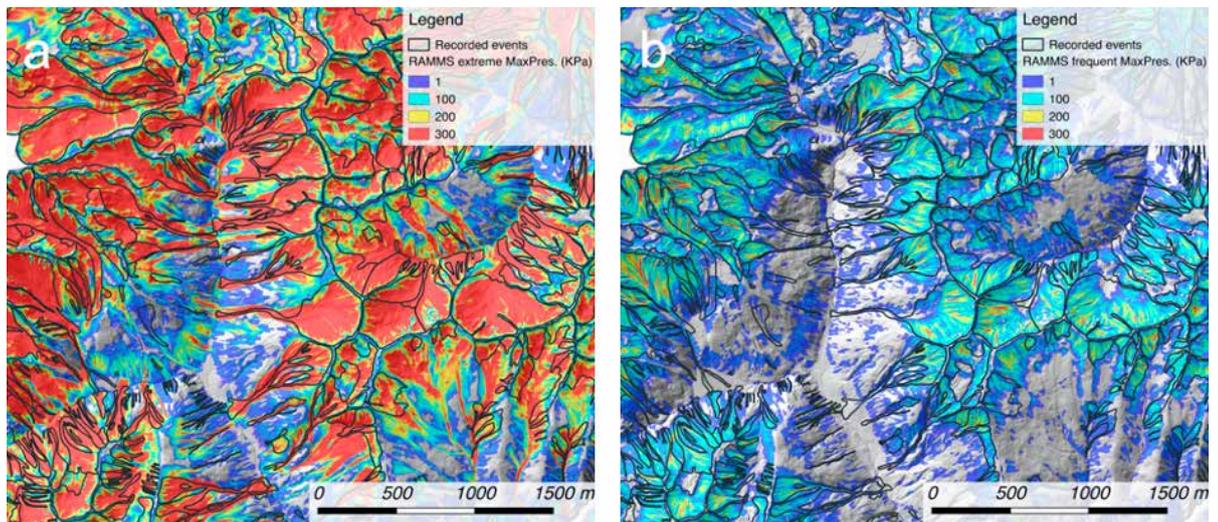


Fig. 3 - Esempio di output delle pressioni massime raggiunte dalle valanghe per lo scenario estremo (a) e quello frequente (b). Gli eventi registrati storicamente e mappati nelle CLPV sono delimitati in nero.



teristiche dello strato forest; 5. I poligoni delle PRA sono classificati in base alla loro esposizione (tramite lo strato aspect sectors); 6. Ora tutti i poligoni adiacenti con le medesime esposizioni sono da unire tra loro. Questa operazione è effettuata tramite un algoritmo di crescita delle PRA basato sugli strati density e slope. Ciò assicura che le PRA con pendenza e densità simili siano riunite. Grandi differenze nella pendenza e nella densità portano nuovamente alla separazione delle PRA; 7. Si procede infine con una nuova fase di semplificazione: i poligoni sono smussati ed eventuali piccoli buchi presenti all'interno dei poligoni eliminati. Alla fine di questo processo si ottengono le PRA utilizzabili per descrivere lo scenario estremo.

E' necessario, quindi, calcolare lo spes-

sore di distacco (d_0), utilizzato dal modello RAMMS per definire la massa di neve che caratterizza la valanga, derivandolo dalla variabile di aumento dell'altezza della neve al suolo nei tre giorni $\Delta H S 3$ (formula 1) secondo il metodo standard delle linee guide Svizzere (adottato anche dall'Associazione Italiana Neve e Valanghe A.I.N.E.V.A.) (Salm et al., 1990).

Per questo scopo sono stati utilizzati i dati nivo-meteorologici ottenuti secondo la metodologia descritta in precedenza.

Questi valori misurati in campi pianeggianti devono ora essere corretti sulla base dell'altitudine e della pendenza delle differenti PRA. Successivamente, il valore iniziale dello spessore di distacco d_0^* viene calcolato correggendolo con il coseno di 28° ($d_0^* = \Delta H S \times \cos 28^\circ$). Quindi è aggiunto uno strato basale di 0,2 m per lo scenario frequente e 0,5 m

per lo scenario estremo. Infine, la pendenza delle PRA ψ è presa in considerazione dalla funzione $f(\psi)$ (formula 2), supponendo che si possa accumulare meno neve in zone ripide rispetto alle aree più pianeggianti.

$$(1) d_0 = d_0^* \times f(\psi)$$

$$(2) f(\psi) = 0.291 / (\sin \psi - 0.202 \times \cos \psi)$$

Questo calcolo è eseguito su base poligonale, in base all'altitudine media e alla pendenza media di ciascun poligono di PRA. Questi valori sono direttamente utilizzati dall'algoritmo per la determinazione delle PRA OBIA (Fig. 2). Per questo motivo è stato creato uno script python per ArcGIS.

SIMULAZIONI DI DINAMICA DELLE VALANGHE

Le informazioni raccolte ed elaborate nelle fasi precedenti sono utilizzate per effettuare le simulazioni della dinamica

delle valanghe. I differenti scenari saranno ottenuti in funzione che si scelgano i valori di $\Delta HS3$, derivati alla quota e alla pendenza media della rispettiva PRA, con tempo di ritorno estremi o frequenti. Con il modello di simulazione della dinamica valanghe RAMMS si devono quindi simulare, una ad una, tutte le probabili valanghe, utilizzando i rispettivi valori di spessore di distacco. A tale scopo, è stato appositamente sviluppato un nuovo modulo di RAMMS, RAMMS :: LSHM (Large Scale Hazard Mapping). Una volta determinate le differenti PRA, queste sono suddivise in funzione alla loro dimensione in: Molto piccole ($T < 5000 \text{ m}^3$), Piccole ($S < 25'000 \text{ m}^3$), Medie ($M < 60'000 \text{ m}^3$) e Grandi ($L > 60'000 \text{ m}^3$). In funzione della dimensione delle PRA, si utilizzeranno i rispettivi parametri di attrito μ e ξ seguendo la procedura classica del modello RAMMS (Christen et al., 2010).

Output delle elaborazioni

Gli output principali delle simulazioni sono i raster di pressione, altezza massima e velocità di flusso delle valanghe (per un determinato tempo di ritorno) (Fig. 3).

Se per una cella del raster sono transitate più valanghe, è riportato il valore massimo di pressione raggiunto tra tutte le valanghe (non la somma). Ad esempio, nel raster con le velocità massime raggiunte dalle valanghe, se per un pixel sono transitate più valanghe, è riportato il valore massimo di velocità raggiunta tra tutte le valanghe.

Inoltre, è possibile esportare uno strato informativo in forma di shape file contenente tutte le linee perimetrali delle singole valanghe. Questo strato informativo è utile per poter ricondurre una zona interessata da una valanga alla rispettiva area di distacco.

Mappe indicative del pericolo come strumento di supporto ai Piani di Governo del Territorio

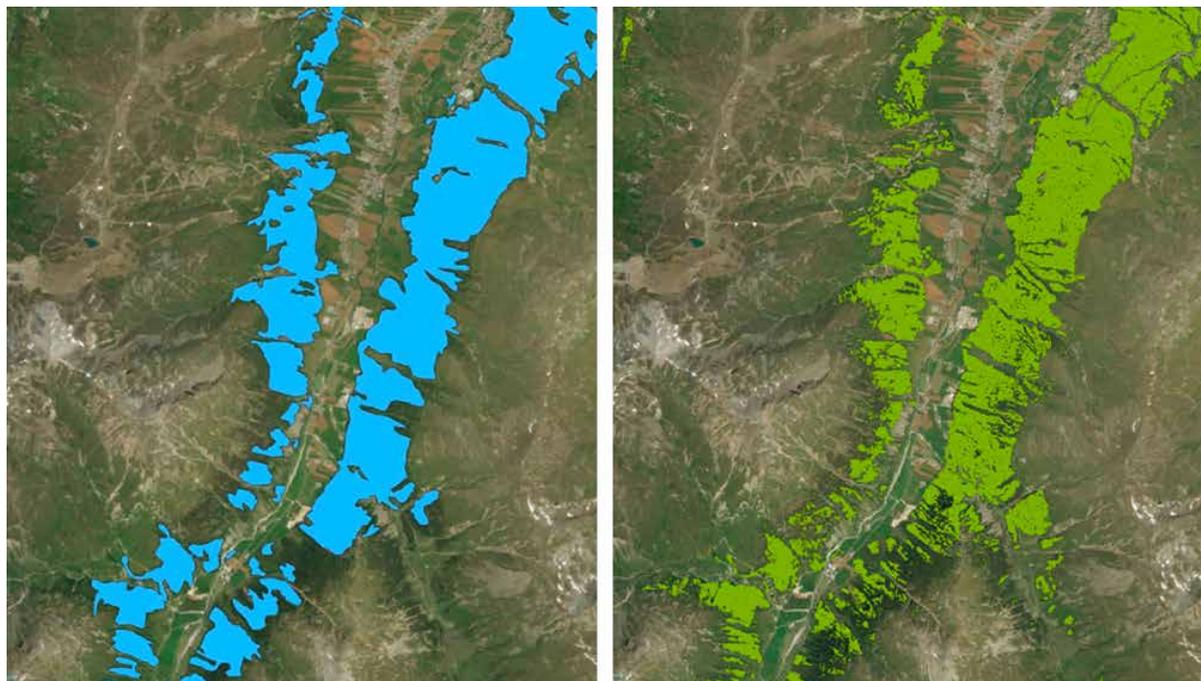
Per il Comune di Livigno (SO) è stata elaborata una mappa del pericolo indicativo

valanghe da utilizzare come supporto al proprio Piano di Governo del Territorio. Il centro abitato principale di Livigno è a 1816 m s.l.m. e il territorio, caratterizzato da un clima alpino continentale è storicamente interessato da fenomeni valan-

ghivi. Se per le vallate principali gli eventi valanghivi storici sono documentati da dati storici esaustivi, la stessa cosa non vale per il resto del territorio. Fino agli anni '50 l'abitato era isolato per diversi mesi l'anno, quindi anche la gente locale



Fig. 4 - Confronto tra il laser dell'uso e copertura del suolo 2018 (DUSAF 6.0) (destra) e il laser ottenuto dalla classificazione automatica tramite algoritmo di machine learning (sinistra).



non aveva modo di raccogliere informazioni esaustive per le aree più remote. Dalla seconda parte del secolo storico il piccolo abitato rurale si è trasformato in una località turistica molto sviluppata e rinomata a livello internazionale ed è sempre più marcata la necessità di disporre di strumenti che aiutino gli amministratori e i tecnici comunali a operare le scelte corrette per pianificare lo sviluppo del paese anche in termini di esposizione al pericolo valanghe.

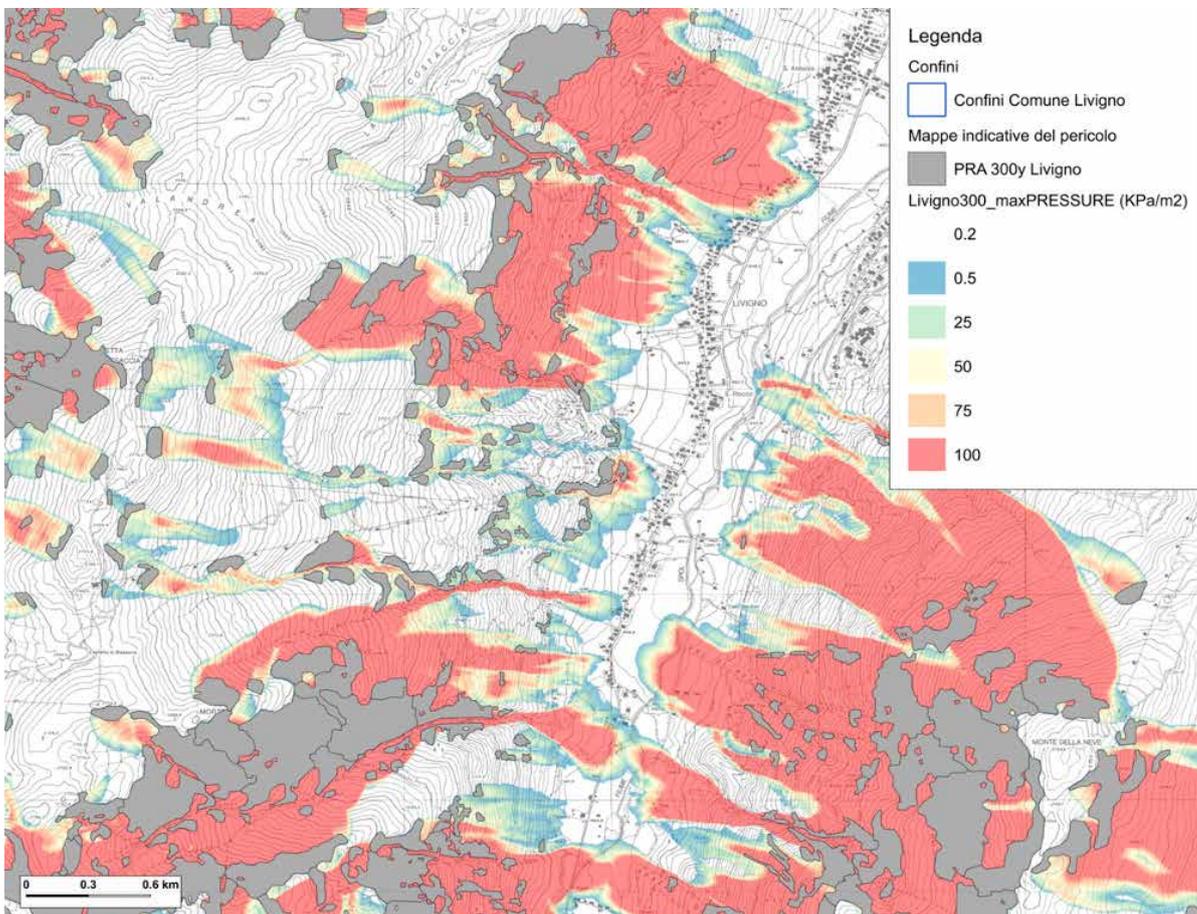
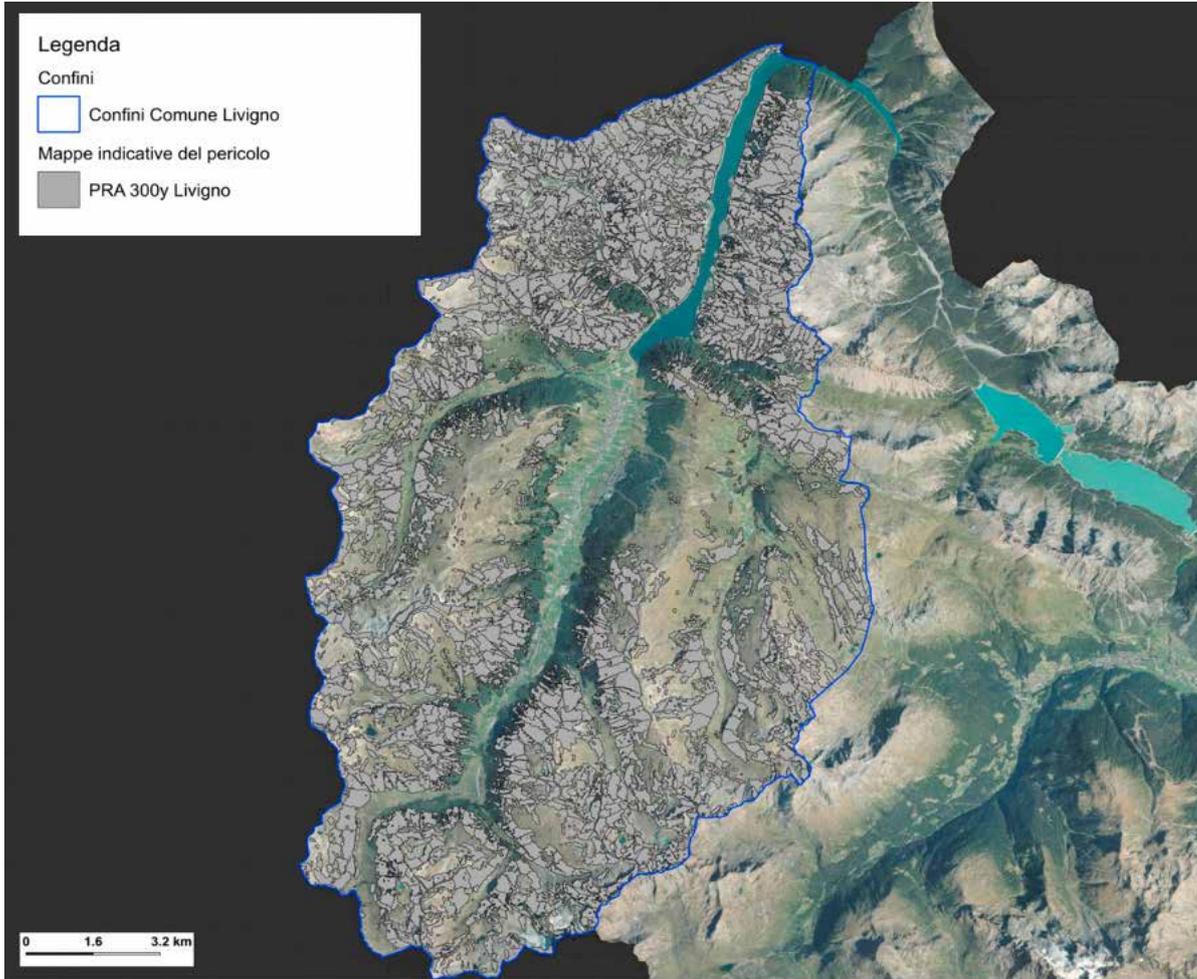
Da qui l'idea condivisa con Regione Lombardia di affiancare agli strumenti classici di pianificazione territoriale anche le mappe indicative del pericolo.

Queste non sono da intendersi vincolanti in termini urbanistici ma appunto come solo uno strumento indicativo del pericolo. Attualmente esistono delle chiare norme riguardanti le limitazioni urbanistiche da adottare inerenti agli eventi valanghivi storici presenti all'interno del catasto regionale valanghe e per i P.Z.E.V. Qualora però si voglia intraprendere una qualsiasi attività urbanistica al di fuori delle aree già attualmente assoggettate alle norme regionali e quindi anche alle norme del piano di governo del territorio comunale, ma che ricadono all'interno delle aree indicate come potenzialmente esposte al pericolo valanghe individuate dalle mappe indicative

del pericolo, sarà necessario, prima di procedere con una qualsiasi concessione, effettuare una perizia di dettaglio sul pericolo effettivo valanghe (es. P.Z.E.V.). L'elaborazione delle mappe indicative del pericolo è stata effettuata seguendo le procedure indicate nel capitolo precedente. L'unica particolarità ha riguardato la creazione dello strato informativo sull'attuale copertura forestale. Poiché, per il Comune di Livigno, lo strato informativo regionale (mappa dell'uso e copertura del suolo 2018 (DUSAF 6.0)) non presentava una risoluzione adeguata, questo è stato rielaborato partendo da immagini satellitari (immagini dal satellite Sentinel II nella banda del NIR, risoluzione 10 m ricampionata a 1 m) e immagini aeree (Ortofoto scattata nel visibile con risoluzione del pixel a 1m). Tali immagini sono state utilizzate per calcolare degli indici di vegetazione: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), RGBVI (Red-Green-Blue Vegetation Index), GLI (Gap Light Index), VARI (Visual Atmospheric Resistance Index) e NGRDI (Normalized Green Red Difference Index). Sono stati poi calcolati, partendo dall'ortofoto, anche dei raster caratterizzanti la texture delle immagini. Tutti questi raster sono stati utilizzati per allenare un algoritmo di machine learning basato sul metodo delle Random

Forest. Sono stati individuati dei poligoni di training che individuano quattro classi di copertura del suolo: foreste, cespuglieti, terreno alpino ed erba. Una volta elaborato tale algoritmo è stata classificata automaticamente tutto il territorio secondo le quattro classi definite in precedenza (Fig. 4). Quindi è stato effettuato un controllo manuale dei risultati e sono state corrette le discrepanze più evidenti.

Dalle informazioni a disposizione non era possibile valutare l'altezza da terra della copertura forestale. Per questa ragione, tutte le zone coperte da mughete sono state considerate come non forestate per lo scenario estremo così come le zone coperte da arbusteti o aree con una copertura forestale rada. Nonostante il raster della copertura forestale possa presentare errori di stima rispetto la reale copertura forestale, è stato ritenuto più opportuno utilizzare il raster di copertura forestale ottenuto dall'algoritmo di machine learning rispetto quello regionale di copertura del suolo. Queste problematiche possono portare ad una sovrastima o, in minor misura, a una sottostima delle aree di distacco. In Figura 5 è possibile osservare tutte le zone potenziali di distacco individuate automaticamente per lo scenario estremo (300 anni), il quale è coerente con



CARTOGRAFIA

lo scenario estremo indicato dalle linee guida svizzere per la zonazione delle aree di pericolo.

In figura 6 è riportato un dettaglio dei risultati ottenuti con le mappe indicative di pericolo nel quale sono visibili le aree di distacco per lo scenario estremo e i risultati delle relative simulazioni di dinamica delle valanghe (pressioni massime). Valutando i risultati ottenuti, è importante prendere in considerazione delle differenze sostanziali tra le mappe indicative del pericolo e i risultati i P.Z.E.V.:

I. Le opere di difesa attiva dal pericolo valanghe (es. opere fermaneve) non possono essere prese in considerazione nei processi di creazione delle mappe indicative del pericolo. Pertanto, in

corrispondenza di siti valanghivi per i quali sono state realizzate delle opere di difesa, tendenzialmente, si avrà una sovrastima delle zone di scorrimento e deposito.

II. Ogni zona di distacco è simulata indipendentemente dalle altre, questo significa che all'interno delle mappe indicative del pericolo le estensioni delle zone soggette a valanghe, i valori di pressione e di velocità si riferiscono a distacchi singoli e mai simultanei. Nelle zone in cui in passato sono stati registrati distacchi simultanei le mappe indicative del pericolo sotto-stimano l'estensione massima dell'area coinvolta dai potenziali fenomeni valanghivi.

III. Le simulazioni effettuate per le mappe indicative del pericolo non sono tarate e valutate manualmente per ogni sito valanghivo; esse sono frutto di processi automatici di calcolo. Questo significa che possono esserci delle differenze anche significative con la realtà. In particolare questo si evidenzia nell'individuazione delle zone di distacco.

IV. All'interno degli algoritmi utilizzati per la definizione delle zone di distacco, l'effetto dell'attività eolica, che in molti casi può radicalmente cambiare gli scenari di distacco, non è preso in considerazione: ad esempio, in corrispondenza di dorsali, normalmente, i fenomeni valanghivi sono molto rari e comunque l'attività eolica, che influenza il manto nevoso anche durante i singoli episodi precipitativi, spesso porta alla suddivisione dei distacchi in aree più piccole di quanto non è attualmente identificabile dai metodi automatici.

V. Gli effetti di attrito generati dalla presenza di copertura forestale (come da indicazioni presenti in letteratura scientifica) non sono considerati all'interno della simulazione della dinamica delle valanghe estreme. Questo può portare ad una sovrastima delle zone di arresto rispetto ai fenomeni realmente osservati.

VI. Per la realizzazione delle mappe non è considerata alcuna caratteristica del manto nevoso se non lo spessore

Fig. 7 - Mappa della Provincia Autonoma di Trento suddivisa in 5 micro-aree con le rispettive stazioni di misura manuali. Le aree micro-climatiche individuate sono: Bondone - Stivo - Paganella + Adamello Sud - Tremalzo + Prealpi - Piccole Dolomiti - Folgaria (B+A+F); Brenta - Tonale (BRENTA); Valle di Fiemme e Fassa (FIEMME); Lagorai - Primiero (LAGORAI); Val di Sole - Peio - Rabbi - Rumo (SOLE).

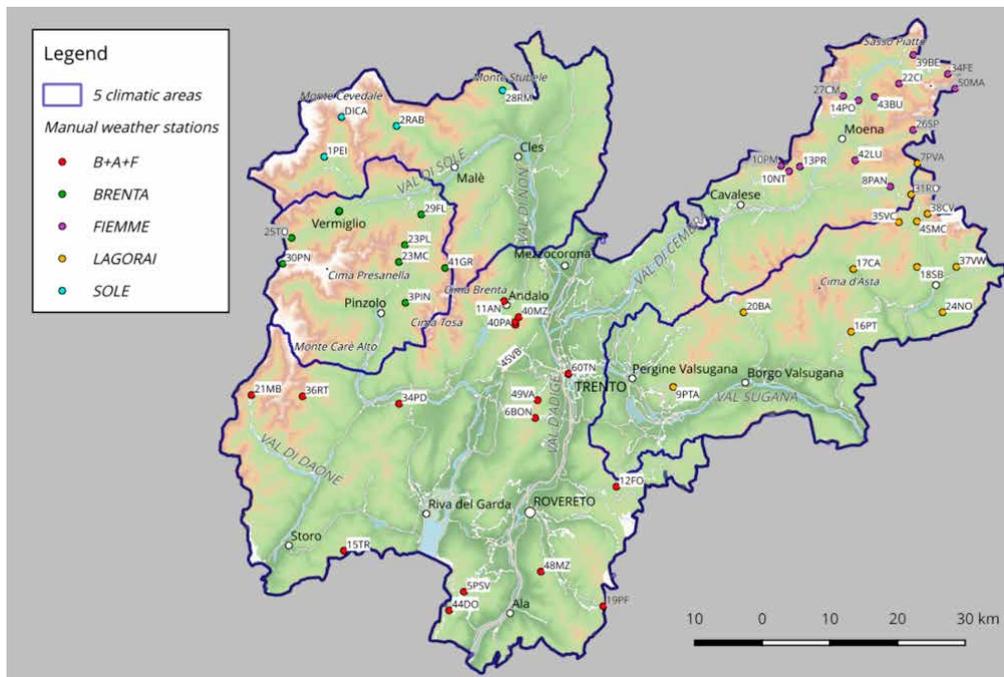
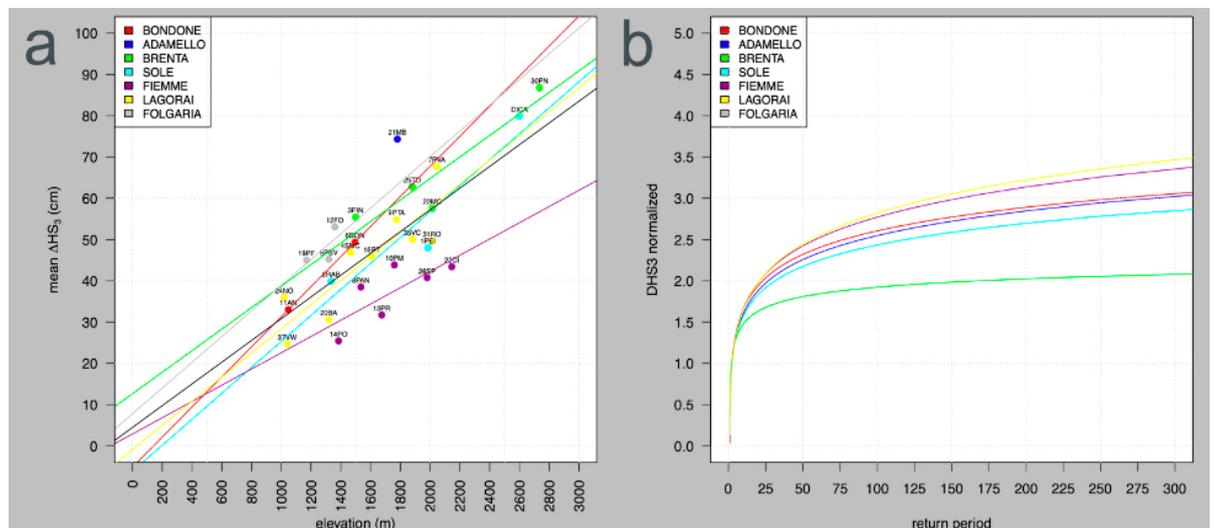


Fig. 8 - Dati di ΔH_{S3} delle singole stazioni in rapporto con la quota (a) e le distribuzioni Generalizzate dei Valori Estremi di ΔH_{S3} (GEV) per le diverse aree climatiche in funzione del tempo di ritorno (b).



di distacco in funzione della quota e pendenza dell'area di distacco stessa.

Per un determinato sito valanghivo o area esposta, nel caso di valutazioni professionali di dettaglio, si dovrà tenere conto di tutte queste limitazioni e distinguere per procedere ad una valutazione dell'effettiva esposizione al pericolo valanghe (ad esempio accumuli dovuti all'attività eolica). L'elenco sopra indicato è da considerarsi come punto di partenza per la ricerca delle motivazioni di eventuali incoerenze tra gli studi di dettaglio e le mappe indicative del pericolo.

Le mappe indicative di pericolo non possono essere utilizzate in alcun modo in sostituzione dei Piani di Zona Esposta a Valanga (P.Z.E.V.).

Le differenze tra queste due tipologie di strumenti sono sostanziali: le zone potenziali di distacco valanghe alla base delle mappe indicative del pericolo sono state calcolate automaticamente, partendo da un modello digitale del terreno con una risoluzione di 5 m x 5m. Seppure le aree siano state calcolate come descritto in precedenza, presentano delle limitazioni e delle differenze rispetto a quanto osservabile nella realtà e quanto realizzabile nel dettaglio da un professionista.

Tali mappe indicative del pericolo possono quindi essere utilizzate solo come base di partenza per approfondimenti puntuali operati dai singoli professionisti. A parte che per i casi considerati in precedenza, tendenzialmente le mappe indicative del pericolo tendono a sovrastimare piuttosto che sottostimare le valanghe attese, sono quindi uno strumento estremamente utile per evitare di sottostimare la pericolosità di una determinata area.

MAPPA DEL BOSCO DI PROTEZIONE

I boschi di montagna hanno una funzione molto importante nella protezione contro le valanghe (Brang et al., 2006). Le condizioni del bosco influiscono sia

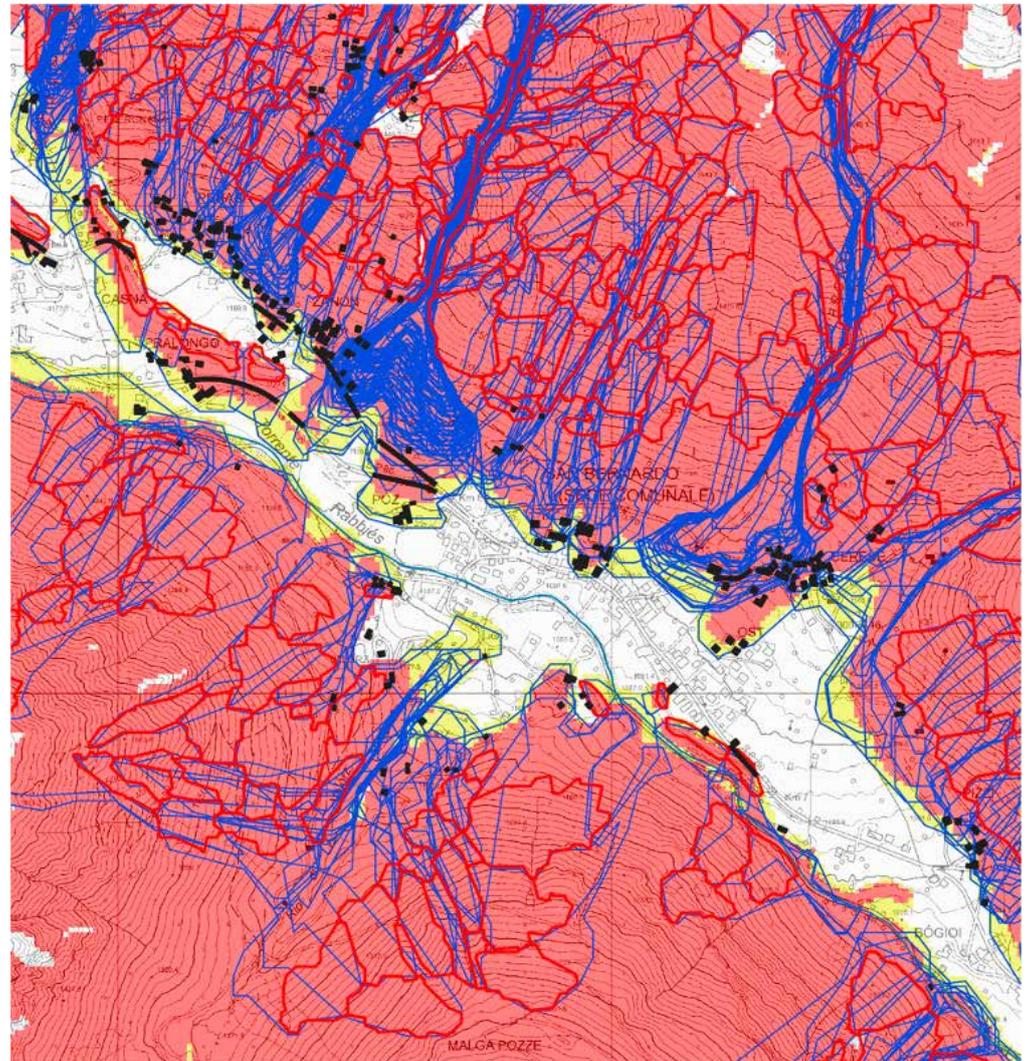


Fig. 9 - Potenziale interferenza valanghiva con le infrastrutture riconducibile alle zone di distacco attualmente mitigate dalla presenza di boschi di protezione.

sul distacco delle valanghe sia sul loro scorrimento; d'altra parte, le valanghe sono il disturbo più importante che colpisce gli ecosistemi montani (Bebi et al., 2009). La struttura forestale è un fattore chiave che condiziona la sicurezza delle aree abitabili e ne limita l'espansione in vaste aree delle Alpi (Bebi et al., 2001). La funzione di mitigazione attiva dei boschi ha la potenzialità di impedire completamente l'innescò di una valanga (Bebi et al., 2009); la funzione passiva (cioè l'aumento dell'attrito della massa nevosa in movimento) è invece abbastanza limitata o nulla in caso di eventi di grandi dimensioni (Teich et al., 2012). La corretta gestione dei boschi nei paesaggi montani soggetti a valanghe può essere un efficace approccio di mitigazione del rischio valanghe (Teich e Baby, 2009). L'identificazione dei boschi di protezione è quindi di importanza cruciale per definire adeguate misure tecniche e culturali

in grado di mantenere o migliorare la loro funzione.

Gli studi di dettaglio (come i PZEV) consentono di identificare con precisione il bosco con funzione protettiva, ma a causa dei loro costi sono applicati solo a situazioni molto definite e critiche (Gruber e Margreth, 2001). Anche se le carte indicative del pericolo sono meno dettagliate e precise delle carte dei pericoli, esse possono fornire una panoramica spaziale continuativa del pericolo di valanghe sulla base di simulazioni numeriche in grandi regioni (Bühler et al. 2018) e possono essere lo strumento migliore per identificare i boschi che svolgono una funzione protettiva contro le valanghe su grandi superfici. Considerando i limiti evidenziati anche in precedenza, la precisione di questo strumento è comunque sufficientemente adeguata per individuare corrette politiche di gestione del patrimonio forestale.

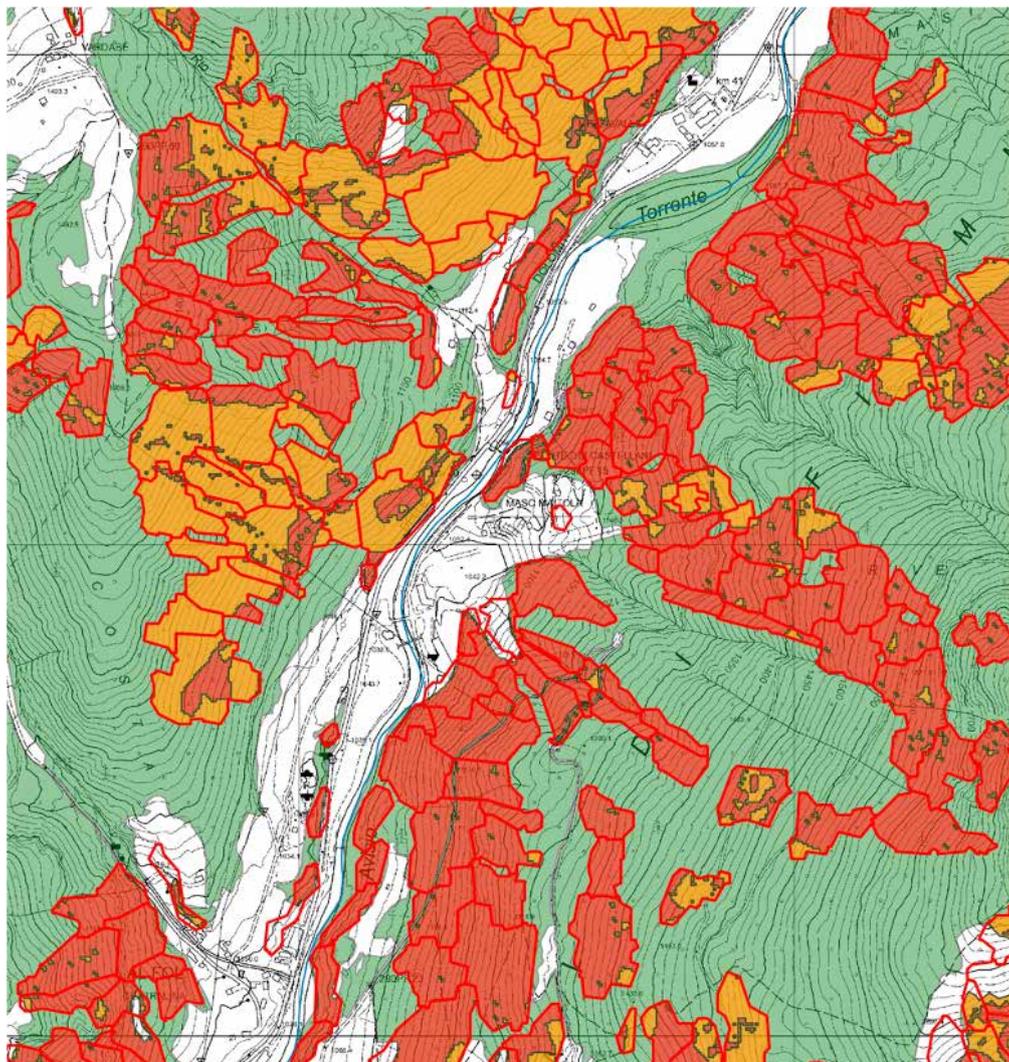


Fig. 10 - Mappa nella quale è visibile: in verde, il bosco; in rosso, il bosco di protezione attiva e già efficace; in arancio, le aree di bosco che potrebbero svolgere una funzione di protezione attiva ma attualmente presentano una copertura forestale insufficiente.

Nel 2004, le mappe indicative del pericolo sono state utilizzate per la prima volta nella valutazione delle funzioni di protezione dei boschi nell'ambito del progetto SilvProtect in Svizzera (Gruber e Baltenweiler 2004). Su incarico del Servizio Foreste e Fauna - Provincia Autonoma di Trento, nel 2019 la società Alpsolut con la collaborazione del WSL Istituto per lo studio della Neve e valanghe SLF, ha utilizzato un approccio automatizzato per la mappatura del pericolo valanghe per identificare le foreste che svolgono un ruolo protettivo nella mitigazione del rischio valanghe nella Provincia di Trento (Italia) all'interno del progetto europeo Rock the Alps.

Nella prima fase è stato necessario suddividere il territorio provinciale in zone climatiche omogenee. Il numero di serie storiche disponibili per questo processo è stato l'elemento chiave per individuare l'estensione di tali aree. Sostanzialmente

è stato necessario trovare un compromesso tra i dati disponibili utili a caratterizzare le condizioni nivo-climatiche e l'auspicio di poter dettagliare nel modo più realistico possibile l'intero territorio. In Figura 7 sono riportate la mappa del territorio provinciale, suddivisa in 5 zone climatiche e le stazioni di misura dei dati nivologici con serie temporali sufficientemente estese per fornire indicazioni statistiche robuste. In Figura 8 sono visibili i dati di $\Delta HS3$ delle singole stazioni in rapporto con la quota (a) e la distribuzione Generalizzata dei Valori Estremi di $\Delta HS3$ (GEV) per le diverse aree climatiche in funzione del tempo di ritorno (b).

Per questo progetto era disponibile uno strato informativo di dettaglio riguardante la copertura forestale. Questo è stato ricavato partendo dai rilievi LIDAR effettuati in differenti campagne (a partire dal 2014) e aggiornato con

fotografie aeree scattate in tempi differenti (le più recenti effettuate nel corso del 2018). La risoluzione spaziale di tale prodotto è di 1m. Per l'individuazione della copertura forestale in grado di mitigare il pericolo valanghe sono state selezionate le aree aventi una percentuale di copertura delle chiome maggiore del 50%, con un'altezza delle piante superiore ai 2 m (Frehner et al., 2005). L'informazione dell'altezza delle chiome è stata ricavata da un modello dell'altezza della copertura forestale (CMH) ricavato sottraendo le informazioni contenute nei rilievi LIDAR da quelle contenute nel DTM. Per la realizzazione delle analisi sopra descritte, il raster è stato esaminato tramite una finestra spaziale di 10 celle, ottenendo così informazioni con un dettaglio spaziale di 10m.

Le aree potenziali di distacco sono state individuate per due scenari: uno frequente (con un tempo di ritorno trentennale) e uno scenario estremo (con un tempo di ritorno centennale). Queste aree potenziali di distacco sono state individuate sia considerando il territorio con copertura forestale sia considerandolo senza. I boschi che ricadono in aree potenziali di distacco nello scenario privo di copertura forestale hanno una vocazione protettiva da valanghe. Laddove le simulazioni di dinamica delle valanghe con il modello RAMMS, effettuato per ogni singola PRA, intersecano infrastrutture potenzialmente esposte, il bosco può svolgere una funzione protettiva effettiva (Fig.9). Questa si esprime in modo attivo laddove la copertura e la struttura siano già sufficienti (Fig.10), mentre laddove la struttura del bosco sia insufficiente si possono orientare le caratteristiche dei popolamenti forestali verso strutture più efficienti attraverso la gestione (Fig.11).

PERICOLOSITÀ VALANGHE INDOTTA DALLA TEMPESTA VAIA

Nei giorni 27-29 ottobre 2018 la tempesta di Vaia ha principalmente interessato

le regioni italiane del nord-est (Trentino Alto Adige, Veneto, Friuli Venezia, Lombardia) con raffiche di vento spesso superiori ai 200 km/h; in particolare nella serata del terzo giorno si sono manifestate le raffiche più violente che hanno prodotto schianti forestali su superfici molto estese.

Nel complesso sono stati stimati 42.500 ha (Chirici et al., 2019) di boschi danneggiati, nel solo territorio della Provincia autonoma di Trento sono stati colpiti 19.500 ha di foreste per circa 4 milioni di metri cubi di legname (Figura 12), e di essi almeno 12.500 ha con danni superiori al 50%.

Nelle zone montane questo ha determi-

nato il disboscamento integrale di interi versanti causando la formazione di nuove aree prone al distacco di valanghe. Nel settembre 2019 la società Alpsolut, in collaborazione con WSL Istituto per lo studio della Neve e valanghe SLF, è stata incaricata dal Servizio Prevenzione Rischi della Provincia Autonoma di Trento della realizzazione di uno studio per l'individuazione delle zone potenziali di distacco e simulazione delle valanghe per le aree soggette agli schianti forestali in seguito alla tempesta Vaia. Il progetto consiste nella realizzazione di mappe di indicazione del pericolo basate sulla simulazione di dinamica delle valanghe per tutte le aree interes-

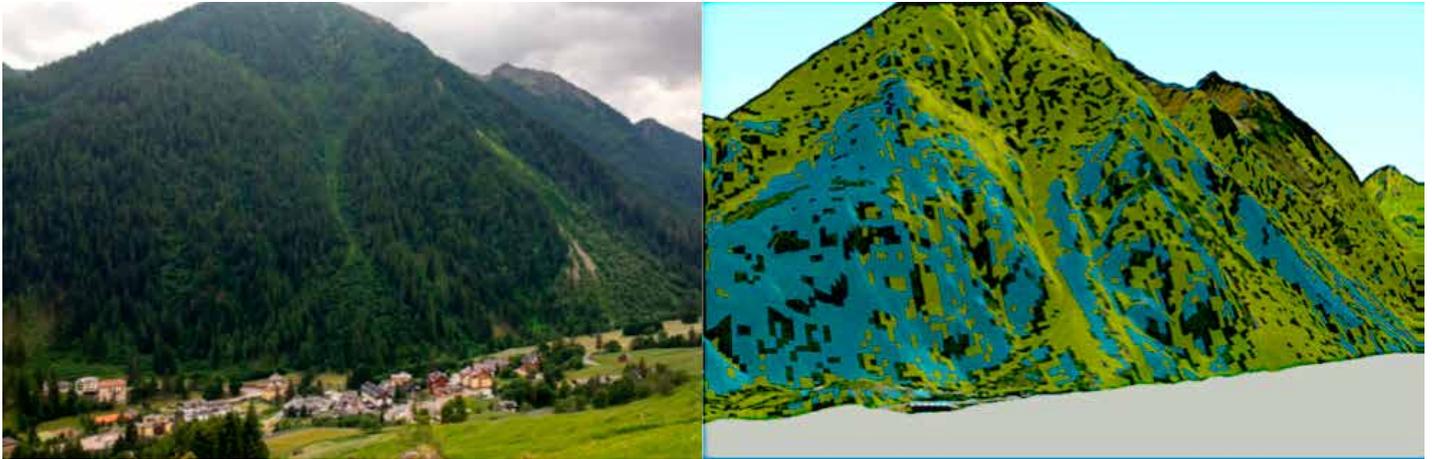
sate dagli schianti forestali dovuti alla tempesta. L'obiettivo finale è quello di individuare tutti i nuovi siti valanghivi creatisi in seguito alla perdita della funzione di mitigazione attiva dei boschi e discriminarli in funzione alla possibilità che questi potrebbero interessare delle infrastrutture.

Tali mappe vogliono essere di supporto alle indagini e ai processi decisionali atti a identificare le priorità di intervento per il monitoraggio e per la messa in sicurezza dei nuovi siti valanghivi.

Le mappe indicative del pericolo, calcolate per lo scenario con tempo di ritorno di 10 anni (Fig. 13), sono utili a identificare tutte le infrastrutture esposte alle

*Dall'alto:
Fig. 11 - Confronto tra un'immagine di versante forestato caratterizzato da più siti valanghivi (destra) e la relativa rielaborazione tridimensionale (destra) dove sono evidenziati i boschi in grado di fornire un'azione di protezione attiva (azzurro) e quelli che invece non garantiscono tale azione per lo scarso grado di copertura o per l'insufficiente altezza (verde chiaro).*

Fig. 12 - Abitato di Predazzo (Tn), sono visibili tutte le aree caratterizzate dagli schianti forestali dovuti alla tempesta Vaia.



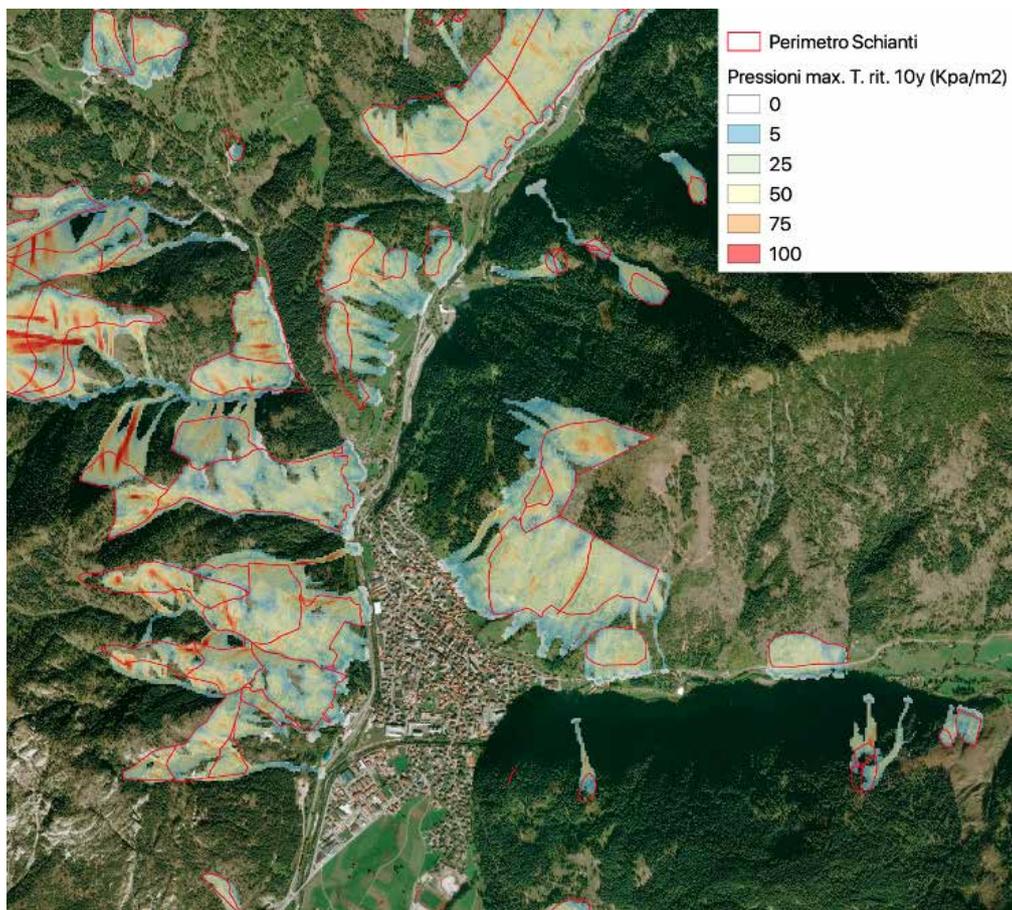


Fig. 13 - Mappe indicative del pericolo calcolate nelle zone interessate dagli schianti della tempesta Vaia per lo scenario con tempo di ritorno di 10 anni.

valanghe che possono verificarsi con un innevamento relativamente frequente. A questi siti valanghivi si deve dare priorità sia in termini di azioni di monitoraggio sia di realizzazione di opere di difesa. Le mappe indicative del pericolo calcolate invece per lo scenario con tempo di ritorno di 100 anni (Fig. 14) sono utili per individuare tutte le infrastrutture che potrebbero essere esposte a pericolo in caso di eventi eccezionali.

Potenzialità e limiti delle mappe indicative del pericolo

La validazione delle mappe indicative del pericolo è molto complessa, soprattutto per quanto riguarda le simulazioni estreme, in quanto i dati di riferimento significativi sono abbastanza limitati. Le valutazioni qualitative e parzialmente quantitative dei risultati indicano però una buona corrispondenza ed evidenziano le buone potenzialità dell'approccio (Compagnoni, 2020).

Il grado di precisione necessario alla pianificazione territoriale non permette l'impiego delle mappe indicative del pe-

ricolo (Fig. 15), tuttavia queste possono essere utilizzate come uno strumento di supporto per disciplinare la trasformazione urbanistica in aree dove non sono disponibili sufficienti informazioni storiche sugli eventi valanghivi.

Inoltre, queste mappe possono essere impiegate per quantificare il rischio valanghe in aree anche molto estese, mettendo in relazione le zone potenzialmente esposte al pericolo con le strutture e le infrastrutture presenti. Per quanto riguarda l'identificazione delle zone potenziali di distacco, vi sono margini di miglioramento sia integrando algoritmi che possano prendere in considerazione anche gli effetti dell'attività eolica sia migliorando la suddivisione delle stesse in funzione di caratteristiche del terreno che non prevedano la pre-classificazione in classi (es. classificazione delle esposizioni in 8 classi).

Allo stato attuale, non è ancora possibile impiegare questi approcci come strumento di supporto alla valutazione

Bibliografia

- Barbolini, M., Gruber, U., Keylock, C. J., Naaïm, M., and Savim, F.: Application of statistical and hydraulic-continuum dense-snow avalanche models to five real European sites, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 31, 133–149, 2000.
- Barbolini, M., Pagliardi, M., Ferro, F., and Corradeghini, P.: Avalanche hazard mapping over large undocumented areas, *Natural Hazards*, 56, 451–464, 10.1007/s11069-009-9434-8, 2011.
- Bebi, P., Kienast, F., and Schönenberger, W.: Assessing structures in mountain forests as a basis for investigating the forests dynamics and protective function. *Forest Ecology and Management*, 145: 3–14, 2001.
- Bebi, P., Kulakowski, D., and Rixen, C.: Snow avalanche disturbances in forest ecosystems—State of research and implications for management. *Forest Ecology and Management*, 257(9): 1883–1892, 2009.
- Blaschke, T.: Object based image analysis for remote sensing, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65, 2–16, 10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004, 2010.
- Brang, P., Schönenberger, W., Frehner, M., Schwitter, R., Thormann, J.-J., Wasser, B.: Management of protection forests in the European Alps: an overview. *Forest Snow and Landscape Research* 80, 23–44, 2006.
- Brang, P., Schönenberger, W., Frehner, M., Schwitter, R., Thormann, J.-J., Wasser, B.: Management of protection forests in the European Alps: an overview. *Forest Snow and Landscape Research* 80, 23–44, 2006.
- Bühler, Y., Kumar, S., Veitinger, J., Christen, M., Stoffel, A., and Snehmani: Automated identification of potential snow avalanche release areas based on digital elevation models, *Natural Hazards and Earth System Science*, 13, 1321–1335, 10.5194/nhess-13-1321-2013, 2013.
- Bühler, Y., von Rickenbach, D., Christen, M., Margreth, S., Stoffel, L., Stoffel, A. and Kühne, R. Linking modelled potential release areas with avalanche dynamic simulations: An automated approach for efficient avalanche hazard indication mapping, *International Snow Science Workshop ISSW*, Innsbruck, Austria, 2018a.
- Bühler, Y., von Rickenbach, D., Stoffel, A., Margreth, S., Stoffel, L., & Christen, M. (2018). Automated snow avalanche release area delineation-validation of existing algorithms and proposition of a new object-based approach for large-scale hazard indication mapping. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 2018(12).

Nella pagina a fianco: Fig. 14 - Mappe indicative del pericolo calcolate nelle zone interessate dagli schianti della tempesta Vaia per lo scenario con tempo di ritorno di 100 anni.

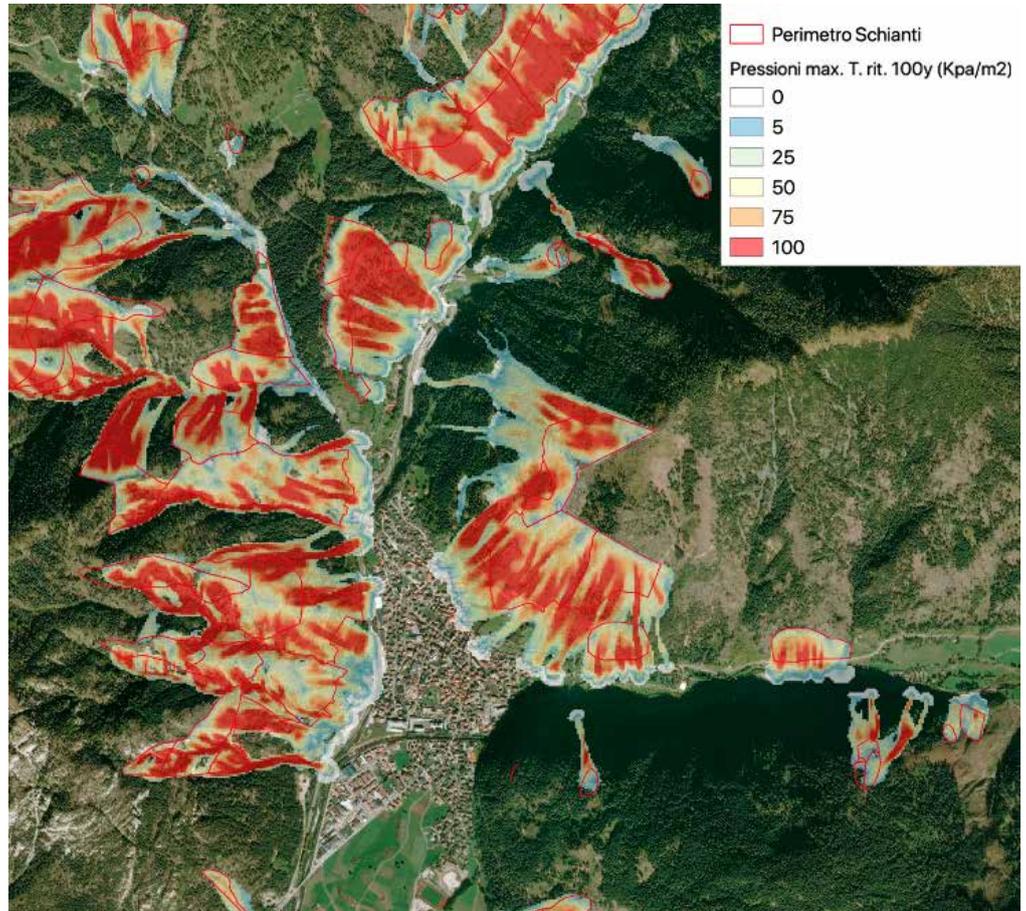
in tempo reale del pericolo valanghe: se da una parte esiste la necessità di avere DTM con risoluzioni maggiori per migliorare l'identificazione delle zone di distacco, dall'altra c'è la difficoltà dei modelli di dinamica delle valanghe attualmente impiegabili dai processi automatici a risolvere le simulazioni su dati spaziali molto risolti e con spessori di distacco ridotti (compatibili a scenari di innevamento frequenti).

Ringraziamenti

Ringraziamo in particolare Daniele Bocchiola, Sergio Benigni, Lukas Stoffel, Stefan Margreth e Igor Chiambretti per il loro supporto tecnico.

Ringraziamo anche il Servizio Foreste e Fauna e il Servizio Prevenzione Rischi della Provincia Autonoma di Trento, nonché il Comune di Livigno per il sostegno economico.

Infine un sentito ringraziamento anche ai nostri partner: Ufficio turistico di Livigno, BlackDiamond e Pieps.



- Chirici G., Giannetti F., Travaglini D., Nocentini S., Francini S., D'Amico G., Calvo E., Fasolini D., Broll M., Maistrelli F., Tonner J., Pietrogiovanna M., Oberlechner K., Andriolo A., Comino R., Faidiga A., Pasutto I., Carraro G., Zen S., Contarin F., Alfonsi L., Wolynski A., Zanin M., Gagliano C., Tonolli S., Zoanetti R., Tonetti R., Cavalli R., Lingua E., Pirotti F., Grigolato S., Bellingeri D., Zini E., Gianelle D., Dalponte M., Pompei E., Stefani A., Motta R., Morresi D., Garbarino M., Alberti G., Valdevit F., Tomelleri E., Torresani M., Tonon G., Marchi M., Corona P., Marchetti M.: Forest damage inventory after the "Vaia" storm in Italy, 2019.
- Christen, M., Kowalski, J., and Bartelt, P.: RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain, *Cold Regions Science and Technology*, 63, 1 - 14, 10.1016/j.coldregions.2010.04.005, 2010.
- Chueca Cía, J., Andrés, A. J., and Montañés Magallón, A.: 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, 203-210, 10.1080/17445647.2013.870501, 2014.
- Compagnoni L.: Confronto tra mappatura manuale e mappatura automatica per la definizione del pericolo valanghe. Caso di studio : comune di Livigno. Tesi magistrale, Politecnico di Milano, a.a. 2019/2020.
- Cordola, M., and Tecilla G.: Linee guida metodologiche per la perimetrazione delle aree esposte al pericolo di valanghe. Eds. Massimiliano Barbolini, and Luigi Natale. Pavia, 2005.
- Cunnane, C.: Statistical Distribution for Flood Frequency Analysis. WMO- Operational Hydrology Report, No. 33, 61 pp, 1989.
- Frehner, M., Brächt, W., Schwitler, R.: Continuità nel bosco di protezione e controllo dell'efficacia (NaiS). Istruzioni per le cure nei boschi con funzione protettiva, Ambiente-Esecuzione. Ufficio federale dell'ambiente, delle foreste e del paesaggio, Berna, 564 p, 2005.
- Gruber, U. and Baltensweiler, A.: SilvaProtect-CH, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, Schweiz, 2004.
- Gruber, U. and Baltensweiler, A.: SilvaProtect-CH, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, Schweiz., 2004.
- Gruber, U., Margreth, S.: Winter 1999: a valuable test of the avalanche-hazard mapping procedure in Switzerland. *Annals of Glaciology* 32, 328-332, 2001.
- Hosking, J.M.R. and Wallis J.R.: Regional Frequency Analysis. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 224 pp, 1997.
- Kite, G.W.: Frequency and Risk analysis in Hydrology, Littleton, CO, Water Resources Publications, No. 224; 1988.
- Lu, L.H. and Stedinger R.: Variance of Two- and Three- Parameter GEV/PWM Quantile Estimator: Formulae, Confidence Intervals and a Comparison. *Journal of Hydrology*, 138, 247-267, 1992.
- Maggioni, M. and Gruber, U.: The influence of topographic parameters on avalanche release dimension and frequency. *Cold Regions Science and Technology*, 37(3): 407-419, 2003.
- Maione, U. and Moisélo, U.: Elementi di statistica per l'idrologia. La Goliardica Pavese Ed., Pavia, 299 pp, 1993.
- Pistocchi, A., and Notarnicola, C.: Data-driven mapping of avalanche release areas: A case study in South Tyrol, Italy, *Natural Hazards*, 65, 1313-1330, 10.1007/s11069-012-0410-3, 2013.
- Rudolf-Miklau, F., Sauer Moser, S., and Mears, A.: The Technical Avalanche Protection Handbook, Wiley-VCH, Berlin, Germany, 2014.
- Salm, B., Burkhard, A. and Gubler, H.U.: Berechnung von Fließlawinen. Eine Anleitung für den Praktiker mit Beispielen, Eidgenössisches Institut für Schnee und Lawinenforschung SLF, Davos, 1990.
- Teich, M., and Bebi, P.: Evaluating the benefit of avalanche protection forest with GIS-based risk analyses—A case study in Switzerland. *Forest Ecology and Management*, 257(9): 1910-1919, 2009.
- Teich, M., Bartelt P., Grêt-Regamey A., and Bebi P.: Snow avalanches in forested terrain: influence of forest parameters, topography and avalanche characteristics on runout distance. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 44:509-519, 2012.
- Veitinger, J., Purves, R. S., and Sovilla, B.: Potential slab avalanche release area identification from estimated winter terrain: a multi-scale, fuzzy logic approach, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16, 2211-2225, 10.5194/nhess-16-2211-2016, 2016.