

STAR

Un modello statistico in ambiente GIS

Alessandro Ghinoi

Dip. di Scienze della Terra,
Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia
Largo S.Eufemia, 19
41100 Modena
e-mail: ghinoi.alessandro@unimore.it

Il presente articolo descrive una metodologia per la localizzazione delle zone maggiormente predisponenti all'instabilità del manto nevoso in particolari condizioni meteorologiche e alla scala di una porzione di valle alpina. La localizzazione si basa sull'analisi statistica dei rapporti esistenti tra tutte le possibili combinazioni di elementi topografici (s.l.) e le zone di distacco delle valanghe del passato. L'ambiente di elaborazione delle carte utilizzate è costituito da due diversi software di Sistemi Informativi Territoriali (GIS); l'analisi dei dati è stata affidata ad un apposito software. I risultati delle analisi statistiche sono stati verificati su zone di distacco di prova e confrontati utilizzando particolari grafici.

Dal confronto sono scaturite tre carte di suscettibilità, una per ogni scenario meteorologico considerato, in cui sono evidenziati i pixel a maggior valore di suscettibilità per l'intera area di studio. Le verifiche effettuate hanno mostrato come da queste carte ci si possa ragionevolmente attendere una capacità di localizzare percentuali superiori al 60% delle zone di distacco future.



**Un metodo per la valutazione della
susceptibilità valanghiva naturale**

TER





Stabilire quali zone siano maggiormente suscettibili al distacco di neve alla scala di una porzione di valle alpina è senza dubbio un'operazione non facile. Ai fini di una pianificazione territoriale è però un'operazione quanto mai desiderabile, specialmente in aree montuose densamente popolate. L'importanza è ancor maggiore laddove in gioco vi siano anche forti interessi economici, come nel caso dei comprensori sciistici. Ad esempio, l'interruzione (anche per pochi giorni) di un'importante via di accesso ad uno di questi comprensori da parte di una valanga può determinare perdite economiche rilevanti. Per non parlare dei danni alle strutture e ai rischi a cui sciatori, escursionisti e amanti del fuoripista possono essere soggetti, sebbene questi sportivi siano a volte la causa stessa delle slavine di cui sono vittime.

Uno strumento molto utile e già entrato da tempo nella consuetudine della pianificazione territoriale è rappresentato dalle carte della localizzazione probabile delle valanghe (C.L.P.V.). In questo documento cartografico sono riportati tutti i tracciati di valanga individuabili attraverso il riconoscimento, da fotografie

aeree, dei segni lasciati (principalmente nella vegetazione) dal passaggio di valanghe del passato. Il riconoscimento deve essere poi confermato e implementato dal rilevamento di campagna, affiancato dalla testimonianza di un abitante locale, possibilmente fornito di buona memoria storica.

Al di là dei limiti che possono essere riconosciuti a questo strumento, ma che non ne inficiano certo l'estrema utilità, le C.L.P.V. non sono adatte (e, del resto, non rientra nemmeno nelle loro finalità) a risolvere un problema ben più specifico quale è quello testé introdotto: delimitare, cioè, quelle zone che, più di tutte le altre (in una determinata porzione di valle alpina), favoriscono l'instabilità del manto nevoso. Va da sé che le zone in questione saranno le sole zone di distacco. Concentrare l'attenzione sulle sole zone di distacco è di indubbia importanza poiché ogni conseguente studio di dinamica valanghiva (e quindi ogni analisi del rischio) non può prescindere da questo dato.

In questo studio, frutto di una ricerca durata tre anni e che ha portato al conseguimento del titolo di dottore di ricerca

presso l'Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, si è cercato di risolvere proprio questo problema.

L'approccio utilizzato si basa sull'esame delle zone di distacco delle valanghe del passato. Tali zone sono descritte all'interno del catasto valanghe (Modello 7 AINEVA). Sebbene il catasto non costituisca una banca dati statisticamente ideale per questo particolare studio, perché solo le valanghe prossime ad elementi vulnerabili sono in esso registrate, è però soddisfacente per la precisione descrittiva delle zone di distacco: quota massima del distacco, larghezza e superficie della zona di distacco e spessore dello strato nevoso staccatosi.

Le zone di distacco del passato possono rivelare informazioni estremamente interessanti se sovrapposte ad elementi topografici (s.l.) che in qualche modo siano correlabili con l'instabilità del manto nevoso: ad esempio l'inclinazione del pendio, l'esposizione del versante, la presenza di concavità o convessità o di determinati tipi vegetazionali ecc. Tali elementi, proprio perché considerabili costanti nel tempo (diversamente dalla distribuzione del manto nevoso e delle sue proprietà, estremamente variabili sia nel tempo che nello spazio) possono essere rappresentabili cartograficamente ed analizzati all'interno di un Sistema Informativo Territoriale in rapporto alle zone di distacco del passato. E' spesso, però, la combinazione di questi elementi a far sì che una certa porzione di territorio sia maggiormente predisponente all'instabilità del manto nevoso.

Quello che si è tentato di scoprire, in questo studio, è proprio la relazione esistente tra tutte le possibili combinazioni di elementi topografici e le zone di di-

stacco del passato; questo con la speranza di prevedere dove, in futuro, possono preferibilmente verificarsi nuovi distacchi utilizzando, come indicatore, il solo fattore topografico. E' lampante la grande potenzialità di questo tipo di previsione, una volta verificatane la validità: basterebbero alcune carte facilmente reperibili e una sufficiente banca dati catastale per individuare una possibile distribuzione spaziale delle zone potenzialmente sedi d'instabilità per il manto nevoso.

Con questo non si pretende di prevedere quando (previsione temporale) un certo volume di neve potrà staccarsi, poiché questo richiede ovviamente dati ben precisi riguardanti le condizioni del manto nevoso e la situazione meteorologica precedente il distacco. Si vuole invece cercare di capire quali siano le caratteristiche topografiche che, per così dire, preparano la strada all'instaurarsi di condizioni instabili per il manto nevoso (previsione spaziale).

Si potrebbe obiettare che nemmeno quest'ultima questione può essere risolta prescindendo dalla conoscenza di dati riguardanti la "storia" meteorologica di una certa zona e delle condizioni della neve. Questo è senz'altro vero e per questo si è cercato, nella selezione e nell'analisi dei dati, di tener conto anche di questi due importantissimi fattori.

Per la creazione della banca dati cartografica e per l'elaborazione delle carte derivate sono stati utilizzati i GIS ArcGis 8.2® (ESRI, 2001) e ILWIS 3.11® (ITC, 2001), mentre per l'analisi statistica dei dati spaziali è stato utilizzato il software SPMS® (Chung, 2003). L'area di studio scelta per la sperimentazione comprende l'Alta Val Badia e zone limitrofe. E' un'area rettangolare di circa

235 km², delimitata ad ovest dal paese di Selva di Valgardena (Wolkenstein), ad est dal Passo Valparola, a nord dall'abitato di La Villa e a sud dal Passo Campolongo.

DESCRIZIONE DEL METODO DI STUDIO

L'idea di fondo è quella di sviscerare dalle zone di distacco del passato, sede quindi certa d'instabilità per il manto nevoso, tutte le caratteristiche topografiche (s.l.) cui, dalla letteratura, è riconosciuto un ruolo fondamentale nel preparare le condizioni che portano all'innesco di valanghe. Questa prima osservazione viene

fatta semplicemente isolando, dai poligoni rappresentanti i tracciati di valanga del catasto, le zone di distacco e sovrapponendole di volta in volta ad una carta rappresentante un singolo elemento topografico. Ad esempio, se si considera l'elemento topografico "inclinazione del pendio", questo sarà rappresentabile, su carta, da una serie di poligoni (o pixel = poligoni quadrati della medesima dimensione). Ognuno di questi pixel avrà un unico valore di pendenza (se si è deciso di suddividere l'intera gamma di pendenze in classi di 1°, i valori possono essere al massimo 91: da 0° a 90°). Se dunque si vuole

Figura 1

CLASSI RICORRENTI, CON PIÙ ALTA FREQUENZA, ALL'INTERNO DELLE ZONE DI DISTACCO DI EVENTI VALANGHIVI

Scenario 1: aumento di carico d'intensità minore di 50 cm / 1 giorno

Carte degli elementi topografici (s.l.)	Classi a frequenza maggiore
Inclinazione del pendio	40°
Esposizione del pendio	100°
Fasce di quota	1800 ±10m
Distanza dalle linee di cresta	80 - 150 m
Asperità del terreno	Erba alta
Concavità/Convessità	Concavità

Scenario 2: aumento di carico d'intensità tra 50 e 100 cm / 1 giorno

Carte degli elementi topografici (s.l.)	Classi a frequenza maggiore
Inclinazione del pendio	55° - 60°
esposizione del pendio	135° - 200°
Fasce di quota	2000 ±10m
Distanza dalle linee di cresta	90 - 100 m
Asperità del terreno	Erba alta
Concavità/Convessità	Concavità

Scenario 3: aumento di carico d'intensità superiore a 100 cm / 1 giorno

Carte degli elementi topografici (s.l.)	Classi a frequenza maggiore
Inclinazione del pendio	45°
esposizione del pendio	150°
Fasce di quota	2450 ±10m
Distanza dalle linee di cresta	80 m
Asperità del terreno	Erba alta
Concavità/Convessità	Concavità

conoscere quali classi di pendenza si trovano con maggior frequenza all'interno di zone di distacco del passato basterà sovrapporre la carta delle classi di pendenza su quella delle zone di distacco e contare quante volte una certa classe di pendenza (un pixel "p" con valore di pendenza "i": pi) si trova all'interno delle zone di distacco.

A questo punto si presenta la



Figura 2

questione fondamentale: quali zone di distacco sia giusto considerare. Discriminante per la scelta dovranno essere le condizioni meteorologiche che hanno preceduto e accompagnato l'insacco degli eventi valanghivi del passato: in pratica si dovranno selezionare quelle valanghe (e quindi le loro zone di distacco) che hanno in comune un medesimo scenario meteorologico predisponente ed innescante. Questo perché a scenari diversi corrisponderanno, ragionevolmente, zone di distacco di dimensioni diverse, nonché di collocazione spaziale diversa. L'idea di basare la scelta sulla discriminante meteorologica ha un significato ben preciso: introdurre, nell'unico modo possibile, la seconda variabile fondamentale per lo studio dell'instabilità del manto nevoso. La terza variabile, cioè le condizioni del manto nevoso, di gran lunga più difficile da conoscere e de-

scrivere, non sarà che il risultato dell'azione combinata delle prime due variabili. L'assunzione è senza dubbio molto forte, ma è l'unica possibilità, per altro già utilizzata diverse volte in letteratura, basti pensare allo studio di Karl Birkeland (Birkeland et al., 1995) o all'applicazione di Aldo Bariffi (Bariffi, 2002).

La prima operazione da eseguire, quindi, è stata la suddivisione della banca dati del catasto valanghe di La Villa in base alle sezioni A e B del modulo 7 AINEVA: rispettivamente "condizioni meteorologiche significative nei 2-3 giorni precedenti l'evento" e "condizioni meteorologiche significative al momento dell'evento". Per poter fare questo è stato necessario inserire manualmente tutti i moduli 7 AINEVA in un database Access® in modo da impostare automaticamente la selezione delle valanghe in base alle varie combinazioni possibili delle sezioni A e B. In realtà, si è tenuto conto anche della sezione G (Cause del distacco), in modo da arrivare ad una ricostruzione, la più vicina possibile alla realtà, delle cause dei distacchi. La selezione ha portato, per motivi puramente statistici, ad escludere certe combinazioni perché risultanti in un numero di eventi valanghivi piuttosto scarso. In maniera prevedibile, le combinazioni prescelte corrispondono alle situazioni meteorologiche che, per la zona di studio, hanno con maggior frequenza determinato il verificarsi di eventi valanghivi in passato. Queste sono rappresentate da aumenti di carico dovuti a spessori di neve fresca, caduti nell'arco di una giornata, di:

- meno di 50 cm,
- tra 50 e 100 cm
- maggiori di 100 cm.

Esaminando anche le serie meteorologiche del modello 1 AI-

FORMULE

(1) $Prob \{ZD_p | p_{30^\circ}\} = \frac{IC \cap p_{30^\circ}}{p_{30^\circ}} = \frac{10}{5000} = 0,002$

Il primo membro significa: la probabilità che il pixel "p" si trovi all'interno di una zona di distacco di calcolo (ZD) se il suo valore è pari a 30° d'inclinazione. IC è l'insieme di tutte le zone di distacco di calcolo e p_{30°} è l'insieme di tutti i pixel che hanno valore d'inclinazione pari a 30°.

(2) $I = I_1 \otimes I_2 \Leftrightarrow \mu_p = \mu_{p_1} \cdot \mu_{p_2}$

I è l'insieme "prodotto", μ_p è la funzione d'appartenenza "prodotto" e I₁, I₂ sono gli insiemi la cui funzione d'appartenenza è, rispettivamente, μ_{p₁} e μ_{p₂}. In parole povere, se μ_{p₁} è uguale a 0.002 (dalla (1)) per la classe d'inclinazione 30° e μ_{p₂} è uguale, ad esempio, a 0.009, per la classe d'esposizione SO, allora la combinazione delle due classi, nello stesso pixel "p", darà un valore di probabilità pari a 0.000018.

(□) $I = I_1 \oplus I_2 = (I_1^c \otimes I_2^c) \Leftrightarrow \mu_p = \mu_{p_1} + \mu_{p_2} - \mu_{p_1} \cdot \mu_{p_2}$

Usando gli stessi valori, la probabilità combinata sarà, in Questo caso: 0.011□ 0.000018 □ 0.0109.

(□) $Op.Gamma = (Prodotto\ algebraico)^{1-y} \cdot (Somma\ algebraica)^y$

con 0 ≤ y ≤ 1. Quando y □ 0 la (□) corrisponde alla (2) □ Quando y □ 1 la (□) corrisponde alla (□). Continuando ad usare gli stessi valori precedenti, un y pari a 0.□ darebbe un valore di probabilità combinata pari a 0.000□□.

NEVA degli ultimi vent'anni, se ne ha una conferma. Da qui, oltre all'aumento di carico, anche i repentini innalzamenti della temperatura media dell'aria (fino a raggiungere e superare gli 0°C) hanno rappresentato un importante motivo d'inesco per le valanghe del passato. In questo studio si è tuttavia scelto di scartare l'innalzamento della temperatura dell'aria per concentrarsi sui tre scenari sopraccitati.

Come si diceva già nell'introduzione, ciò che importa non è tanto l'esaminare i rapporti biunivoci tra ogni elemento topografico e le zone di distacco del passato, bensì è la combinazione dei vari elementi che deve maggiormente interessare. S'immagini, per semplicità, di voler conoscere il rapporto esistente tra due elementi topografici (l'inclinazione del pendio e l'esposizione del pendio) e le zone di distacco. Se si assume che i due elementi siano indipendenti, cioè che il manifestarsi dell'uno non influenzi il manifestarsi dell'altro, allora si dovrà esaminare come la loro contemporanea presenza in una determinata porzione di territorio (in questo caso uno o più pixel) si rapporta alla presenza di una zona di distacco. Presi singolarmente, i due elementi mostreranno, con le zone di distacco, una certa relazione. Per contro, se presi in combinazione, la nuova relazione potrebbe essere totalmente differente. Tale relazione potrebbe essere descritta con un semplice calcolo di probabilità dato dal rapporto tra il numero di pixel di una certa classe che cadono all'interno di una zona di distacco e la somma di tutti i pixel componenti quella classe. Tale rapporto verrà ripreso più avanti nell'equazione (1).

Si dovrà poi trovare un modo per combinare i vari elementi topografici e un modo per poter

calcolare il grado di relazione che ciascuna combinazione ha con le zone di distacco. Raggiunti questi due obiettivi primari si dovrà quindi trovare un sistema per confrontare le varie relazioni al fine di scegliere quella più stretta. In fine, la combinazione di elementi topografici che mostrerà la relazione più stretta con le zone di distacco del passato dovrà essere utilizzata per costruire la carta finale di suscettibilità valanghiva.

LA BANCA DATI CARTOGRAFICA UTILIZZATA

La carta di base è il Modello Digitale delle Quote (o, nella terminologia inglese, più frequentemente usata, D.E.M.). Fornito dalla Provincia Autonoma di Bolzano, il modello ha una struttura matriciale con passo di campionamento di 20m (pixel size 20x20 m). E' stato creato dalla interpolazione delle isolinee (equidistanza 10m) ottenute dalla foto-restituzione di fotografie aeree del Volo Italia 1994. Punti di misurazione GPS, nonché particolari punti quotati in corrispondenza di selle, depressioni, cocuzzoli, linee di cresta ecc., sono stati aggiunti per affinare la descrizione altimetrica. La discrepanza tra le quote di punti determinati fotogrammetricamente su particolari ben identificabili e quelle corrispondenti ricavate per interpolazione sul DEM, non è mai superiore alla metà dell'equidistanza delle isolinee, ovvero a 5 metri.

Dal DEM sono state ricavate:

- (1)** la carta dell'inclinazione del pendio,
- (2)** la carta dell'orientazione del pendio,
- (3)** la carta delle fasce di quota
- (4)** la carta delle concavità e delle convessità.

La carta (1) contiene 85 classi

continue d'inclinazione, espressa in gradi: da 1° a 85°; la carta (2) contiene 360 classi continue d'esposizione, espressa in gradi: da 1° a 359°; la carta (3) contiene 187 classi continue di fasce di quota, di valore unitario pari a 10 m: da 1297 m a 3173 m; la carta (4) contiene 3 classi tematiche: a) superfici concave, b) superfici convesse e c) superfici piane.

La carta (1) è stata ottenuta calcolando le differenze di quota nella direzione x e nella direzione y tramite un filtro che calcola, per ogni pixel "p_k", la derivata prima tra 5 punti quotati allineati di cui "p_k" è quello centrale. Di ogni valore viene quindi calcolata l'arco-tangente, successivamente convertita in gradi. Non è necessario spiegare il significato che questa carta ha in relazione alle zone di distacco, poiché non nasconde altro che la distribuzione dell'elemento fondamentale per tutti i processi di versante, e cioè la gravità. La carta (2) è stata ottenuta calcolando, come in (1), le stesse derivate prime, dx e dy; viene poi calcolato l'angolo (in radianti) tra l'asse delle x e la coppia (dx,dy), a questo sommando il valore di π .

Il valore finale viene convertito in gradi. Nell'esposizione del versante sono nascosti tutti i processi che possono avvenire all'interno del manto nevoso a seguito del bilancio radiativo esterno e dell'esposizione ad influssi d'aria più o meno ricorrenti.

La carta (3) è semplicemente una riclassificazione del DEM in fasce di quota di spessore uniforme, in questo caso scelto corrispondente alla distanza tra le isolinee. La carta dovrebbe rappresentare la variazione delle quantità di precipitazione in base alla sola quota. Sebbene tale variazione non sia molto pronunciata alla scala di questo studio, si è comunque deciso di

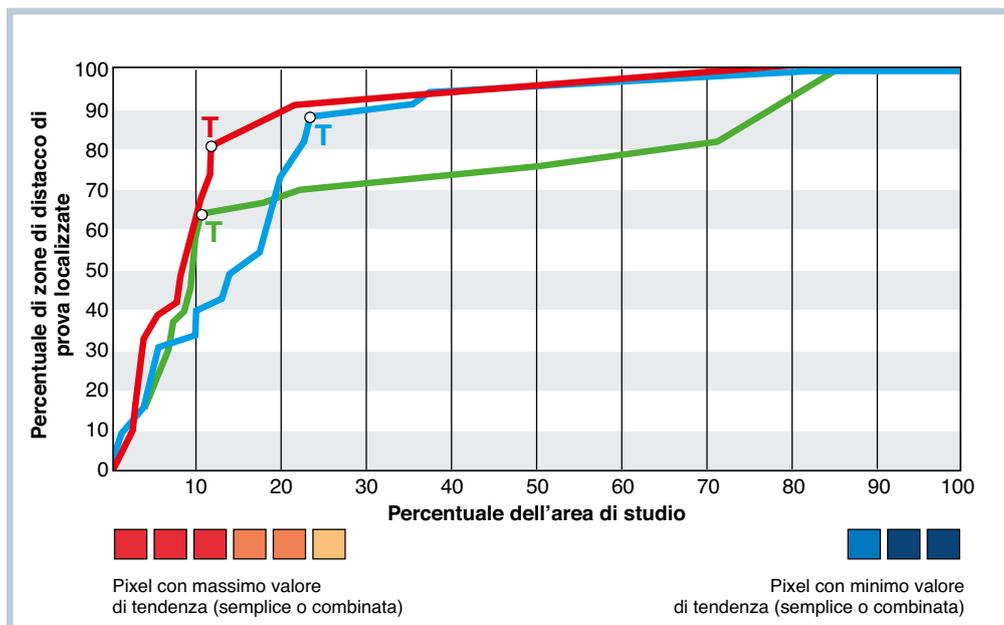


Figura 3: costruzione del grafico di verifica. Sull'asse delle x vi sono disposti, in ordine decrescente di valore di tendenza, tutti i pixel che compongono l'intera area di studio, da $x = 0$ a $x = 100$. In rosso sono i pixel a più alto valore di tendenza. Le curve mostrano la percentuale di zone di distacco di prova localizzate da tre diverse combinazioni di elementi topografici (s.l.). I punti "T" segnano il passaggio tra la porzione più significativa di ogni curva (quella tra (0,0) e T) e la porzione meno significativa (quella tra T e (100,100)).

inserire anche questo elemento nel calcolo.

La carta (4) è in realtà da scomporre in tre carte differenti, ciascuna delle quali è costruita calcolando la derivata seconda, per ogni pixel " p_k ", tra cinque punti quotati allineati di cui " p_k " è il pixel centrale. Le carte sono tre poiché l'allineamento è, per la prima, lungo l'asse delle x, per la seconda lungo quello delle y e per la terza nelle 2 diagonali principali. Questa carta dovrebbe evidenziare, una volta sovrapposta alle zone di distacco, quale delle tre forme rappresenta la situazione più favorevole (dal punto di vista degli sforzi da essa prodotti all'interno del manto nevoso, ma anche dell'accumulo preferenziale di neve) al distacco di valanghe.

Per cercare di valutare il rapporto esistente tra il trasporto (e quindi l'accumulo) della neve da parte del vento e le zone di distacco del passato, si è creata una carta delle linee di cresta, digitalizzando tali linee direttamente sulle orto-fotografie a colori della zona (volo 1999, pixel size 1x1 m). Con una procedura preesistente all'interno di ArcGis 8.2®, è stata creata la carta delle fasce d'equidistanza (planare) dalle

linee di cresta; questo perché, dalla letteratura, è noto come, a parità d'intensità e direzione del vento, gli accumuli di neve si sviluppano a distanze diverse dalla cresta montuosa a seconda della forma e dimensione della cresta stessa (Föhn & Meister, 1983; Meister, 1989).

L'ultima carta creata appositamente per questo studio è stata la carta delle "asperità del terreno": in essa vengono distinte, attraverso l'esame delle orto-fotografie aeree, le varie tipologie vegetazionali, le visibili classi granulometriche dei depositi superficiali, la roccia nuda affiorante, nonché la contemporanea presenza di classi vegetazionali e granulometriche/rocciose. Le classi sono in tutto 16: 1. bosco a basso fusto; 2. bosco a basso fusto (rado); 3. bosco ad alto fusto (rado); 4. bosco ad alto fusto (bassa densità); 5. bosco ad alto fusto (alta densità); 6. bosco ad alto fusto su roccia; 7. erba bassa; 8. erba alta; 9. roccia ruvida; 10. roccia liscia; 11. suolo privo di vegetazione; 12. detrito (granulometria fine); 13. detrito (granulometria media); 14. detrito (granulometria grande); 15. blocchi; 16. superficie artificiale. La sovrapposizione

di questa carta con le zone di distacco dovrebbe evidenziare la relazione esistente tra queste, sede dell'instabilità passata del manto nevoso, e un elemento topografico che può avere una certa influenza sui parametri di resistenza del manto nevoso (McClung, 2001; McClung & Schaerer, 1993).

ANALISI DI FREQUENZA

Interessante è osservare, prima di procedere all'esame dei rapporti tra le possibili combinazioni di elementi topografici e le zone di distacco, quali classi di ogni elemento topografico ricadano (per questa area di studio) con maggior frequenza all'interno delle zone di distacco del passato. Per fare questo si dovranno semplicemente sovrapporre le singole carte prima descritte alle zone di distacco del passato. Il software utilizzato per la sovrapposizione e per la costruzione dei grafici di distribuzione di frequenza è SPMS®. Il risultato di queste sovrapposizioni si può esaminare, per ogni insieme di eventi, nelle tabelle di fig. 1.

La gran parte (per non dire tutti) degli studi di suscettibilità¹ (anche se questo termine viene spesso confuso con "pericolosità" e addirittura con "rischio"²) a conoscenza dell'autore si fermano qui, e il risultato potrebbe già essere soddisfacente. In fondo, da questa analisi si potrebbero già isolare, come altamente suscettibili, quelle classi espresse in tabella, rappresentandole con un colore a piacere (generalmente rosso) sulla carta di suscettibilità.

Il passo avanti che con questo studio s'intende fare è quello di combinare (per ogni pixel) i valori di probabilità (di far parte di una zona di distacco) calcolati per ogni singola classe di ogni elemento topografico e di

verificare i rapporti di tali combinazioni con le zone di distacco del passato.

PROBABILITA', COMBINAZIONI E VERIFICA: PROCEDURE DI CALCOLO

Invece di spiegare, a livello teorico, le tre procedure di calcolo, è certamente più immediato utilizzare un esempio pratico. Si prendano due carte di elementi topografici: per non abbandonare l'esempio precedente, si considerino la carta dell'inclinazione del pendio e quella dell'esposizione del pendio. Si prenda anche la carta con tutte le zone di distacco appartenenti al gruppo di valanghe determinate da un aumento di carico inferiore a 50cm/1 giorno. La prima operazione da eseguire è quella di scomporre in due parti (possibilmente uguali) l'insieme delle zone di distacco, e di farlo in modo casuale. Il significato della scomposizione è il seguente: una parte dell'insieme (chiamata "insieme di calcolo") verrà utilizzata per il calcolo delle probabilità e delle loro combinazioni; l'altra parte (chiamata "insieme di prova") servirà per la verifica.

La filosofia di fondo è la stessa già ben collaudata per la *supervised classification* di unità superficiali del terreno attraverso immagini tele-rilevate (Lillesand & Kiefer, 1994).

Si calcoli ora la probabilità che la classe 30° d'inclinazione del pendio faccia parte di una zona di distacco dell'insieme di calcolo. Se la classe 30° è rappresentata, nell'intera area di studio, da 5000 pixel e da 10 pixel nelle zone di distacco dell'insieme di calcolo, allora la probabilità sarà data dalla equazione (1) in figura 2.

Dopo il calcolo, a tutti i pixel

dell'area di studio con valore d'inclinazione 30° verrà sostituito il valore di probabilità 0.002. Così per tutte le altre classi d'inclinazione e per tutte le classi d'esposizione del pendio.

Poiché ciò che interessa è la combinazione dei due elementi topografici, uno dei sistemi possibili di combinazione (qui adottato) proviene dalla teoria degli insiemi fuzzy di Zadeh (Zadeh, 1965; Zadeh, 1968; Zadeh, 1978). Questo non significa certo che altre tecniche vadano scartate, anzi, in futuro sarà molto interessante poterle esaminare a confronto.

Se si assume che la funzione d'appartenenza (μ) ad un insieme fuzzy sia data, per ogni classe, dalla (1), e se si assume l'indipendenza esistente tra i due elementi topografici, allora si possono utilizzare gli operatori della teoria fuzzy per combinare le due funzioni d'appartenenza. Gli operatori che possono essere ragionevolmente utilizzati sono: 1. il prodotto algebrico e 2. la somma algebrica.

Il prodotto algebrico è descritto dalla formula (2) in figura 2.

La somma algebrica è invece descritta dalla formula (3) in figura 2. Un terzo operatore è l'operatore Gamma definibile, con una simbologia non proprio ortodossa, come in formula (4). E' evidente come l'operatore gamma sia uno strumento comodo per calcolare tutta la serie di valori compresa tra il minimo, dato dal prodotto algebrico, e il massimo, ottenibile con la somma algebrica. In questo studio è stato usato l'operatore gamma con tre valori: $\gamma = 0, 1$ e 0.5 .

L'esempio appena descritto ha tentato di spiegare una delle due componenti fondamentali di questo approccio e cioè la combinazione di quelle che potremmo ora definire "tendenze

d'appartenenza" (ad una zona di distacco del passato) di ogni singola classe di elementi topografici.

La seconda componente fondamentale è la verifica dell'effettiva significatività di tali tendenze. In pratica, anche se la combinazione delle probabilità tra le classi d'inclinazione e d'esposizione del pendio ha fornito il valore più alto per la combinazione "30°inclin.+200°espos.", ciò non implica necessariamente che i pixel contenenti quella combinazione facciano parte di future zone di distacco. Questo lo si può verificare soltanto sovrapponendo all'insieme di prova delle zone di distacco (che si sostituiscono alle inesistenti zone di distacco future) le varie carte delle tendenze combinate. E' soltanto attraverso questa operazione che si può dimostrare se i pixel a maggior tendenza sono effettivamente quelli che permettono di individuare il maggior numero di zone di distacco future. Se la verifica mostrerà una conferma positiva, allora quei pixel (quindi quelle unità in cui è stata scomposta l'area di studio) saranno eletti come altamente suscettibili alla preparazione dell'instabilità del manto nevoso.

Anche qui il calcolo è molto semplice: per verificare se i pixel a maggior tendenza (nell'esempio quelli contraddistinti dalla combinazione "30°inclin.+200°espos.") sono in grado di localizzare il maggior numero di zone di distacco di prova basterà contare quanti di quei pixel cadono all'interno di quelle zone. In questo studio si è scelto di considerare una zona di distacco di prova come "localizzata" quando almeno metà della sua superficie è ricoperta dai pixel a maggiore tendenza.

Immaginiamo ora di aver calcolato le tendenze d'appartenenza

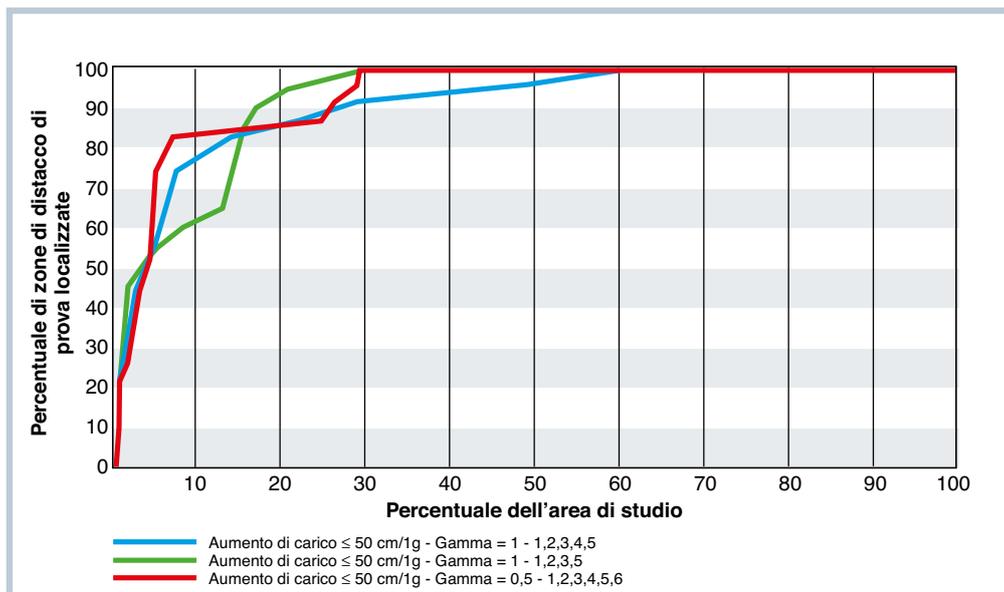


Fig. 4

Fig. 4a



Figura 4: confronto tra le curve di verifica delle tre combinazioni che hanno mostrato i migliori risultati in termini di percentuale di zone di distacco di prova localizzate. 1: carta dell'inclinazione del pendio; 2: carta dell'esposizione del pendio; 3: carta delle fasce di quota; 4: carta delle concavità/convessità; 5: carta delle distanze dalle creste montuose; 6: carta delle asperità del terreno. Scenario meteorologico: aumento di carico <50cm/1 giorno di neve fresca.

per tutti i pixel caratterizzati dalla combinazione delle inclinazioni del pendio e delle esposizioni del pendio: s'immagini quindi una carta piena di valori che saranno compresi tra 0 e 1. Immaginiamo poi di ordinare tutti i pixel in ordine decrescente di valore, e cioè da un massimo di 1 ad un minimo di 0, sull'asse delle x di un grafico cartesiano, facendo sì che il valore massimo coincida con l'origine degli assi, quindi corrispondente ad una percentuale di superficie totale pari allo 0% (Figura 3). Sovrapponiamo quindi la carta dei valori di tendenza a quella delle zone di distacco di prova.

In questo momento ha inizio il conteggio dei pixel che, per ogni valore di tendenza, cadono all'interno delle zone di distacco di prova. C'è da aspettarsi che i pixel con valore di tendenza prossimo al massimo coprano la percentuale maggiore delle zone di distacco di prova. Se quindi poniamo sull'asse delle y la percentuale di zone di distacco di prova localizzate (0% all'origine degli assi) otteniamo una curva che rappresenta esattamente la verifica di quella che potremmo chiamare "previsione di suscettibilità". E' chiaro che la curva avrà un andamento monotono crescente, tenderà a raggiungere

$y=100%$ con x che tende al 100% dell'area e rappresenterà una verifica tanto più buona quanto più il suo punto "T" (dove la curva comincia a tendere lentamente a $y=100%$) sarà vicino al punto (0%,100%).

Il grafico di verifica rappresenta uno strumento importantissimo perché permette di visualizzare e di quantificare la bontà di qualsiasi combinazione di elementi topografici nel localizzare le zone di distacco di prova. In altre parole, il grafico permette di quantificare la suscettibilità che due o più elementi topografici mostrano nel preparare l'instabilità del manto nevoso.

Riprendendo l'esempio, poniamo che la curva rappresentante la previsione di suscettibilità degli elementi topografici "inclinazione del pendio" e "esposizione del pendio" abbia il suo punto di massima curvatura in (1%,80%). Ciò significa che i pixel a maggior valore di tendenza combinata coprono l'1% dell'intera area di studio (cioè 2,30 km²) e con questi è possibile localizzare l'80% delle zone di distacco di prova. Sarebbe un ottimo risultato. Immaginiamo poi che la combinazione tra "inclinazione del pendio" e "vegetazione" fornisca una curva di verifica con la massima curvatura in (3%,80%): in questo caso la previsione di suscettibilità sarebbe inferiore rispetto alla prima poiché la stessa percentuale di zone di distacco di prova è localizzata utilizzando i pixel a maggior valore di tendenza combinata che coprono una percentuale maggiore dell'area di studio. Utilizzando un paragone sportivo, si potrebbe spiegare il significato di quanto appena detto nel seguente modo: non è un grande successo fare centro al gioco delle freccette saturando di freccette l'intero cerchio; lo è

solo nel momento in cui si riesce a fare centro con una freccetta sola. Parimenti, la previsione di suscettibilità avrà successo se si riuscirà a localizzare il più alto numero di zone di distacco di prova utilizzando il più basso numero possibile di pixel a maggiore valore di tendenza: ovviamente non più basso dell'estensione totale delle zone di distacco di prova.

Una volta individuata la combinazione di elementi topografici con la migliore curva di verifica si dovrà selezionare una percentuale di pixel, a più alta tendenza combinata, non superiore al 10% dell'area totale di studio. A questi pixel può essere assegnato un colore rosso e la loro distribuzione spaziale sarà in tal modo chiaramente visualizzabile su di una carta topografica o su di una fotografia aerea. La curva di verifica serve quindi a quantificare il grado di successo attendibile dalla carta così costruita, la cui utilità appare ora evidente: saranno infatti quei pixel rossi le zone dove la massima attenzione dovrà essere concentrata e, poiché collocate con precisione nello spazio, su quelle zone si dovranno indirizzare successive analisi di stabilità, nonché tentare ipotesi di distacco di volumi di neve per calcoli di dinamica valanghiva.

RISULTATI DELL'APPLICAZIONE IN ALTA VAL BADIA

Dopo aver cercato di descrivere il procedimento utilizzato, vengono qui riportati e commentati i risultati dell'applicazione del metodo alle zone di distacco dell'Alta Val Badia. Gli scenari meteorologici considerati sono quelli già descritti in precedenza. Per ognuno di questi verranno mostrate le curve di verifica più significative dal punto di vista

del numero di zone di distacco di prova previste e le rispettive carte di suscettibilità.

Dal grafico di figura 4 si vede come la combinazione (con $\gamma = 0.5$) tra i valori di tendenza delle classi di tutti gli elementi topografici considerati permetta di localizzare circa l'82% (cioè 11 su 14) delle zone di distacco di prova utilizzando il 7% dell'intera area di studio. Non certo indifferente è pure l'andamento della curva data dalla combinazione dei primi cinque elementi topografici, con $\gamma = 1$. Per la costruzione della carta di suscettibilità finale, per questo scenario, verrà pertanto utilizzata la carta dei valori di tendenza combinati

data dalla combinazione rossa. Solo i pixel con valori più elevati verranno evidenziati sulla carta e la loro estensione non sarà superiore al 10% dell'area di studio. Questa percentuale del 10% è scelta come limite massimo, in conseguenza di quanto si è appena detto riguardo al successo a cui una previsione deve aspirare. Saranno le aree ricoperte da questi pixel quelle dove, con maggior probabilità, potranno svilupparsi future zone di distacco (figura 5). L'atteso grado di suscettibilità di quei pixel è invece quantificato dalla rispettiva curva rossa (fig. 4). Anche per il secondo scenario la combinazione di elementi

Figura 4a: distribuzione dei pixel a maggior valore di tendenza combinata (in rosso) in una porzione dell'area di studio. La combinazione di elementi topografici corrispondente è quella della curva rossa di figura 2. Scenario meteorologico: aumento di carico <50cm/1 giorno di neve fresca.

Figure 5 e 5a: Scenario meteorologico: aumento di carico tra 50 e 100cm/1 giorno di neve fresca.

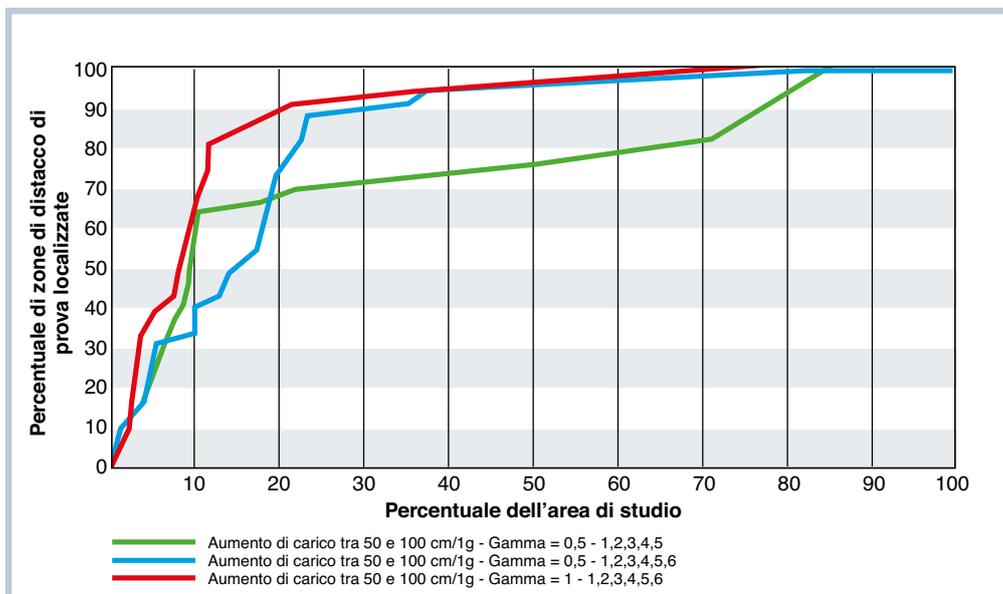


Fig. 5
Fig. 5a



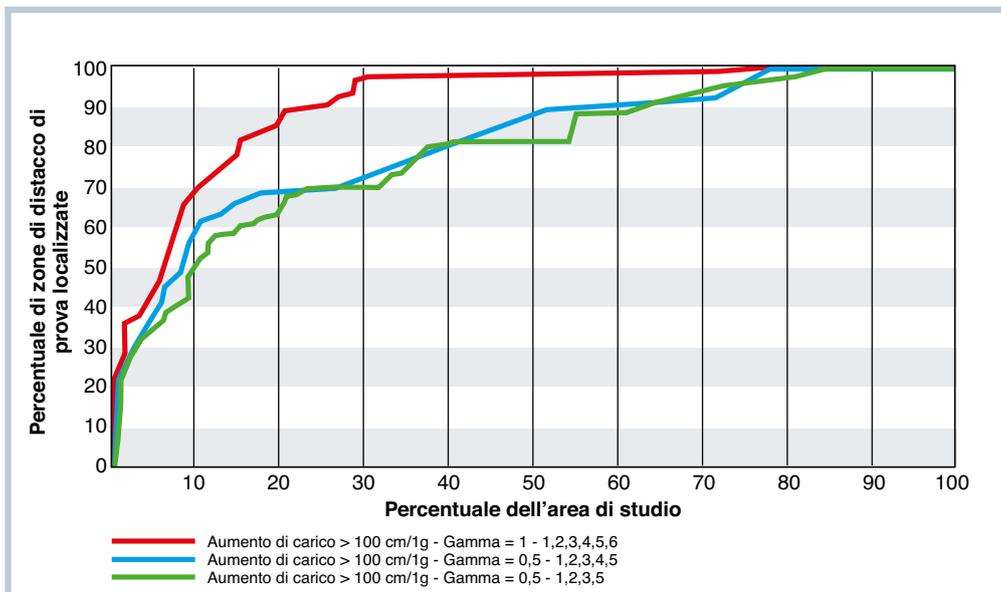


Fig. 6

Fig. 6a



Figure 6 e 6a: Scenario meteorologico: aumento di carico maggiore di 100cm/1 giorno di neve fresca.

topografici che ottiene il miglior risultato è la stessa (questa volta utilizzando $\gamma = 1$) (figura 6). Il successo atteso è leggermente inferiore: la percentuale di zone di distacco di prova localizzate è circa pari al 67% (quasi 9 su 13) e la superficie totale utilizzata per localizzarle è pari al 10% dell'area di studio. La rispettiva carta di suscettibilità è visibile, nella sua porzione particolare identica a quella di figura 4a, in figura 5a.

Anche per l'ultimo scenario la combinazione migliore risulta essere quella tra tutti gli elementi

topografici considerati ($\gamma = 1$) (figura 6). La percentuale di zone di distacco di prova localizzate è circa pari al 70% (quasi 17 su 24) e la superficie totale utilizzata per localizzarle è pari al 10% dell'area di studio. La rispettiva carta di suscettibilità è visibile, nella sua porzione particolare identica a quelle di figura 4a e 5a, in figura 6a.

OSSERVAZIONI

Interessante è notare come il maggior numero di zone di prova localizzate sia ottenibile combinando insieme tutti i sei

elementi topografici considerati, a conferma del fatto che la relazione riconosciuta dall'esperienza tra questi e le zone sedi d'instabilità per il manto nevoso è effettivamente stretta. Il fatto poi che, se presi singolarmente o in combinazioni parziali, i vari elementi portino a risultati inferiori conferma la correttezza dell'ipotesi iniziale secondo la quale è la loro simultanea presenza a preparare le condizioni favorevoli all'instabilità del manto nevoso. Il numero di zone di distacco di prova localizzate, espresso dai grafici di verifica, quantifica il grado di successo che ci si deve aspettare dalle rispettive carte di suscettibilità di figura 4a, 5a e 6a. Ossia, se si prende una qualunque delle tre figure, la distribuzione spaziale dei pixel rossi ha una "speranza" di localizzare nuove zone di distacco pari a quella indicata dal grafico di verifica. Nel caso dei pixel rossi di figura 4a, la speranza è pari all'83% (punto "T"); per i pixel di figura 5a è 67% e per i pixel di figura 6a è il 70%.

Un'altra osservazione interessante è la seguente: il valore di γ preferibile sembra essere pari a 1, seguito da 0.5. Tra tutti i calcoli di probabilità combinata eseguiti, $\gamma = 0$ non compare quasi mai se non nelle combinazioni a più basso successo. Ciò significa che la somma dei valori di probabilità è il metodo di combinazione preferibile tra quelli qui utilizzati.

L'osservazione degna di maggior rilievo è quella che deriva dall'esame delle carte di suscettibilità finali. Anche se, per ragioni di spazio e di chiarezza visiva, non mostrano l'intera area di studio, le figure 4a, 5a e 6a esprimono tutta la loro potenziale utilità. In modo particolare le figure 4a e 5a mostrano chiaramente quali possono essere le zone poten-

zialmente sede d'instabilità qualora si verificano precipitazioni rispettivamente <50cm/1giorno e tra 50 e 100cm/1giorno. Ciò significa che, nel momento in cui una previsione meteorologica anticipi precipitazioni simili in futuro, queste carte anticiperanno, a loro volta, i luoghi da cui, con maggior probabilità, potranno innescarsi valanghe. Nel caso di figura 4a, senz'altro quello maggiormente ricorrente nella zona di studio, le aree possono essere delimitate in poligoni ed eventualmente utilizzate per il calcolo dei volumi di neve che possono staccarsi. Negli altri due casi la superficie potenzialmente interessabile da distacchi è talmente ampia che risulterà pressoché impossibile (o comunque dispendioso in termini di tempo) individuare possibili poligoni per calcoli volumetrici. Per finire, l'esame di figura 4a suscita un'altra osservazione. Le zone ricoperte dai pixel rossi indicano dove indirizzare (quando possibile) le analisi di

stabilità del manto nevoso. Questo non è forse fondamentale per le tipologie di eventi valanghivi qui prese in considerazione. Se si considerano, però, valanghe determinate principalmente dalla formazione di strati deboli all'interno del manto nevoso, e se si immagina di aver costruito per queste una carta di suscettibilità, ecco che la potenzialità di tale carta appare evidente: saranno infatti quei punti rossi le zone da sorvegliare con maggiore attenzione aumentando, ad esempio, la frequenza dei profili.

CONCLUSIONI

Una carta di suscettibilità, per un certo fenomeno naturale, è uno strumento di studio che sta diventando sempre più di moda nel mondo scientifico accademico, soprattutto per quanto riguarda le diverse tipologie di frana, gli eventi sismici e le alluvioni. Il motivo principale risiede nel fatto che la suscettibilità è un concetto che riguarda principalmente le caratteristiche del terreno,

quindi caratteristiche facilmente descrivibili e a variabilità temporale sufficientemente limitata se non, in alcuni casi, assente. Non riuscendo, ad oggi, a prevedere un evento sismico in una determinata zona, una possibile mitigazione del rischio è rappresentata dalla carta dei terreni a maggiore o minore attitudine ad amplificare l'intensità delle onde sismiche, in pratica una carta di suscettibilità sismica. Parallelamente, non potendo prevedere con sufficiente precisione dove si staccheranno future valanghe, questo metodo tenta di ridurre l'ampiezza d'indagine dirigendo l'attenzione su quelle zone che possono maggiormente favorire (o, per usare lo stesso termine, amplificare, anche se qui ha un significato leggermente diverso) l'instabilità del manto nevoso. I terreni a maggior suscettibilità sismica sono stati riconosciuti tali grazie a simulazioni sismiche eseguite sui terreni stessi; in modo più indiretto questo metodo riconosce le zone a maggior

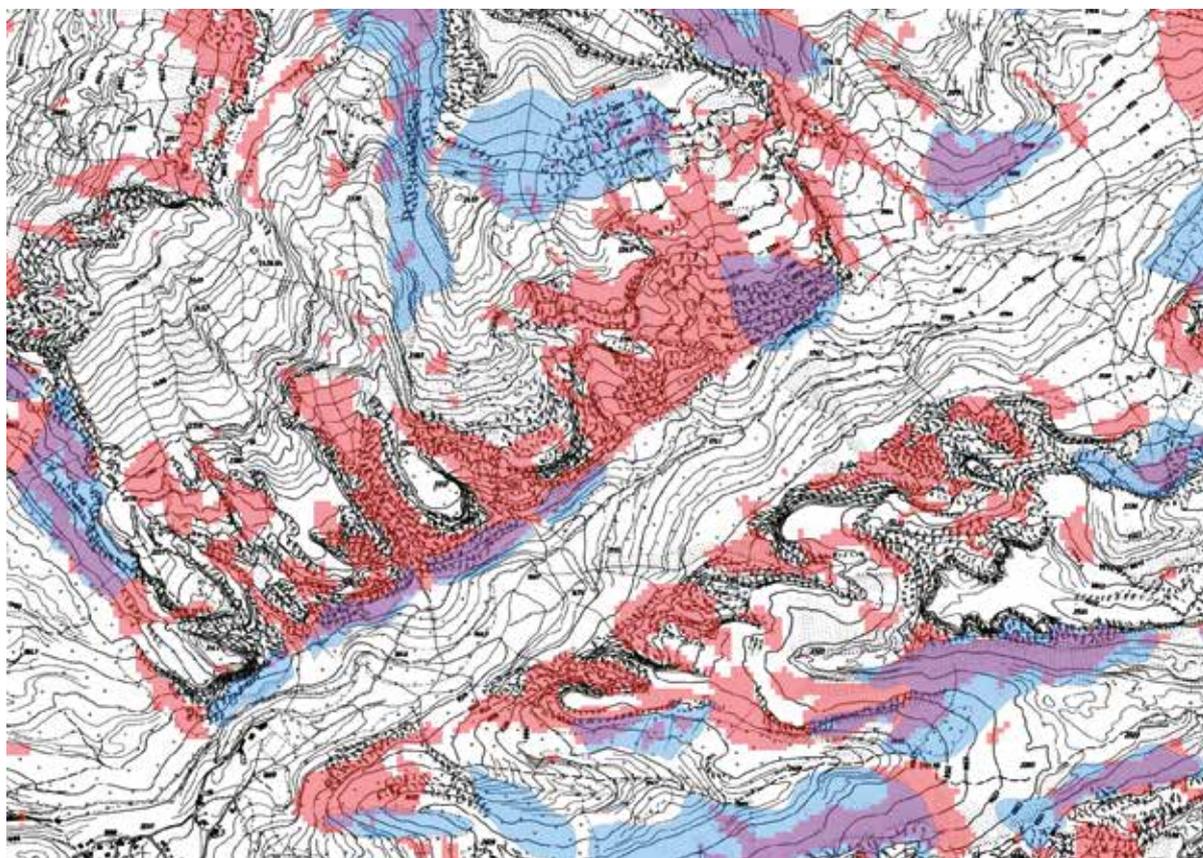


Figura 7: sovrapposizione tra i poligoni (in azzurro) della CLPV rappresentanti le zone individuate come pericolose dal rilevamento e i pixel (in rosso) a più alto valore di suscettibilità ottenuti dall'applicazione di STARTER. (Porzione dell'area di studio scelta come esempio).

suscettibilità osservando le zone sede d'instabilità del manto nevoso in passato.

Se si osserva la figura 7 si può intuire cosa s'intenda per "ridurre l'ampiezza d'indagine". Le zone rosse sono infatti quelle individuate dal modello come suscettibili a distacco in caso di precipitazioni nevose <50cm/1 giorno; i poligoni azzurri sono invece le zone individuate come pericolose dal rilevamento sul terreno e presenti nella CLPV della zona. I poligoni azzurri individuano zone potenzialmente instabili senza specificare per quale tipo causa. In alcuni casi le aree e i poligoni si sovrappongono in gran parte, in altri casi le aree rosse costituiscono un sottinsieme dei poligoni, altre volte si estendono oltre i poligoni. Questo confronto non deve portare a giudizi d'affidabilità tra le due rappresentazioni cartografiche, poiché i fini dell'una non coincidono con quelli dell'altra, bensì a meglio comprendere ciò che si è tentato di ottenere con questo modello: innanzitutto un'analisi più strettamente legata alle cause meteorologiche, in alcuni casi un affinamento per quanto riguarda la dimensione delle aree maggiormente suscettibili e, in altri casi, un'estrapolazione obiettiva dei valori di maggiore suscettibilità a porzioni dell'area di studio che l'opinione del rilevatore può non aver considerato affatto come suscettibili.

Immaginiamo ora di poter disporre di una carta con le aree a maggiore suscettibilità per un certo scenario meteorologico e di conoscere il successo che da essa ci si può ragionevolmente attendere in termini di zone di distacco future localizzabili. Il grande problema che si presenta, nel momento in cui si desidera impostare calcoli di dinamica valanghiva a partire

dalle zone individuate, è quale porzione di esse considerare per la scelta del volume di neve iniziale. Basta guardare ancora la figura 7 per capire che non tutte le aree rosse possono essere considerate nella loro interezza poiché si otterrebbero volumi iniziali, a parità di spessore del manto, troppo grandi. In questo caso le soluzioni possono essere due: 1. si possono usare criteri di selezione basati sull'esperienza oppure 2. si possono individuare dimensioni delle zone di distacco sulla base di calcoli statistici come quelli utilizzati da Barbolini (Barbolini & Savi, 2001). In entrambi i casi con dimensioni massime \leq alle superfici rosse. In alcuni casi la topografia potrà aiutare a suddividere ulteriormente le zone rosse come nel caso di una cresta montuosa, di una vallecchia o di una scarpata. In prospettiva futura, la carta di suscettibilità potrà essere sovrapposta alle reali zone di distacco che si svilupperanno durante gli inverni a venire: questo potrà ulteriormente confermare la bontà della carta stessa, accrescerla o, per contro, diminuirla. Nell'ultimo caso sarà necessario utilizzare le zone di distacco future come zone di calcolo e di prova per reimpostare una nuova carta di suscettibilità. Lo strumento fin qui descritto è quindi una carta dinamica, nel senso che può in qualsiasi momento essere ricostruita, migliorandola, sulla base delle osservazioni sul terreno, diversamente per quanto riguarda le carte "statiche" delle CLPV. Quest'ultima caratteristica fa della carta di suscettibilità uno strumento versatile, utilizzabile come carta di base per altre applicazioni e trasferibile sul web per una rapida consultazione, come già accade per le CLPV. Il limite all'utilizzo di questo

metodo deriva dall'assenza, ad oggi, di un vero confronto sul campo. E' chiaro però come, per un confronto significativo, si debba verificare una condizione fondamentale e cioè una situazione meteorologica simile a quella su cui la carta è stata costruita. E' un limite quindi facilmente eliminabile nel tempo e con una buona continuità di osservazioni sul campo. Un limite più impegnativo da eliminare è costituito probabilmente dall'elaborazione delle carte degli elementi topografici, un limite strettamente interno agli algoritmi di calcolo utilizzabili all'interno dei GIS: non sempre gli elementi topografici che si ritengono importanti per la predisposizione all'instabilità del manto nevoso sono rappresentabili in due dimensioni come si vorrebbe. Un esempio incontrato in questo studio è quello delle concavità e delle convessità: gli algoritmi che permettono di selezionare automaticamente le aree concave e quelle convesse permettono di farlo soltanto lungo quattro direzioni preferenziali, non necessariamente coincidenti con la direzione di massima pendenza del versante o con quella ad essa perpendicolare.

Infine, un limite sempre presente è quello dato dalla capacità con cui l'influenza di alcuni elementi non rappresentabili riesce ad essere espressa attraverso elementi derivati. L'esempio è quello delle zone d'accumulo preferenziale della neve trasportata dal vento. Nel caso presente si è cercato di rappresentare tali zone sulla base della distanza dalle creste montuose (anche da quelle più piccole), in combinazione con le concavità del terreno. Per fare meglio si dovrebbero suddividere le creste in categorie basate sul grado di arrotondamento delle stesse e al profilo dei due versanti.



RINGRAZIAMENTI

L'autore desidera ringraziare Fabio Gheser, dell'Ufficio Idrografico di Bolzano, per la disponibilità offerta durante la fase di raccolta dei dati del Catasto Valanghe della Val Badia e il Dr. Chang-Jo F. Chung, del Servizio Geologico Canadese (Ottawa, Ontario), per il fondamentale aiuto nella fase di analisi dei dati spaziali.

Note

1 Si veda, per una definizione di "susceptibilità", Crozier, M.J., 1999. The frequency and magnitude of geomorphic processes and landform behaviour. *Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd. 115*: 35-50.

2 Per le definizioni di "pericolosità" e "rischio" si veda Varnes, D.J., 1984. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. *UNESCO Natural Hazards*, 3: 63.

BIBLIOGRAFIA

- Barbolini, M. & Savi, F., 2001. Monte Carlo: una nuova metodologia per lo studio delle valanghe. *Neve e Valanghe*, 43: 32-41.
- Bariffi, A., 2002. GIS e modellizzazione del rischio valanga. *Neve e Valanghe*, 45: 32-41.
- Birkeland, K.W., Hansen, K.J. & Brown, R.L., 1995. The spatial variability of snow resistance on potential avalanche slopes. *Journal of Glaciology*, 41(137): 183-190.
- Chung, T.J., 2003. *Spatial Prediction Modeling System (User's Guide)*. A Private Company, Ottawa (in press).
- Crozier, M.J., 1999. The frequency and magnitude of geomorphic processes and landform behaviour. *Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd. 115*: 35-50.
- ESRI, 2001. *ArcGIS*. ESRI, Redlands, California, U.S.A.
- Föhn, M.B. & Meister, R., 1983. Distribution of snow drifts on ridge slopes: measurements and theoretical approximations. *Annals of Glaciology*, 4: 52-57.
- ITC, 2001. *Ilwis*. ITC, Enschede, The Netherlands.
- Lillesand, T.M. & Kiefer, R.W., 1994. *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons, Inc., 750 pp.
- McClung, D.M., 2001. Characteristics of terrain, snow supply and forest cover for avalanche initiation caused by logging. *Annals of Glaciology*, 32: 223-229.
- McClung, D.M. & Schaerer, P., 1993. *The avalanche handbook*. The Mountaineers, 272 pp.
- Meister, R., 1989. Influence of strong winds on snow distribution and avalanche activity. *Annals of Glaciology*, 13: 195-201.
- Varnes, D.J., 1984. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. *UNESCO Natural Hazards*, 3: 63.
- Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy sets. *IEEE Infomatics and Control*, 8: 338-353.
- Zadeh, L.A., 1968. Probability measures of fuzzy events. *Journal of Mathematical Analysis and Application*, 10: 421-427.
- Zadeh, L.A., 1978. Fuzzy sets as a basis of a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, 1: 3-28.