

Valutazione della pericolosità da caduta massi tramite un approccio integrato statistico e deterministico

Giovanni Battista Crosta¹, Alberto Carrara², Federico Agliardi³, Paolo Campedel⁴, Paolo Frattini⁵

¹Dipartimento di Scienze Geologiche, Università di Milano Bicocca, giovannibattista.crosta@unimib.it

²CNR-IEIT, acarrara@bo.ieit.cnr.it

³Dipartimento di Scienze Geologiche, Università di Milano Bicocca, federico.agliardi@unimib.it

⁴Servizio Geologico, Provincia Autonoma di Trento, paolo.campedel@provincia.tn.it

⁵Dipartimento di Scienze Geologiche, Università di Milano Bicocca, paolo.frattini@unimib.it

Rockfall hazard assessment through an integrated statistical and physically-based approach

ABSTRACT: In Val di Fassa (Dolomites, Eastern Italian Alps) rockfalls constitute the most relevant gravity-induced natural disaster threatening both the inhabitants of the valley and the thousands of tourists who populate the area in summer and winter times. To assess rockfall hazard, we developed an integrated statistical and physically-based approach aimed at predicting both the onset susceptibility and the reach probability of rockfalls. Through field checks and multi-temporal aerial photo-interpretation, we prepared a detailed inventory of both rockfall source areas and associated scree slope deposits. Grid-cells pertaining to the source area polygons were classified as active and inactive using an innovative technique based on GIS tools and a 3D rockfall simulation code (HY-STONE). The latter allows for linking each source grid-cell with scree slope deposit polygons by calculating the trajectory of each simulated launch of blocks. By means of discriminant analysis, we then identified the mix of environmental characteristics that better discriminate grid-cells with low and high rockfall susceptibility. Among the variables, the structural setting, land-use, and morphology resulted to be the most important factors leading to rockfall initiation. We developed 3D simulation models of the rockfall runout distance, intensity and frequency, assigning an either fixed or variable onset susceptibility; the latter derived from the discriminant model group (active/inactive) membership probabilities. The comparison of these models indicates that the variable onset susceptibility model appears the most realistic one.

Key terms: rockfall, hazard assessment, onset susceptibility, HY-STONE, Dolomites

Termini chiave: caduta massi, valutazione della pericolosità, probabilità di innesco, HY-STONE, Dolomiti

Riassunto

Per valutare la pericolosità da crollo, abbiamo sviluppato un approccio integrato statistico e deterministico in grado di valutare sia la suscettibilità all'innesco dei crolli, che la probabilità di transito. Il metodo si articola in diverse fasi. Innanzitutto abbiamo realizzato, attraverso la fotointerpretazione multitemporale, una cartografia di dettaglio delle aree sorgenti e dei depositi di crollo. Abbiamo quindi attribuito un grado di attività alle pareti di crollo sulla base della presenza e della freschezza dei depositi sottostanti. Questa operazione è stata effettuata con il codice di calcolo HY-STONE, verificando le traiettorie di caduta massi rispetto alla posizione dei depositi. Utilizzando l'informazione sull'attività delle aree sorgenti di crollo e un set di variabili geo-ambientali dell'area di studio, abbiamo implementato un'analisi statistica multivariata volta a generare una mappa della suscettibilità di innesco di crolli nell'area di studio. Abbiamo quindi sviluppato due modelli di propagazione 3D dei crolli: il primo con probabilità di

innesco costante; il secondo con la probabilità di innesco variabile calcolata tramite analisi discriminante. Il confronto dei due modelli mostra come l'utilizzo di una probabilità di innesco variabile migliori l'efficienza del modello e permetta di realizzare una carta finale della suscettibilità di crollo più realistica.

1. Introduzione

I crolli sono processi molto frequenti nelle aree montane e costituiscono un'importante sorgente di danni e vittime. La valutazione della pericolosità derivante dai crolli è pertanto un tema di grande interesse per tecnici, amministratori e pianificatori locali.

La pericolosità da crollo è comunemente definita come la probabilità di accadimento di un fenomeno di una certa intensità in un certo intervallo di tempo in una determinata area (Varnes et al, 1984). Questa definizione incorpora i concetti di intensità, frequenza di ricorrenza e localizzazione nello spazio. In realtà, la valutazione di tutte

queste componenti è assai complessa, soprattutto per quanto riguarda la dimensione temporale dei fenomeni. Per questo motivo, il presente lavoro è finalizzato alla valutazione, con metodi quantitativi, della probabilità spaziale (susceptibilità) dei crolli. Per valutare correttamente la suscettibilità di un fenomeno a rapido e largo espandimento come i crolli, è necessario stimare tanto la probabilità di innesco del processo quanto la probabilità che, una volta innescato, il fenomeno raggiunga una certa posizione nello spazio ("probabilità di propagazione"). In letteratura sono stati proposti diversi metodi per valutare sia la probabilità di innesco (Hoek e Bray, 1981, Jaboyedoff et al., 1999; Hantz et al, 2003, Chau et al., 2004) sia la propagazione (Evans e Hungr, 1993; Agliardi e Crosta, 2003, Pfeiffer e Bowen, 1989; Descouedres e Zimmermann, 1987), ma pochi tentativi sono stati fatti per valutare entrambe (Pierson et al., 1990; Cancelli e Crosta, 1993).

In questo lavoro viene presentata una metodologia integrata per la valutazione della suscettibilità da crollo basata sull'utilizzo di un approccio statistico multivariato (Carrara, 1983) e sull'utilizzo di una modellazione fisicamente-basata della propagazione dei crolli. Tale metodologia è sperimentata in Val di Fassa (Provincia Autonoma di Trento), nota nel mondo per la spettacolarità delle pareti rocciose che raggiungono oltre 1000 metri di altezza. Queste pareti, d'altro canto, sono significative sorgenti di crolli che minacciano seriamente i residenti e le migliaia di turisti che ogni anno popolano la valle, sia in estate sia in inverno.

2. Area di studio

L'area di studio si estende per oltre 300 km² ed include il bacino del torrente Avisio a nord di Moena di Fassa. L'area appartiene alle Dolomiti (Alpi Meridionali). La parte settentrionale dell'area è costituita da formazioni carbonatiche Triassiche con subordinate litologie terrigene, mentre la parte sud è costituita da rocce effusive (rioliti). Una larga intrusione medio-Triassica occupa la parte centrale dell'area, con rocce di tipo intrusivo (monzoniti e gabbri) ed effusivo (lave, lave a pillow).

La morfologia della valle è dominata dalle pareti rocciose, presenti soprattutto nel dominio calcareo. Tali scarpate occupano la parte più elevata dei versanti, che declinano gentilmente verso il basso a causa della presenza di rocce meno resistenti e di abbondanti accumuli di detrito. In tutta l'area si riconosce una profonda influenza esercitata dai ghiacciai che hanno modellato le forme e lasciato notevoli accumuli di deposito.

La quota nell'area di studio varia da 1150 a 3200 m s.l.m.. Il clima è di tipo alpino, con locali variazioni dovute alla complessità morfologica della valle. La vegetazione è costituita prevalentemente da boschi di conifere fino a 1800-1900 m s.l.m., formazioni erbacee di tipo alpino, frequentemente utilizzate come prati o pascoli, fino a 2400 m s.l.m. e vegetazioni rupestri e di detrito a quote ancora

più elevate.

La carta inventario dei dissesti dell'area di studio è stata realizzata in scala 1:10.000 per conto della Provincia Autonoma di Trento, a partire dalla foto-interpretazione di 5 set di voli aerei, che variano in scala da 1:15.000 a 1:40.000. L'inventario realizzato è stato quindi verificato sul terreno.

Per quanto riguarda i fenomeni di crollo, sono state mappate: le pareti riconosciute propense al distacco di massi, gli accumuli di detrito di crollo, i massi isolati di grosse dimensioni e altre caratteristiche utili a caratterizzare le pareti sorgenti di crollo (lineamenti principali, fratture, trincee, etc.).

Le pareti più notevoli sono presenti nel dominio calcareo, soprattutto nel massiccio della Marmolada, del Gran Vernel e del Catinaccio (Fig. 1). Altre pareti rilevanti si trovano nelle rocce ignee affioranti nel versante sud della valle di S. Pellegrino. Pareti minori, infine, sono presenti nei massicci intrusivi medio-Triassici che occupano la zona centrale dell'area di studio.

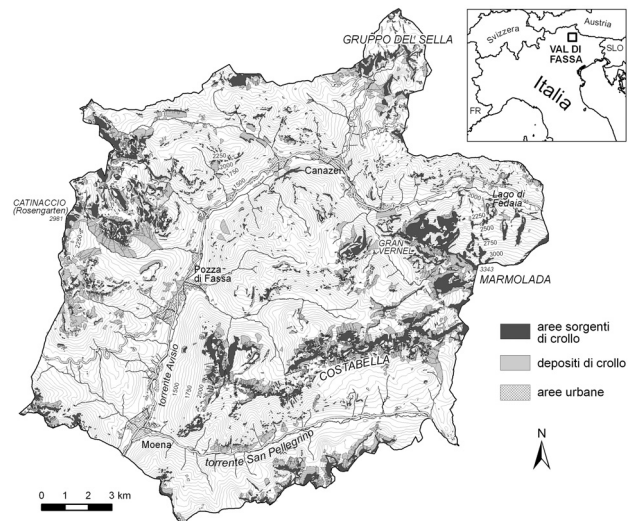


Fig. 1. Area di studio della Val di Fassa. Localizzazione delle aree sorgenti di crollo e degli accumuli di detrito
Val di Fassa study area. Location of rockfall source areas (in solid black) and scree slope deposits (in gray)

Gli accumuli di detrito sono situati prevalentemente alla base delle pareti mappate e formano talus o conici di detrito. Particolare attenzione è stata posta nel distinguere tali forme da quelle derivanti da altri processi concorrenti (es; debris flows, rock avalanches, valanghe), e nel classificare il grado di attività dei depositi. L'attività è riconoscibile dalla presenza/assenza di vegetazione, dal grado di rimodellazione dei depositi e dalla freschezza delle forme. Tale classificazione non è peraltro scevra da errori poiché diversi fattori possono falsare l'interpretazione. In particolare, i fattori microclimatici influiscono sulla velocità di colonizzazione dei depositi e sul grado di copertura della

vegetazione in modo del tutto indipendente dal grado di attività effettiva dell'accumulo.

In totale sono state mappate 2099 aree sorgenti di crollo e 1137 depositi, per un totale pari, rispettivamente, all'8% e al 10% del territorio in esame.

Ai fini del presente studio, oltre alla carta inventario, è stato necessario acquisire o produrre diverse carte tematiche (carta geologica, carta dei depositi superficiali e carta dell'uso del suolo, Carrara et al, 2004). Infine, è stato realizzato un nuovo DEM con pixel di 10x10 m, a partire dalle curve di livello della Carta Tecnica 1:10.000 della Provincia Autonoma di Trento. Tutti i dati raccolti sono stati digitalizzare ed archiviate in un database spaziale di un GIS.

3. Classificazione dell'attività delle aree sorgenti di crollo

Al fine di implementare un'analisi statistica delle aree sorgenti di crollo è stato necessario in primo luogo classificare tali aree in base al grado di attività. Per fare ciò,

si è deciso di attribuire ad ogni area sorgente l'attività dei depositi di crollo a valle della stessa. In sostanza, in assenza di dati statistici, si ritiene attiva una parete solo se i depositi a valle della stessa mostrano i segni di una attività recente. Per attribuire l'attività alle aree sorgenti si è proceduto in un primo tempo utilizzando un approccio di tipo idrologico, ovvero determinando per ogni accumulo il bacino di drenaggio (analogo al bacino di potenziale origine dei crolli) e attribuendo l'attività del deposito a tutte le aree sorgenti interne a tale bacino. Questo metodo è stato utilizzato con discreto successo nel caso di depositi subito al piede delle pareti (Duarte e Marquínez, 2002), ma presenta diversi problemi nel caso di morfologie complesse o lunghe distanze di propagazione dei massi (Fig. 2).

Per ovviare a questi inconvenienti, abbiamo sperimentato un metodo innovativo basato sull'utilizzo di un codice di calcolo per la propagazione tridimensionale dei crolli: HY-STONE (Agliardi e Crosta, 2003; Crosta et al., 2004).

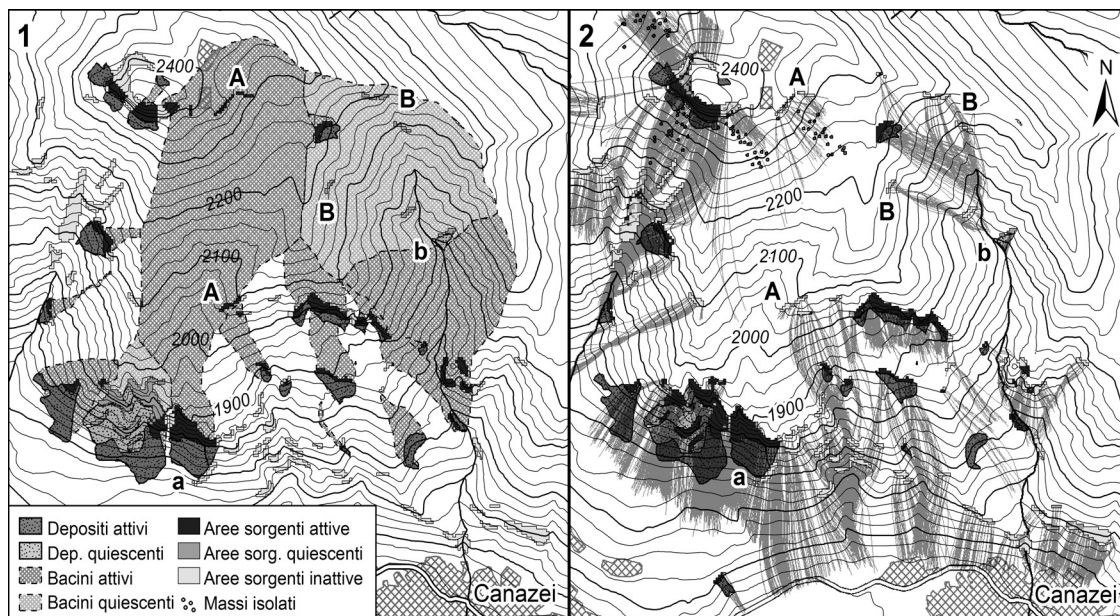


Fig. 2. Esempio di classificazione delle aree sorgenti di crollo come attive, inattive e quiescenti attraverso (1) un approccio idrologico (Duarte and Marquínez, 2002) e (2) un approccio fisicamente-basato (HY-STONE). Le lettere "A" e "B" indicano diversi esempi di aree di crollo mal classificate dall'approccio idrologico, che le associa erroneamente al bacino di "drenaggio" dei depositi "a" e "b". L'analisi delle traiettorie calcolate da HY-STONE, invece, dimostra che queste aree sorgenti non contribuiscono alla formazione dei depositi "a" e "b" e sono pertanto da classificare come inattive.

Example of classification of rockfall source areas as active, dormant and inactive through (1) an hydrological approach (Duarte and Marquínez, 2002) and (2) a process-based approach (HY-STONE). Letters "A" and "B" indicate different examples of rockfall source areas misclassified by the hydrological approach, wrongly linking them to the activity of the scree slope deposits "a" and "b". The analysis of computed rockfall paths demonstrates that these source areas do not contribute to the development of the scree slopes by rockfall processes.

HY-STONE incorpora un algoritmo cinematico ed uno ibrido (misto cinematico-dinamico), e permette di simulare i processi di caduta libera, rimbalzo e rotolamento su una morfologia tridimensionale derivante dal DEM. Il codice

permette di "lanciare" un numero variabile di blocchi con forma e dimensioni differenti da ogni punto dello spazio. Attraverso un approccio stocastico, il codice permette inoltre di considerare la variabilità di diversi parametri del

modello (velocità iniziale, restituzione tangenziale e normale, attrito al rotolamento, etc.) utilizzando diverse distribuzioni di probabilità (normale, uniforme, log-normale, etc.) all'interno di determinati range di variazione. Il codice consente inoltre di incorporare nella simulazione l'effetto della vegetazione e delle strutture di contenimento. Gli input del modello sono matrici raster (aree sorgenti, coefficienti di restituzione, forma e massa dei blocchi, etc.) e gli output sono sia in forma raster (per ogni cella: numero di passaggi, velocità e energie medie, minime e massime dei blocchi, altezze medie, minime e massime delle traiettorie) sia in forma vettoriale (punti di impatto, traiettorie lineari 3D, punti di arresto).

Per la simulazione con HY-STONE, sono stati lanciati da ogni area sorgente 5 blocchi, per un totale di 1.109.575 lanci. Si sono quindi analizzate le intersezioni tra traiettorie vettoriali e poligoni di accumulo (o buffer dei blocchi isolati) con diverse attività. Un'area sorgente è stata classificata come attiva se almeno l'80% delle sue traiettorie intersecano depositi attivi o blocchi isolati (Tab. 1).

Tab. 1: Classificazione dell'attività delle celle appartenenti alle aree sorgenti mappate nell'inventario delle frane.
Classification of the activity of the grid cells appertaining to the rockfall source areas of the inventory map.

Attività	Numero di celle	%
Attiva	112,494	50.7
Inattiva	65,345	29.4
Quiescente/non classificato	44,076	19.9
Totale	221,915	100.0

Se invece le traiettorie di un'area sorgente non raggiungono alcun deposito o blocco isolato, quest'area sorgente viene classificata come inattiva. Le restanti aree sorgenti sono classificate come quiescenti/stabilizzate.

4. Caratterizzazione delle aree sorgenti di crollo attraverso un approccio statistico

Nella fase successiva del lavoro, le aree sorgenti sono state utilizzate per costruire un modello discriminante che leghi la loro attività con le variabili geo-ambientali potenzialmente responsabili di tale attività. Quest'analisi permette in primo luogo di analizzare le caratteristiche ambientali associate all'attività delle aree sorgenti; quindi, consente di associare ad ogni area sorgente una probabilità di innesco che può essere utilizzata per la costruzione della carta di suscettibilità. L'analisi è stata effettuata utilizzando le celle come unità statistica, selezionando solo quelle attive e inattive. In totale sono state analizzate 65345 celle inattive (l'intero campione) e un ugual numero di celle attive selezionate casualmente dal campione disponibile (training set).

Il modello discriminante ha selezionato 23 variabili indipendenti attraverso una procedura stepwise (Tab. 2). Di queste variabili, sette sono litologiche, sei strutturali, una legata alla presenza di grandi frane, cinque legate alle

caratteristiche morfologiche dei versanti e dei canali, due correlate con condizioni micro-climatiche e due legate a tipologie di uso del suolo. Con questo set di variabili il modello è stato in grado di predire correttamente il 74.6% delle aree sorgenti attive, e il 71.2% di quelle inattive, con un potere predittivo complessivo pari al 72.9% (Tab. 2b). A parziale conferma della robustezza del modello si osserva che il 74% delle aree attive non selezionate dal modello (validation set) sono state correttamente classificate. Le aree sorgenti quiescenti sono state classificate per il 40.4% come attive e per il 59.6% come inattive. La probabilità di appartenenza al gruppo "attivo" viene considerata come una probabilità spaziale di innesco dei fenomeni di crollo.

5. Modellazione della propagazione dei crolli

Usando il codice HY-STONE è stata simulata la propagazione di 30 blocchi da ognuna delle celle sorgenti precedentemente descritte, per un totale di 6.657.450 blocchi "lanciati".

Sono stati sviluppati due modelli: nel primo (VAR), è stata associata ad ogni blocco la probabilità di innesco della cella sorgente calcolata con l'analisi discriminante; nel secondo (FIX) è stata associata a ogni blocco una probabilità fissa, pari a 0,5. In entrambi i casi la frequenza di transito per ogni cella del DEM è calcolata sommando le probabilità di innesco di ogni blocco passante per la cella.

E' utile osservare come la distanza massima di espandimento, la velocità e l'energia dei blocchi non venga influenzata dalla probabilità di innesco e sia quindi uguale nei due modelli.

Per calibrare i modelli è stata suddivisa l'area di studio in 42 unique-condition areas ottenute sovrapponendo la carta dell'uso del suolo (8 classi), la carta della litologia superficiale (6 classi) e la carta della litologia del substrato (7 classi). Ad ogni unique condition sono stati assegnati dei coefficienti di restituzione normale/tangenziale e degli angoli di attrito al rotolamento, inizialmente ottenuti dalla letteratura (Pfeiffer and Bowen, 1989; Azzoni et al., 1995) e successivamente modificati per calibrazione.

I modelli sono stati sviluppati utilizzando il codice HY-STONE con algoritmo ibrido, variando stocasticamente i parametri più rilevanti del modello. Questo, insieme all'elevato numero di traiettorie simulate, permette di tenere in conto la notevole variabilità dei parametri e la complessità delle condizioni di terreno. Per quanto riguarda la massa dei blocchi lanciati, si è deciso di utilizzare una distribuzione di tipo esponenziale, con valore minimo (e più frequente) di 0.5 m³ e massimo di 33.5 m³. Questi valori sono in accordo con le osservazioni di terreno sulla dimensione dei blocchi.

La differenza nella frequenza di transito tra modello a probabilità di innesco variabile e fissa è molto variabile sul territorio e riflette le diverse caratteristiche delle aree sorgenti di crollo (Fig. 3). La frequenza di transito del modello VAR è significativamente minore lungo la valle

principale, soprattutto sul versante sinistro. D'altra parte, la frequenza è maggiore in corrispondenza della Costabella, del Catinaccio, e delle pareti riolitiche a sud della Valle di S. Pellegrino.

Tab. 2. Modello discriminante dell'attività delle aree sorgenti di crollo. (a) Lista delle 23 variabili selezionate dalla procedura stepwise come migliori predittori. Le più importanti sono mostrate in grassetto. (b) Classificazione delle aree sorgenti come attive o inattive
Discriminant model of rockfall onset susceptibility. (a) List of the 23 variables selected by stepwise discriminant analysis as the best predictors. The most important standardized discriminant function coefficients (SDFC) are shown in bold. (b) Classification of active and inactive source cells

a)

Variabile	Descrizione	SDFC
CAO	Presenza di breccie caotiche nella cella sorgente	-0.073
CONG	Presenza di conglomerati nella cella sorgente	-0.036
DOLO	Presenza di dolomiti nella cella sorgente	.084
LAVA	Presenza di lave nella cella sorgente	-0.048
PILLOW	Presenza di <i>pillow</i> lave nella cella sorgente	-0.043
TUFI	Presenza di tufi nella cella sorgente	-0.033
VULC	Presenza di rioliti nella cella sorgente	.425
SLID_AQR	Presenza di deposito di grandi frane nella cella sorgente	.273
REG	Cella sorgente a reggipoggio	.177
TRA	Cella sorgente a traversopoggio	-0.063
MASS	Struttura massiva dell'ammasso	.180
CAOT	Struttura caotica dell'ammasso legata alla presenza di diverse famiglie di discontinuità	.545
LIN_DENS	Densità dei lineamenti principali in un intorno di 50 m dalla cella sorgente	.005
FILON_DISS	Log della distanza della cella sorgente da filoni	-.288
SLOPE_PX	Pendenza della cella sorgente	.202
ELV_PX	Quota della cella sorgente	.243
CURV_PROF	Curvatura lungo profilo della cella sorgente	-0.032
LNK_ANG	Pendenza dell'asta che delimita l'unità di versante a cui appartiene la cella sorgente	-0.078
SLO_LEN	Lunghezza dell'unità di versante a cui appartiene la cella sorgente	.051
M_ESE	Interazione di esposizione N-NE e quota della cella sorgente	.064
M_WNW	Interazione di esposizione W-NW e quota della cella sorgente	.104
NUDO	Assenza di vegetazione (o vegetazione rupestre/di detrito) nella cella sorgente	.550
PASCOLO	Presenza di pascolo nella cella sorgente	.066

b)

Appartenenza reale alle classi	Appartenenza predetta dal modello	
	Celle sorgenti inattive	Celle sorgenti attive
<i>Training set</i>	Celle sorgenti inattive	71.2%
	Celle sorgenti attive	25.4%
<i>Validation set</i>	Celle sorgenti inattive	-
	Celle sorgenti attive	25.3%
Sorgenti quiescenti	Non classificate	59.6%
		40.4%

Celle del training set classificate correttamente: 72.9%.

Celle del validation set classificate correttamente: 74.7%

Al fine di evidenziare le differenze tra i modelli, è stata analizzata l'estensione del territorio avente un valore di frequenza di transito superiore ad una certa soglia (Fig. 4). Questo permette di verificare quanta area presenta un grado di pericolosità (funzione della frequenza di transito) superiore ad un certo livello soglia.

L'area potenzialmente pericolosa nel modello a probabilità di innesco variabile tende a decrescere più rapidamente rispetto al modello a probabilità fissa. La differenza è circa il 2% per una soglia di frequenza di transito pari a 1, e circa il 5% per un soglia di 10.

6. Valutazione della suscettibilità da crollo

La suscettibilità da crollo, per ogni cella, è una funzione della frequenza di transito (f) e dell'intensità espressa in termini di altezza delle traiettorie (h) ed energia cinetica (e) (Crosta e Agliardi, 2003). Per avere grandezze paragonabili, le tre componenti della suscettibilità sono riclassificate in tre classi (bassa/media/alta, Tab. 3).

Queste classi sono definite tenendo conto in particolare delle caratteristiche strutturali e progettuali (massima energia assorbibile, altezza, etc.) delle diverse tipologie di difesa paramassi. Per i dettagli su questa metodologia si rimanda a Crosta e Agliardi, 2003.

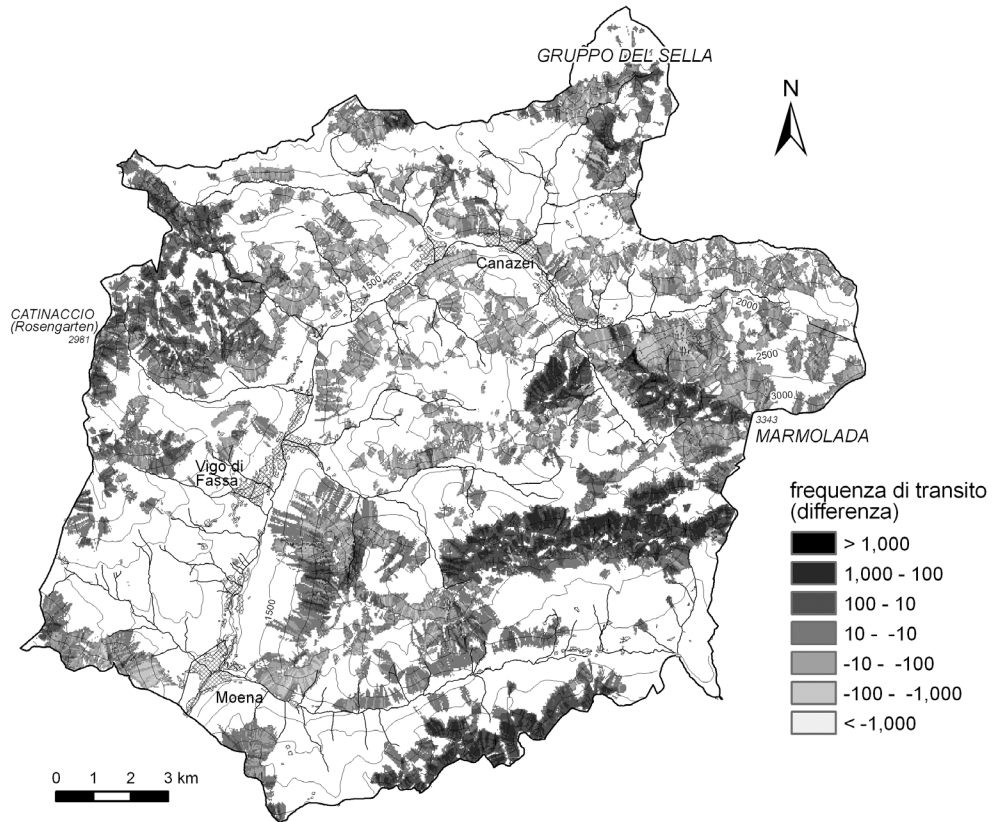


Fig. 3. Differenze nella frequenza di transito calcolata per il modello a probabilità di innesco variabile e quello a probabilità di innesco fissa (VAR – FIX)

Differences in transits frequency for the models with variable and fixed onset susceptibility (VAR – FIX)

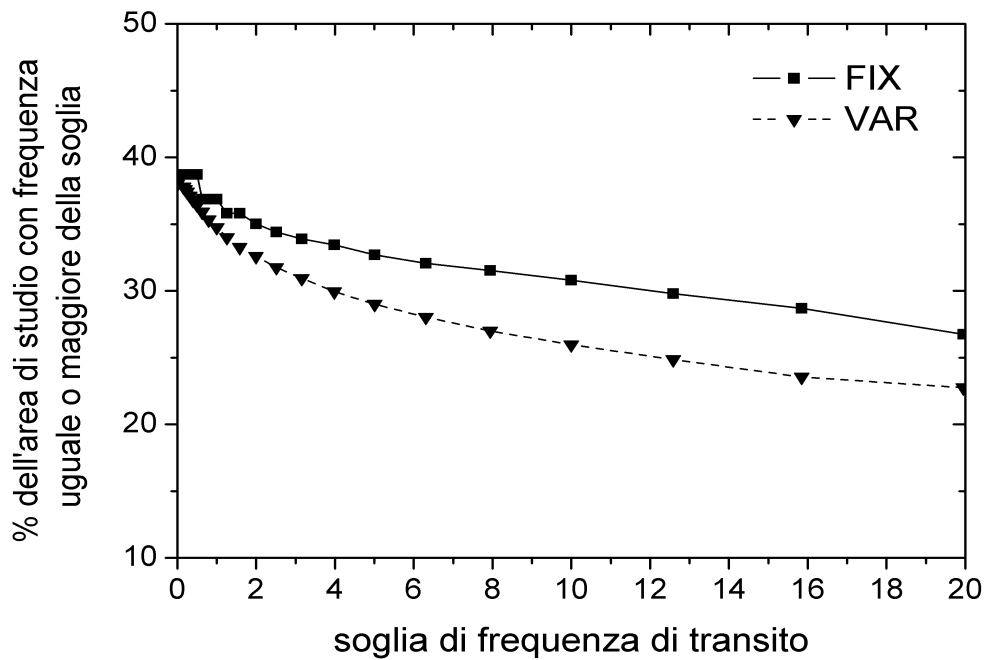


Fig. 4. Percentuale di area con una frequenza di transito uguale o maggiore di u determinato valore soglia

Percent of study area with a transit frequency equal or greater than the cut-off value

Tab. 3. Schema di riclassificazione dei parametri utilizzato per la definizione del Rockfall Hazard Vector (RHV). La frequenza di transito è normalizzata per il numero di blocchi lanciati moltiplicato per 5 (Crosta e Agliardi, 2003)

Parameter reclassification scheme used in the Rockfall Hazard Vector (RHV) procedure. The transit frequency is normalised by the number of launched blocks from each source cell multiplied by 5 (Crosta e Agliardi, 2003)

classe	Frequenza di transito normalizzato (f , #)	Energia cinetica (e , kJ)	Altezza (h, m)
1	$0 < f \leq 0,2$	$0 < e \leq 700$	$0 \leq h \leq 4$
2	$0,2 < f \leq 1$	$700 < e \leq 2500$	$4 < h \leq 10$
3	$f > 1$	$e > 2500$	$h > 10$

Le tre componenti riclassificate della suscettibilità vengono utilizzate per costruire il vettore della pericolosità (Rockfall Hazard Vector, RHV), il cui modulo viene utilizzato come criterio di classificazione della suscettibilità (Fig. 5).

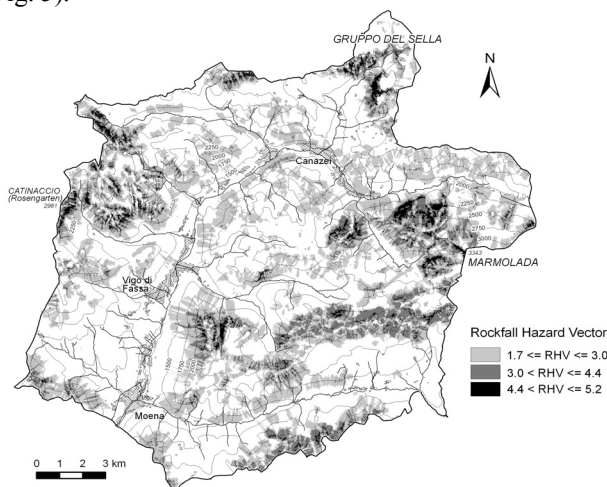


Fig. 5. Carta della suscettibilità da crollo della Val di Fassa con probabilità di innesco variabile calcolata tramite analisi discriminante (VAR)

Rockfall susceptibility map of the Val di Fassa with variable onset susceptibility derived from the discriminant function (VAR)

7. Discussione e conclusioni

La metodologia presentata per la valutazione della pericolosità da crollo in Val di Fassa prevede tre passaggi fondamentali: 1) la classificazione a priori delle aree sorgenti in funzione dell'attività; 2) la costruzione di un modello statistico per la caratterizzazione della probabilità di innesco dei crolli; 3) la simulazione delle possibili traiettorie per costruire la carta della suscettibilità sull'intero territorio analizzato.

Per quanto riguarda il primo passaggio, si è deciso di utilizzare come stimatore della probabilità di innesco delle aree sorgenti la presenza e il grado di attività dei loro accumuli a valle, così come interpretati dai geomorfologi. Questa scelta è giustificata dal fatto che aree sorgenti con elevata probabilità di innesco generano ricorrenti distacchi

che disturbano la vegetazione e impediscono la formazione di una copertura continua, formando quindi depositi che vengono riconosciuti come attivi. Nel presente lavoro si propone una tecnica innovativa per associare ad ogni deposito mappato le aree sorgenti "veramente" responsabili della sua formazione, aree alle quali verranno quindi associati i corretti attributi di attività. Il metodo è fisicamente significativo e può essere utilizzato anche per altre problematiche rilevanti per il rischio come l'analisi degli impatti potenziali su strutture antropiche (Crosta et al, 2005).

L'analisi discriminante applicata alle aree sorgenti ha permesso in primo luogo di riconoscere quelle che sono le condizioni geo-ambientali più critiche per l'innescio dei crolli nell'area di studio. Le variabili di tipo geologico sono le più numerose nel modello e sono quelle che esercitano un peso maggiore. In particolare, la presenza di vulcaniti e la struttura caotica dell'ammasso, legata alla presenza di diverse famiglie di discontinuità, sono le variabili che pesano di più nel modello, insieme all'assenza di vegetazione. I risultati del modello discriminante appaiono soddisfacenti sia in termini di qualità e significatività delle variabili entrate nel modello, sia in termini di potere predittivo del modello. Una limitazione emerge dal fatto che le variabili utilizzate dal modello sono variabili spazialmente distribuite, quali la geologia e le variabili morfologiche. D'altra parte, è noto che l'innescio dei crolli è controllato da condizioni locali (famiglie di discontinuità, presenza di acqua, etc.) che non è stato possibile mappare alla scala dell'analisi. Quindi, è ipotizzabile che parte della fisica coinvolta nel processo di innesco dei crolli rimanga sconosciuta al modello. Va ricordato che in caso di disponibilità di dati strutturali e geomeccanici di dettaglio sarebbe anche possibile determinare le probabilità di distacco tramite esecuzione di test di fattibilità cinematica spazialmente distribuiti (Jaboyedoff et al., 1999).

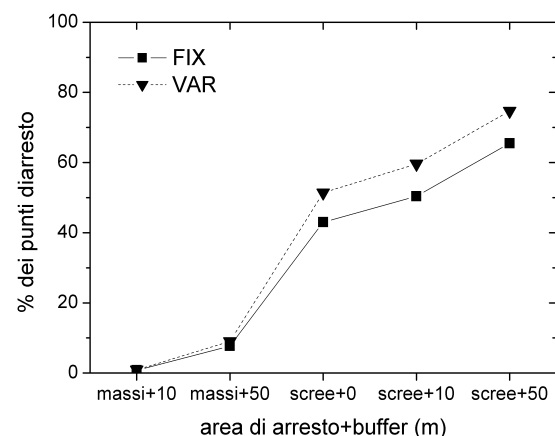


Fig. 6. Percentuale di arresti all'interno dei depositi o in corrispondenza di massi isolati. Sono analizzati buffer di 10 m e 50 m attorno a depositi e massi isolati

Percentage of arrest points within scree deposits or corresponding to isolated large boulders. 10 m and 50 m buffers around scree deposits and isolated boulders are analysed

I risultati del modello statistico sono stati utilizzati per calcolare la probabilità di innesco delle aree sorgenti, probabilità che è stata inserita nella simulazione dei crolli. Per la simulazione della propagazione e la valutazione finale della suscettibilità sono stati sviluppati due approcci, con probabilità di innesco fissa o variabile. Per confrontare le performance dei modelli, sono stati studiati i punti di arresto delle traiettorie, ed è stato valutato in che percentuale tali punti ricadono in corrispondenza degli accumuli di deposito o dei massi isolati come sarebbe ottimale dal punto di vista geomorfologica (Fig. 6). Per migliorare tale confronto e per tenere in considerazione le incertezze nella mappatura dei depositi e dei massi, sono stati analizzati anche i buffer di 10 e 50 m attorno a questi elementi.

La percentuale di arresti corretti in corrispondenza di massi isolati è molto bassa (< 10% per il buffer a 50 m), e dipende dal fatto che il numero di massi isolati mappati è relativamente limitato (2620 massi). L'area occupata dai buffer di questi massi occupa solo lo 0,3% e 7,1% del territorio per buffer a 10 e 50 metri. Inoltre, i grandi blocchi isolati rappresentano condizioni di propagazione eccezionali (grandi volumi, effetto della micromorfologia, effetto della neve, etc.), ed è pertanto normale che solo pochi blocchi simulati raggiungano tali punti. La percentuale di arresti corretti in corrispondenza o in vicinanza dei depositi di crollo è molto maggiore, e supera il 75% per il modello a probabilità di innesco variabile. In tutti i casi, il modello a probabilità variabile mostra una percentuale di arresti

corretti maggiore rispetto a quello a probabilità fissa, dimostrando quindi di essere più realistico e di avere una performance migliore.

Dal punto di vista della gestione del territorio, la stima della probabilità di innesco e la sua integrazione nella simulazione delle traiettorie costituiscono dei significativi progressi per la valutazione della pericolosità da crollo. Nonostante alcune limitazioni dovute alla complessità del territorio e alla difficoltà di modellazione dei processi coinvolti, la procedura utilizzata ha permesso di migliorare notevolmente la valutazione della suscettibilità. In particolare, i miglioramenti sono stati più sensibili nelle zone di basso versante, che sono quelle urbanizzate e più interessanti dal punto di vista della gestione del territorio. I miglioramenti hanno pertanto un grande impatto sulla problematica del rischio.

8. Ringraziamenti

Ringraziamo il Dr. Marco Stefani, Università di Ferrara, per avere fornito la carta geologica della Val di Fassa. Samuel Cucchiario, Elena Valbuzzi e Sabrina Iannaccone hanno partecipato alla redazione dell'inventario dei dissesti e vengono pertanto ringraziati. La ricerca è stata finanziata in parte dal progetto FIRB RBAU014LRS e dal progetto PRIN "Frane catastrofiche: studio dei cinematismi e delle dinamiche dei versanti mediante l'uso di modelli analogici e numerici per la valutazione del rischio.

Bibliografia

- Agliardi, F., Crosta, G., 2003. High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 40, 455-471.
- Azzoni, A., La Barbera, G., Zaninetti, A., 1995. Analysis and prediction of rock falls using a mathematical model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts* 32 (7), 709-724.
- Cancelli, A., Crosta, G., 1993. Hazard and risk assessment in rockfall prone areas. In: Skipp B.O. (Ed.), *Risk Reliability in Ground Engineering*, Thomas Telford, pp. 177-190.
- Carrara, A., 1983. Multivariate models for landslide hazard evolution. *Mathematical Geology* 15, 403-427.
- Carrara, A., Campedel, P., Crosta, G.B., Stefani, M., Bozzolan, M., Frattini, P., 2004. Valutazione della pericolosità geologica in Val di Fassa, Trentino: Realizzazione della parte trentina del foglio geotematico n. 28 "La Marmolada". Final Project report, unpublished (in Italian).
- Chau, K.T., Tang, Y.F., Wong, R.H.C., 2004. GIS based rockfall hazard map for Hong Kong. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41, 3, 530-530.
- Crosta, G.B., Agliardi, F., 2003. A new methodology for physically-based rockfall hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3, 407-422.
- Crosta, G.B., Agliardi, F., Frattini, P., Imposimato, S., 2004. A three-dimensional hybrid numerical model for rockfall simulation. *Geophysical Research Abstracts* 6, n. 04502.
- Crosta, G.B., Agliardi, F., Frattini, P., 2005. Modelling rockfall impact on structures. *Geophysical Research Abstracts*, 7, 08555.
- Descouedres, F., Zimmermann, Th., 1987. Three-dimensional dynamic calculation of rock falls. *Proc. 6th Int. Congress of Rock Mechanics*. Montreal, Canada, pp. 337-342.
- Duarte, R.M., Marquinez, J., 2002. The influence of environmental and lithologic factors on rockfall at a regional scale: an evaluation using GIS. *Geomorphology* 43, 1-2, 117-136.
- Evans, S.G., Hungr, O., 1993. The assessment of rock fall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal* 30, 620-636.
- Hantz, D., Vengeon, J.M., Dussauge, C., 2003. An historical, geomechanical and probabilistic approach to rock-fall hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3, 693-701.
- Hoek, E., Bray, J.W., 1981. *Rock slope engineering*. 3rd edition. Institution of Mining and Metallurgy, London.
- Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Marro, C., Philippoussian, F., Rouiller, J.D., 1999. Detection of rock instabilities: Matterrock methodology. *Joint Japan-Swiss Sem. on Impact Load by Rock Falls and Protection Structures*. Kanazawa, Japan, pp. 37-43.
- Pfeiffer, T., Bowen, T., 1989. Computer simulation of rock falls. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists* 26, 1, 135-146.
- Pierson, L.A., Davis, S.A., Van Vickle, R., 1990. *Rockfall Hazard Rating System Implementation Manual*. Report FHWA-OR-EG-90-01, Federal Highway Administration (FHWA), U.S. Department of Transportation, Washington, DC.
- Varnes, D.J., Commission on Landslides and Other Mass Movements (IAEG), 1984. *The principles and practise of landslide hazard zonation*. The UNESCO Press, Paris.