

## Valutazione preliminare della pericolosità da frana nell'area del M. Salta (Prealpi Friulane), con particolare riferimento ai fenomeni di crollo.

Paola Reichenbach<sup>1</sup>, Fabrizio Tagliavini<sup>2</sup>, Fausto Guzzetti<sup>3</sup>, Alessandro Pasuto<sup>4</sup>, Kazunori Fujizawa<sup>5</sup>

<sup>1</sup>IRPI-Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica CNR, Perugia, Italy paola.reichenbach@irpi.cnr.it

<sup>2</sup>Autore corrispondente. IRPI-Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica CNR, Padova, Italy fabrizio.tagliavini@irpi.cnr.it

<sup>3</sup>IRPI-Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica CNR, Perugia, Italy fausto.guzzetti@irpi.cnr.it

<sup>4</sup>IRPI-Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica CNR, Padova, Italy alessandro.pasuto@irpi.cnr.it

<sup>5</sup>PWRI-Public Work Research Institute, Tsukuba, Japan fujisawa@pwri.jo.jp

### *Preliminary study of rock fall hazard assessment in the Mt. Salta area (eastern Italian Alps)*

**ABSTRACT.** The paper deals with the preliminary results of a rock-fall hazard assessment for the Mt Salta landslide, in the Vajont valley (northeast Italy). The Mt Salta landslide is induced by the presence of the Mt Borgà regional thrust, which uplifts limestone Jurassic in age on top of a Formation Cretaceous in age. Above the thrust zone, folded, highly fractured bedding planes dip steeply towards the slope free face, producing a highly unstable setting. Several historical landslide events were reported in the area; the first one dates back to the XVII century. Different landslide hazard scenarios using STONE, a 3-dimensional rock-fall simulation program have been determined. The software computes 3-dimensional rock-fall trajectories starting from: (i) digital terrain model (DTM), (ii) location of rock-fall release points (source areas), and (iii) maps of the dynamic friction coefficient and of the coefficients of normal and tangential energy restitution. For each DTM cell the software calculates the number of rock falls passing through, the maximum rock-fall velocity and the maximum flying height. These informations are useful to ascertain rock-fall hazard. For the study area, we obtained a DTM with a ground resolution of 5x5m through the interpolation of 5 m contour lines, acquired from topographical maps at 1:5,000 scale. The source areas of rock-falls were identified through the analysis of medium scale, vertical stereoscopic aerial photographs and field surveys. Parameters controlling the loss of energy at impact points and during rolling were obtained from a detailed (1:5000 scale) surface geology map. Field information on historical rock-fall deposits, and rock-fall trajectories, allowed to calibrate the modelling parameters, and validate the results. Visual comparison of the model results with the mapped rock-falls confirmed the accuracy of the model.

*Key terms:* rock fall, hazard, modelling

*Termini chiave:* frana per crollo, pericolosità, modello di propagazione

### **Riassunto**

Sono di seguito riportati i risultati dello studio preliminare per la valutazione della pericolosità della frana del Monte Salta (Valle del Vajont, PN). La frana è classificata come fenomeno di crollo, indotto dal sovrascorrimento regionale del M. Borgà, il quale porta il Calcare del Vajont (Giurassico) a sovrascorrere sulla Formazione della Scaglia Rossa di età Cretacea.

La nicchia di distacco della frana è posta proprio in prossimità della piega a ginocchio legata alla presenza del sovrascorrimento; gli sforzi tensionali distribuiti su questa parte della superficie di strato creano una serie di fratture che isolano diedri di dimensioni importanti, i quali inducono delle situazioni di rischio per gli elementi vulnerabili presenti nell'area, tra i quali il più sensibile è senza dubbio il paese di Casso.

Sono stati ipotizzati diversi scenari di evoluzione della frana usando STONE, un programma di simulazione 3-dimensionale per i fenomeni di crollo. Il software elabora diverse traiettorie partendo da un modello digitale del terreno e sulla base di alcune carte tematiche che rappresentano i coefficienti di assorbimento all'urto e di restituzione normale e tangenziale. Le aree sorgenti di sedimento e le carte parametriche sono state ottenute da attenti studi geomorfologici di campagna, i risultati di seguito presentati sono poi stati confermati dalle traiettorie di crolli recenti rilevate direttamente sul terreno.

### **Introduzione**

La frana del M. Salta ha avuto origine nel 1674, probabilmente a seguito di un evento sismico di rilevante importanza, che ha mobilitato un volume approssimativo

di 1 milione di m<sup>3</sup>. Il fenomeno coinvolge gli strati della formazione del Calcarea del Vajont che sono fortemente piegati e fratturati a causa della presenza dell'importante sovrascorrimento del M. Borgà (Doglioni e Bosellini, 1987). Nei secoli il fenomeno si è più volte riattivato con eventi di diversa intensità. Negli anni sessanta alcuni grossi blocchi hanno danneggiato la strada che collega Casso alla SS della Val Cellina, e negli anni '90 altri blocchi, di minori dimensioni, hanno interessato la medesima area. Nei primi anni '90 in corrispondenza della parte più distale del corpo di frana, ad oriente dell'abitato di Casso, è stata attivata una cava di prestito con l'intento di mitigare il rischio per la zona abitata.

L'attività di ricerca, condotta in collaborazione con il Dipartimento di Georisorse e Territorio dell'Università di Udine, per conto della Direzione Regionale della Protezione Civile del Friuli-Venezia Giulia, ha avuto lo scopo di valutare la pericolosità del fenomeno ed individuare possibili opere di sistemazione. In tale ambito è stato necessario perimetrare le aree di possibile risentimento effettuando una modellazione delle traiettorie di rotolamento massi. Per questo si è utilizzato STONE, un codice di calcolo sviluppato anche dal CNR-IRPI, che ha mostrato un notevole grado di precisione ed affidabilità.

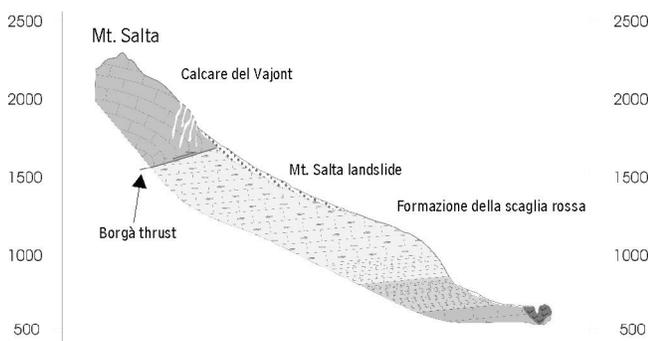


Figura 1: Sezione geologica del versante meridionale del Monte Salta

*Southern Slope of Mt Salta cross section*

### Inquadramento geologico, morfologico e strutturale

Il fenomeno oggetto del presente studio interessa le pareti calcaree del M. Salta, dove la grande acclività del pendio unitamente alle sue caratteristiche geologiche e strutturali, determinano una notevole fragilità dell'ammasso roccioso. Questo settore è infatti interessato dal lineamento del M. Borgà che porta il competente Calcarea del Vajont (Giurassico) a sovrascorrere sulla formazione calcarea marnosa della Scaglia Rossa di età cretacea (Fig. 1). La presenza di tale struttura ha come conseguenza una giacitura degli strati del Calcarea del Vajont a franapoggio con pendenza circa uguale a quella del versante. Oltre allo sfavorevole assetto strutturale degli strati, il versante meridionale del M. Salta è interessato anche da una fitta e

complessa fatturazione (Ghirotti, 1995). Le fratture, beanti fino ad una larghezza di parecchi metri, isolano porzioni di roccia di volumetrie variabili da alcuni metri cubi fino a 100.000 m<sup>3</sup>, che possono, in situazioni di particolare stress, essere soggette a fenomeni di ribaltamento (*toppling*) e/o crollo (Fig. 2).

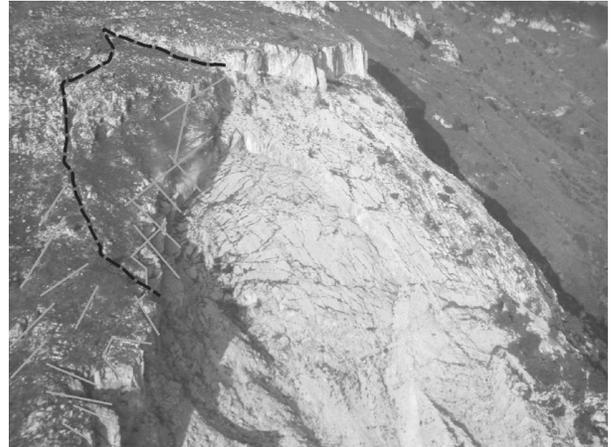


Figura 2: La nicchia di distacco: con la linea tratteggiata è evidenziata la frattura principale che potenzialmente isola una porzione di roccia di volume pari a 100.000 m<sup>3</sup>

*Main scarp: the dotted line shows the big fracture that could involve around 100.000 cubic meters of consistent rock*

La raccolta dati ha quindi privilegiato le grandi famiglie strutturali, legate alle principali discontinuità tettoniche che interessano il rilievo. Dal confronto di questi elementi con le caratteristiche di fratture di neoformazione è derivata quindi la possibilità di capire il tipo di cinematica evolutiva che ha interessato il versante in epoca recente e, quindi, il tipo di fenomenologia di dissesto che si è sviluppata in relazione a questo assetto strutturale. Si sono individuate quattro famiglie di fratture principali, ragionevolmente orientate secondo le direttrici connesse alle strutture tettoniche più importanti presenti in zona (Fig. 3). Dallo studio strutturale è emerso soprattutto come le famiglie "A" "C" e "D" (N 30, N 330, N 280) (Fig. 4) interagiscono con l'orientazione della parete, tendenzialmente orientata lungo la direzione N 70 (famiglia B), isolando dei volumi rocciosi che tendono all'instabilità. Per la realizzazione delle carte tematiche utili allo sviluppo del modello è stata effettuata una approfondita analisi fotointerpretativa su serie di immagini multitemporali. Sono seguiti rilevamenti di dettaglio sul terreno che hanno permesso di caratterizzare, soprattutto dal punto di vista litologico-tessiturale, i depositi e quaternari e determinare per essi i più corretti coefficienti di risposta al rotolamento dei blocchi.

Nella Valle del Vajont sono infatti presenti depositi quaternari di grande rilevanza scientifica, generalmente ben conservati, che testimoniano la complessa dinamica glaciale che ha caratterizzato il periodo Pleniglaciale e Tardoglaciale in queste aree di confluenza tra gli apparati glaciali locali e il grande ghiacciaio presente nella Valle del Piave.

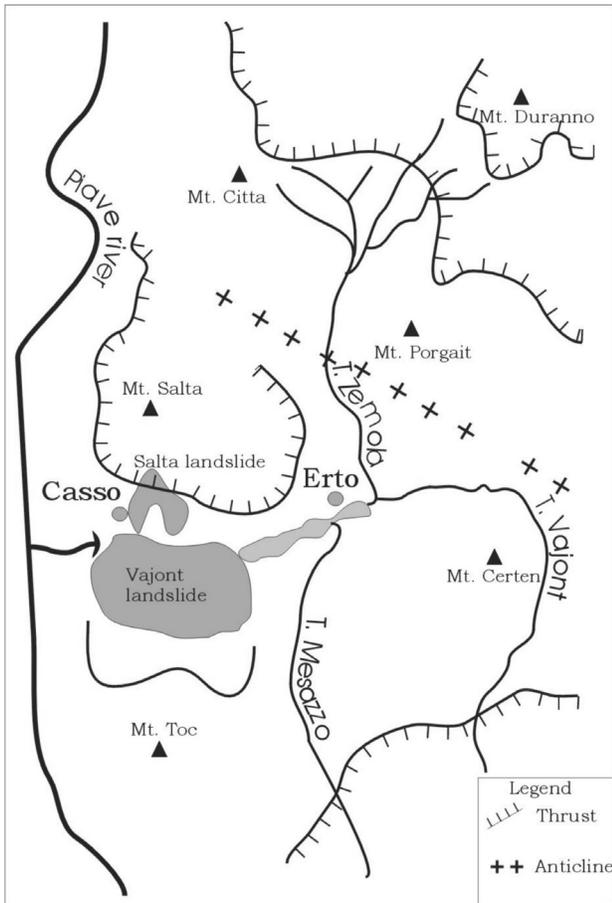


Figura 3: Inquadramento strutturale (da Leonardi, 1967 modificato)  
*Structural setting (after Leonardi, 1967, modified)*

blocchi variabile. Tutte queste informazioni sono poi state sintetizzate in una cartografia geomorfologica di dettaglio (Fig. 5) che ha cercato di mettere in evidenza soprattutto i processi che hanno condizionato l'evoluzione dell'area dal punto di vista gravitativo.

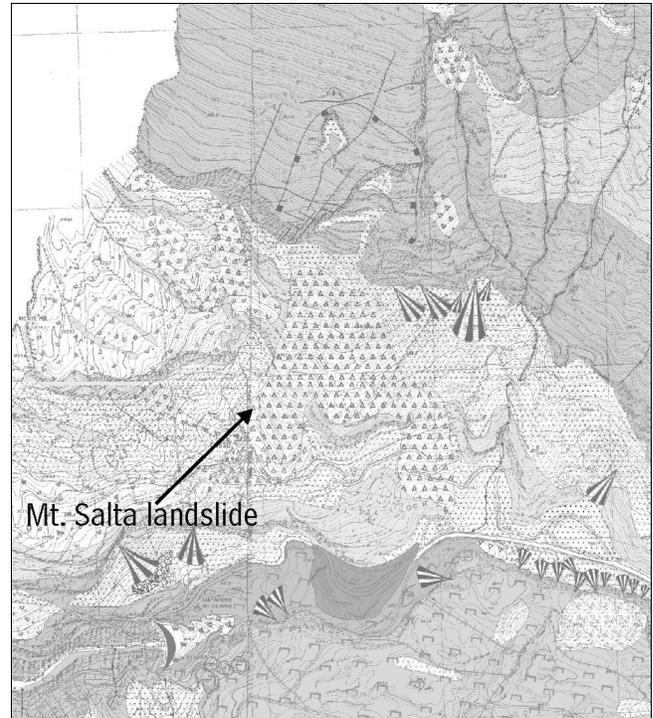


Figura 5: Carta Geomorfologica  
*Geomorphological map*

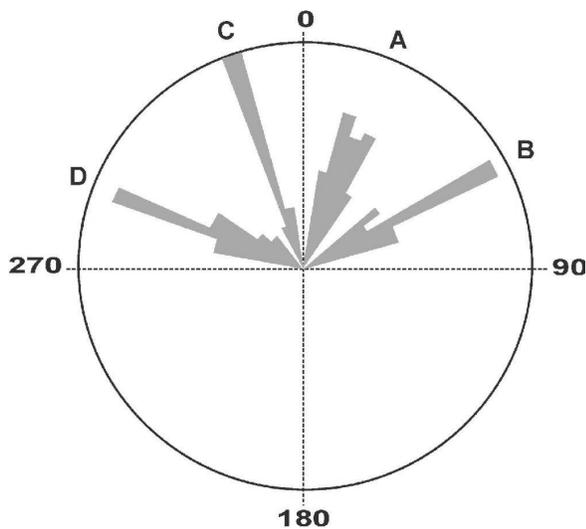


Figura 4: Diagramma a rosetta delle principali famiglie di fratture  
*Rose diagram of the main joint families*

A questi depositi si sono sovrapposti una serie di materiali d'origine gravitativa con spessori e dimensione dei

### Il modello

Il modello impiegato per l'analisi qui illustrata ipotizza e simula l'andamento delle possibili traiettorie dei blocchi che si possono separare dall'ammasso roccioso originario e il loro percorso lungo il versante; esso non prende ovviamente in considerazione la possibilità che il corpo detritico, una volta staccatosi dalla zona sorgente, possa essere soggetto ad una evoluzione diversa, reologicamente assimilabile, ad esempio, al flusso granulare secco (*dry debris flow*). Nel caso specifico è stato quindi adottato "STONE" (Guzzetti et al., 2002), un software sviluppato dal CNR-IRPI e che ha dimostrato un notevole grado di affidabilità ed accuratezza. "STONE" è un software per la simulazione tridimensionale e spazialmente distribuita del fenomeno di caduta massi. Il programma, implementa un modello cinematico di tipo *lumped mass*, ed è in grado di simulare tre dei quattro stati del moto che un masso, in caduta lungo un versante, può avere: caduta libera (volo), impatto (e rimbalzo), rotolamento. È stato possibile simulare inoltre la variabilità naturale dei parametri che controllano il fenomeno di caduta massi, ed in particolare la dissipazione della velocità (o dell'energia) durante gli urti e nelle fasi di rotolamento.

Per effettuare la simulazione “STONE” necessita di una serie di dati d’ingresso:

1. una descrizione dettagliata della topografia, attraverso un DTM, associata alle caratteristiche granulometriche e tessiture dei terreni sottostanti la zona di distacco, che, nel caso specifico, è stata desunta dall’interpolazione della Carta Tecnica Regionale alla scala 1:5000;

2. la localizzazione delle aree di partenza dei massi (celle sorgenti), ricavata dall’analisi strutturale condotta nella zona di distacco;

3. una carta del coefficiente di attrito dinamico al rotolamento, per la simulazione della perdita di velocità durante le fasi di rotolamento del masso (ottenuta tramite la riclassificazione della carta geomorfologica);

4. carte dei coefficienti di restituzione, normale e tangenziale, all’urto per la simulazione della perdita di velocità al momento dell’impatto del blocco con il terreno (anch’essa desunta dalla riclassificazione della carta geomorfologica).

Per la localizzazione delle celle sorgenti dei massi è stato effettuato un attento rilevamento di campagna il quale ha messo in evidenza tutte le zone di possibile distacco. Il rilevamento ha permesso di evidenziare anche la qualità dell’ammasso roccioso e quindi il suo grado di fratturazione. A questo proposito si sono anche valutati i diversi gradi di libertà dei blocchi più voluminosi in funzione dell’orientamento delle principali discontinuità e del versante. Le zone sorgenti sono quindi state distinte in funzione del loro grado di tettonizzazione in:

- aree estremamente fratturate
- aree mediamente fratturate
- aree scarsamente fratturate

Tale distinzione, rappresentata in figura 6 e che si può tradurre direttamente in predisposizione al crollo, ha permesso di ipotizzare scenari differenti in funzione della situazione strutturale delle varie scarpate considerate. Dalle aree estremamente fratturate è stato quindi simulato un distacco di 70 blocchi per ogni cella, mentre per quelle mediamente e scarsamente fratturate sono stati simulati distacchi rispettivamente di 40 e di 20 blocchi per cella.

I valori dei coefficienti di restituzione all’urto e dell’angolo d’attrito al rotolamento (Fig. 7), utilizzati nella realizzazione delle corrispondenti carte di input sono stati ottenuti tramite riclassificazione della carta geomorfologica e stabiliti sulla base di informazioni reperite in letteratura.

Il codice di calcolo “STONE” utilizza un modello vettoriale per l’elaborazione dei dati e per il calcolo delle traiettorie di caduta. I risultati delle elaborazioni sono forniti sia in formato *raster* (a griglia), sia in formato vettoriale (in 2 e 3 dimensioni).

Gli output raster sono costituiti da:

1. una mappa dei contatori delle traiettorie di caduta. Per ogni cella del modello è indicato il numero di traiettorie dei blocchi in caduta transitati (anche in volo) per quella determinata cella;

2. una mappa della massima velocità lungo le traiettorie di caduta. Per ogni cella è indicata la velocità massima calcolata lungo le traiettorie transitate sia in volo sia al suolo;

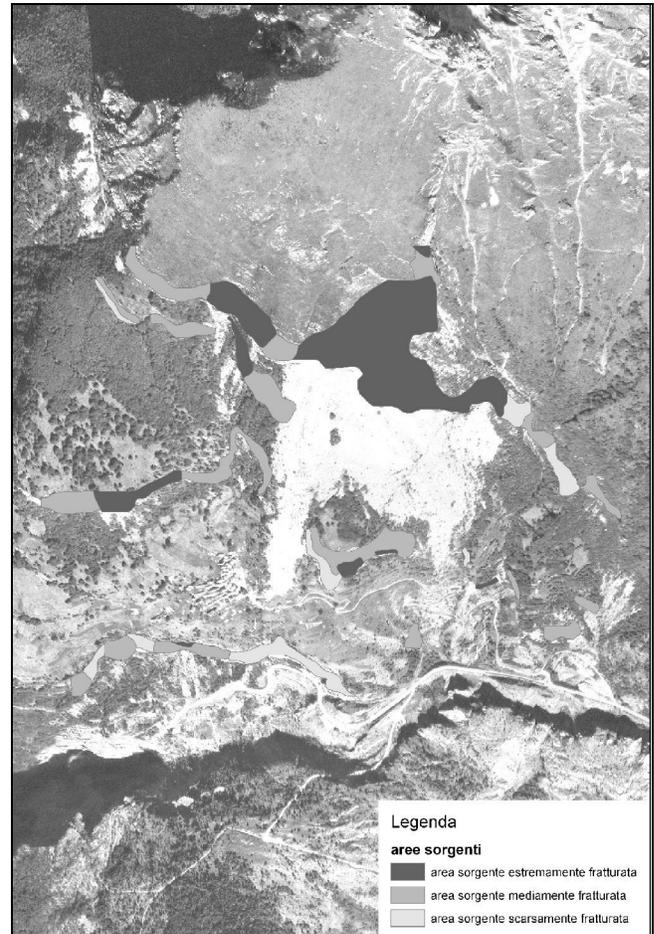


Figura 6: Carta delle aree sorgenti  
*Sediment source areas*

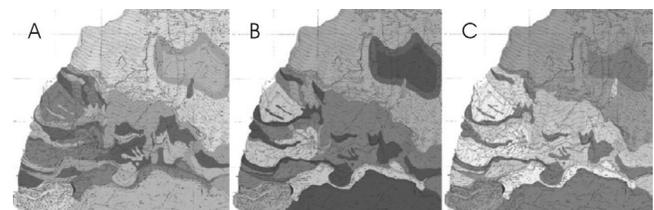


Figura 7: STONE carte di input: A) coefficiente di attrito dinamico B) coefficiente di restituzione normale C) coefficiente di restituzione tangenziale  
*STONE input maps: A) dynamic friction coefficient B) coefficient of normal restitution D) coefficient of tangential restitution*

3. una mappa della massima altezza da terra delle traiettorie di caduta. Per ogni cella è indicata la massima differenza di quota fra tutti i punti lungo le traiettorie transitate e la superficie topografica. In sostanza il

programma esplicita l'altezza attesa dei rimbalzi lungo la traiettoria considerata.

Se si assume che la probabilità di distacco dei massi da ogni area (cella) sorgente sia rappresentata dalla carta delle aree sorgenti, la carta delle traiettorie (contatori) (Fig. 8)

fornisce utili informazioni sulla probabilità di transito dei massi per ciascuna cella. Quindi, più elevato è il valore del contatore, maggiore sarà il numero di traiettorie che transitano in quella determinata cella e, di conseguenza, più elevate saranno le condizioni di pericolo.

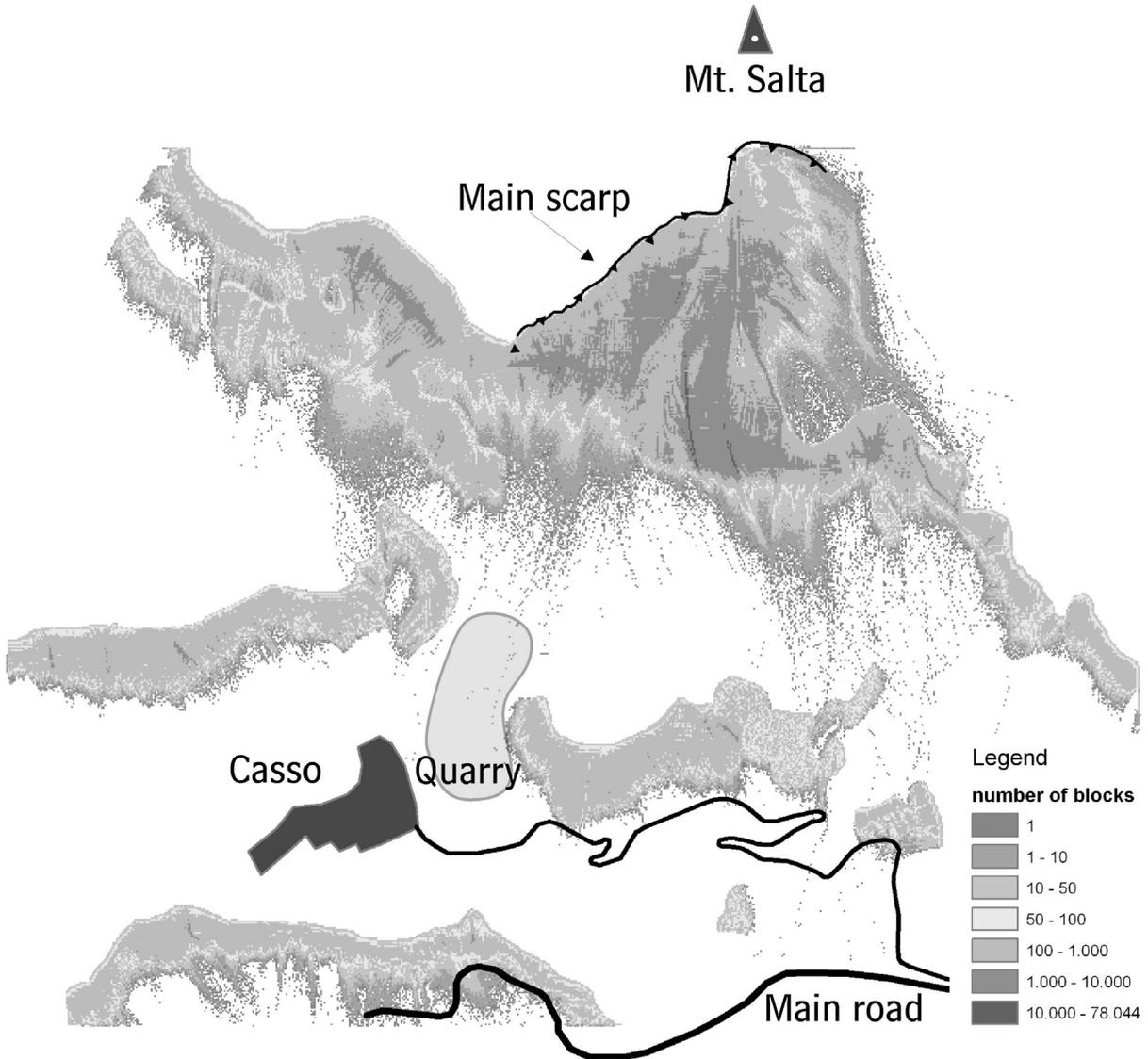


Figure 8: Carta delle possibili traiettorie  
*Trajectory map*

### Risultati e conclusioni

L'applicazione del modello STONE al caso in esame ha evidenziato come oltre il 12% dell'area considerata potrebbe essere interessata, in futuro, da fenomeni di crollo. Le traiettorie vengono definite con sufficiente precisione per cui, già in fase di analisi preliminare dei risultati, è possibile effettuare una zonizzazione del territorio in

funzione della probabilità di transito dei massi. E' evidente che, maggiore è il numero di traiettorie interessanti una determinata area, più elevato sarà il livello di pericolosità associato. Nel caso specifico della frana del M. Salta viene evidenziata una situazione piuttosto critica per quanto riguarda il settore che interessa l'area di cava e, di conseguenza, la parte orientale dell'abitato di Casso. Alcuni massi potrebbero raggiungere questa zona con energia

sufficiente per causare danni rilevanti.

In questo contesto, il fatto che il modello fornisca anche l'entità dei rimbalzi attesi, facilita il dimensionamento di eventuali opere trasversali di contenimento e ciò costituisce un valore aggiunto importante in fase di pianificazione degli interventi.

Bisogna sottolineare comunque, come il modello prenda in considerazione solo l'ipotesi di distacchi di materiale lapideo di volumetria pari ad alcuni metri cubi, e con una dinamica balistica propria dei fenomeni di crollo. Non viene quindi considerata l'ipotesi di distacco di grossi diedri (che pure risulta probabile da quanto detto nei paragrafi precedenti) i quali presentano una dinamica di movimento complessa, composta oltre che da moto di crollo, anche da una componente di scivolamento ed infine di flusso detritico con processi di interazione tra blocchi. In questo caso quindi la perimetrazione delle aree potenzialmente coinvolgibili risulta non del tutto affidabile. Si ritiene quindi verosimile

che, nel caso di fenomeni parossistici importanti (volumetrie ipotizzabili fino a 100.000 m<sup>3</sup>), lo scenario di propagazione dei blocchi potrebbe essere molto più esteso ed articolato di quello rappresentato in figura 8. Il modello può quindi essere ulteriormente raffinato, introducendo ad esempio un modello digitale del terreno meglio definito, tramite scansione laser del territorio, e delle carte input che rappresentino altri parametri utili al calcolo delle traiettorie, come la carta dell'uso del suolo ed una carta granulometrica che definisca al meglio la rugosità del terreno. Ciò nonostante è evidente che i risultati ottenuti dalla applicazione del modello, che prevedono traiettorie in prossimità di importanti elementi vulnerabili come la strada statale, quella comunale, e la cava di inerti ad est di Casso, rappresentano un significativo contributo per l'individuazione della pericolosità da crollo e per la definizione di opportune misure di mitigazione a protezione dell'abitato di Casso.

## Bibliografia

Doglioni, C., Bosellini, A., 1987, Eoalpine and mesoalpine tectonics in the Southern Alps, *Geologische Rundschau* 76 (3), 735-754.  
Ghirotti, M., 1995, L'antica frana del Monte Borgà e primi risultati del monitoraggio dell'area

di Prà de Salta (Casso, PN), *Quad. di Geol. App.*, 1 123-130.

Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R. & Agliardi, F., 2002, STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Computers*

& *Geosciences* 28 (9) 1079-1093.

Leonardi, P., 1967, in Leonardi (ed.), 1967, *Le Dolomiti: Geologia dei monti tra Isarco e Piave*, Manfrini Ed., 2 voll, 1019 pp..