

## Previsione delle traiettorie di blocchi mobilizzati da frane di crollo: applicazione e confronto di modelli

Lorenzo Del Maschio<sup>\*</sup>, Giampiero Gozza<sup>\*</sup>, Daniela Piacentini<sup>\*\*</sup>, Marco Pizziolo<sup>\*</sup>,  
Mauro Soldati<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Servizio Geologico Sismico e dei Suoli, Regione Emilia-Romagna

<sup>\*\*</sup> Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia

ldelmaschio@regione.emilia-romagna.it, ggozza@regione.emilia-romagna.it, piacentini.daniela@unimore.it, mpizziolo@regione.emilia-romagna.it, soldati@unimore.it

### *Rock-fall trajectories analysis: application and comparison of models*

**ABSTRACT:** Rock-fall phenomena due to their high velocity can cause damage to built-up areas and threaten human lives. Therefore it is very relevant, for a correct land management, to evaluate rock-fall runout. The aim of the research was to test different methodologies in order to compare and define their potentiality and limits. In particular, empiric and mathematical models have been applied in order to predict rock-fall trajectories and relevant parameters (energy, height of bounce, run-out distance of the falling blocks).

**Key Terms:** Rock falls, Run out, Empiric models, Mathematical models

**Parole Chiave:** Frane di crollo, Aree di propagazione, Modelli empirici, Modelli cinematici

### **Riassunto**

Le frane di crollo, in funzione dell'elevata velocità con cui si manifestano, possono determinare calamitose conseguenze provocando il danneggiamento di infrastrutture e soprattutto minacciando l'incolumità delle vite umane.

Per tale motivo risulta estremamente importante, ai fini di una corretta pianificazione territoriale, riuscire a circoscrivere e valutare con precisione la diffusione spaziale del fenomeno. Il presente lavoro si propone, quindi, di applicare e testare differenti metodologie per la previsione spaziale di suddetti fenomeni in modo da evidenziarne pregi, potenzialità e limiti. In particolare la modellistica qui applicata prevede l'utilizzo di metodi previsionali, sia di tipo empirico che cinematico, al fine di una corretta ricostruzione delle traiettorie potenziali di caduta e dei principali parametri ad esse associati (energia, altezza di volo, distanza di propagazione del blocco in caduta).

### **1. Introduzione**

Il presente lavoro si inserisce all'interno di un programma di lavori finalizzato ad una migliore conoscenza dei fenomeni di crollo nel territorio regionale, intrapreso dalla Regione Emilia-Romagna (Servizio Geologico Sismico e dei Suoli) e dall'Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia (Gruppo di Geomorfologia), che si propone di individuare e testare metodologie per la previsione spaziale dei suddetti fenomeni.

Tali metodologie possono infatti fornire ulteriori informazioni rispetto alle carte geologiche di base, che individuano esclusivamente le forme di accumulo, e permettere una zonizzazione del territorio utile ai fini di una corretta pianificazione territoriale.

L'innesco di una frana di crollo è generalmente determinato da una rottura per taglio o per trazione lungo piani di discontinuità preesistenti, che separano un blocco potenzialmente instabile dal pendio roccioso. Il movimento di caduta di un blocco si può poi spiegare secondo i moti gravitativi di caduta libera, rimbalzo, rotolamento e scivolamento (Fig. 1).

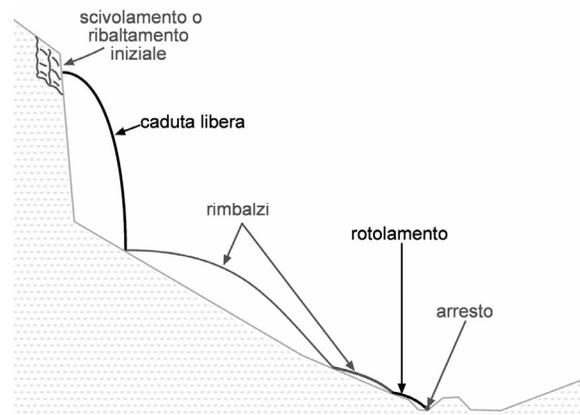


Figura 1: Possibili moti di propagazione di un blocco soggetto a crollo

*Possible propagation movements of a falling block*

Le caratteristiche del moto dipendono dalla forma e dimensione del blocco, dalla sua litologia e dalla geometria del pendio.

Alcuni autori (Bozzolo e Pamini, 1986; Hoek, 1987; Piteau e Clayton, 1987; Hoek e Bray, 1988) hanno proposto l'utilizzo di parametri, definiti come coefficienti di restituzione normale e tangenziale, per esprimere le caratteristiche di impatto e rimbalzo dei massi sul versante. Tali parametri descrivono la dissipazione di energia cinetica durante l'urto e sono esprimibili secondo le formule (Fig. 2):

$$K_n = \frac{Vb_n}{Va_n} \quad \text{e} \quad K_t = \frac{Vb_t}{Va_t}$$

$K_n$  = Coefficiente di restituzione normale

$K_t$  = Coefficiente di restituzione tangenziale

$Va_n$  = Componente normale della velocità prima dell'urto (Va)

$Vb_n$  = Componente normale della velocità dopo l'urto (Vb)

$Va_t$  = Componente tangenziale della velocità prima dell'urto (Va)

$Vb_t$  = Componente tangenziale della velocità dopo l'urto (Vb)

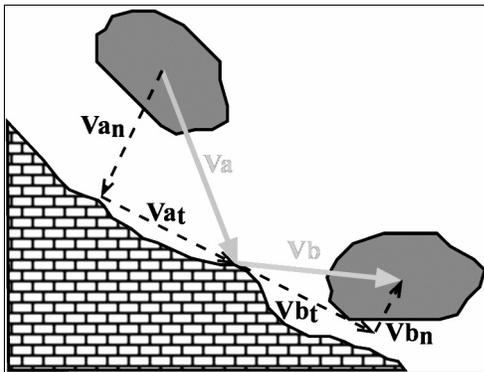


Figura 2: Rapporto tra le velocità prima e dopo l'urto  
*Relationship between velocities before and after impact*

A tali coefficienti ne viene spesso associato un terzo, definito come coefficiente di roto-scivolamento, che esprime la perdita di energia causata dagli attriti tra il versante e il masso, nelle fasi di rotolamento/scivolamento.

Il principio fondamentale che regola la caduta dei massi è comunque quello secondo il quale ogni blocco, soggetto ad un movimento di caduta o rotolamento su un pendio, rispetta, in ogni istante, la condizione di massima efficienza del moto. Di conseguenza sia le traiettorie compiute da un blocco, sia il tipo di moto assunto durante il percorso verso valle sono quelli che determinano la minor perdita di energia cinetica.

In particolare, nel caso studio di Montalbano (Comune di Zocca, Provincia di Modena) di seguito illustrato, sono stati presi in considerazione moti di caduta relativi a crolli di singoli blocchi che non si frammentano durante la caduta

a seguito di impatti. Questo ha permesso di facilitare la ricostruzione cinematica più cautelativa del moto, limitando in maniera significativa il numero di variabili da inserire nell'analisi, senza inficiare tuttavia l'attendibilità dei risultati.

## 2. Modelli per la previsione spaziale delle frane di crollo

I metodi di analisi più diffusi per prevedere il moto di caduta di un blocco si basano principalmente su modelli di tipo empirico e cinematico.

I modelli empirici considerano la dissipazione di energia proporzionale alla lunghezza del percorso. Tali modelli, detti anche "zenitali", delimitano, secondo specifici angoli di attrito equivalente verticali ed orizzontali, l'area entro la quale si dovrebbe arrestare la totalità dei blocchi.

Questi metodi, basati sull'analisi di crolli storici, risultano di facile applicabilità e sono indicati per una prima stima del massimo avanzamento dei massi in funzione della topografia del versante (Onofri e Candian, 1979; Heinimann et al., 1998; Jaboyedoff e Labiouse, 2003; Piacentini, 2005).

Nel presente lavoro, in particolare, è stato applicato il metodo empirico tridimensionale sviluppato in ambiente GIS (Piacentini, 2006), opportunamente calibrato e validato tramite il confronto con metodi cinematici e verifiche mirate sul terreno.

I modelli cinematici analizzano il problema della delimitazione del massimo avanzamento dei blocchi, considerando la fisica del moto e le relative equazioni (Azzoni et al., 1995; Paronuzzi e Artini, 1999; Guzzetti et al., 2002; Agliardi e Crosta, 2003; Del Maschio et al., 2004; Geo&Soft, 2004; Crosta et al., 2006). Tali equazioni descrivono le relazioni esistenti tra tipo di movimento (caduta, rimbalzo, rotolamento e scivolamento), energia del blocco in caduta e coefficienti di restituzione del versante. Questi modelli, nonostante l'aleatorietà insita nella determinazione dei parametri del moto, hanno il vantaggio di consentire simulazioni che ricostruiscono in maniera probabilistica il comportamento potenziale delle traiettorie, le velocità e le altezze raggiunte. La stima di tali parametri risulta infatti essenziale per una corretta progettazione di opere di difesa e quindi gestione del territorio. Nel presente lavoro sono stati presi in considerazione unicamente modelli di tipo "lumped mass", che assimilano il blocco in caduta ad un punto materiale dotato di velocità e con massa concentrata nel punto stesso.

Per l'analisi del sito di Montalbano sono stati utilizzati e testati i software commerciali RocFall®RocScience inc. e Rotomap®Geo&Soft srl. La scelta di applicazione congiunta di entrambi i software è stata effettuata in modo da poter confrontare i risultati ottenuti mediante un approccio bidimensionale con quelli conseguiti con un metodo tridimensionale. La validazione delle simulazioni ricavate è stata condotta sulla base dei crolli storici rilevati nel sito di interesse.

### 3. Il caso studio di Montalbano (Appennino modenese)

Per applicare e confrontare tra loro i vari modelli è stata scelta una parete rocciosa che in passato è stata soggetta a diversi episodi di crollo e che a tutt'oggi minaccia una strada provinciale e varie abitazioni. Per meglio inquadrare la parete prescelta, si è deciso di estendere l'analisi anche

alle zone limitrofe ed è stata così definita un'area di studio che si estende per circa 5 km<sup>2</sup> nel Comune di Zocca (Provincia di Modena). Tale area comprende oltre alla parete di Monte della Riva, oggetto dell'analisi, anche le borgate di Missano e di Montalbano e la strada provinciale che collega l'abitato di Zocca con la provinciale di Samone (Fig. 3).

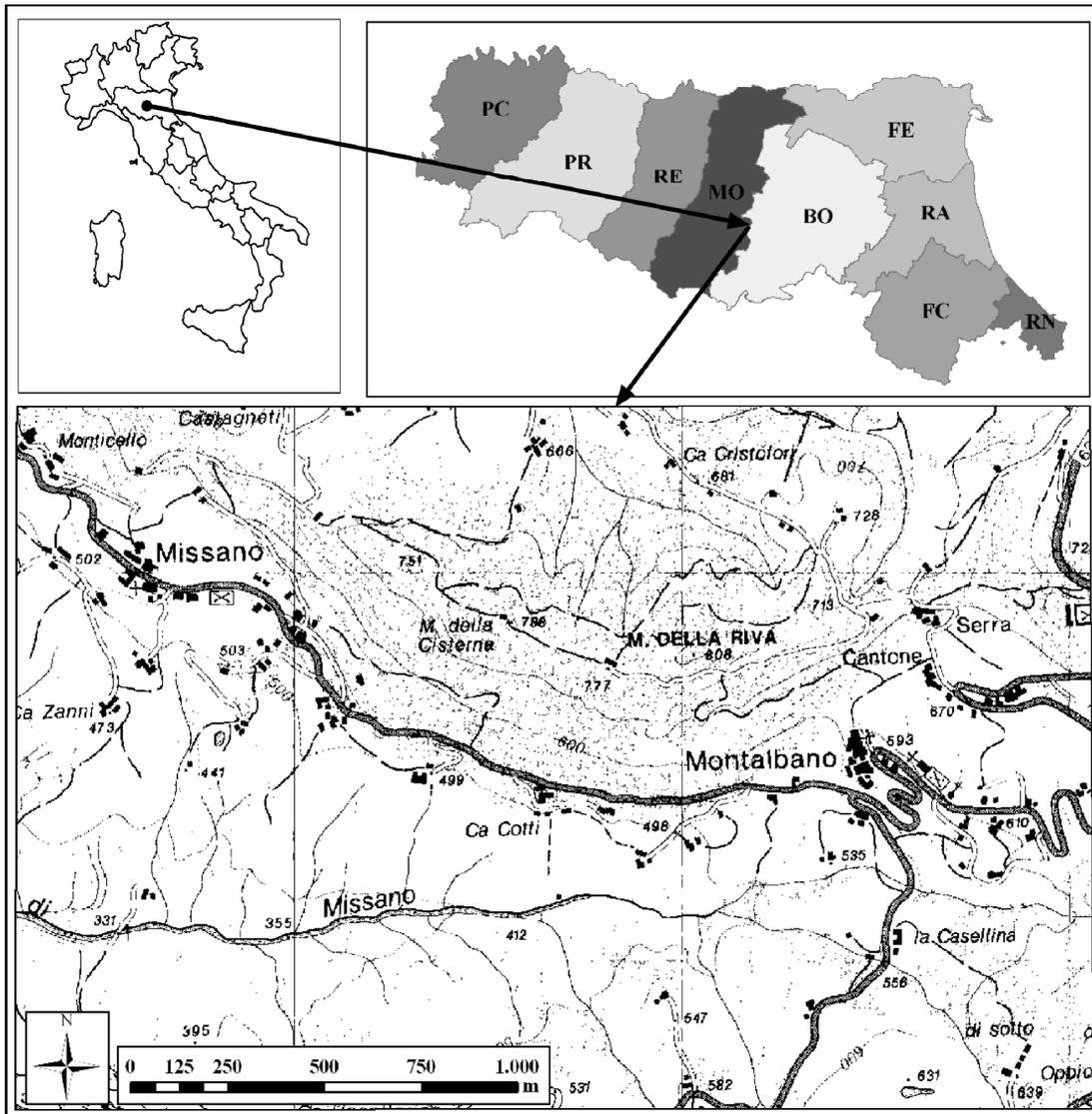


Figura 3: Inquadramento geografico dell'area di studio di Montalbano (Appennino modenese)  
*Geographical setting of the Montalbano study area (Modenese Apennine)*

L'area è stata selezionata in quanto caratterizzata da:

- presenza di litotipi a comportamento fragile, peraltro sovrapposti a litotipi a comportamento duttile;
- morfologia regolare, senza brusche rotture di pendio, che agevola l'applicazione e l'analisi delle traiettorie di caduta;
- differenti tipologie di uso del suolo che permettono

l'esame delle modalità di risposta alla cinematica di caduta fornita dalle varie destinazioni d'uso e la conseguente taratura dei coefficienti di restituzione corrispondenti.

La scelta dell'area di studio è stata inoltre dettata dalla disponibilità di buoni dati di partenza (DEM e cartografie tematiche necessarie all'analisi) e dalla presenza, alla base della parete, di evidenze di crolli precedenti. La forte

antropizzazione di quest'area se da un lato ha inficiato l'attendibilità dell'ubicazione dei massi rinvenuti, dall'altro ha permesso di disporre di segnalazioni riguardanti crolli passati che hanno interessato la strada comunale.

Il versante scende in direzione SW, in destra idrografica rispetto al fosso di Missano, affluente di destra del fiume Panaro. Si tratta di una zona di bassa montagna caratterizzata da morfologia dolce e pendii ondulati con scarsa energia del rilievo. Le quote della zona variano tra i 350 m s.l.m., in prossimità del Fosso Missano, e gli 800 m nella parte alta del versante in corrispondenza del Monte

della Riva, situato nella parte settentrionale dell'area. Per delineare l'uso del suolo, funzionale all'individuazione delle caratteristiche di risposta agli urti normali e tangenziali, sono state consultate la carta della copertura del suolo "Corine land use" e la carta dell'uso del suolo (2° edizione) della Regione Emilia-Romagna, entrambe a scala 1:25.000. Per migliorare il dettaglio esistente è stato inoltre eseguito un rilevamento mirato sul terreno, coadiuvato dall'analisi delle ortofotografie aeree "TerraItaly" del 2000 e delle ortofoto satellitari "QuickBird" del 2003 (Fig. 4).

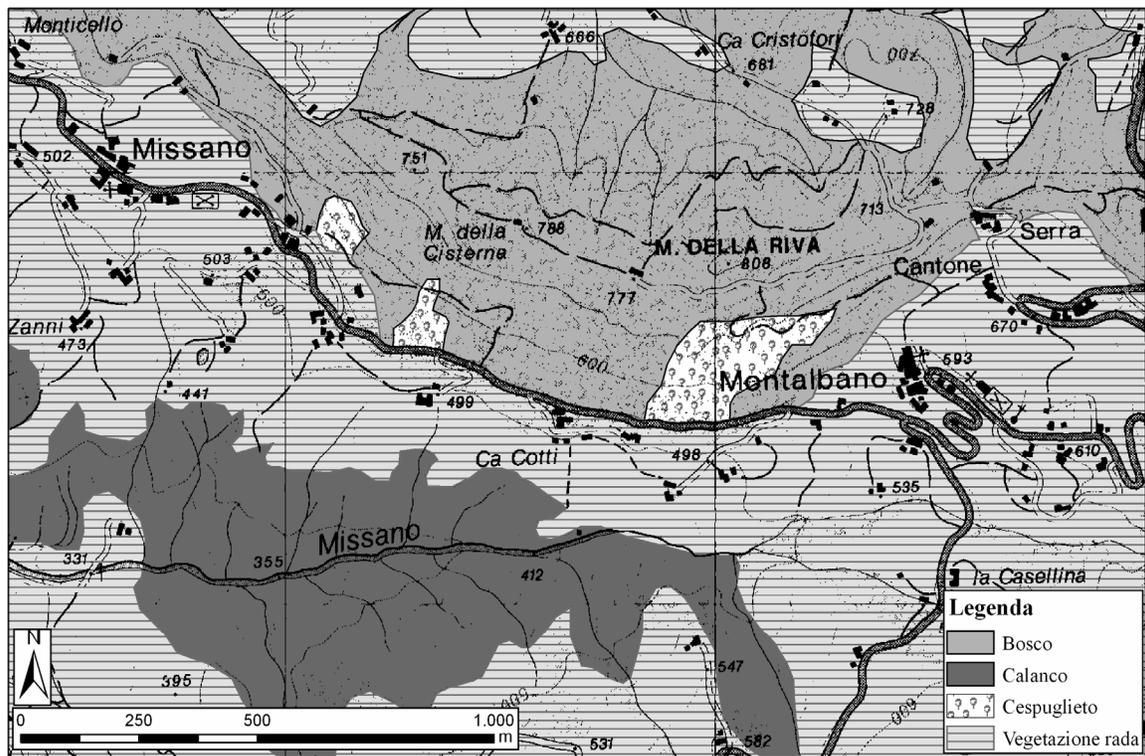


Figura 4: Carta dell'uso del suolo  
*Land use map*

Dalla carta dell'uso del suolo ricavata, è stato poi possibile attribuire ad ogni unità individuata adeguati valori dei coefficienti di restituzione e di rotoscivolamento (Crs), sia attraverso la consultazione della bibliografia esistente sia mediante taratura eseguita basandosi sull'ubicazione dei massi presenti alla base della parete e sull'analisi di crolli storici (Tab. 1).

Il rilevamento sul terreno supportato dall'analisi della Sezione 236080 della carta geologica regionale (Regione Emilia-Romagna, 2006) e della Tavola 3/4 del Piano territoriale di coordinamento provinciale (PTCP) (Provincia di Modena, 2006) ha inoltre permesso di definire il contesto geologico-geomorfologico (Fig. 5).

I terreni affioranti nell'area appartengono alla successione ligure (di età cretacea) e a quella epiligure

sovrastante (di età miocenica).

Tabella 1: Coefficienti utilizzati per l'applicazione dei modelli cinematici

*Coefficients used for mathematical models*

Uso del suolo	Kn	Kt	Crs
Bosco	0,30	0,80	0,70
Vegetazione rada	0,20	0,30	0,50
Calanchi	0,30	0,80	0,60
Cespuglieto	0,25	0,50	0,60

In particolare sono presenti le Argille Varicolori di Cassio (AVV) nella parte sud-est del fondovalle, le Arenarie di Scabiazza (SCB) sul versante sinistro del Rio

Missano in prossimità della zona calanchiva in contatto con le Argille Varicolori, la Formazione di Antognola (ANT) in corrispondenza dell'abitato di Montalbano e del versante a valle di Missano e la Formazione di Pantano (PAT) che costituisce il massiccio del Monte della Riva.

Le *Argille Varicolori di Cassio* affioranti nella zona sono costituite da alternanze ritmiche di argille rosse, grigie,

verdastre e nerastre, fissili, a stratificazione molto sottile o sottile con frequenti intercalazioni di torbiditi pelitico-arenacee a grana fine, calcilutiti silicee grigio-chiare e verdognole, calcilutiti biancastre, arenarie a grana variabile da fine a grossolana e microconglomerati di colore grigio-chiaro alterati in marrone.

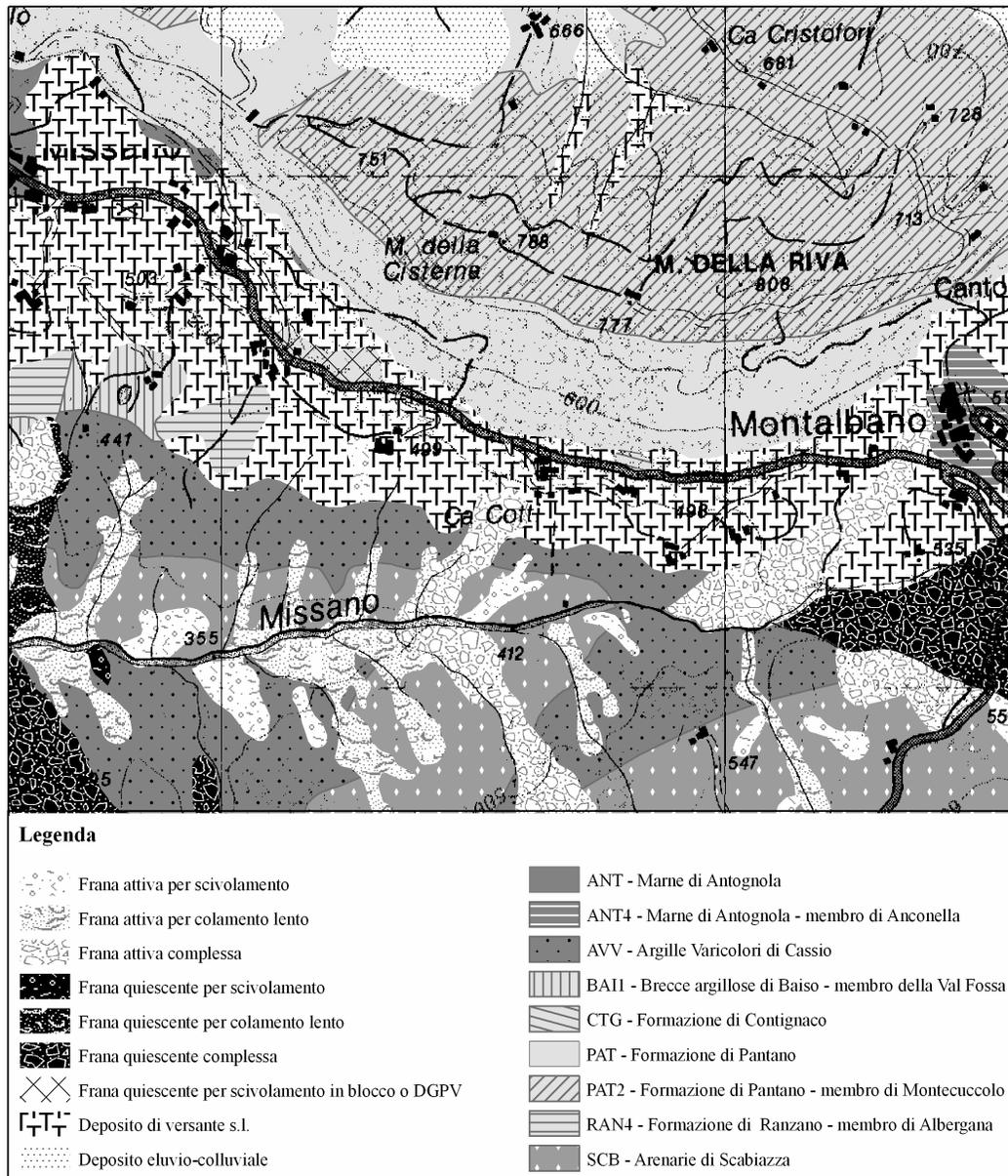


Figura 5: Stralcio della carta geologica regionale (Sezione 236080 - Regione Emilia-Romagna, 2006)  
*Sketch of the geological regional map (Sezione 236080 - Regione Emilia-Romagna, 2006)*

Strettamente associate alle Argille Varicolori di Cassio si presentano le *Arenarie di Scabiazza* costituite da torbiditi arenaceo-pelitiche e pelitico-arenacee in strati in prevalenza da molto sottili a medi, con rapporto arenaria/pelite (A/P) molto variabile. Le porzioni arenacee sono formate da

arenarie fini e finissime, con caratteristico colore di alterazione marrone-rossiccio o nocciola, passanti ad argille o argille marnose grigio-scuri.

La *Formazione di Antognola* è invece costituita da marne e marne argillose grigio-verdi in strati spesso mal

definiti. A luoghi sono presenti intercalazioni di strati arenacei torbiditici in genere da sottilissimi a medi. Nella zona è altresì presente il Membro di Anconella (ANT<sub>4</sub>) costituito da arenarie risedimentate a composizione quarzoso-feldspatica di color grigio-chiaro o giallastro se alterate.

La *Formazione di Pantano*, che costituisce il versante roccioso di Monte delle Riva oggetto dello studio, è caratterizzata da areniti finissime e siltose, grigie, in genere mal classate con bioturbazione pervasiva e strutture sedimentarie interne in genere non preservate. Nell'area è inoltre presente il Membro di Montecuccolo (PAT<sub>2</sub>), costituito da biocalcareni e da areniti da fini a molto grossolane, localmente microconglomeratiche, a stratificazione obliqua e dal caratteristico colore grigio, giallastro all'alterazione (Bettelli et al., 2002).

Per quanto riguarda la dinamica dei versanti, fenomeni di crollo riguardano la Formazione di Pantano (PAT e PAT<sub>2</sub>), mentre frane di scivolamento/colata si ritrovano nelle formazioni a comportamento plastico quali le Argille Varicolori di Cassio (AVV) e Arenarie di Scabiazza (SCB).

### 3.1 Caratteristiche dell'ammasso roccioso di Monte della Riva

La parete rocciosa di Monte della Riva si presenta con direzione prevalente N15°W e inclinazioni variabili tra i 30° e i 50°. In particolare la parete risulta suddivisibile in due distinte zone caratterizzate da orientazioni e pendenze differenti. La zona più occidentale è contraddistinta da pendenze varie tra 30° e 45° con un andamento NW-SE; l'area tra Cà Cotti e la porzione settentrionale al centro abitato di Montalbano è invece disposta W-E ed è caratterizzata da pendenze leggermente più elevate (da 30° a 50°).

Sulla parete sono state riscontrate due famiglie di discontinuità principali: una, riconducibile alla stratificazione, con immersione N40°E e inclinazione di 20° e l'altra, presente soprattutto nella porzione basale della parete, con immersione N85°E e inclinazione 65°. Tutte le fratture si presentano con un'apertura limitata e con scarso riempimento.

L'esame dei possibili cinematismi di rottura ha permesso di comprendere come queste famiglie non diano luogo né a rotture planari né a rotture a cuneo. L'intera parete si presenta però come potenziale zona di distacco di blocchi a causa dei piani di debolezza presenti che possono, soprattutto in funzione delle variazioni climatiche stagionali, mobilizzare massi.

L'analisi della dimensione dei blocchi presenti alla base della parete ha permesso di stabilire che i fenomeni franosi di crollo avvenuti in passato, che hanno anche interessato la strada provinciale sottostante, hanno coinvolto massi con dimensione media metrica per volumi complessivi modesti, non superiori ai 50 m<sup>3</sup>.

La parete ad oggi è stata oggetto di intervento da parte del Servizio Tecnico di Bacino Enza, Panaro e Secchia, che ha provveduto alla messa in opera di reti di protezione a maglia semplice con funi di orditura alla base del versante per la raccolta del materiale di disfacimento.

## 4. Applicazione dei modelli

Le analisi sono state mirate alla delimitazione delle aree di possibile propagazione dei blocchi dalla parete. In particolare, l'approccio ritenuto più corretto è stato quello di integrare analisi tridimensionali sia di tipo empirico che cinematico (Rotomap®Geo&Soft srl) con quelle di tipo bidimensionale (RocFall®RocScience inc.), anch'esse analitiche, in modo da poter individuare le traiettorie che possono indurre i maggiori danni.

La base dati, utilizzata per realizzare le simulazioni, è stata il modello digitale del terreno (DTM) della Regione Emilia-Romagna, con risoluzione spaziale della cella di 5 m.

### 4.1 Modello empirico

A partire dalla probabile area di distacco, comprendente l'intera parete sud ovest del Monte della Riva, sono state individuate le traiettorie di caduta massi applicando il metodo empirico in tre dimensioni (Piacentini, 2006) con angoli di attrito equivalente in accordo con la metodologia BUWAL (Heinimann et al., 1998) (Tab. 2).

Tabella 2: Angoli di attrito equivalente in accordo con la metodologia BUWAL (Heinimann et al., 1998)  
*Friction angles in accordance with BUWAL methodology (Heinimann et al., 1998)*

Dimensione blocchi	33°	35°	37°
< 0,5 m	Vegetazione: prato Topografia: regolare Terreno: poco profondo	Vegetazione: alto fusto Topografia: scarsamente irregolare Terreno: profondo	Vegetazione: alto fusto Topografia: molto irregolare Terreno: detrito di falda
0,5 - 2 m	Vegetazione: basso fusto Topografia: scarsamente irregolare Terreno: poco profondo	Vegetazione: alto fusto Topografia: molto irregolare Terreno: profondo	
> 2 m	Vegetazione: alto fusto Topografia: molto irregolare Terreno: profondo		

Secondo tale metodologia, in funzione della dimensione dei blocchi, si possono avere differenti fasce di propagazione ai piedi delle pareti di distacco in relazione alla tipologia di vegetazione presente, alla regolarità della topografia e alle caratteristiche del terreno.

In particolare i massi con dimensioni minori di 0,5 m di diametro possono propagarsi in tre fasce. Nella prima, più prossima alla parete di distacco e limitata da un angolo di attrito equivalente di  $37^\circ$ , i blocchi si possono arrestare in

presenza di vegetazione ad alto fusto, topografia molto irregolare e detrito di versante. La seconda, intermedia, definita da un angolo di attrito equivalente di  $35^\circ$ , è raggiungibile da blocchi in condizioni di vegetazione, topografia e uso del suolo meno favorevoli all'arresto rispetto alle precedenti. Infine nella terza fascia, più distale e cautelativa, limitata da angoli di  $33^\circ$ , i massi di piccole dimensioni possono avanzare solo in condizioni particolarmente sfavorevoli all'arresto dei blocchi.

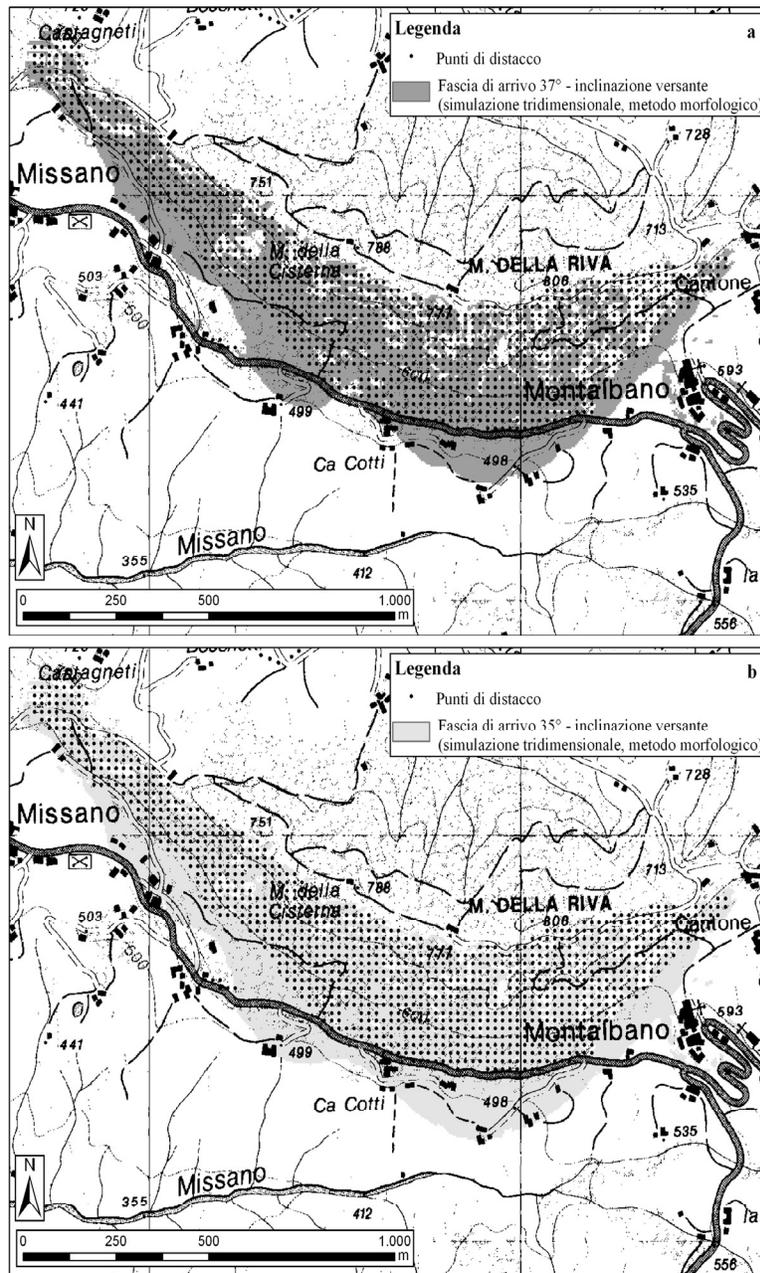


Figura 6: Punti di distacco e fasce di arrivo secondo il metodo tridimensionale empirico: a) scenario possibile per i blocchi di dimensioni minori di 0,5 m di diametro; b) scenario possibile per i blocchi con dimensioni comprese tra 0,5 m e 2 m di diametro  
Starting points and run out according to the three-dimensional empiric model: a) possible scenario for blocks with diameter smaller than 0.5 m; b) possible scenario for blocks with diameter between 0.5 m and 2 m.

I massi con dimensioni di diametro comprese tra i 0,5 m e i 2 m, possono invece propagarsi secondo due possibili fasce, una più prossima alla parete, circoscritta da angoli di 35°, allorché sono presenti alla base della parete condizioni di uso del suolo, vegetazione e topografia che agevolano l'arresto dei blocchi ed una più distale, limitata da un angolo di 33° nel caso opposto.

Per i blocchi di dimensioni che superano i 2 m di diametro è infine possibile individuare una sola fascia di possibile propagazione definita da un angolo di attrito equivalente di 33°.

Nel caso di studio di Montalbano sono stati considerati come scenari possibili quelli relativi ai massi con dimensioni medie di diametro minori di 0,5 m e quelli che considerano massi con diametro medio compreso tra 0,5 m e 2 m.

Non è invece stato preso in considerazione lo scenario relativo alla caduta di massi di dimensioni medie di diametro maggiori di 2 m, in quanto nessuno dei blocchi rilevati alla base della parete presentava tali caratteristiche.

Sulla base dell'uso del suolo, della morfologia della parete ed in accordo con la metodologia BUWAL (Heinimann et al., 1998) sono stati quindi considerate rispettivamente la fascia 37° - inclinazione del versante per i blocchi di dimensioni minori di 0,5 m (Fig. 6a) e la fascia 35° - inclinazione del versante per i blocchi con dimensioni comprese tra 0,5 m e 2 m di diametro (Fig. 6b).

## 4.2 Modelli cinematici

I modelli cinematici hanno permesso di ricavare non solo informazioni sull'area di possibile propagazione e arresto, ma anche di calcolare l'energia di caduta, la velocità di propagazione e di identificare la quota delle altezze di volo.

A partire dalla probabile area di distacco, comprendente l'intera parete sud ovest del Monte della Riva, sono state dapprima valutate le traiettorie ricavate dall'applicazione del modello tridimensionale, necessarie all'individuazione dei profili ritenuti più critici, sui quali sono state effettuate le ulteriori verifiche di tipo bidimensionale.

### 4.2.1 Modellazione tridimensionale (Rotomap®Geo&Soft srl)

La rappresentazione tridimensionale considera la propagazione di caduta del blocco nella sua forma più completa, in quanto non sempre le traiettorie più critiche giacciono su piani verticali individuabili lungo la massima pendenza.

Il software qui utilizzato può prescindere dal rilievo geomeccanico della parete rocciosa (utile per l'individuazione delle porzioni instabili, ma assai dispendioso e poco affidabile se condotto senza la possibilità di verificare la situazione in parete stessa). Inoltre l'approccio di tipo probabilistico permette di determinare il percorso medio e "spazialmente più ammissibile" dei massi in caduta.

In particolare, i dati di ingresso utilizzati dal software e necessari per l'analisi sono:

- modello digitale delle altezze;
- area di distacco;
- coefficienti di restituzione normali, tangenziali e di rotoscivolamento;
- angoli limite di decollo, urto e rimbalzo;
- numero dei punti di partenza per maglia;
- passo in maglie dei punti di partenza;
- numero velocità iniziali, nonché velocità iniziale minima e massima;
- numero deviazioni angolari e deviazioni angolare massima delle traiettorie.

Tutte le fasi dell'analisi sono state gestite in ambiente GIS (ESRI®ArcGis).

Per quanto riguarda la determinazione delle velocità di distacco ( $v_0$ ), sono state ritenute idonee quelle che ricadono nell'intervallo 0,5 m/s - 3,5 m/s. Tali valori sono stati determinati considerando sia l'ipotesi del distacco del blocco tramite caduta con volo libero ( $v_0 = \sqrt{2gh}$ ) sia l'ipotesi di un tratto di scivolamento iniziale (moto uniformemente accelerato), prima di un moto di caduta in volo libero ( $v_0 = \sqrt{2gs(\sin\beta - \cos\beta \tan\phi)}$ ).

Nella determinazione delle velocità sono state considerate anche le possibili sollecitazioni aggiuntive provenienti da *input* sismici, secondo quanto prescritto dalle Norme Tecniche della normativa vigente (D.M. 14/09/2005).

Le simulazioni sono state eseguite considerando un possibile distacco ogni 5 m (ovvero per ogni pixel) e prevedendo per ogni punto di partenza due deviazioni angolari, per un valore massimo complessivo di 30°.

Le elaborazioni eseguite hanno permesso di ottenere la localizzazione dei punti di arresto dei massi (Fig. 7a) espresso come numero dei blocchi che si possono arrestare in ogni pixel, le traiettorie di caduta più probabili (Fig. 7b), i valori dell'energia specifica (massima e media) dei blocchi in caduta (J/kg) (Fig. 7c) e l'altezza, espressa in metri, raggiungibile dai blocchi durante la caduta (Fig. 7d).

In particolare nel caso specifico di Montalbano le principali zone di arresto dei massi si rinvennero al di sotto della sede stradale, nel tratto compreso tra Montalbano e Cà Cotti, e nella porzione a monte della strada, tra tale località e Missano. Le principali traiettorie di caduta sono presenti in fasce ben definite nella porzione di versante tra Montalbano e Cà Cotti, oltre che alla base del Monte della Cisterna e a monte di Missano. In queste zone si raggiungono i valori massimi di energia specifica, che raggiungono i 790 J/kg. Infine le analisi effettuate hanno permesso di evincere come le traiettorie di caduta non prevedano significative fasi di volo in quanto tutte le simulazioni presentano altezze di caduta prossime allo zero.

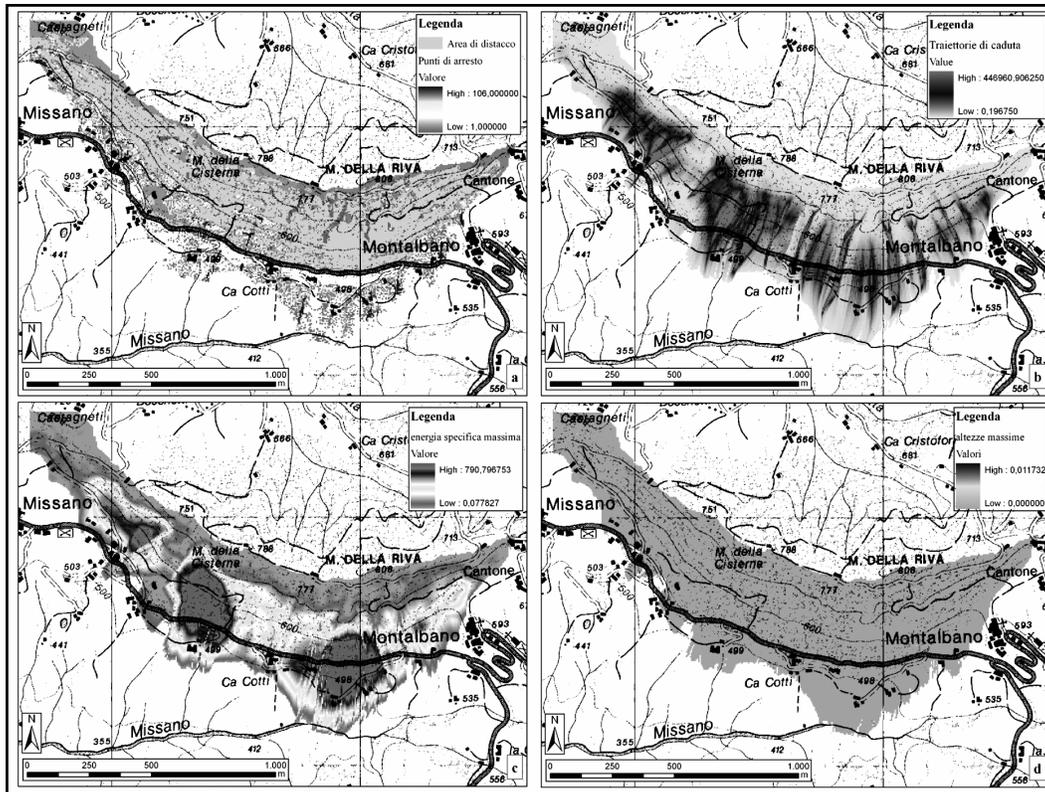


Figura 7: Risultati delle simulazioni ottenute tramite il modello cinematico tridimensionale (*Rotomap®Geo&Soft srl*): a) punti di arresto dei massi; b) traiettorie di caduta; c) energia specifica massima (J/kg); d) altezza massima dei blocchi  
*Three-dimensional mathematical model results (Rotomap®Geo&Soft srl): a) blocks end points; b) rock-fall trajectories; c) maximum specific energy (J/kg); d) maximum height of blocks*

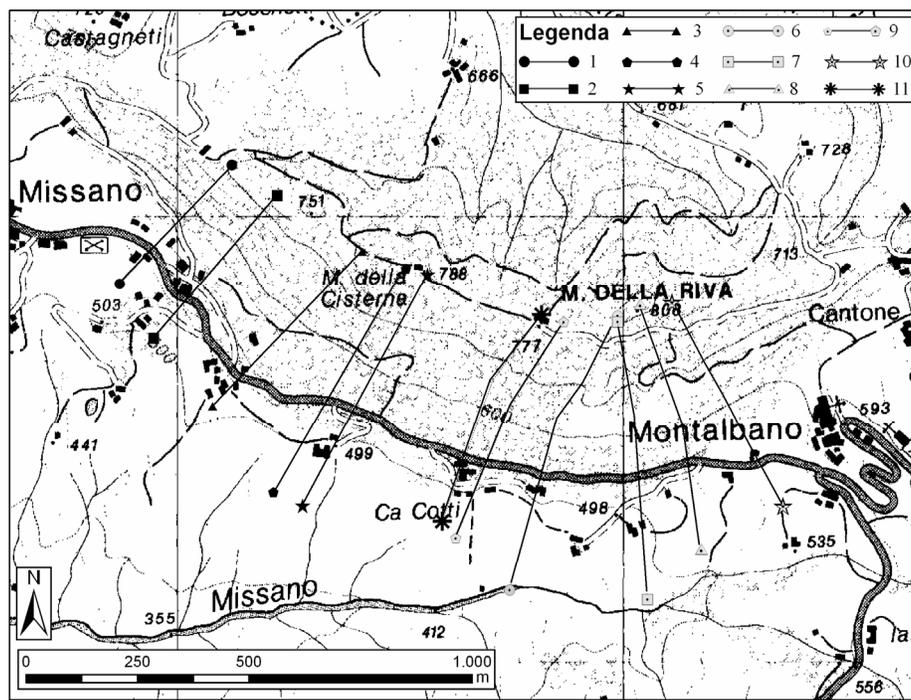


Figura 8: Tracce dei profili topografici realizzati nell'area di studio  
*Topographic cross-sections in the study area*

#### 4.2.2. Modellazione bidimensionale (RocFall®RocScience inc.)

L'applicazione del metodo bidimensionale ha permesso di verificare ed integrare i risultati ottenuti dalla modellazione tridimensionale. Il modello utilizzato consente di studiare il comportamento di un masso in caduta lungo un profilo. In particolare nel caso di studio sono stati individuati 11 profili ritenuti più significativi sulla base delle criticità evidenziate dall'analisi tridimensionale (Fig. 8).

Lungo i profili sono poi state effettuate le simulazione utilizzando come dati di *input*:

- topografia del versante;
- area di distacco;
- coefficienti di restituzione normali, tangenziali;
- velocità iniziale minima e massima nelle due componenti orizzontale e verticale;
- peso del blocco.

Per quanto riguarda le velocità di distacco sono state operate le medesime considerazioni del paragrafo precedente e sono stati adottati valori variabili da 0,5 m/s a 3,5 m/s.

Le analisi bidimensionali realizzate lungo i profili selezionati hanno permesso di determinare le traiettorie di caduta dei blocchi (Fig. 9) oltre che le energie e l'altezze dei rimbalzi. In particolare per ogni profilo sono stati simulati 1000 possibili distacchi.

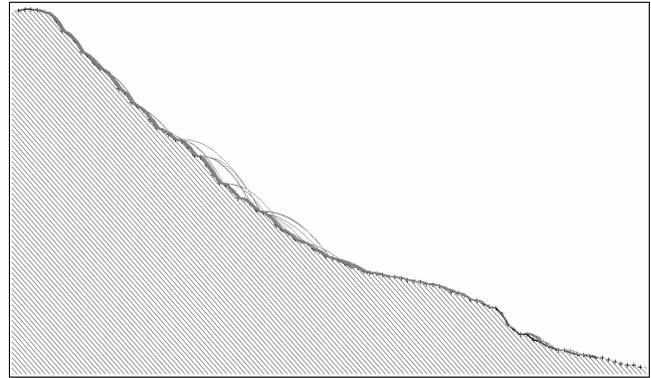


Figura 9: Esempio di simulazione analitica bidimensionale (Profilo n°3)

*Example of bi-dimensional mathematical modelling (cross-section n° 3)*

In particolare l'utilizzo di tale modello, che se adoperato in maniera esclusiva, non permette di delineare in modo preciso le reali traiettorie di propagazione, consente di considerare nell'analisi anche la presenza di eventuali barriere e valutarne l'efficacia.

I risultati delle simulazioni bidimensionali sono stati poi ubicati in carta in modo da permettere un'agevole confronto con i risultati ottenuti dalle simulazioni tridimensionali (Fig. 10).

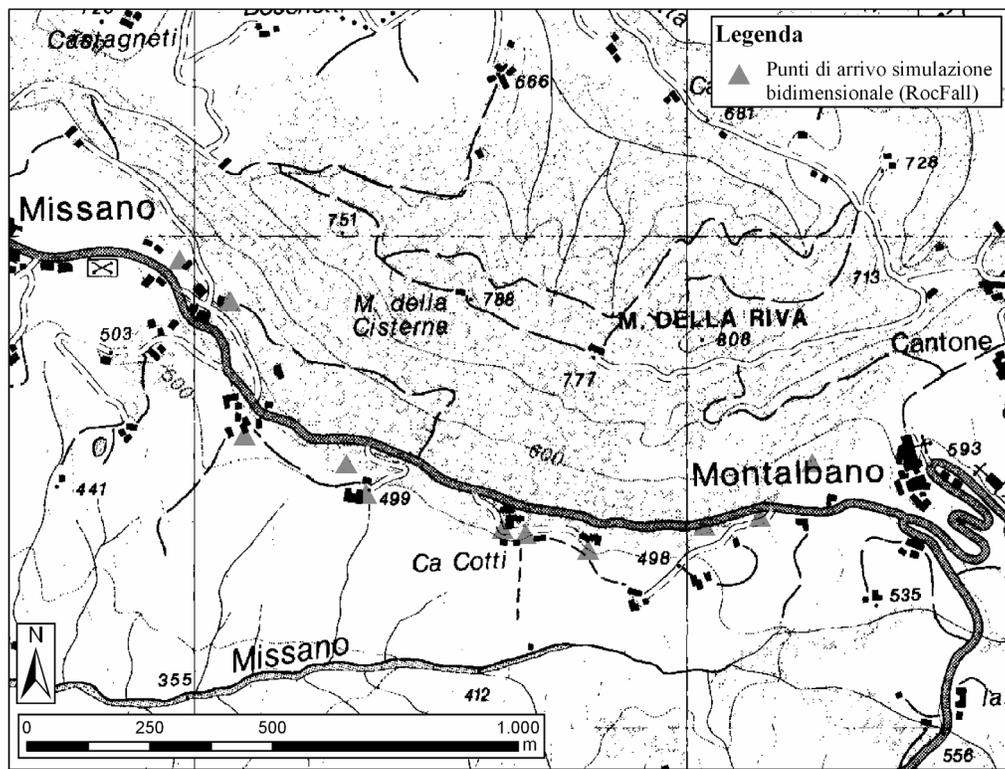


Figura 10: Risultati dell'analisi bidimensionale  
*Bi-dimensional mathematical modelling results*

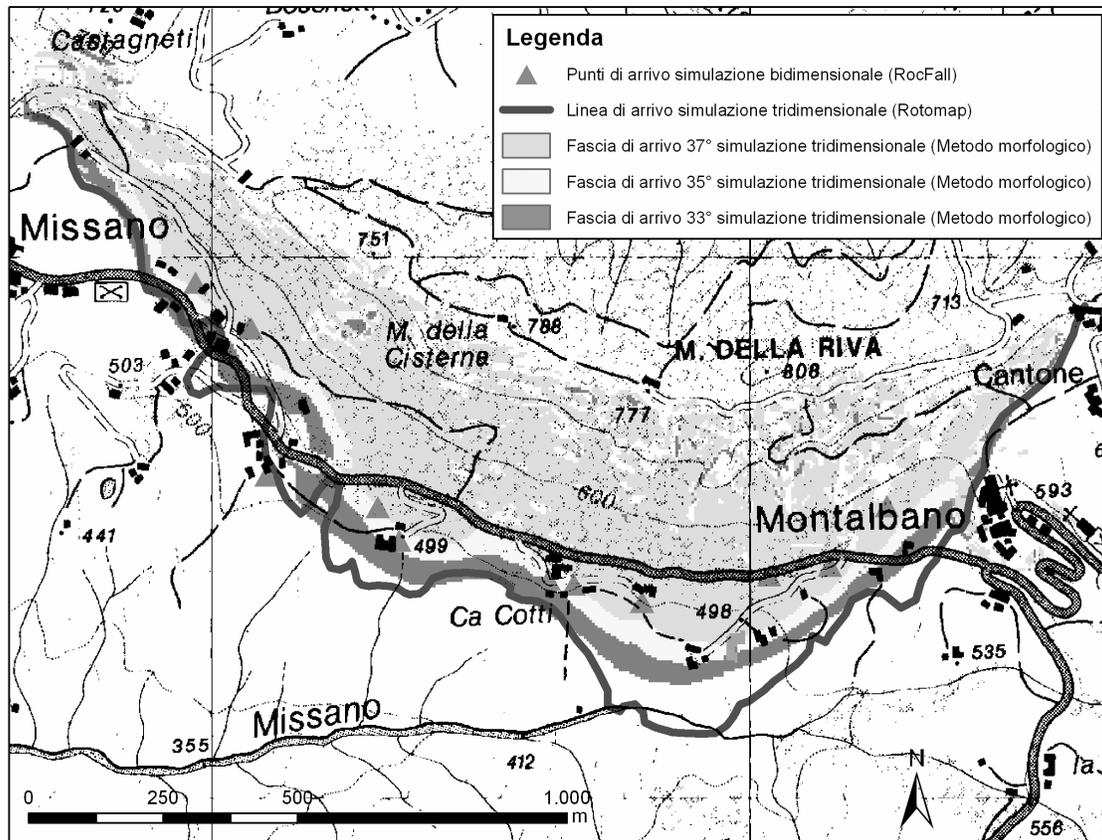


Figura 11: Risultati ottenuti mediante l'applicazione dei differenti metodi  
*Results from the application of different methods*

## 5. Analisi dei risultati

Da una prima analisi risulta che, per tutta la parete indagata, non vi è una perfetta corrispondenza tra i risultati derivanti dall'applicazione dei vari modelli precedentemente descritti (Fig. 11).

Da ciò risulta evidente che affidarsi ad un solo modello per l'analisi di situazioni dovute a fenomeni di crollo può indurre a commettere errori grossolani non solo in termini di sovrastima, ma soprattutto in termini di sottostima del fenomeno stesso.

Entrando nel merito della modellistica utilizzata, risulta che l'applicazione del modello cinematico tridimensionale fornisce, ad eccezione di piccole situazioni locali, i risultati più cautelativi, ovvero quelli che delimitano le aree più ampie di possibile propagazione dei crolli, tra quelli qui testati.

Tali risultati non hanno trovato riscontro nella fase di rilevamento sul campo, anche se bisogna ricordare che la presenza dell'uomo nell'area (strada comunale e varie borgate sparse) può aver in parte modificato i depositi originali dei crolli passati e che quindi non si può escludere a priori la possibilità che qualche masso possa raggiungere distanze superiori rispetto a quelle realmente riscontrate.

I risultati del metodo tridimensionale empirico sono del tutto paragonabili, anche se mediamente meno cautelativi, a

quelli del metodo tridimensionale cinematico, nell'analisi con gli angoli di 33°, e del tutto paragonabili a quelli bidimensionale per gli angoli di 37°.

I valori di energie e altezze di volo ricavati con i due metodi cinematici sono risultati del tutto confrontabili; sui profili di analisi vengono infatti raggiunte velocità massime prossime ai 35-40 m/s che determinano energie in gioco di circa 1500-2000 Kj, paragonabili ai valori ottenuti dall'analisi tridimensionale. Si è inoltre riscontrato che i massi si muovono principalmente per rotolamento senza compiere significative traiettorie in volo, se non a seguito di locali rimbalzi.

L'analisi congiunta dei risultati sottolinea che la strada e le case sottostanti possono essere raggiunte non solo dalle traiettorie più distali, ma anche da quelle più prossime alla parete e determina la necessità di pianificare adeguate opere di mitigazione.

## 6. Conclusioni

In considerazione dell'applicabilità dei metodi confrontati, del costo di esecuzione e del rapporto tra tempi di realizzazione e risultati, è possibile affermare che il metodo empirico tridimensionale può rappresentare un utile strumento di indagine preliminare che permette di ottenere

in maniera agevole risultati del tutto raffrontabili con quelli ottenibili applicando metodi cinematici più complessi. Il metodo permette infatti di individuare le aree potenzialmente interessabili da fenomeni di caduta massi e quindi di giungere ad una zonizzazione del territorio e definire possibili scenari di propagazione dei crolli, con indubbi benefici ai fini della pianificazione territoriale.

Il metodo empirico non fornisce però informazioni riguardo le caratteristiche cinematiche del moto. Risulta quindi utile affiancare a tale metodo almeno un metodo di tipo cinematico, che fornisca indicazioni riguardo l'altezza dei blocchi raggiunta e le energie/velocità in gioco nei percorsi di caduta dei massi, soprattutto in quelle aree ove sono presenti elementi vulnerabili e quindi necessari studi di maggior dettaglio.

In particolare, nei casi in cui sia necessario pianificare

interventi di mitigazione, risulta utile affiancare metodi cinematici tridimensionali e bidimensionali per costruire un quadro conoscitivo il più completo possibile: i primi risultano infatti utili per definire le traiettorie maggiormente critiche, da approfondire e analizzare poi utilizzando i metodi 2D che permettono altresì di indagare la funzionalità di eventuali barriere o della realizzazione di valli.

L'applicazione di entrambi i metodi è anche necessaria per confrontare i valori delle energie e delle altezze ottenuti per convalidare l'affidabilità dei risultati stessi.

## 7. Ringraziamenti

Si ringrazia il Prof. Paolo Paronuzzi per la revisione critica del testo.

## Bibliografia

- Agliardi F., Crosta G.B., 2003. High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 40, 455-471.
- Azzoni A., La Barbera G., Zaninetti A., 1995. Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 32 (7), 709-724.
- Bettelli G., Panini F., Pizziolo M., 2002. Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio 236 "Pavullo nel Frignano". Servizio Geologico d'Italia 165.
- Bozzolo D., Pamini R., 1986. Simulation of rockfall down a valley site. *Acta Mach.* 63, 113-130.
- Crosta G.B., Carrara Agliardi F., Campedel P., Frattini P., 2006. Valutazione della pericolosità da caduta massi tramite un approccio integrato statistico e deterministico. *Giorn. Geo. Appl.* 4, 41-48.
- D.M. 14. 09. 2005. Norme Tecniche per le costruzioni. *Gazzetta Ufficiale* n° 222, 23/09/2005.
- Del Maschio L., Pizziolo M., Gozza G., Piacentini D., 2004. Una metodologia integrata in ambiente GIS per l'analisi dei fenomeni di crollo: il caso studio di Monte delle Formiche (BO). *Il Geologo dell'Emilia-Romagna*, Anno IV, 19, 43-51.
- Geo&Soft, 2004. Rotomap, Manuale d'uso. [www.geo&soft.it](http://www.geo&soft.it)
- Guzzetti F., Crosta G., Detti R. e Agliardi F., 2002. STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Computers and geosciences* 28, 1079-1093.
- Heinimann H.R., Holtenstein K., Kienholz H., Krummenhacher B. e Mani P., 1998. Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. *Umwelt-Materialien* Nr. 85, Naturgefahren, BUWAL, Bern, 248.
- Hoek E., Bray J.W., 1988. *Rock Slope Engineering*. Institution of Mining and Metallurgy, 360.
- Hoek E., 1987. Rockfall. A program in basic for the analysis of rockfall from slope. Unpublished notes, University of Toronto. Canada.
- Jaboyedoff M. e Labiouse V., 2003. Preliminary assessment of rockfall hazard based on GIS data. *ISRM 2003, Technology road map for rock mechanics*. South Africa Institute of Mining and Metallurgy, 575-578.
- Onofri R. e Candian C., 1979. Indagine sui limiti di massima invasione dei blocchi rocciosi franati durante il sisma del Friuli del 1976. *Reg. Aut. Friuli-Venezia-Giulia*, CLUET, 42.
- Paronuzzi P. e Artini E., 1999. Un nuovo programma in ambiente Windows per la modellizzazione della caduta massi. *Geologia tecnica e ambientale* 1, 13-24.
- Piacentini D., 2005. Studio preliminare per l'analisi della stabilità di pareti rocciose: un esempio di applicazione nelle Dolomiti Occidentali (Provincia di Bolzano, Italia). *HydroGeo* 0, 50-55.
- Piacentini D., 2006. Metodi innovativi per la valutazione della pericolosità da frana, con particolare attenzione ai fenomeni di crollo di roccia: casi studio nelle Dolomiti e nell'Appennino Emiliano. Tesi di Dottorato. Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Dipartimento di Scienze della Terra, 322.
- Piteau D.R. e Clayton R., 1987. Computer rockfall model. *Proceeding Meeting on Rockfall Dynamics and Protective Works Effectiveness*. Bergamo, Italy. ISMES, 90, 123-125.
- Provincia di Modena, 2006. Tavola 3/4 PTCP (Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale).
- Regione Emilia-Romagna, 2006. Carta Geologica dell'Appennino Emiliano-Romagnolo, scala 1:10.000. Sezione 236080. Servizio Geologico Regione Emilia Romagna; <http://www.regione.emilia-romagna.it>