



**Università degli Studi di Modena
e Reggio Emilia**
Dipartimento di Scienze della Terra

Autonome Provinz

Bozen - Südtirol

Abteilung 30

Wasserschutzbauten

Sonderbetrieb für

Bodenschutz,

Wildbach- und

Lawinverbauung



Provincia Autonoma di

Bolzano - Alto Adige

Ripartizione 30

Opere idrauliche

Azienda Speciale per la
regolazione

dei corsi d'acqua e la
difesa del suolo

L'ANALISI E LA PERIMETRAZIONE DELLE AREE DI POSSIBILE PROPAGAZIONE CROLLI.

Linee Guida

CONTENUTI:

- 1) **Introduzione**
- 2) **Metodo zenitale**
 - a. **Selezione aree di possibile distacco**
 - b. **Individuazione aree di possibile propagazione**
- 3) **Risultati**
- 4) **Validità e limiti del modello**
- 5) **Criteri di modifica**
- 6) **Conclusioni**
- 7) **Bibliografia**

1. Introduzione

Le frane di crollo, in funzione della loro elevata velocità, costituiscono una grave minaccia per le infrastrutture e i centri abitati. Per tale motivo risulta estremamente importante riuscire ad analizzarne e valutarne la diffusione spaziale e l'eventuale interferenza con i sistemi antropici.

Il movimento di caduta può esplicarsi secondo i moti gravitativi di caduta libera, rimbalzo, rotolamento e scivolamento. Il principio fondamentale che regola la caduta dei massi è comunque quello secondo il quale ogni blocco, soggetto ad un movimento su un pendio, rispetta, in ogni istante, la condizione di massima efficienza del moto. Di conseguenza sia le trattorie compiute da un blocco, sia il tipo di moto assunto durante il percorso sono quelli che determinano la minor perdita di energia cinetica.

Per analizzare il movimento di caduta e tentare di individuare le aree maggiormente soggette a propagazione di massi si possono utilizzare diversi metodi che possono venir applicati per approssimare la situazione reale. Tali metodi possono essere suddivisi in due macrogruppi fondamentali: i modelli di tipo morfologico (**o empirici**) e i modelli fisicamente basati (o cinematici).

I modelli morfologici sono essenzialmente indicati per una prima valutazione del massimo avanzamento dei massi, dipendono dalla topografia del versante e si basano su analisi statistiche eseguite su crolli storici. Rappresentativi di questo tipo di modello sono i metodi zenitali sviluppati da diversi autori (Onofri & Candian, 1979; Heinimann et al., 1998; Jaboyedoff & Labiouse, 2003).

I modelli cinematici affrontano invece il problema della delimitazione del massimo avanzamento dei blocchi in modo analitico considerando la fisica del moto e le relative equazioni pur con qualche necessaria semplificazione. Sono basati su diversi algoritmi che descrivono le relazioni esistenti tra

tipo di movimento (caduta, rimbalzo, rotolamento e scivolamento), energia del blocco e coefficienti di restituzione del versante. Tali modelli di simulazione, nonostante il numero necessariamente limitato di variabili introducibili e l'aleatorietà insita nella determinazione dei parametri del moto, hanno il vantaggio di consentire simulazioni che ricostruiscono il comportamento della frana determinando le traiettorie, le velocità e le energie cinetiche dei massi durante il loro moto di caduta. La stima di tali dati risulta infatti essenziale per la pianificazione del territorio e la progettazione di opere di difesa.

L'analisi della massima propagazione delle frane di crollo su vasta area risulta spesso difficoltosa, in quanto i principali metodi di analisi sono concepiti per essere applicabili unicamente lungo profili di caduta preliminarmente definiti. Tali metodi di analisi, per quanto i profili siano numerosi e rappresentativi del versante oggetto dello studio, non descrivono però adeguatamente la reale traiettoria di caduta dei massi, in quanto non è possibile tenere in considerazione eventuali deviazioni rispetto al percorso prestabilito. Inoltre vengono individuate solo limitate porzioni del versante, rischiando di escludere dall'analisi aree di possibile sviluppo delle traiettorie e quindi sottostimare il fenomeno.

Tutti i modelli, sia di tipo bidimensionale, lungo sezioni, che tridimensionale, necessitano di una calibratura accurata e della determinazione precisa dei parametri di ingresso. Tali parametri possono venir ricavati da indagini in sito, da taratura a posteriori di crolli passati o mediante analisi probabilistiche.

La scelta del modello da applicare e l'acquisizione dei parametri necessari per le analisi può essere effettuata a diversi livelli di dettaglio e a scale differenti, in relazione alle finalità del lavoro da realizzare e all'estensione dell'area da esaminare.

2. Metodo zenitale

Il modello messo a punto ed applicato nell'ambito della presente convenzione, sulla base della ricca bibliografia esistente sull'argomento, ha voluto rispondere alla necessità specifica di effettuare analisi tridimensionali su vaste aree e di poter disporre di uno strumento facilmente utilizzabile in ambiente GIS.

In relazione alle finalità dello studio e all'estensione dell'area di analisi si è infatti sentita l'esigenza di sviluppare ed applicare, a sostegno dei tradizionali metodi di indagine relativi alle frane di crollo che prevedono per lo più analisi puntuali in sito, un metodo che permettesse di individuare preliminarmente le aree con le maggiori pericolosità a scala regionale. E' stato così applicato il così detto "metodo zenitale" proposto da Heinimann et al. (1998). Tale metodo, impostato su parametri

di ingresso facilmente reperibili (modello digitale del terreno), consente infatti una valutazione preliminare su vasta scala delle aree di massimo avanzamento dei massi considerando la dissipazione di energia proporzionale alla lunghezza del percorso, in rapporto alla differenza di quota tra il punto di distacco e di arrivo. In particolare esso si basa sul concetto del “cono d’ombra” che delimita, orizzontalmente e verticalmente, l’area entro la quale si arresta la quasi totalità dei blocchi. Il “cono d’ombra” viene essenzialmente definito dall’angolo di scansione verticale ovvero dall’angolo del segmento congiungente il punto di distacco e il punto di arresto e, nello spazio tridimensionale, dall’angolo di scansione orizzontale ovvero dall’angolo di deviazione angolare rispetto alla massima pendenza.

In particolare il metodo applicato è stato adattato alle esigenze specifiche dell’area di esame, modificato per l’applicazione tridimensionale ed implementato con procedure GIS. Sono stati così definiti specifici criteri di scelta delle aree di potenziale distacco, calibrati gli angoli per la descrizione delle traiettorie ritenute più adeguate e messi a punto procedimenti semi-automatici per l’identificazione delle aree sorgente di crolli e delle massime distanze di propagazione delle masse franate, avvalendosi in modo particolare dell’estensione *Spatial Analyst* di ArcGis 8.3.

a. Selezione aree di possibile distacco

Nell’accingersi alla delimitazione delle aree di potenziale propagazione di crolli è stato dapprima necessario definire i criteri di selezione delle aree di possibile distacco degli stessi. Trattandosi di un’analisi estesa a scala regionale non si è ritenuto possibile effettuare il rilevamento di dettaglio delle discontinuità e l’analisi mirata dei cinematismi locali di rottura. Si è dovuto così ricorrere a differenti criteri di selezione delle potenziali aree di distacco ed in particolare dalla verifica incrociata tra rilievi diretti in campagna ed elaborazioni eseguite in ambiente GIS, è emerso che la delimitazione delle aree di distacco crolli poteva venir eseguita, con buoni risultati, mediante l’integrazione di informazioni relative a:

- litologia;
- uso del suolo
- inclinazione dei versanti.

Sono state così definite classi litologiche, classi tipologiche di uso del suolo e classi di inclinazione che potevano potenzialmente essere sorgenti di frane di crollo.

In particolare le classi litologiche sono state suddivise sulla base delle specifiche caratteristiche geomeccaniche delle formazioni affioranti e sul grado di fratturazione (espresso come frequenza e densità di fratture) che queste presentano. I dati di partenza relativi alle tipologie di uso del suolo sono stati invece suddivisi, in modo da risultare funzionali allo scopo dell’indagine, in classi

tipologiche caratterizzate da risposte analoghe nei confronti dei fenomeni franosi di crollo. Gli usi del suolo sono stati quindi raggruppati in:

Carta Uso del suolo	Classi di uso del suolo per simulazione crolli
Aree umide	Acque
Bacini d'acqua	Acque
Corsi d'acqua	Acque
Dighe	Acque
Ghiacciaio	Acque
Bosco	Bosco
Arbusti contorti e pino mugo	Cespuglieti
Pascoli o arbusti nani alberati, prati alberati	Cespuglieti
Zone detritiche prive di vegetazione	Detrito
Roccia	Roccia
Siepi ed alberature	Seminativo-Colture perm.-Prati-Altre sup.agricole
Altre superfici agricole	Seminativo-Colture perm.-Prati-Altre sup.agricole
Aree prative	Seminativo-Colture perm.-Prati-Altre sup.agricole
Colture permanenti	Seminativo-Colture perm.-Prati-Altre sup.agricole
Seminativo	Seminativo-Colture perm.-Prati-Altre sup.agricole
Aeroporto	Urbano
Altre attrezzature di interesse pubblico	Urbano
Area a copertura artificiale non classificabile	Urbano
Area verde urbana	Urbano
Attrezzature sportive e per il tempo libero	Urbano
Case singole, case sparse	Urbano
Cave	Urbano
Cimitero	Urbano
Discariche	Urbano
Impianto speciale	Urbano
Linee ferroviarie e spazi associati	Urbano
Rete stradale e spazi associati	Urbano
Superfici industriali e commerciali	Urbano

Tessuto extraurbano denso	Urbano
Tessuto urbano denso	Urbano
Tessuto urbano rado	Urbano
Zona militare	Urbano
impianti a fune (edifici) e spazi associati	Urbano

Le classi relative a: Acque, Urbano e Seminativo-Colture perm.-Prati-Altre sup.agricole sono state escluse dalla simulazione “con riserva” (in funzione delle considerazioni che verranno espresse nei paragrafi seguenti) in quanto non si riteneva fossero possibili zone sorgente di frane di crollo. Sono state così considerate le classi: cespuglieto, bosco, detrito, roccia.

Il valore di inclinazione ritenuto critico ai fini dell’insorgere di fenomeni franosi di crollo, ricavabile a partire da un modello digitale del terreno, è stato prescelto sulla base di analisi effettuate in aree test. In accordo con i valori proposti da vari autori, sono stati vagliate inclinazioni del pendio maggiori di 33° (Heinimann et al., 1998), 40° e 45° (Jaboyedoff e Laboiuse, 2003). Il confronto tra i risultati ottenuti e le reali pareti, potenzialmente sorgente di fenomeni franosi di crollo ha evidenziato che il criterio che riproduce più fedelmente la realtà è quello che considera i pendii con inclinazione maggiore di 33°, in accordo con quanto proposto da Heinimann et al. (1998). Tale soglia si presenta infatti cautelativa senza sovrastimare in maniera eccessiva le aree di potenziale distacco da prendere in considerazione.

Prendendo in considerazione le varie informazioni litologiche, di uso del suolo e di inclinazione dei versanti >33° è stato così possibile ricavare diverse distribuzioni delle zone di distacco.

La necessità di inserire nella fase preliminare dati di dettaglio, quali la geologia, inficiava però l’applicabilità generale su vasta scala del metodo che si voleva mettere a punto. Si è allora deciso di verificare, effettuando ulteriori analisi in aree test, se era possibile considerare unicamente l’informazione morfologica di inclinazione dei versanti unitamente a quella relativa all’uso del suolo, come criterio per la selezione delle aree di potenziale distacco crolli. I risultati ottenuti sono stati poi verificati direttamente in campagna, dove si è accertato che le zone da ritenersi sorgente potenziale di crolli venivano correttamente individuate mediante l’applicazione del tale criterio morfologico, che considera pendii con inclinazione maggiore di 33°, applicato alle specifiche tipologie di uso del suolo.

Si è infatti potuto constatare che, anche se in questo modo si tende a sovrastimare la delimitazione delle aree (il numero dei potenziali punti di distacco risulta leggermente sovrastimato con una differenza percentuale non superiore al 7%). esiste una buona corrispondenza tra le aree realmente critiche e quelle selezionate. Si è notato inoltre che la differenza tendeva a diminuire man mano che

aumentavano i valori di inclinazione del pendio (in funzione della relazione tra caratteristiche dei litotipi e inclinazione del versante); per un'inclinazione di circa 10° si ha una diminuzione del numero dei punti di distacco dal 85% al 30% (rispetto al totale dei punti di distacco), per un'inclinazione maggiore di 33° si ha una diminuzione del numero dei punti di distacco dal 24% al 17% e per un'inclinazione maggiore di 45° la diminuzione varia dal 12% al 10%.

In considerazione dei risultati emersi si è quindi deciso di utilizzare il solo criterio morfologico con inclinazione del pendio >33° °, applicato a specifiche tipologie di uso del suolo, in quanto si è potuto constatare che permetteva analisi cautelative senza sovrastimare eccessivamente i reali punti di distacco. L'applicazione di questo criterio per la selezione delle aree di possibile distacco crolli permette così la facile riproducibilità del metodo anche in aree per le quali non esistono rilievi geologici dettagliati e specifiche informazioni circa la fratturazione.

I versanti con inclinazione > di 33° sono poi stati suddivisi in classi di pendenza (Classe ad **acclività media** con angoli compresi tra i 33° e i 45° e Classe ad **acclività alta** con angoli compresi tra 45° e 90°) e le aree così ricavate sono state poi trasformate in punti di distacco (con equidistanza in funzione della risoluzione del DEM di partenza), a cui stati attribuiti i valori dell'immersione del versante di appartenenza (suddiviso in pixel), in modo da agevolare il calcolo delle possibili propagazioni.

I punti di potenziale distacco così ricavati rappresentano quindi una buona base di partenza per le simulazioni (sia con metodi morfologici che cinematici) delle traiettorie di caduta e per la pianificazione di eventuali sopralluoghi ed analisi di dettaglio. A partire da tali punti di distacco, in funzione della tipologia di uso del suolo, delle dimensioni stimate dei massi che si possono staccare, nonché dello spessore del terreno sono state simulate le differenti traiettorie caratterizzate da angoli di scansione verticale variabili.

b. Individuazione aree di possibile propagazione

Le zone di possibile propagazione di crolli sono state individuate, a partire dai punti di potenziale distacco, utilizzando il metodo zenitale sviluppato in tre dimensioni. Per verificare gli angoli da utilizzare nella definizione delle traiettorie, sono state eseguite diverse simulazioni in aree test.

Il valore dell'angolo di scansione verticale (ϕ) può essere stimato sulla base della relazione:

$$\phi = \arctan(H/L)$$

dove

H= dislivello tra la zona di distacco e di arresto

L= massima distanza percorsa

Vari autori hanno proposto, su base statistica in funzione di frane di crollo storiche, angoli di scansione verticale:

- Onofri e Candian (1979) 27°-41°;
- Toppe (1987) 32°;
- Heinimann et al (1998) 33°-37°;
- Focardi e Iotti (2001) 27°-29°;
- Jaboyedoff e Laboiuse (2003) 33°;
- Corominas (2003) 26° - 54°.

In particolare si è deciso di testare gli angoli minimi di 27,15° e di 33° proposti rispettivamente da Onori e Candian (1979) e da Heinimann et al. (1998).

L'analisi dei risultati ha messo in evidenza come il valore di angolo di 27,15° sia ampiamente sovrastimato rispetto alla distribuzione dei crolli rilevabili sul terreno e che il valore di soglia minima di 33° meglio si adatta alle specificità delle aree studiate.

Secondo Heinimann et al. (1998) in funzione della tipologia di uso del suolo, delle dimensioni stimate dei massi che si possono staccare, nonché dello spessore del terreno e della regolarità profilo del profilo possono venir poi individuati tre differenti angoli.

Nell'analisi, le traiettorie sono state quindi definite da angoli, misurati rispetto alla linea dell'orizzonte, variabili da 33° (condizioni peggiori: uso del suolo che si oppone scarsamente al passaggio dei blocchi) sino all'inclinazione del pendio, suddivisibili in tre classi:

33° - 35°

35° - 37°

37° - inclinazione del versante.

In particolare:

Dimensione Blocchi (diametro)	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:a 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		

A luoghi anche questi angoli sono risultati sovrastimati in presenza di particolari contesti morfologici caratterizzati dalla presenza di potenti pareti rocciose sub-verticali sovrastanti valli secondarie strette o zone pianeggianti. Sono così stati analizzati nel dettaglio numerosi casi in modo da mettere a punto una serie di indicazioni per facilitare l'analisi critica dei risultati e ottimizzare l'applicazione pratica degli stessi.

L'applicazione del metodo zenitale in tre dimensioni ha inoltre richiesto la definizione dell'angolo di scansione orizzontale. Trattandosi però di un metodo applicato precedentemente in prevalenza nello spazio bidimensionale, lungo sezioni, non si è potuto disporre di una ricca bibliografia al riguardo in quanto i precedenti autori non si sono pronunciati circa l'entità di tale angolo. In questa analisi, a seguito di analisi di crolli storici, si è deciso di considerare angoli di scansione orizzontali pari a +/- 15° rispetto al valore dell'immersione ritenuti adeguati per valutare coni di influenza sufficientemente rappresentativi senza sovrastimare eccessivamente il fenomeno.

Le elaborazioni dati e la creazione delle traiettorie è stata realizzata mediante l'estensione Spatial Analyst, presente all'interno del software ArcGis 8.3, ed in particolare con la funzione Viewshed. Tale funzione permette di calcolare, a partire da specifici punti di partenza, le maglie che possono essere visibili, da uno o più punti, secondo gli angoli di scansione che vengono prefissati.

Per verificare la correttezza del metodo morfologico così delineato si è provveduto a verificare i risultati delle simulazioni direttamente sul terreno confrontando le propagazioni attese con gli accumuli presenti alla base delle pareti, e mediante l'applicazione di modelli fisicamente basati di tipo cinematico (p.e. software Rotomap, Geo&Soft).

Lo studio effettuato ha permesso così di ottenere una zonizzazione preliminare del territorio esaminato.

3. Risultati

Il metodo permette di ricavare tre possibili scenari di propagazione in base alla dimensione del materiale coinvolto. Si può avere:

- Caso 1: materiale coinvolto minore di 0,5 m di diametro con 3 possibili fasce di propagazione (33°- 35°, 35°-37°, 37°-inclinazione pendio);
- Caso 2: materiale coinvolto con dimensione dei massi con diametro medio compreso tra 0,5 m e 2 m con 2 possibili fasce di propagazione (33°-35°, 35°-inclinazione del pendio),
- Caso 3: materiale coinvolto con un diametro medio maggiore di 2 m con un'unica possibile fascia di propagazione (33°-inclinazione del pendio).

La scelta della fascia di appartenenza deve venir effettuata sulla base delle condizioni al contorno relative alla tipologia di vegetazione presente alla base del pendio, allo spessore del terreno interessato nel crollo e delle condizioni topografiche. Nell'analisi dei risultati bisogna prescindere dalla presenza di opere di mitigazione ed elementi antropici in generale che andranno poi valutati in un secondo momento per stimare come possono influenzare la propagazione dei massi stessa.

Le aree di possibile propagazione dei blocchi individuate mediante il modello morfologico possono anche venir analizzate in funzione degli elementi vulnerabili (strade e centri abitati) presenti sul territorio in esame. Questo permette di evidenziare quale sia effettivamente la distribuzione delle aree a maggior rischio, rispetto a questo particolare tipo di fenomeno, e di indicare quali siano le pareti da sottoporre a specifici studi di dettaglio. Il metodo permette infatti di ottenere una zonizzazione del territorio che serve a valutare in maniera immediata le eventuali interferenze tra zone di possibile massima propagazione dei crolli e zone vulnerabili. Le mappe che se ne ricavano, fornendo una prima panoramica delle aree che possono essere interessate dalla propagazione dei crolli, possono inoltre costituire un utile strumento per individuare i settori che necessitano di eventuali interventi di mitigazione. Nella zonizzazione che se ne ricava, oltre alle zone di possibile massima propagazione, possono inoltre venir indicate le aree di possibile distacco individuate secondo i criteri precedentemente stabiliti.

I risultati ottenuti mediante l'applicazione di tale metodologia sono stati validati tramite l'applicazione di altri metodi e mediante verifica diretta sul terreno.

4. Validità e limiti del modello

Il metodo zenitale se da un lato presenta il grande pregio di basarsi su di un numero limitato di dati di partenza facilmente reperibili (DEM e Uso del Suolo) dall'altro risulta ampiamente influenzato dalla definizione e dalla validità degli stessi.

In particolare l'analisi è stata effettuata utilizzando un modello digitale del terreno con risoluzione 20 m che ha quindi influenzato di ± 20 m il grado di precisione dell'analisi stessa sia per quanto riguarda la selezione dei possibili punti di distacco sia per quanto concerne l'individuazione delle zone di possibile propagazione. L'utilizzo di un DEM con tale risoluzione anche se ha penalizzato l'individuazione precisa di cambiamenti locali di morfologia, causando locali inesattezze, ha permesso un'agevole analisi a scala regionale e si è dimostrato proporzionale al grado di dettaglio che si è voluto attribuire all'analisi stessa. L'applicazione di DEM più risolti permette infatti una ricostruzione morfologica più accurata ma introduce, oltre a tempi di elaborazione notevolmente più lunghi, un grado di dettaglio eccessivo per la scala di indagine e la necessità di basare l'analisi su di un maggior numero di dati di partenza. I risultati ottenuti eseguendo analisi basate su DEM con diverse risoluzioni hanno infatti messo in evidenza che più il DEM aumenta di risoluzione più i punti di distacco, selezionati secondo il metodo morfologico, si presentano sovrastimati rispetto alle reali zone di distacco. Se sulla base del DEM con risoluzione 20 m l'applicazione del modello morfologico conduce alla sostanziale delimitazione della parete da cui si distacco i crolli (sovrastima 7% per inclinazioni di 33°), per le analisi effettuate utilizzando i DEM più risolti si assiste ad una sovrastima, per inclinazioni di 33°, dell'ordine del 15%. Da qui l'esigenza di considerare altresì le caratteristiche geologiche dell'area in esame e studiare unicamente le litologie che, per caratteristiche litotecniche e di fratturazione, possono dare origine a frane di crollo inficiando l'applicabilità su vasta scala della metodologia stessa. Si può inoltre notare che l'aumento di risoluzione del DEM anche se influenza la precisione nella definizione delle aree di possibile propagazione non migliora sostanzialmente i risultati dell'analisi.

Anche i dati di partenza ricavati dalla carta dell'uso del suolo sono di fondamentale importanza per quanto riguarda la selezione delle aree di possibile distacco di crolli. Ne deriva che l'accuratezza del dato di partenza influenza profondamente la delimitazione dei punti di distacco utilizzati come base per l'analisi zenitale.

Analisi effettuate a posteriori hanno permesso di tarare la precisione del modello stesso. In particolare si è ricavato che sulla base di un DEM con risoluzione di 20m i risultati ottenuti con il modello zenitale si presentano sovrastimati di circa il 10% rispetto a quelli ottenuti mediante l'applicazione di metodi fisicamente basati (p.e. Rotomap; Geo&Soft) e del 38% rispetto all'ubicazione degli effettivi massi rilevati sul terreno. Tenendo però in considerazione il limite connesso alla risoluzione del DEM di partenza stimabile all'incirca in ± 20 m si desume che il metodo zenitale tende a sovrastimare i risultati ottenibili rispetto alla realtà di circa un 20%. Una condizione di sovrastima particolare si è verificata ove potenti pareti sub-verticali affiorano al di sopra di superfici pianeggianti. Nel tal caso specifico si è appurato che la sovrastima nella

delimitazione delle fasce di possibile propagazione massima dei crolli aumenta sino al 30% rispetto alla situazione reale.

Tali dati risultano ricavati da analisi effettuate prendendo in considerazione le fasce di propagazione relative alla classe 37°-90° che si ritiene essere quelle più frequente e probabile, e di per sé già cautelativa, in quanto si è evinto che le fasce 33° e 35° rappresentano condizioni estremamente sfavorevoli verificabili in rari casi.

Il modello morfologico rappresenta quindi una valida soluzione, seppur con qualche limitazione, per la creazione di un utile quadro conoscitivo inerente la problematica dei crolli a scala regionale (area vasta 1:25.000).

Necessariamente ove sono presenti aree vulnerabili non è sufficiente, a fini pianificatori, basarsi sui risultati forniti da tale modello ma occorre eseguire analisi di dettaglio (sia in campagna che in laboratorio) volte ad una definizione più precisa e puntuale della problematica.

5. Criteri di modifica

I risultati ottenuti mediante l'applicazione del metodo zenitale possono venir modificati a seguito di verifiche dirette in campagna e analisi di tipo cinematico. Tali modifiche potranno venir effettuate qualora:

- 1) le fasce di propagazione si presentino sovrastimante oltre al limite accettabile insito nella risoluzione del metodo stesso o
- 2) si verificano incongruenze circa la selezione dei punti di potenziale distacco.

Durante la fase di taratura del modello è stato possibile appurare che condizioni di eccessiva sovrastima si possono verificare in particolari contesti morfologici come per esempio in presenza di potenti pareti rocciose sub-verticali sovrastanti valli secondarie strette. Nel tal caso sarà quindi possibile ridefinire le fasce di propagazione sulla base di rilievi di campagna di dettaglio e analisi di tipo cinematica.

La valutazione circa la presenza di opere di mitigazione deve invece venir effettuata in un secondo momento e separatamente; tale presenza non deve infatti andare a modificare l'estensione delle fasce di possibile massima propagazione delle frane di crollo in quanto queste sono da considerarsi indipendenti dall'effettiva presenza e funzionalità di eventuali opere presenti su territorio.

L'aggiunta o la diminuzione dei potenziali punti di distacco può invece venir effettuata nel momento in cui si verificano condizioni di uso del suolo differenti da quelli riportati in carta o si ritenga opportuno inserire altresì aree appartenenti a tipologie che sono state escluse dall'analisi in quanto solitamente non possono dare origine a frane di crolli, come per esempio i seminativi o i prati, ma che per specificità locali (p.e. presenza di massi) devono venir inclusi come punti di

distacco. Ove lo si ritenga necessario è inoltre possibile inserire ulteriori punti di distacco in quelle situazioni ove il DEM, a causa della sua risoluzione, non ha evidenziato condizioni di acclività superiori ai 33° ma ove sono presenti locali rotture di pendio potenzialmente distaccanti.

E' inoltre possibile diminuire il numero dei punti di distacco ove si verifichi l'assenza di affioramenti rocciosi potenzialmente distaccanti. Questo può per esempio avvenire all'interno di aree boscate che, seppur inserite nell'analisi per ragioni cautelative, possono non presentare al loro interno zone potenzialmente sorgente di crolli.

6. Conclusioni

Il modello utilizzato per analizzare la propagazione delle frane di crollo, è un modello morfologico, derivato da quello adottato da Heinemann et al. (1998) e parzialmente sviluppato nell'ambito del presente lavoro. Tale modello, che può essere agevolmente applicato su vaste porzioni di territorio e richiede dati di input facilmente reperibili (DEM), non descrive in termini matematici, e quindi rigorosi, la previsione del moto di caduta massi, ma valuta le aree di massimo avanzamento dei blocchi, considerando la dissipazione di energia proporzionale alla lunghezza del percorso, in rapporto alla differenza di quota tra il punto di distacco e di arrivo; si basa sul concetto di "cono d'ombra" che delimita, orizzontalmente e verticalmente, l'area entro la quale si arresta la quasi totalità dei blocchi. Il valore minimo da attribuire agli angoli di scansione è stato vagliato e verificato in analisi sperimentali effettuate in aree campione ed è stato fissato in accordo con quanto stabilito da Heinemann et. al. (1998) pari a 33° per la scansione verticale e uguale a $\pm 15^\circ$ per quella orizzontale. La verifica della correttezza del metodo morfologico così delineato è stata effettuata direttamente sul terreno e mediante il confronto con modelli deterministici. Tali modelli deterministici sono caratterizzati da un numero di variabili maggiori rispetto a quelli empirici e ciò implica necessariamente una complessità del modello tale per cui risulta utilizzabile in situazioni puntuali e di dettaglio e non a scala regionale.

Si ritiene che il modello morfologico rappresenti una valida soluzione, seppur con qualche limitazione, per la creazione di un utile quadro conoscitivo inerente la problematica dei crolli a scala regionale (area vasta 1:25.000).

Lo studio effettuato ha infatti dimostrato che, dopo una prima fase di taratura e verifica abbastanza lunga e delicata, è possibile eseguire in modo rapido ed efficace analisi preliminari sufficientemente accurate, anche per aree estese. I controlli effettuati durante il rilevamento geomorfologico hanno poi indicato che i risultati ottenuti con tale metodo morfologico presentano una sovrastima, nella delimitazione delle aree di possibile propagazione crolli, rispetto alle evidenze riscontrate in campagna variabile tra il 20% e il 30%. L'analisi morfologica ha inoltre l'indubbio vantaggio di

presentare tempi e costi di elaborazione estremamente contenuti, oltre che permettere l'acquisizione di informazioni attendibili circa le zone potenzialmente pericolose in modo da incentrare su di esse i rilievi di dettaglio di tipo puntuale.

Le aree di possibile propagazione dei blocchi individuate mediante il modello morfologico se analizzate in funzione degli elementi vulnerabili (strade e centri abitati) presenti sul territorio in esame evidenziano quale sia effettivamente la distribuzione delle aree a maggior rischio, rispetto a questo particolare tipo di fenomeno, e di indicare quali siano le pareti da sottoporre a specifici studi di dettaglio, riducendo notevolmente i tempi di indagine..

Necessariamente ove sono presenti aree vulnerabili non è sufficiente, a fini pianificatori, basarsi sui risultati forniti da tale modello ma occorre eseguire analisi di dettaglio (sia in campagna che in laboratorio) volte ad una definizione più precisa e puntuale della problematica.

7. Bibliografia

- Corominas J., Copons R., Vilaplana J.M., Altimir J., Amigò J., 2003** – *Form landslide hazard assessment to management, the Andorran experience. International Conference on Fast Slope Movements, Prediction and Prevention for Risk Mitigation.* A cura di Picarelli L., edito per l'Associazione Geotecnica Italiana dalla Patron editore.
- Focardi P. & Iotti A., 2001** - *Confronto di metodi di calcolo per la determinazione del percorso di blocchi a seguito di frane di crollo.* Geologia tecnica e ambientale. 2, pp.3-8.
- Geo&Soft, 2004** – *Rotomap, Manuale d'uso.* www.geo&soft.it
- Heinimann H.R., Holtenstein K., Kienholz H., Krummenhacher B. & Mani P., 1998.** - *Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. Umwelt-Materialien Nr. 85, Naturgefahren, BUWAL, Bern, 248 pp.*
- Jaboyedoff M. & Laboiuse V., 2003** – *Preliminary assessment of rockfall hazard based on GIS data.* ISRM 2003, Technology roadmap for rock mechanics. South Africa Institute of Mining and Metallurgy.
- 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 pp.
- Toppe R., 1987** – *Terrain model: a tool for natural hazard mapping.* In: *Avalanche formation, movement and effects.* Edited by Salm B. & Gubler H. Int Ass. Of Hydrological Sciences. Wallingford,UK Publ.162, 629-638.