

Le grandi frane alpine 2.2

2.2.1

Introduzione

Le frane sono state definite da Cruden (1991) come *movimenti di masse di roccia, detrito o terra lungo un pendio* e sono responsabili di considerevoli perdite sia in termini economici sia di vite umane. La gravità di tali perdite aumenta con l'espansione urbana e le trasformazioni di uso del suolo che stanno sempre più interessando le aree montane, sia per motivi legati allo sviluppo turistico sia per il miglioramento delle vie di comunicazione. Non deve pertanto sorprendere che, in quest'ambito, negli ultimi anni si stiano investendo notevoli risorse per la ricerca, le applicazioni e le tematiche inerenti la pianificazione territoriale a livello mondiale.

In modo particolare, l'attenzione è rivolta a quei fenomeni catastrofici, genericamente definiti grandi frane, le cui conseguenze su vasta scala hanno una importante ricaduta sulle comunità umane.

In letteratura esistono numerose definizioni per descrivere le grandi frane. Ad esempio, il recente *World Landslide Inventory* condotto dall'*International Union of Geological Sciences* (IUGS), definisce *grandi frane* quei fenomeni gravitativi che coinvolgono un volume superiore ad un milione di metri cubi, causano una o più vittime o inducono perdite equivalenti al lavoro annuale di una persona. Questa definizione pone l'attenzione principalmente agli effetti legati a movimenti improvvisi e catastrofici di porzioni di versanti instabili e non considera, ad esempio, interi versanti soggetti a lenti movimenti. Infatti, questi fenomeni sono caratterizzati generalmente da una bassa probabilità di evoluzione come frane catastrofiche ma potenzialmente possono produrre gravissimi danni, sia diretti sia indiretti, alle persone, alle proprietà ed all'ambiente. Inoltre, il movimento generalizzato di vaste porzioni dei versanti, produce numerosi fenomeni secondari (quali frane minori o colate detritiche) che hanno talvolta elevata frequenza. Molto spesso sono questi fenomeni secondari che attirano l'attenzione delle comunità e delle istituzioni, che richiedono azioni di protezione senza sviluppare, tuttavia, una coscienza nei confronti del movimento generale del versante.

D'altro canto, nella quasi totalità dei casi, non è possibile eseguire interventi di sistemazione per le grandi frane in quanto, tali interventi, risultano o tecnicamente irrealizzabili ed inefficaci o eccessivamente onerosi dal punto di vista economico. In tale contesto, le metodologie per la valutazione e la mitigazione del rischio assumono un ruolo particolarmente significativo.

2.2.2

Approccio multidisciplinare per l'analisi di pericolosità e rischio

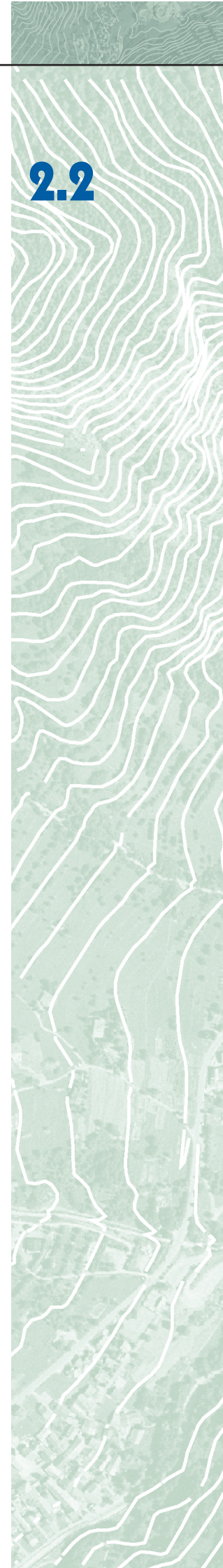
Nell'ambito del Progetto IMIRILAND (*Impact of Large Landslides in the Mountain Environment: Identification and Mitigation of Risk*), finanziato dal-

l'Unione Europea (*5th Framework Programme*), è stata recentemente predisposta una metodologia multidisciplinare finalizzata alla valutazione quantitativa del rischio (QRA) legato ai grandi fenomeni gravitativi (Bonnard *et al.*, 2004). La QRA, in generale, fornisce uno schema utile per la valutazione del rapporto costi/benefici delle misure di mitigazione, indicando strategie per la gestione e la riduzione del rischio. La QRA applicata nella metodologia IMIRILAND è stata sperimentata in otto siti delle Alpi e dei Pirenei ed ha permesso di quantificare il rischio attraverso una sistematica analisi di tutti i fattori che caratterizzano la pericolosità connessa alle grandi frane e le relative conseguenze per l'uomo e l'ambiente. Sulla base dei casi studiati si sono evidenziate quattro situazioni tipiche connesse all'evoluzione delle grandi frane alpine:

- 1) movimenti lenti e continui in aree antropizzate estese;
- 2) movimenti su aree estese in grado di produrre l'evoluzione parossistica di un fenomeno gravitativo con conseguente modificazione della geometria del piede del versante e del fondovalle (sbarramenti);
- 3) potenziale evoluzione rapida o molto rapida del fenomeno gravitativo (crolli e valanghe di roccia) con coinvolgimento di aree antropizzate;
- 4) evoluzione del fenomeno gravitativo con propagazione di imponenti colate detritiche all'interno del reticolo idrografico.

I principi su cui si basa la metodologia IMIRILAND derivano dalle metodologie per l'analisi del rischio da frana proposte in letteratura (Cruden & Fell, 1997) e si riferiscono al seguente schema generale:

- analisi di pericolosità (analisi dei fenomeni e della relativa probabilità di accadimento);
- identificazione degli elementi a rischio;
- analisi della vulnerabilità degli elementi a rischio;
- calcolo del rischio.



La metodologia IMIRILAND ha approfondito in particolare i seguenti aspetti:

- predisposizione di un processo basato sull'espressione numerica di ogni componente della pericolosità e del rischio che, per mezzo di semplici operazioni matematiche ed un approccio matriciale, si sviluppa attraverso fasi consequenziali;
- utilizzo dei Sistemi Informativi Geografici (GIS) per le elaborazioni spaziali basate sul principio che ciascun componente della pericolosità e del rischio è rappresentabile spazialmente.

In base a queste considerazioni, ciascun componente della pericolosità e del rischio, rappresentato per quanto possibile in termini quantitativi ed oggettivi, può essere considerato l'attributo numerico di una specifica rappresentazione spaziale. L'analisi di rischio può essere sintetizzata nelle seguenti tre fasi:

- 1) analisi di pericolosità;
- 2) analisi del danno;
- 3) calcolo del rischio.

2.2.2.1

Analisi di pericolosità

Il primo e basilare passo che permette di pervenire alla definizione della pericolosità (*hazard*) è la caratterizzazione del pericolo (*danger*). Affinché il *danger* sia caratterizzato rigorosamente, soprattutto per i grandi movimenti franosi, è necessario sviluppare un approccio metodologico multidisciplinare che integri il contributo ottenuto da differenti analisi complementari: geologica, geomorfologica, storica, strumentale, geomeccanica (modelli di innesco e propagazione). Queste analisi si sviluppano in modo consequenziale, fornendo ciascuna una serie di dati e conoscenze che vengono impiegate come *input* per le analisi succes-

sive (**figura 2.2.1**). Questo processo è in continuo divenire in relazione al progredire delle conoscenze. È importante evidenziare che ogni analisi di questo processo può introdurre degli errori intrinseci, che possono essere limitati attraverso un procedimento di verifica a ritroso (*feedback*). I dati, le conoscenze e gli strumenti forniti da ogni analisi vengono brevemente descritti di seguito.

Analisi geologiche e geomorfologiche

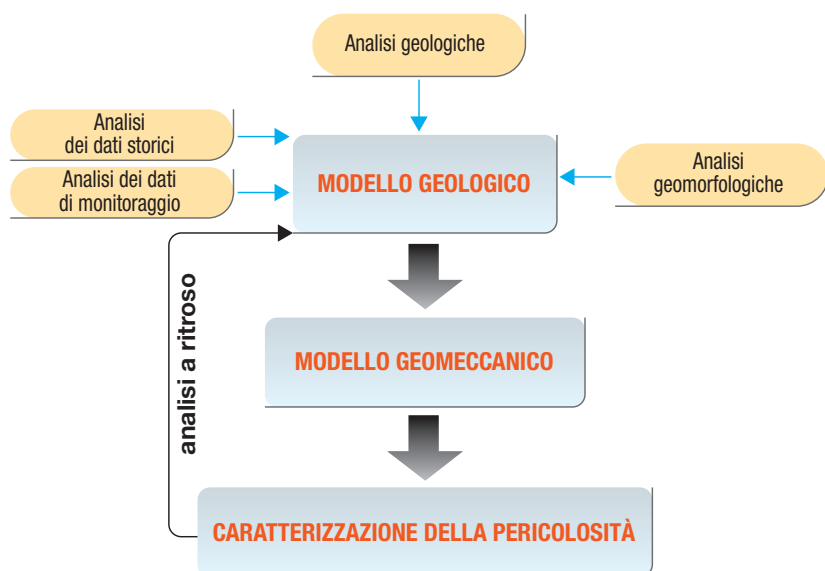
Sono analisi che forniscono una iniziale caratterizzazione del fenomeno oggetto di studio e sono rivolte ad una comprensione delle geometrie del corpo di frana (area, volume, profondità ecc.) e dei possibili meccanismi di deformazione e di innesco. Tali analisi supportano la simulazione numerica e la definizione qualitativa della probabilità di innesco (predisposizione). Affinché ciò sia realizzabile in maniera rigorosa, le analisi devono essere effettuate sia sul corpo di frana (*on-site*), sia in un suo intorno geologico locale e regionale (*around-site*) più ampio. Le analisi *around-site* diventano necessarie soprattutto quando la deformazione gravitativa è così evoluta da non permettere il riconoscimento delle relazioni geometriche di base tra le discontinuità che interessano il corpo di frana e le principali unità strutturali, impedendo inoltre una ricostruzione della originaria configurazione geometrico-strutturale della frana stessa. Queste analisi sono infine necessarie anche per una valutazione della pericolosità su più grandi areali (per esempio l'intero versante o valle), sulla base di estrapolazioni laterali dei caratteri geologici regionali. Questo approccio geologico-geomorfologico, schematizzato in **figura 2.2.2**, integra dati alla meso ed alla macro-scala di modelli geologici regionali, come di seguito sintetizzato.

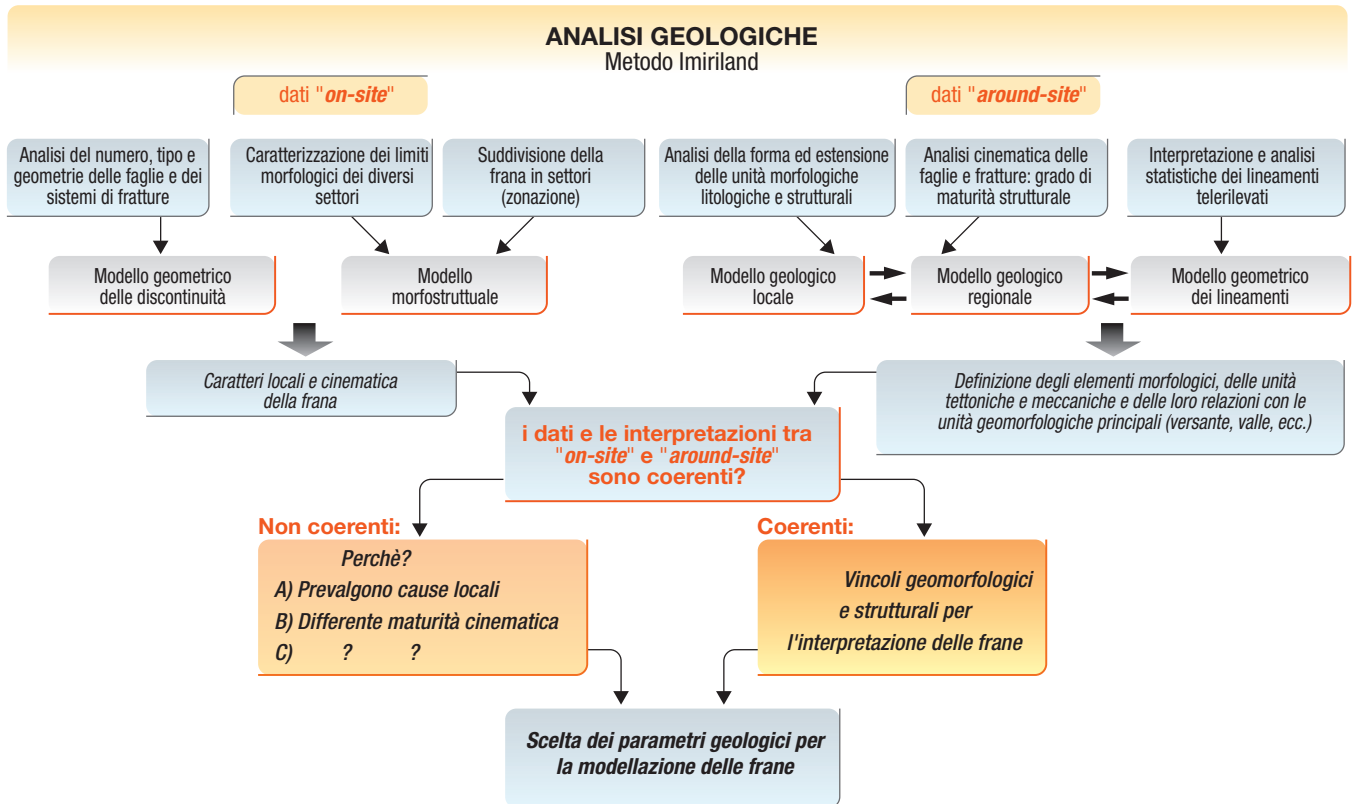
Analisi sul sito di frana (*on-site*)

Queste analisi permettono di definire i seguenti modelli:

- 1) geometrico, rivolto principalmente ad una caratterizzazione delle geometrie e delle proprietà fisiche dei sistemi di discontinuità (tipo, numero di sistemi, orientazione, persistenza, tipo di terminazione e relazioni di intersezione), fornendo inoltre indicazioni su dimensioni e geometria delle porzioni rocciose instabili per un'analisi qualitativa dei meccanismi cinematici e di rottura. Tuttavia, un'approfondita raccolta dati sul sito di frana non è sempre possibile a causa delle difficoltà logistiche, della scarsità di affioramenti rocciosi in posto, dell'elevato grado di fratturazione dell'ammasso roccioso ecc.;
- 2) morfostrutturale, rivolto a fornire una conoscenza delle caratteristiche geomorfologiche peculiari dell'intero versante (per esempio nel caso di deformazioni gravitative profonde di versante) sul quale si sviluppa la frana. Tale modello definisce i limiti principali del fenomeno gravitativo ed i vari settori della frana distinti sulla base dei

Figura 2.2.1
Schema delle analisi e dei modelli utilizzati e integrati per lo studio delle grandi frane





differenti comportamenti cinematici (zonazione della frana). Negli ultimi anni, l'analisi geomorfologica delle grandi frane è sempre più frequentemente rivolta alla caratterizzazione dell'intero versante o dell'intera valle al fine di individuare quegli elementi geomorfologici comuni (ubiquitari) che possono governare i processi di instabilità a più piccola scala. Un approccio morfostrutturale di questo tipo è rivolto principalmente a ricercare le corrispondenze tra elementi morfologici e strutturali ed è basato sull'assunzione che i caratteri morfologici delle frane sono l'espressione superficiale di elementi strutturali del substrato.

L'integrazione dei modelli geometrico e morfostrutturale permette una definizione dei caratteri locali e del comportamento cinematico della frana.

Analisi nell'intorno del sito di frana (around-site)

Queste analisi consentono una migliore definizione del modelli locali in quanto si riferiscono non solo al sito di frana, ma anche al suo intorno (versante e valle) e si basano sulle conoscenze della:

- 1) geometria ed estensione di unità morfologiche, litologiche e strutturali, in grado di condizionare il comportamento cinematico e meccanico dell'ammasso roccioso (per esempio, le unità strutturali possono essere distinte al fine di individuare settori maggiormente soggetti all'instabilità sulla base del differente grado di fratturazione);
- 2) cinematica e grado di maturità strutturale di faglie e fratture. La caratterizzazione dello spessore e tipo di roccia di faglia, la persistenza e

l'architettura della fratturazione associata a faglie forniscono dei vincoli per la caratterizzazione della forma e dimensione di blocchi rocciosi o di settori, che costituiscono il corpo di frana.

- 3) geometria, gerarchia e densità di distribuzione dei lineamenti telerilevati (da immagini satellitari). I modelli geometrici e gerarchici dei sistemi di lineamenti possono essere confrontati qualitativamente e quantitativamente con l'assetto strutturale. Nel caso in cui questo confronto fornisca una buona corrispondenza, il dato lineamentare può essere utilizzato come rappresentativo della distribuzione delle strutture geologiche ed estrapolato alle diverse scale (da scala locale a scala regionale e viceversa). Questo tipo di dato presenta il vantaggio di essere omogeneo ed utilizzabile per analisi statistiche e numeriche in automatico in quanto è caratterizzato da un numero di elementi statisticamente rappresentativo e riferibile ad ampi contesti territoriali.

L'integrazione dei modelli locali e regionali consente la definizione di unità meccaniche e tettoniche e delle loro relazioni con le principali unità morfologiche (versante, valle, ecc.), all'interno delle quali si sviluppano le frane. Conseguentemente, le frane possono essere suddivise in settori caratterizzati da distinta morfologia, dimensione, geometria e densità di fratturazione. L'intensità del *danger* dipenderà, quindi, da numerosi fattori: posizione dei settori in funzione della geometria del versante, configurazione litostratigrafica, densità ed intensità della fratturazione, maturità strutturale delle superfici strutturali, ecc.

Figura 2.2.2
Metodologia geologica adottata nello studio delle grandi frane (in Bonnard et al., 2004)



Confronto tra i dati e le interpretazioni sul sito di frana (on-site) con il suo intorno (around-site)

In questo approccio metodologico, le caratteristiche geometriche e cinematiche del fenomeno gravitativo sono confrontate con i principali caratteri geomorfologici e strutturali (unità tettoniche e meccaniche) del versante, della valle o dello spartiacque, al fine di verificare se i caratteri principali del contesto geologico regionale condizionano l'instabilità all'interno e/o all'esterno del corpo di frana. Qualora queste condizioni siano soddisfatte, si può assumere che le interpretazioni sul sito di frana e nel suo intorno sono coerenti: in questo caso è possibile estrapolare lateralmente le interpretazioni *around-site* al sito di frana e viceversa.

Nel caso in cui le interpretazioni non siano coerenti, l'instabilità del versante potrebbe essere determinata da caratteri peculiari del fenomeno gravitativo. Ad esempio, ciò si verifica nel caso in cui la frana è molto evoluta o l'evoluzione cinematica non è più controllata da caratteri strutturali preesistenti (per la presenza di livelli locali con proprietà meccaniche scadenti o per il condizionamento da parte di particolari elementi geomorfologici).

Questa metodologia permette di descrivere qualitativamente la geometria ed i meccanismi di evoluzione dell'area instabile e fornisce: una classificazione tipologica della frana, con identificazione spazio-temporale della sua evoluzione (meccanismi di scivolamento, comportamento qualitativo del corpo di frana, parametri geometrici e una preliminare probabilità di accadimento) ed una caratterizzazione del versante su cui la frana si sviluppa.

Il contributo di questo approccio all'analisi quantitativa del rischio consiste, inoltre, in una preliminare definizione degli scenari come punto di partenza per i modelli geomeccanici e numerici.

Analisi dei dati storici

Generalmente, esistono due tipi di documentazione disponibili per la ricostruzione di eventi pregressi dei fenomeni gravitativi. Il primo fa riferimento ad archivi di istituzioni pubbliche o religiose (cronache descrittive sintetiche dei fatti avvenuti, antiche carte catastali, ecc.) in cui le informazioni devono essere spesso rielaborate attraverso una rilettura critica che tenga conto del contesto storico in cui sono state scritte e del fenomeno in esame. Questa documentazione è particolarmente utile per definire un primo quadro conoscitivo e per stabilirne una ricorrenza temporale e spaziale.

Il secondo tipo di documenti è costituito da foto aeree e di terreno e da documenti tecnici che permettono una precisa identificazione e quantificazione dei movimenti e dei volumi coinvolti nel tempo. La precisione delle interpretazioni è funzione della qualità, del numero e degli intervalli di tempo a cui le foto o i documenti si riferiscono.

Analisi dei dati di monitoraggio

Nell'ambito dello studio delle grandi frane, i dati provenienti da un sistema di monitoraggio, qualora statisticamente rappresentativi e provenienti da una strumentazione adeguatamente posizionata, possono essere particolarmente significativi per la ricostruzione delle relazioni tra i movimenti del corpo di frana ed il tempo. Questi dati, a seconda del tipo di strumentazione adoperata e della loro sensibilità nelle misure, permettono di quantificare le deformazioni superficiali (localizzate o areali), i movimenti in profondità, la geometria dell'acquifero, ecc., risultando fondamentali per stabilire i vincoli nei modelli geologici e geomeccanici.

Modelli geomeccanici

I modelli geomeccanici permettono di simulare un fenomeno/processo nel modo più conforme alla realtà adottando approcci semplificati dei meccanismi che determinano e controllano il movimento gravitativo e la sua evoluzione. In tal senso rappresentano la sintesi e la validazione dei modelli finora descritti (geologico, geomorfologico, ecc.). In letteratura vengono illustrati differenti modelli geomeccanici sviluppati per diversi contesti geologici, approcci metodologici e scopi d'uso, si veda per esempio Jing & Hudson (2002) e raggruppabili, in linea generale, in modelli di innesco (*triggering*) e di propagazione (*run out*).

Il modello numerico di innesco (triggering models)

I modelli numerici di innesco sono usati nella valutazione della pericolosità nel tentativo di determinare, sulla base di elementi geomeccanici, la probabilità di accadimento temporale di una frana. Tuttavia, la probabilità di rottura nel tempo di un versante non è determinabile, a meno che non possa essere analizzata la variazione nel tempo delle sollecitazioni o il decadimento dei parametri meccanici. Dato che queste variazioni non possono essere predette in modo quantitativo nel tempo, può essere numericamente computata solo una probabilità non temporale, si veda, per esempio, Einstein (1988) e Scavia *et al.* (1990). La valutazione della probabilità di innesco è ancora più complessa quando si tratta di grandi frane in quanto nell'analisi aumentano i parametri geometrici e meccanici e la loro variabilità spaziale e temporale. Data questa difficoltà, il modello geomeccanico è solitamente utilizzato come strumento di verifica della congruenza meccanica dei modelli geologici. In caso di discordanza, sono necessarie nuove analisi geologiche e geomeccaniche.

Inoltre, affinché il modello sia sufficientemente adeguato ad analizzare il fenomeno gravitativo in oggetto, l'esperto di dominio deve essere in grado di: discretizzare numericamente le principali discontinuità che interessano l'ammasso roccioso, definire l'ambito in cui operare (modelli 2D o 3D), scegliere l'approccio metodologico più consono (mezzo discontinuo o mezzo continuo equivalente). Per i principi teorici si rimanda ai lavori di Prat *et al.* (1993) e Carol *et al.* (1997).

Il modello numerico di propagazione (run out models)

I modelli di *run out* vengono utilizzati per completare la definizione degli scenari di pericolosità; i risultati di queste analisi sono rivolti a quantificare, per un dato volume di materiale mobilizzato, le aree coinvolte dalla propagazione del materiale e l'intensità associata a tale propagazione.

Questi modelli vengono usati per simulare sia le traiettorie di singoli massi sia i comportamenti di fenomeni complessi ed ampi, quali le valanghe di roccia (*rock avalanches*), dove il movimento della massa rocciosa viene simulato come un flusso di blocchi rocciosi tra loro interagenti.

I metodi di previsione ottenuti da questi modelli possono essere raggruppati in:

- metodi empirici, che forniscono una stima della distanza di propagazione della frana e sono basati sulla correlazione tra il volume della massa coinvolta nel movimento e le geometrie del versante, ad esempio Howard (1973) e Hsü (1975). Tali metodi considerano il profilo del versante, l'area di deposizione della frana e la quantità di materiale. Sono metodi che vengono affinati attraverso *back analysis* successive;
- metodi analitici, rivolti alla ricostruzione del movimento di ogni porzione del corpo di frana nello spazio e nel tempo. Tali metodi considerano la topografia del versante, le caratteristiche del materiale, gli sforzi all'interno dell'ammasso roccioso in movimento, ecc. Per i principi teorici si rimanda ai lavori di Hungr (1995, 2001); Evans *et al.* (1994); Potter (1972).

Valutazione della probabilità di accadimento

L'analisi quantitativa del rischio richiede necessariamente la valutazione della probabilità di accadimento in termini temporali, benché questa rappresenti la più grande incertezza nel caso delle analisi di pericolosità e di rischio riguardanti i fenomeni gravitativi.

La probabilità di accadimento può essere espressa in termini relativi (qualitativi) o probabilistici (quantitativi). In quest'ultimo caso, dovrebbe essere applicata una procedura rigorosa che includa metodi meccanici e probabilistici che tengono conto della incertezza di tutti i parametri geometrici e meccanici (geometria della superficie di distacco, resistenza al taglio, pressione piezometrica, ecc.). Nel caso delle grandi frane, tuttavia, tale procedura non può essere applicata a causa dell'elevato numero di parametri coinvolti e della loro variabilità temporale e spaziale; inoltre, il numero di eventi catastrofici è statisticamente poco rappresentativo per condurre un'analisi di tipo probabilistico.

Una procedura alternativa considera la relazione tra le frane e l'intensità dei relativi eventi scatenanti, quali le precipitazioni od i terremoti, attraverso correlazioni empiriche o metodi più sofisticati, ad esempio i metodi a reti neurali (Bonnard *et al.*, 2004). In ogni caso, risulta difficile, talvolta impossibile, mettere in relazione una

magnitudo di un fenomeno gravitativo con l'intensità dell'evento scatenante. In particolare, nel caso di frane indotte dalle piogge, la causa reale della fase parossistica di un fenomeno gravitativo risiede spesso nella combinazione di lunghi periodi con modeste precipitazioni che precedono periodi con piogge brevi ed intense durante i quali si manifestano i fenomeni gravitativi. La mancanza di dati e, spesso, di conoscenza delle relazioni precipitazioni/movimenti di versante, rendono inapplicabile questo approccio e, soprattutto nel caso delle grandi frane, caratterizzate spesso da eventi parossistici unici, non è possibile determinarne statisticamente la probabilità di accadimento.

La probabilità di accadimento di una frana può essere stimata per mezzo di metodi semi-quantitativi che mettono in relazione, unitamente alle esperienze passate su eventi confrontabili a quelli analizzati, i dati storici sui movimenti gravitativi con le dettagliate conoscenze geologico-geomorfologiche dell'area instabile. L'approccio storico consiste nell'attenta valutazione di ogni tipo di movimento accaduto nel passato, di cui si abbia traccia, e nell'accurata descrizione delle sue caratteristiche (tipologia, volume ed area coinvolti, possibile localizzazione, ecc.).

2.2.2.2

Analisi del danno

Una volta identificati gli scenari di pericolosità, ciascuno caratterizzato da un'area nella quale è nota la distribuzione dell'intensità dei processi e la relativa probabilità di accadimento, è possibile procedere con l'analisi del danno in accordo con le seguenti fasi:

- 1) identificazione e valutazione degli elementi a rischio;
- 2) valutazione della vulnerabilità;
- 3) calcolo del danno atteso.

L'identificazione degli elementi a rischio avviene sovrapponendo in modo automatico l'area coinvolta di ciascun scenario di pericolosità con i dati territoriali (classi di uso del suolo derivanti dalla pianificazione territoriale, distribuzione della popolazione in base a dati demografici, elementi strategici quali vie di comunicazione o impianti per la produzione di energia, ecc.). Nella metodologia IMIRILAND, gli elementi a rischio sono classificati in differenti categorie, a ciascuna delle quali è stato attribuito un valore gerarchico relativo, variabile da 1 a 4 (**tabelle 2.2.1 e 2.2.2**).

L'attribuzione di un valore agli elementi a rischio è un aspetto controverso dell'analisi di rischio in quanto risulta difficile esprimerlo univocamente. Infatti, se, ad esempio, è possibile attribuire un valore monetario alle attività economiche od alle proprietà, ciò risulta difficile nel caso delle persone o dei beni ambientali. Inoltre, la valutazione degli elementi a rischio è fortemente legata al conte-

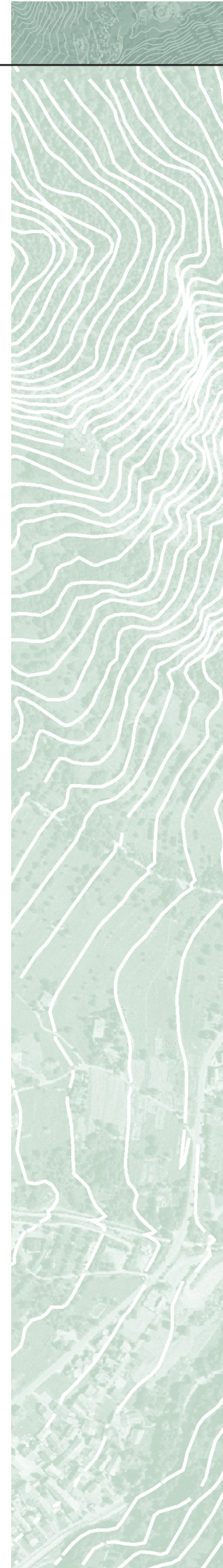


TABELLA 2.2.1
VALUTAZIONE DEI VALORI RELATIVI PER ALCUNE CATEGORIE DI ELEMENTI A RISCHIO (BONNARD ET AL., 2004)

ELEMENT AT RISK	ASSETS RELATIVE VALUE	RELATIVE VALUE OF ECONOMIC ACTIVITIES INTERRUPTION	ENVIRONMENTAL RELATIVE VALUE
Densely built modern cities (with high-rise buildings)	4	4	1
Historical city centers	4	2	4
Residential areas	4	1	1
Productive or industrial areas	4	4	1
Strategic services and facilities	4	4	2
Extra-municipal infrastructures and plants	4	4	2
Valuable buildings or valuable rural centers (historical, architectonic, artistic and/or cultural value)	3	1	3
Tourist accommodation - buildings	3	3	1
Valuable environmental areas - buildings	3	2	2
Local infrastructures and plants	3	3	2
Transportation facilities (highway and international railways with relative services)	3	4	1
Strategic lifelines	3	4	1
Great traffic or strategic roads	3	4	1
Tourist accommodation - campsite	2	2	1
Valuable environmental areas - no buildings	2	1	4
Parks, sport and parking areas	2	1	3
Local services	2	2	1
Secondary roads	1	2	1
Secondary lifelines	1	2	1
Rural areas - farming and domestic animals	1	2	2
Forests (private and public properties)	1	1	3
Strategic risk objects			
hospital	3	4	1
school	2	4	1
rubbish dump	2	3	4

**TABELLA 2.2.2 VALUTAZIONE DEI VALORI RELATIVI
 PER LE PERSONE COINVOLTE (BONNARD ET AL., 2004)**

HUMAN LIVES (NUMBER OF PERSONS INVOLVED)	RELATIVE VALUE OF HUMAN LIVES
0-1	1
2-9	2
10-19	3
>20	4

sto politico, sociale, culturale e religioso in cui viene condotta l'analisi di rischio. Nell'ambito del Progetto *Plan d'Exposition aux Risk* (DRM, 1990), in cui è stata utilizzata una scala relativa dei costi sociali per le vittime esposte al rischio, è stato evidenziato il paradosso secondo il quale le persone ferite hanno un valore 2-3 volte superiore a quello di una persona deceduta, a causa degli elevati costi per le cure mediche e per l'assistenza e la riabilitazione delle persone rimaste invalide. Nell'ambito della metodologia IMIRILAND sono state individuate quattro categorie di valore, a partire dalle quali vengono condotte distinte analisi di rischio che permettono di mantenere separati i beni dalle persone, le attività economiche dai

beni ambientali. Le quattro categorie di valore sono le seguenti:

- fisico, valore dei beni, in considerazione della loro tipologia ed anche di eventuali costi di ricostruzione;
- economico, valore legato alle attività produttive o commerciali (fatturato, guadagni, introiti, ecc.);
- sociale, valore legato alla presenza dell'uomo ed alla utilità sociale di un bene (ad esempio di un ospedale);
- ambientale, valore floro-faunistico e paesaggistico (storico-culturale-architettonico) di un'area.

Per quanto riguarda la vulnerabilità degli elementi a rischio, essa esprime il grado di perdita che gli elementi a rischio (siano essi beni o persone) possono subire, qualora coinvolti da un evento. La vulnerabilità è funzione sia del tipo di elemento considerato sia del tipo e dell'intensità del processo, in quanto è il risultato dell'interazione tra l'energia liberata dall'impatto dell'evento sull'elemento a rischio e la capacità di quest'ultimo di resistere all'impatto stesso. La metodologia in oggetto, partendo dalle quattro categorie di valori, distingue quattro categorie di vulnerabilità.

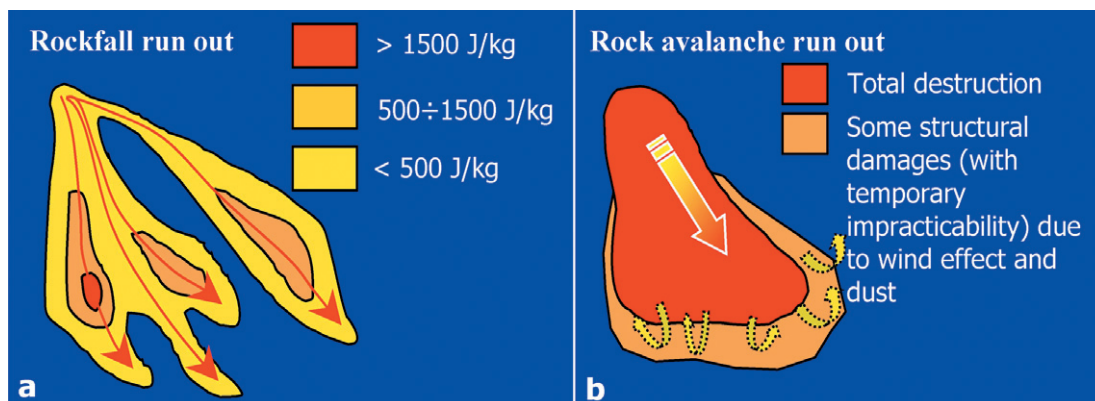


Figura 2.2.3
 a) Quantificazione dell'impatto in termini di energia per massa unitaria;
 b) Descrizione qualitativa degli impatti sulla base della descrizione del danno (Bonnard et al., 2004)

- Vulnerabilità fisica, considera: (a) l'intensità del fenomeno (velocità o energia), (b) il tipo, la funzione e la resistenza della struttura, (c) lo stato di manutenzione e la capacità di deformazione della struttura.
- Vulnerabilità economica, considera: (a) l'intensità del fenomeno (in grado di produrre interruzioni temporanee o definitive delle attività economiche), (b) il tipo di attività economica o di servizio coinvolto (industriale, turistico, trasporti, ecc.), (c) la possibilità di evitare i disagi (ad esempio attraverso l'utilizzo di strade alternative).
- Vulnerabilità sociale, considera: (a) l'intensità del fenomeno (in relazione ai tempi di allertamento), (b) la sensibilità della popolazione (dipendente dall'età e dalla capacità delle persone di anticipare l'evento), (c) la capacità delle persone di comprendere il fenomeno e di allontanarsi dalle zone coinvolte.
- Vulnerabilità ambientale, considera: (a) l'intensità del fenomeno (in relazione agli effetti negativi che può produrre direttamente o indirettamente sui beni ambientali), (b) le tipologie di beni ambientali (specie florofaunistiche ed elementi antropici), (c) grado di resistenza delle strutture antropiche (quali villaggi alpini di particolare pregio storico, costruiti in genere in pietra e legno) o capacità di ripopolamento delle specie naturali (in particolare delle specie endemiche o rare).

Il gruppo di lavoro sulle frane afferente alla IUGS (IUGS/WGL/CRA, 1997) ha messo in evidenza che, nonostante l'identificazione degli elementi a rischio e delle loro caratteristiche sia sufficientemente sviluppata, lo stato dell'arte per la valutazione della vulnerabilità è in generale inadeguato. Per gli elementi strutturali (edifici, strade, ferrovie, ecc.), la valutazione della vulnerabilità dipende dal modello che mette in relazione l'evoluzione della frana con la struttura considerata. Ciò è relativamente ben documentato nel caso dei fenomeni di crollo mentre lo è meno nel caso delle colate detritiche e dei movimenti lenti del versante. Pertanto, per la valutazione della vulnerabilità, il gruppo di lavoro IUGS suggerisce di utilizzare il buon senso.

Da un punto di vista pratico, la metodologia IMIRLAND suggerisce due approcci per valutare la vulnerabilità: uno sulla base degli effetti registrati

sugli elementi a rischio e l'altro sulla base dell'intensità dei processi (figura 2.2.3). Nel primo caso sono state applicate cinque classi di percentuale di perdita (0, 0.25, 0.50, 0.75, 1) per ogni categoria di vulnerabilità, mentre nel secondo approccio sono state utilizzate soglie energetiche ottenute dal modello di propagazione (*run out geomechanical model*).

L'ultima fase dell'analisi del danno è il calcolo del danno stesso. Esso viene espresso come il risultato della moltiplicazione tra il valore dell'elemento a rischio (E) per la vulnerabilità (V):

$$D = E \times V \quad (2.2.1)$$

Mantenendo separate le analisi di rischio, ciascuna categoria di valore è stata moltiplicata per la relativa vulnerabilità (ad esempio, valore fisico x vulnerabilità fisica = danno fisico, valore sociale x vulnerabilità sociale = danno sociale e così via). Si tratta quindi di una fase che avviene attraverso un processo oggettivo ed automatico (calcolo matematico). È importante sottolineare, quindi, che, affinché sia significativa la valutazione del danno, deve essere limitato il più possibile il grado di soggettività nelle fasi precedenti (definizione del processo, valutazione degli elementi a rischio e della loro vulnerabilità).

2.2.2.3

Calcolo del rischio

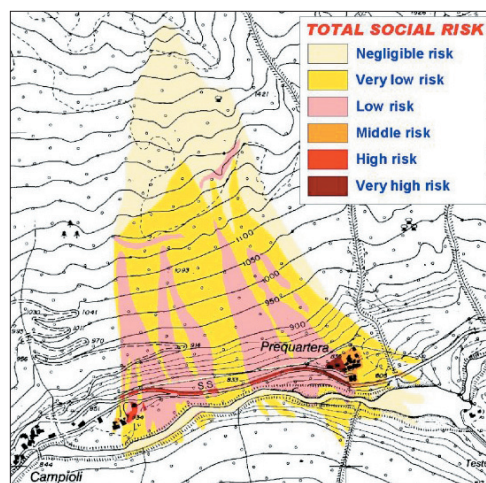
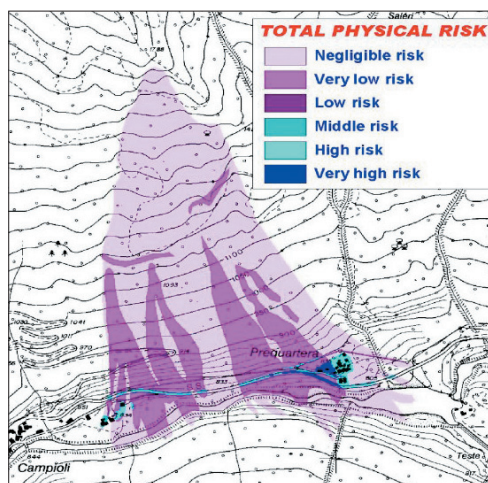
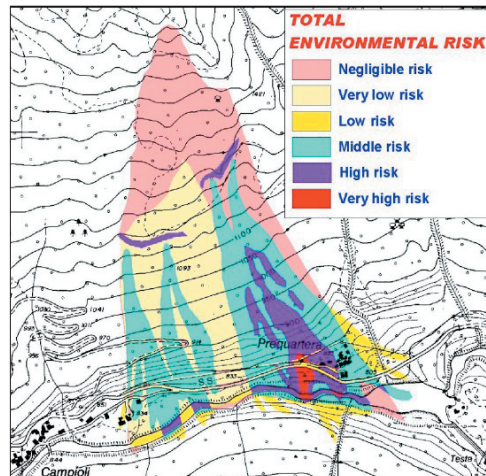
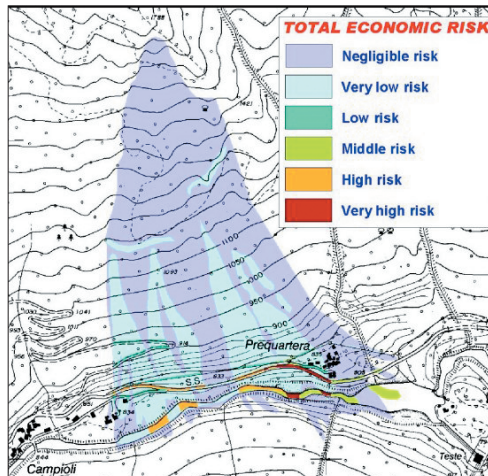
Come precedentemente definito (§ 1.4), il rischio è ottenuto moltiplicando la pericolosità (H) per il danno atteso (D) ed è espresso, analogamente alla pericolosità, in termini temporali di probabilità annua:

$$R = H \times D \quad (2.2.2)$$

In questa fase il calcolo del rischio considera solo la probabilità di accadimento e per questo motivo viene espresso in termini probabilistici. Infatti, nel danno rientrano già le altre due componenti della pericolosità: l'intensità (per le valutazioni sulla vulnerabilità) e l'area coinvolta (individuazione degli elementi a rischio).

Il processo per il calcolo del rischio porta a quattro analisi separate: il rischio fisico a partire dal danno fisico, il rischio economico dal danno economico, il rischio sociale dal danno sociale ed il rischio ambien-

Figura 2.2.4
Esempio di rappresentazione di differenti carte del rischio ottenute considerando specifici fattori di vulnerabilità e attraverso elaborazioni in ambiente GIS (Bonnard *et al.*, 2004)



tale dal danno ambientale. Questo processo deve essere ripetuto per ogni scenario di pericolosità o per le differenti probabilità di accadimento individuate nel corso dell'analisi di pericolosità.

In conclusione, sintetizzando l'intero processo, si hanno le seguenti fasi:

- l'analisi di pericolosità fornisce gli scenari di pericolosità (area coinvolta, intensità del processo, probabilità di accadimento);
- l'area coinvolta identifica gli elementi a rischio;
- attraverso valutazioni sull'interazione tra intensità del processo ed elementi a rischio si ottengono quattro categorie di vulnerabilità (fisica, economica, sociale ed ambientale);
- moltiplicando ciascuna categoria di vulnerabilità per il relativo valore degli elementi a rischio si hanno quattro categorie di danno atteso (fisico, economico, sociale ed ambientale);
- moltiplicando ciascuna categoria di danno atteso per la probabilità di accadimento dello scenario considerato si ha lo scenario di rischio suddiviso in quattro categorie (fisico, economico, sociale ed ambientale);
- si ripete l'intero processo per tutti gli scenari o per le differenti probabilità di accadimento individuate.

Per ottenere un quadro di sintesi del rischio, suddiviso in più scenari e categorie, è possibile procedere ad

alcune differenti sommatorie. Per esprimere il rischio totale dello scenario considerato, una possibilità è quella di sommare le diverse categorie di rischio (fisico, economico, sociale ed ambientale) all'interno dello stesso scenario; la somma delle differenti categorie di rischio, finora mantenute ben separate, deve essere supportata da considerazioni dettagliate che permettono di omogeneizzare la scala dei valori e di chiarire il significato dimostrativo del risultato. Una seconda possibilità è quella di sommare i rischi di tutti gli scenari individuati all'interno di una singola categoria di rischio ottenendo così un rischio fisico totale, un rischio economico totale, e così via. Anche questa somma ha un significato puramente dimostrativo ed è giustificata solo se si considera che gli elementi danneggiati in uno scenario siano stati riparati o ricostruiti prima di venire danneggiati nuovamente nello scenario successivo (**figura 2.2.4**).

Il problema di gestire numerosi dati ed una grande quantità di rappresentazioni spaziali del rischio è affrontato in modo efficace attraverso i Sistemi Informativi Geografici, i quali permettono la sovrapposizione di vari livelli di informazioni spaziali e lo sviluppo di operazioni matematiche tra i vari termini considerati in modo rapido ed automatico.

Nella metodologia qui proposta si è evidenziata l'importanza di una corretta determinazione della

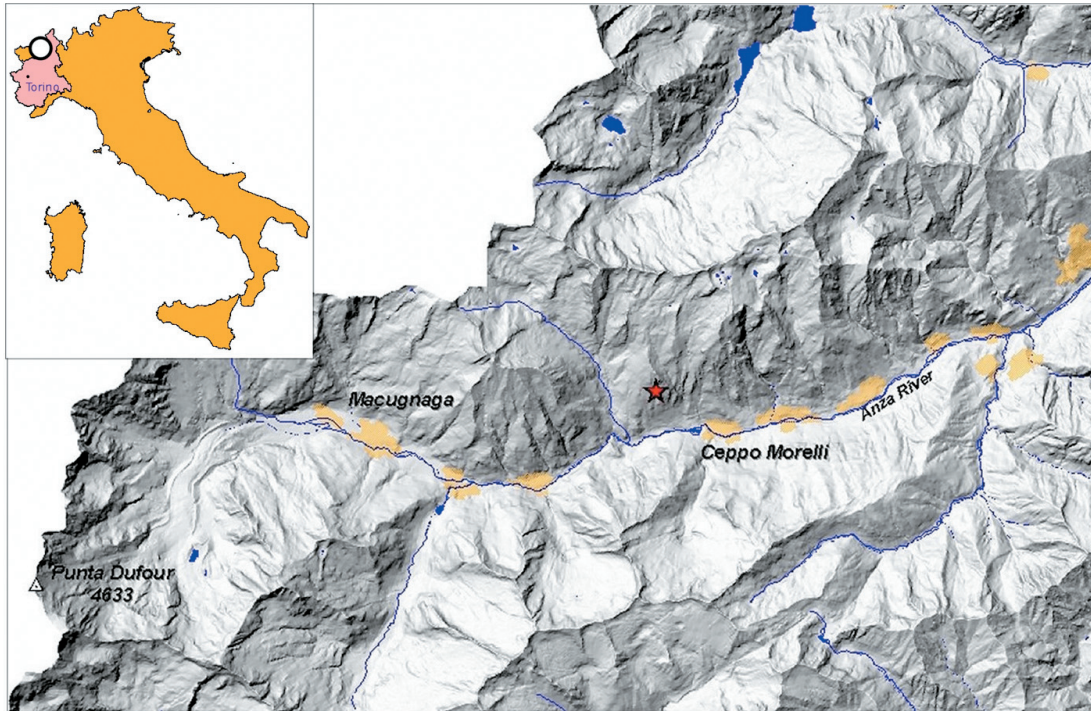


Figura 2.2.5
Ubicazione della frana di Ceppo Morelli (stella e cerchio rossi) ed inquadramento geologico dell'area-stralcio dello *Structural Model of Italy* alla scala 1:500.000 (CNR, 1990). La frana è ubicata all'interno di una delle principali unità tettono-metamorfiche alpine (Unità del Monte Rosa), costituita prevalentemente da gneiss occhiadini e micascisti piegati dall'antiforme di Vanzone (VA) e delimitati dalla Zona Piemontese (in giallo). Ad est della Unità del Monte Rosa è presente il dominio Austroalpino (in marrone ed in arancio puntinato) mentre a sud-est della Linea del Canavese (CL), una delle faglie principali delle Alpi, è presente il dominio Sudalpino

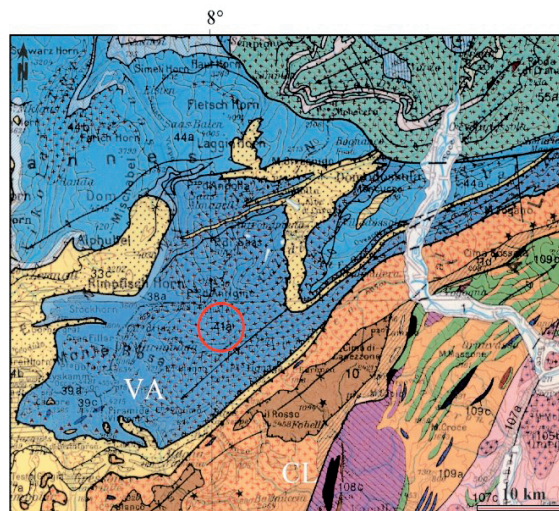
intensità e della probabilità di accadimento dei differenti scenari per un' appropriata valutazione della pericolosità e del rischio nelle aree soggette all'evoluzione delle grandi frane. Ciò soprattutto in relazione al fatto che tali fenomeni sono spesso associati ad una vasta gamma di processi secondari, talvolta concatenati, che tendono a complicare le situazioni di pericolosità e di rischio. Gli scenari complessi che ne derivano possono includere la situazione estrema in cui eventi rari si verificano simultaneamente.

Tale metodologia è stata sperimentata, al fine di mostrarne la validità e l'applicabilità in differenti contesti, in alcuni grandi fenomeni franosi noti delle Alpi (Ceppo Morelli, Cassas e Rosone in Italia, Séchillienne in Francia, Oselitzenbach in Austria, Sedrun e Conters-Gotschang in Svizzera) e dei Pirenei (Encampadana in Spagna) dove sussistono complesse situazioni di rischio. Nel seguente paragrafo vengono presentati sinteticamente i risultati ottenuti nel caso di Ceppo Morelli.

2.2.2.4

Esempio di applicazione della metodologia IMIRILAND al caso di Ceppo Morelli

Il fenomeno gravitativo di Ceppo Morelli si estende sul versante sinistro della media Valle Anzasca (Monte Rubi), nel territorio dell'omonimo comune (Provincia del Verbano-Cusio-Ossola). Tale fenomeno, che i dati storici indicano come un antico e vasto fenomeno complesso, si è riattivato in occasione dell'evento meteorologico che ha interessato il Piemonte settentrionale nell'ottobre 2000. Il movimento, che ha coinvolto un'area di circa 160'000 m² ed un volume stimato di 4-6 milioni di metri cubi



di rocce gneissiche appartenenti alle Unità Pennidiche superiori della falda del Monte Rosa (**figura 2.2.5**), ha determinato una traslazione di oltre 5 m ed innescato numerosi crolli che hanno raggiunto il fondovalle. I blocchi caduti, alcuni dei quali superiori a 300 m³, hanno pesantemente danneggiato la S.S. n° 549 per Macugnaga, interrompendola, e minacciato due piccoli insediamenti alpini (Prequartera e Campioli).

Analisi della pericolosità

Al fine di comprendere l'evoluzione del fenomeno gravitativo e di caratterizzare il contesto studiato da un punto di vista geologico-geomorfologico, sono stati effettuati un accurato rilievo di terreno ed una sistematica analisi di immagini telerilevate (foto aeree e da satellite). In particolare, integrando i dati rilevati in sito (*on-site data*) con le osservazioni a scala regionale (*around-site data*), è stato possibile definire le relazioni geometriche e gerarchiche

Figura 2.2.6

a) Immagine Landsat TM elaborata in falsi colori (combinazione di bande 7-5-4 RGB) con i lineamenti (in rosso) e la frana di Ceppo Morelli (in viola). L'area tratteggiata in verde rappresenta il settore analizzato in b);
 b) foto aerea con foto-lineamenti (in rosso) e la frana di Ceppo Morelli (in blu tratteggiato);
 c) ciclografiche medie dei sistemi strutturali misurati nell'intorno del corpo di frana ed utilizzati nell'analisi di stabilità; legenda) S1 e S2: scistosità; ZT: zone di taglio; K, K1 e K2 sistemi di giunti; F: faglie regionali e Fb: faglie che delimitano il bordo destro del corpo di frana; Ft: sistemi di giunti di trazione (Bonnard *et al.*, 2004)

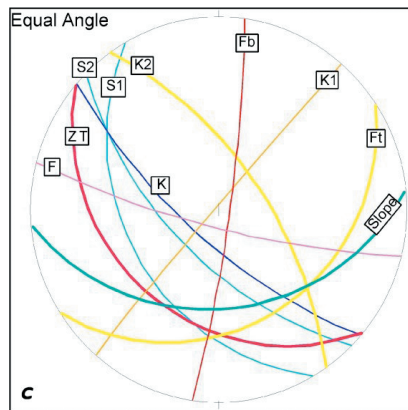
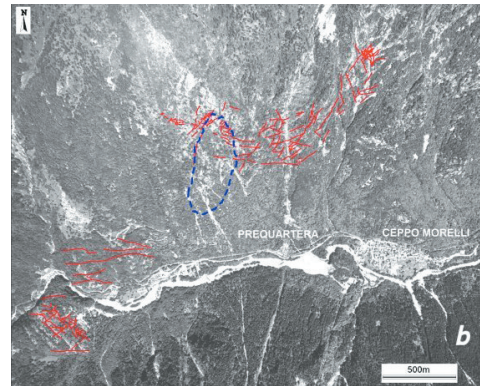
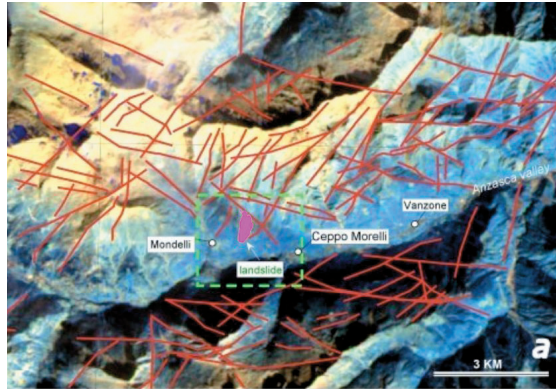
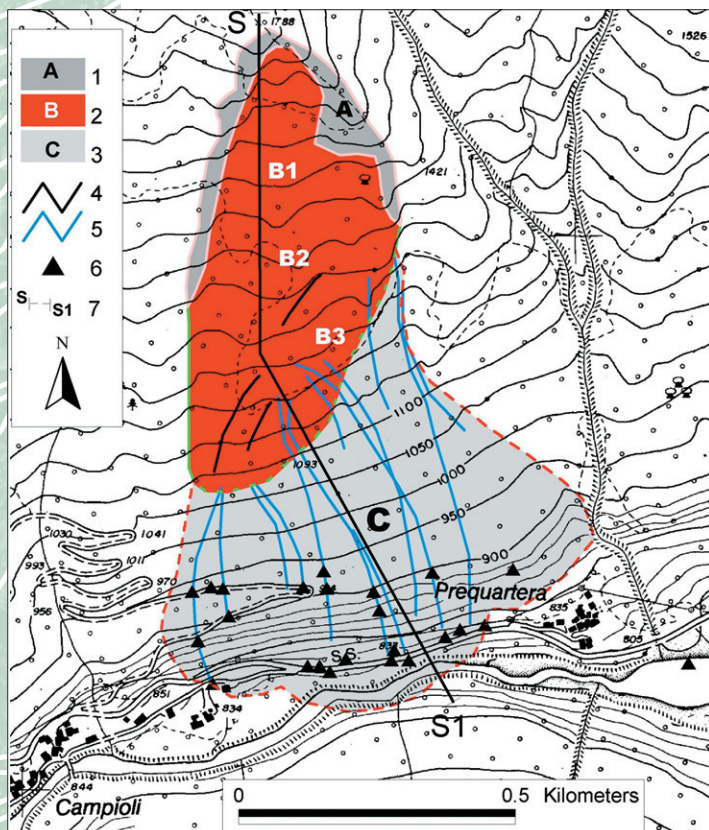


Figura 2.2.7

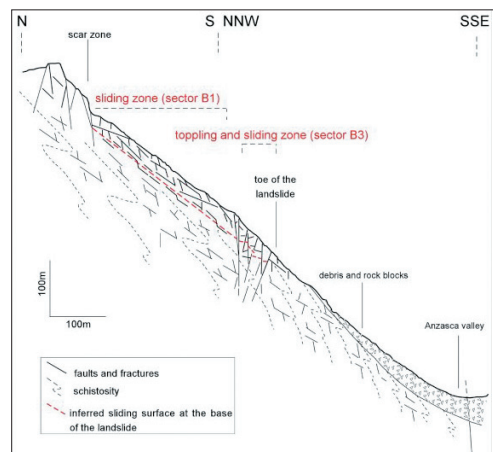
Caratteristiche principali della frana di Ceppo Morelli (a sinistra, in Castelli *et al.*, 2004): 1) area di distacco; 2) area di traslazione; 3) area di accumulo; 4) principali fratture aperte; 5) traiettorie dei crolli e 6) blocchi principali dell'evento dell'ottobre 2000; 7) traccia della sezione schematica della frana riportata a destra (Bonnard *et al.*, 2004)



dei sistemi di discontinuità (figura 2.2.6), nonché le caratteristiche litologiche e meccaniche dell'ammasso roccioso coinvolto.

Sulla base delle analisi strutturali e geomorfologiche sono state distinte tre aree principali di seguito descritte (figura 2.2.7):

- 1) *area di distacco*. Delimita il settore instabile nella parte sommitale e parzialmente lungo il fianco destro. In quest'area si evidenziano due sistemi principali di discontinuità, sub-verticali ed ortogonali tra loro, con direzione NE e NW: il sistema NE, unitamente ad un sistema di discontinuità secondario N-S, corrisponde al limite destro della frana;
- 2) *area di traslazione dell'ammasso roccioso*. Corrisponde ad un ammasso roccioso allentato ed in parte disarticolato, ulteriormente suddiviso in tre principali settori caratterizzati da differenti assetti morfo-strutturali (figura 2.2.7):
 - *settore B1*, costituito da un ammasso roccioso intensamente fratturato in cui si sono evidenziate le maggiori traslazioni in occasione dell'evento dell'ottobre 2000 (oltre 5 m). La traslazione è avvenuta in direzione SSW, lungo una superficie di scivolamento sub-parallela alla scistosità regionale. In seguito agli spostamenti si sono evidenziate una serie di fratture di trazione persistenti, soprattutto nella parte alta del versante al limite con l'area di distacco;
 - *settore B2*, caratterizzato da un ammasso roccioso meno fratturato del precedente;



- *settore B3*, costituito da un ammasso roccioso rilasciato e separato dal settore B2 da un sistema di fratture di trazione subverticali con direzione NW-SE. Nel settore B3, dove il versante presenta una inclinazione maggiore rispetto a quella del settore B2, l'ammasso roccioso evidenzia meccanismi di rigonfiamento e ribaltamento. Il margine inferiore di questo settore è rappresentato dal limite morfologico del piede del versante in cui, sebbene in parte mascherato dalla vegetazione, è riconoscibile un allineamento di scarpate in roccia da cui hanno avuto origine i crolli dell'evento dell'ottobre 2000;
- 3) *area di accumulo*. Costituita da una falda detritica, in gran parte vegetata, che ha origine alla base delle pareti rocciose del settore B3 e raggiunge il fondovalle. Il settore orientale dell'area di accumulo, sovrastante l'abitato di Prequartera, pare relativamente più antico e meno attivo del settore occidentale, sebbene entrambi siano stati interessati dalla traslazione ed accumulo dei crolli dell'evento dell'ottobre 2000.

L'integrazione delle analisi geologiche e geomorfologiche ha permesso una zonazione del fenomeno e di caratterizzare le superfici che la delimitano e la potenza dell'ammasso roccioso (stimata tra 20 m e 40 m). Gli spostamenti registrati dal sistema di monitoraggio, installato in seguito all'evento del 2000, confermano la zonazione definita dai modelli geologico e geomorfologico. I settori B1 e B3 mostrano, infatti, sostanziali differenze di comportamento (ad esempio, le velocità di traslazione sono maggiori nel settore B3 rispetto a quelle misurate nel settore B1).

I modelli geostrutturale e morfodinamico hanno fornito i parametri geometrici e meccanici per la realizzazione del modello geomeccanico di innesco (figura 2.2.8). Le analisi condotte attraverso l'implementazione di modelli numerici bi- e tri-dimensionali hanno sostanzialmente confermato, da un punto di vista meccanico, le ipotesi geometriche relative all'innesco ed alla propagazione del fenomeno gravitativo.

Sulla base delle precedenti considerazioni, integrate dall'analisi storica, sono stati identificati tre scenari principali:

- *scenario 1*: crollo, ribaltamento e scivolamento di blocchi rocciosi di diverse dimensioni (da pochi metri cubi ad alcune centinaia di metri cubi) che, rilasciati dalle scarpate nel tratto inferiore del settore B3, percorrono il resto del versante con meccanismi roto-traslativi raggiungendo il fondovalle. I dati storici documentano una certa frequenza di tali fenomeni, registrati nel 1940, nell'ottobre 1971, nell'aprile 1977, nell'ottobre 2000 e nel giugno 2002, da cui è stata stimata una probabilità di accadimento media annua pari a 1/15. Attraverso i modelli numerici sono stati simulati i fenomeni di crollo ed attraverso i risultati traiettografici è stata delimitata l'area coinvolta da tali fenomeni (figura 2.2.9);

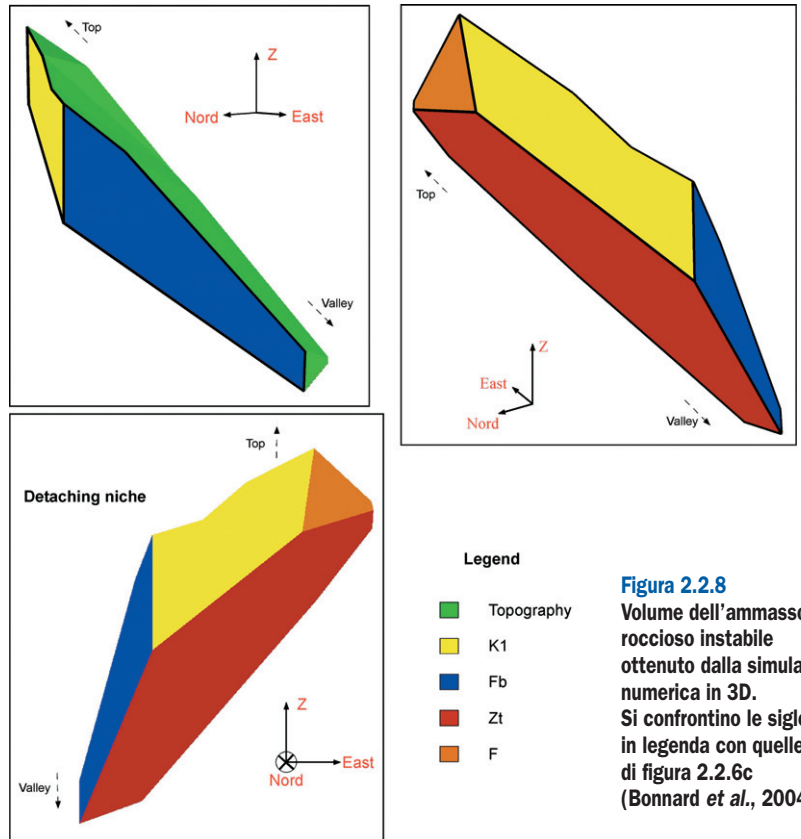
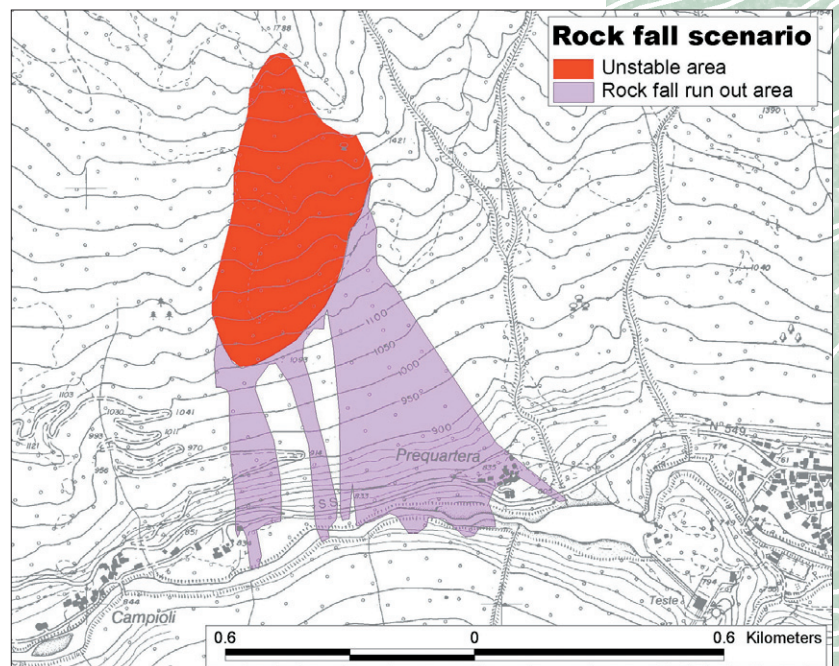


Figura 2.2.8
Volume dell'ammasso roccioso instabile ottenuto dalla simulazione numerica in 3D. Si confrontino le sigle in legenda con quelle di figura 2.2.6c (Bonnard *et al.*, 2004)

- *scenario 2*: collasso del settore B3. Considerato il volume coinvolto, di circa un milione di metri cubi, è ipotizzabile che il fenomeno evolva come valanga di roccia. Per l'individuazione dell'area coinvolta, il fenomeno è stato simulato attraverso l'integrazione di diversi modelli numerici (Bonnard *et al.*, 2004). La probabilità di accadimento media annua di questo scenario di pericolosità è stata stimata essere pari a 1/115, intermedia tra gli scenari 1 e 3;

Figura 2.2.9
Risultato del modello di *run out* per lo scenario 1



- *scenario 3*: collasso dell'intero settore B (area di traslazione dell'ammasso roccioso). Anche in questo scenario è ipotizzabile che il movimento evolva da traslativo a valanga di roccia, in considerazione degli ingenti volumi coinvolti (circa 5 milioni di metri cubi). Per la stima della probabilità di accadimento media annua di questo scenario di pericolosità, si è fatto ricorso ai documenti storici: antiche cronache riportano notizie di importanti movimenti del versante in oggetto nel 312 e nel 843 d.C., mentre le notizie più recenti risalgono al 1816 ed all'evento dell'ottobre 2000. A partire da queste informazioni è stata stimata la probabilità di accadimento media annua di 1/600.

Analisi quantitativa del rischio

In accordo con la metodologia IMIRILAND, sono state condotte tre analisi di rischio, una per ciascuno degli scenari di pericolosità precedentemente descritti. La prima fase riguarda l'identificazione degli elementi a rischio a partire dalle aree coinvolte dall'evoluzione dei fenomeni, a loro volta delimitate attraverso le simulazioni numeriche. Gli elementi a rischio individuati comprendono in generale aree residenziali (i villaggi storici di Prequartera e Campioli) e forestali, corsi d'acqua, strade principali (S.S. 549) e secondarie, importanti infrastrutture (elettrorodotti ed impianti idroelettrici). Le aree residenziali hanno un elevato valore sociale ed ambientale, quest'ultimo in considerazione dell'elevato pregio storico ed architettonico degli antichi villaggi *Walser* coinvolti; la statale ha un elevato valore economico in quanto è l'unica via di comunicazione per l'alta valle dove è ubicata l'importante stazione turistica di Macugnaga; hanno anche un elevato valore economico l'elettrodotto, l'impianto idroelettrico ed il Torrente Anza che ne rifornisce il serbatoio; il torrente e le aree forestali hanno ovviamente un elevato valore ambientale. La vulnerabilità degli elementi a rischio è stata valutata sulla base delle loro caratteristiche strutturali e delle informazioni di carattere energetico fornite dai modelli numerici di *run out*. Gli edifici, per lo più antichi, non presentano particolari caratteristiche di resistenza agli impatti dei processi considerati. Anche le strade risultano pesantemente danneggiate dalla caduta dei blocchi che provocano profonde lesioni del manto stradale con interruzioni della viabilità superiori alle 24 ore. Per quanto riguarda la vulnerabilità sociale, essa è funzione del grado di esposizione delle persone ai fenomeni: in questo studio,

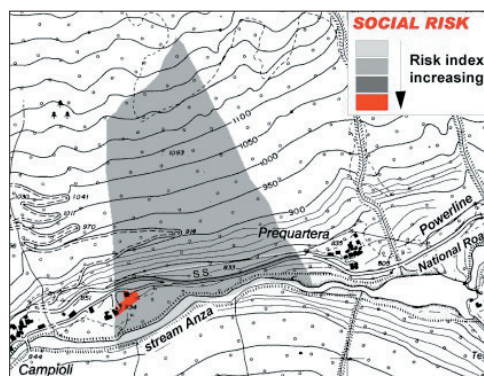
è stato deciso di considerare la situazione peggiore in cui le persone sono prive di protezioni. Nel caso dei fenomeni di valanga di roccia, l'energia liberata dall'evoluzione del processo è tale per cui tutti gli elementi coinvolti risultano distrutti o pesantemente danneggiati, per cui la vulnerabilità è stata assunta pari a 1 (100% di perdita).

In base alle considerazioni sopra esposte, è stato dapprima calcolato il danno, moltiplicando i valori di vulnerabilità per le rispettive categorie di valore degli elementi a rischio ed, infine, il rischio per ciascun scenario, moltiplicando il danno di ciascuna categoria (fisico, economico, sociale ed ambientale) per la probabilità di accadimento di ciascun scenario (**figura 2.2.10**). In ultimo, è stato calcolato il rischio totale sommando, all'interno di ciascuna categoria, il risultato dei tre scenari al fine di presentare un quadro di sintesi del rischio legato al fenomeno gravitativo di Ceppo Morelli. Da questa sintesi si evidenzia che le aree soggette ad elevata intensità dei fenomeni di crollo (scenario 1) presentano, a parità di elementi coinvolti, maggiori valori di rischio rispetto alle aree circostanti. Questa situazione è determinata dalla differenza tra le probabilità di accadimento dei vari scenari che nel caso dei crolli è circa 7 volte superiore allo scenario 2 e ben 40 volte superiore allo scenario 3 (**figura 2.2.4**).

Rischi indiretti e conseguenze a scala regionale

Al fine di completare l'analisi di rischio, sono necessarie alcune considerazioni circa gli effetti indiretti legati all'evoluzione della frana di Ceppo Morelli, che non sono stati considerati nell'analisi quantitativa del rischio. Infatti, è importante evidenziare che si possono verificare danni nelle aree circostanti a quelle delimitate negli scenari sopra descritti a causa dell'effetto soffio e delle polveri, processi associati ai fenomeni di valanga di roccia ipotizzati. Inoltre, si potrebbe generare un lago di sbarramento, a monte dell'accumulo delle valanghe di roccia, con conseguente coinvolgimento di estesi territori del fondovalle. In questo caso, anche i settori a valle dell'ipotetico lago di sbarramento potrebbero essere coinvolti: a causa di fenomeni di tracimazione o di sifonamento dello sbarramento detritico, si potrebbe creare uno svuotamento repentino dell'invaso neoformato, con formazione di una onda di piena rapida ed improvvisa. Tali effetti sono stati attentamente valutati nel corso della predisposizione di un piano di protezione civile per l'intera valle (Bossalini & Cattin, 2002). Altri interventi di mitigazione proposti, considerano la protezione degli abitati e della viabilità. Nel primo caso è stato realizzato un rilevato paramassi per proteggere Prequartera dai processi di crollo ed un altro rilevato è in fase di valutazione per la protezione di Campioli; per proteggere la viabilità dai crolli è stata realizzata, immediatamente dopo l'evento dell'ottobre 2000, una strada provvisoria sul versante opposto, mentre è in fase progettuale un tratto in galleria per mettere definitivamente in sicurezza il transito da e per Macugnaga.

Figura 2.2.10
Esempio di elaborazione in ambiente GIS della carta del rischio sociale relativo allo scenario 2 (Bonnard et al., 2004)



Bibliografia

- Bonnard C., Forlati F. & Scavia C. (eds.) (2004), *Identification and mitigation of large landslide in Europe. Advances in risk assessment*. IMIRILAND PROJECT, European Commission – Fifth Framework Programme Rotterdam, Balkema.
- Bossalini G. & Cattin M. (2002), *Studio dell'onda di piena conseguente ad una ipotetica frana in località Prequartera*. Regione Piemonte, Comunità montana Valle Anzasca.
- Carol I., Prat P.C. & López C. M. (1997), *A normal/shear cracking model. Application to discrete crack analysis*. Journal of Engineering Mechanics, 123 (8), pp. 765-773.
- Castelli M., Amatruda G., Scavia C., Paro L. & Forlati F. (2004), *The IMIRILAND methodology: a proposal for a multidisciplinary risk assessment procedure with respect to large landslides*. Proc. 9th Int. Symp. on Landslides, Rio de Janeiro, June 28-July 2, 2004. Lacerda, Ehrlich, Fontura & Sayao (eds), Taylor & Francis group, London, vol. 2, pp. 229-235.
- CNR [Consiglio Nazionale delle Ricerche] (1990), *Structural model of Italy, scale 1:500.000, sheet 1*. Progetto Finalizzato Geodinamica, Firenze, Selca ed.
- Cruden D. (1991), *A simple definition of a landslide*. Bull. Int. Ass. of Eng. Geol., n. 43, pp. 27-29.
- Cruden D. & Fell R. (eds.) (1997), *Landslide risk assessment*. Proc. Int. Workshop, Honolulu, 19-21 February 1997. Rotterdam, Balkema.
- DRM [Délégation aux risques majeurs] (1990), *Les études préliminaires à la cartographie réglementaire des risques naturels majeurs*. Secrétariat d'Etat auprès du premier Ministre chargé de l'Environnement et de la Prévention des Risques technologiques et naturels majeurs. La Documentations Française. Paris.
- Einstein H.H. (1988), *Special lecture: Landslide risk assessment procedure*. In Bonnard C. (ed.), Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne (CH), 10-15 July 1988 (2), pp. 1075-1090. Rotterdam, Balkema.
- Evans S.G., Hungr O. & Eneqren E.G. (1994), *The Avalanche Lake rock avalanche, Mackenzie Mountains, Northwest Territories, Canada: description, dating and dynamics*. Canadian Geotechnical Journal (31); pp. 749-768.
- Howard K.A. (1973), *Avalanche mode of motion: implications from lunar examples*. Sciences, 180; pp. 1052-1055.
- Hsü K.J. (1975), *Catastrophic debris streams (Sturzstorms) generated by rockfalls*, Geological Society of America Bulletin, 86; pp. 129-140.
- Hungr O. (1995), *Model for run out analysis of rapid flow slide, debris flows, and avalanches*. Canadian Geotechnical Journal (32); pp. 610-623.
- Hungr O. (2001), *A review of the classification of landslides of the flow type*. Environmental and Engineering Geoscience (7); pp. 221-238.
- IUGS, Working Group on Landslide, Committee on Risk Assessment (1997), *Quantitative risk assessment for slopes and landslides – the state of the art*. In Cruden & Fell (eds), Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment, Honolulu/Hawaii/USA/19-21 February 1997; pp. 3-12. Rotterdam, Balkema.
- Jing L. & Hudson J.A. (2002), *Numerical methods in rock mechanics*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 39; pp. 409-427.
- Potter D. (1972), *Computational physics*. London, John Wiley & Sons.
- Prat P.C., Gens A., Carol I., Ledesma A. & Gili J.A. (1993), *DRAC: A computer software for the analysis of rock mechanics problems*. In: Liu (ed.), Application of computer methods in rock mechanics; pp. 1361-1368. Shaanxi Science and Technology Press, Xian, China.
- Scavia C., Barla G. & Bernaudo V. (1990), *Probabilistic stability analysis of block toppling failure in rock slopes*. Int. J. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. vol. 27, n. 6, pp. 465-478. Oxford, Pergamon press.

