

APPENDICE A4

Progetto “INTERREG MASSMOVE” (a cura dell’Università Bicocca, Milano, Regione Friuli Venezia Giulia e Regione Veneto)

PREMESSA	3
INTRODUZIONE	3
CAPITOLO 1	3
STRUMENTI OPERATIVI PER LA ZONAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ E PERICOLOSITÀ PER LE FRANE DI CROLLO	3
1.1 ANALISI A SCALA REGIONALE (R)	5
1.2 ANALISI A SCALA LOCALE (L)	7
1.3 ANALISI SITO-SPECIFICA (S)	8
1.4 DATI DI BASE E PARAMETRI	9
1.5 DIAGRAMMA DI FLUSSO PROCEDURALE	16
CAPITOLO 2	18
METODI PER LA ZONAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ E PERICOLOSITÀ PER LE FRANE DI CROLLO	18
2.1 SUSCETTIBILITÀ ALL'INNESCO	18
2.1.1 CLASSIFICAZIONE EURISTICA DELLA SUSCETTIBILITÀ ALL'INNESCO (R_O2, L_O1, S_O1)	18
2.1.1.1 Metodi diretti	18
2.1.1.2 Metodi euristici indiretti	18
2.1.1.3 Metodi statistici	22
2.1.2 ANALISI DI STABILITÀ (L_O2, S_O2)	22
2.1.2.1 Analisi cinematica	22
2.1.2.2 Analisi all'equilibrio limite	23
2.2 MODELLAZIONE DELLA PROPAGAZIONE	24
2.2.1 METODI EMPIRICI (R_O1)	25
2.2.1.1 Angolo α (reach angle, geometrical slope angle)	25
2.2.1.2 Angolo β (minimum shadow angle)	27
2.2.2 MODELLAZIONE 2D	27
2.2.3 MODELLAZIONE 3D	28
2.3 ZONAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ	29
2.3.1 MASSIMO ESPANDIMENTO, ZONAZIONE DELL'AREA DI MASSIMO ESPANDIMENTO (R_S1, R_S2)	30
2.3.2 SUSCETTIBILITÀ ALL'INNESCO + FREQUENZA DI TRANSITO (L_S)	30
2.3.3 SUSCETTIBILITÀ ALL'INNESCO + FREQUENZA DI TRANSITO + ENERGIA (L_S)	31
2.4 ZONAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ	33
2.4.1 FREQUENZA ATTESA ASSOCIATA AD UNO SCENARIO DI RIFERIMENTO	33
2.4.1.1 Approccio euristico (L-H1, L-H2, S_H1)	33
2.4.1.2 Statistiche dei dati storici (L_H2)	34
2.4.2 RELAZIONI MAGNITUDO FREQUENZA (MF) (S-H2)	35
2.4.3 COMBINAZIONE DELLA FREQUENZA CON LA SUSCETTIBILITÀ: PERICOLOSITÀ DA CROLLO	36

CAPITOLO 3 ERRORE. IL SEGNALIBRO NON È DEFINITO.

**CASO APPLICATIVO PER LE AREE DI STUDIO PER FRANE DI CROLLO DEL PROGETTO
MASSMOVE** ERRORE. IL SEGNALIBRO NON È DEFINITO.

3.1 LIMITI PAI ORIGINALI ERRORE. IL SEGNALIBRO NON È DEFINITO.

3.2 APPROCCIO METODOLOGICO..... ERRORE. IL SEGNALIBRO NON È DEFINITO.

3.3 TRASPOSIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ RHV ALLA PERICOLOSITÀ PAI..... ERRORE. IL SEGNALIBRO NON È DEFINITO.

RINGRAZIAMENTI ERRORE. IL SEGNALIBRO NON È DEFINITO.

BIBLIOGRAFIA..... **38**

Premessa

La presente appendice corrisponde, con qualche modifica o integrazione, alle linee guida per gli standard minimi per la stesura di carte di suscettibilità e pericolosità per le frane di crollo realizzato dal progetto “Interreg MASSMOVE”. Tale progetto si è sviluppato nel contesto del programma di cooperazione territoriale europea “Interreg IV Italia–Austria”, cofinanziato dai fondi FESR, in cui la Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, la Regione Veneto e il Land Carinzia hanno portato avanti il progetto per gli “Standard minimi per la stesura di carte di pericolosità per frane di scivolamento e di crollo quale strumento per la prevenzione dei dissesti franosi”.

La presente versione italiana delle linee guida, focalizzata solo sulla problematica di caduta massi, in parte adattata come appendice alle linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da instabilità di versante sismoindotte (FR), deriva da una versione inglese più ampia che è stata sintetizzata nelle sue componenti salienti e alla quale si rimanda per eventuali approfondimenti degli argomenti trattati. La versione integrale, unitamente a tutte le relazioni intermedie e gli studi sulle aree pilota che hanno condotto alle linee guida, sono reperibili su www.regione.fvg.it e www.regione.veneto.it.

Introduzione

Le linee guida sono uno strumento operativo per la stesura di carte di suscettibilità e di pericolosità da frane di crollo, le stesse definiscono i parametri da utilizzare, le strategie da condurre per la zonazione e i risultati minimi da raggiungere. L’approccio è indipendente dal fatto che l’analisi venga svolta in condizioni dinamiche o statiche.

Nelle linee guida vengono definiti i requisiti minimi in termini di accuratezza dei dati, le metodologie più efficienti in termini di costo e tempo per garantire il livello di accuratezza richiesto e vengono individuati gli strumenti operativi standard per ottimizzare l’attività dei soggetti che abbiano la necessità di approcciarsi alla problematica, siano essi liberi professionisti o tecnici delle autorità e degli enti competenti. Attraverso lo strumento operativo, definibile come manuale, vengono fornite sinteticamente metodologie scientificamente significative e una guida per la loro corretta applicazione.

L’approccio definito nelle linee guida è un approccio multiscalare definito in tre ambiti di scala (regionale, locale e sito specifico) in funzione della problematica da affrontare e soprattutto del risultato atteso dall’analisi della problematica stessa.

Il presente manuale è suddiviso in capitoli che individuano in primo luogo gli strumenti operativi per la zonazione della suscettibilità e pericolosità delle frane di crollo, a cui segue una mera elencazione di dati di base, parametri di ingresso e risultati ottenibili per poi definire, attraverso spiegazioni delle procedure di base, i metodi per la zonazione e la loro applicabilità. Nel testo si fa ricorso a tabelle di sintesi per consentire una visione d’insieme delle tematiche affrontate.

Capitolo 1

Strumenti operativi per la zonazione della suscettibilità e pericolosità per le frane di crollo

Se le linee guida di questo manuale sono standardizzate relativamente ai dati di input, alle procedure generali, ai dati di output, alla qualità del dato, i modelli sono ritenuti liberi ovvero ogni modello, sia esso empirico, euristico, statistico o fisicamente basato, è accettabile se fornisce output adeguati ai requisiti previsti.

L'utente sarà guidato attraverso alcune tabelle, atte a definire la metodologia minima da utilizzare.

Ogni metodologia è una combinazione specifica di:

- Un metodo di modellazione dell'innesco (onset)
- Un metodo per la modellazione della propagazione (runout)
- Un metodo per combinare le due componenti per la zonazione della suscettibilità
- Un metodo per introdurre la probabilità temporale per la zonazione della pericolosità



L'utilizzo della metodologia proposta richiede la seguente procedura:

- 1) scelta di una scala e un campo di applicazione per l'analisi in base alla tabella 1;
- 2) per ciascuna scala, scelta del livello di analisi (minimo o avanzato) secondo le esigenze dettate dal punto di arrivo previsto;
- 3) scelta della metodologia operativa, infatti per ogni scala e livello di indagine, le tabelle offrono una combinazione di: metodo di valutazione della suscettibilità all'innesco (e relativa zonazione); metodo di modellazione della propagazione, metodo per la zonazione della suscettibilità, metodo per la zonazione della pericolosità.

Ogni metodo è riferito ad un acronimo composto da una prima parte che è funzione della scala di riferimento:

R: regionale

L: locale

S: sito specifico

e da una seconda parte riferita all'ambito di riferimento:

O: Onset/innesco

R: Runout/propagazione

S: Suscettibilità

H: Hazard/pericolosità

con definizione di un livello minimo (1) e uno avanzato (2)

Per ogni acronimo è presentata una breve spiegazione dei principi fondamentali. Le procedure connesse e gli strumenti necessari, i dati richiesti e l'idoneità per le diverse applicazioni sono forniti nei diversi capitoli relativi alle metodologie. Nello specifico nel presente capitolo sono riportate solo le informazioni essenziali, mentre le applicazioni specifiche (ad esempio pianificazione territoriale, infrastrutture lineari, progettazione di interventi, zonazione pericolosità, ecc.) e i dettagli pratici delle procedure da adottare, con riferimento anche alla letteratura citata, sono riportati nel capitolo 2.

I requisiti minimi necessari per i diversi dati di input sono definiti nella tabella 9.

Tabella 1: - Definizione della scala e delle finalità dello studio

Scala	Finalità	Tipo di mappa	Scala cartografica indicativa	Risoluzione DEM
R: regionale	Riconoscimento di aree potenzialmente pericolose	Carta inventario/ carta della suscettibilità	1:50.000-1:10.000	≤ 30* m
L: locale (comunale)	Pianificazione del territorio	Carta della suscettibilità, carta delle pericolosità, zonazione della pericolosità	1:10.000 - 1:5.000	≤ 5 m
S: area specifica o singolo versante	Analisi di pericolosità e rischio, progettazione opere di difesa	Carta della pericolosità, zonazione della pericolosità	1:5.000 - 1:500	≤ 2m

*La dimensione minima è dettata dalla disponibilità gratuita di un DEM a scala regionale sul sito: ASTER (cell-size 30m) <http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/index.html>

Nella tabella 2 sono sintetizzati i vantaggi e gli svantaggi di utilizzazione dei diversi metodi e la loro applicabilità in riferimento alla scala di riferimento.

Tabella 2: Scale e possibilità di utilizzo dei metodi

Metodo	Vantaggi	Svantaggi	Innesco			Propagazione		
			R	L	S	R	L	S
Analisi geomorfologica di terreno	Analisi dettagliata	Soggettivo e costoso		X	X		X	(X)
Metodo euristico ad indicatori	Semplice	Soggettivo	X	X	(X)			
Approccio empirico	Semplice					X	X	
Analisi statistica	Oggettivo, automatizzabile	Richiede una popolazione di dati significativa	X	X		X		
Modellazione fisicamente basata	Oggettivo, deterministico o stocastico	Richiede conoscenze dettagliate	(X)	X	X		X	X

1.1 Analisi a scala regionale (R)

Tabella 3: Metodi per l'analisi a scala regionale delle frane di crollo

LIVELLO DI ANALISI	INNESCO	PROPAGAZIONE	Zonazione della SUSCETTIBILITÀ	Zonazione della PERICOLOSITA'
Minimo: suscettibilità con identificazione delle aree sorgenti + limite di propagazione più conservativo	R_O1	R_R1	R_S1	-

Avanzato: suscettibilità con zonazione della suscettibilità all'innesco + frequenza di transito dei blocchi	R_O2	R_R2	R_S2	-
--	-------------	-------------	-------------	---

Innesco:

R_O1: sorgenti di crollo: identificazione basata su mappatura geomorfologica, posizione delle pareti e altezza.

R_O2: classificazione della suscettibilità all'innesco: classificazione delle pareti in termini di potenzialità a generare frane di crollo (processi potenziali, inventario dei crolli)

Propagazione:

R_R1: limite di propagazione conservativo: mappa della massima propagazione generata usando metodi geometrici come l'approccio della linea di energia

R_R2: zonazione della propagazione con frequenza di transito: sovrapposizione della mappa di massimo runout con la mappa di frequenza di transito dei blocchi (modellazione 3D a scala regionale)

Zonazione della suscettibilità:

R_S1: mappa del limite massimo di propagazione e evidenziazione di potenziali situazioni critiche per impatto su strutture e infrastrutture

R_S2: mappa di propagazione riclassificata in funzione della frequenza al transito. La frequenza è riclassificata per tenere conto della suscettibilità all'innesco.

Zonazione della pericolosità:

La zonazione della pericolosità a scala regionale non è prevista

1.2 Analisi a scala locale (L)

Tabella 4: Metodi per l'analisi a scala locale delle frane di crollo

LIVELLO DI ANALISI	INNESCO	PROPAGAZIONE	Zonazione della SUSCETTIBILITÀ	Zonazione della PERICOLOSITA'
Minimo: pericolosità con probabilità di innesco e transito per uno scenario di riferimento	L_O1	L_R	L_S	L_H1
Avanzato: pericolosità con probabilità di innesco e transito per uno scenario di riferimento basato su calcoli di stabilità	L_O2			L_H2

Innesco:

L_O1: classificazione della suscettibilità all'innesco: classificazione delle pareti in termini di potenzialità a generare frane di crollo (processi potenziali, inventario dei crolli)

L_O2: classificazione della suscettibilità all'innesco basata su analisi di stabilità: valutazione dei possibili meccanismi di rottura (scivolamento, ribaltamento) e analisi di stabilità con approccio cinematico o all'equilibrio limite

Propagazione:

L_R: zonazione della propagazione con frequenza di transito ed energia cinetica: zonazione della frequenza di transito e dell'energia cinetica dei blocchi tramite modellazione della propagazione 3D (per ogni situazione) o 2D (per areali ridotti di pochi km² e morfologie di versante semplici)

Zonazione della suscettibilità:

L_S: mappa di propagazione riclassificata in funzione della frequenza al transito e dell'energia cinetica. La frequenza è riclassificata per tenere conto della suscettibilità all'innesco.

Zonazione della pericolosità:

L_H1-2: mappa di propagazione riclassificata in funzione della frequenza attesa, ottenuta riscalando la probabilità di accadimento di uno scenario di riferimento con la frequenza di transito.

1.3 Analisi sito-specifica (S)

Tabella 5: Metodi per l'analisi a scala di sito specifico per le frane di crollo

LIVELLO DI ANALISI	INNESCO	PROPAGAZIONE	Zonazione della SUSCETTIBILITÀ	Zonazione della PERICOLOSITA'
Minimo: pericolosità con probabilità di innesco e transito per uno scenario di riferimento basato su calcoli di stabilità	S_O1	S_R	-	S_H1
Avanzato: pericolosità con probabilità di innesco e transito con approccio probabilistico basato su calcoli di stabilità	S_O2		-	S_H2

Innesco:

S_O1: classificazione della suscettibilità all'innesco: classificazione delle pareti in termini di potenzialità a generare frane di crollo (processi potenziali, inventario dei crolli)

S_O2: classificazione della suscettibilità all'innesco basata su analisi di stabilità: valutazione dei possibili meccanismi di rottura (scivolamento, ribaltamento) e analisi di stabilità con approccio cinematico o all'equilibrio limite

Propagazione:

S_R: zonazione della propagazione con frequenza di transito ed energia cinetica: zonazione della frequenza di transito e dell'energia cinetica dei blocchi tramite modellazione della propagazione 3D (per ogni situazione) o 2D (per areali ridotti di pochi km² e morfologie di versante semplici)

Zonazione della suscettibilità:

La zonazione della suscettibilità a scala di sito specifica non è prevista

Zonazione della pericolosità:

S_H1: mappa di propagazione riclassificata in funzione della frequenza attesa, ottenuta riscalando la probabilità di accadimento di uno scenario di riferimento con la frequenza di transito

S_H2: mappa di energia cinetica associata a diverse frequenze, ottenuta integrando diversi scenari

1.4 Dati di base e parametri

La stabilità dei versanti in roccia è fortemente dipendente dalle caratteristiche geologiche, dalle condizioni della massa rocciosa, dalle caratteristiche geomorfologiche e topografiche e per definire la suscettibilità da crolli è necessario entrare nel dettaglio di tutte le caratteristiche che vincolano il sistema.

Al fine di individuare i parametri e i requisiti minimi in funzione della scala a cui si affronta la problematica della caduta massi vengono riportate di seguito delle tabelle di sintesi che hanno il compito di guidare l'utilizzatore delle linee guida.

Le tabelle 6-7-8 individuano i dati di base, quali sono le informazioni dirette che si possono ottenere, quali sono i dati da raccogliere e analizzare, l'accuratezza dei parametri e le sintesi di uscita che possono essere prodotte per ciascun gruppo di dati di partenza, in funzione della scala di analisi.

La tabella 9 individua i requisiti minimi per le frane di crollo indicando i parametri necessari ed obbligatori, quelli raccomandati, quelli ausiliari e quelle ininfluenti in funzione della scala del processo e della fase di analisi.

Tabella 6: raccolta dati scala regionale

SCALA REGIONALE		SCALA DI ANALISI 1:10.000-1:50.000			GRID < 30 m
ID	DATI	INFORMAZIONI DIRETTE	RACCOLTA DATI ED ANALISI	ACCURATEZZA	DATI DI USCITA
1	DTM-AL*	TOPOGRAFIA	<ul style="list-style-type: none"> • INCLINAZIONE VERSANTE • ESPOSIZIONE VERSANTE • PROFILI TOPOGRAFICI 	GRID ≤10m	<ul style="list-style-type: none"> • CARTE DELLA PENDENZA/ACCLIVITA' • CARTE DELLA DIREZIONE DELLE PENDENZE
2	DSM-AL**	VEGETAZIONE USO DEL SUOLO TIPI DI SUOLO	<ul style="list-style-type: none"> • USO DEL SUOLO (ALTEZZA ALBERI) • VOLUME DEI BLOCCHI SULLA SCARPATA 		<ul style="list-style-type: none"> • CARTE DELL'USO DEL SUOLO • CARTE DELLA TESSITURA DEL TERRENO
3	CARTA GEOLOGICA		<ul style="list-style-type: none"> • LITOLOGIA 		<ul style="list-style-type: none"> • CARTA GEOLOGICA • CARTA LITOLOGICA
4	CARTA TETTONICA		<ul style="list-style-type: none"> • ELEMENTI STRUTTURALI 		<ul style="list-style-type: none"> • CARTA DELLA TETTONICA
5	CARTA GEOMORFOLOGICA		<ul style="list-style-type: none"> • PROCESSI ATTIVI E FORME – CARATTERISTICHE DELLA SCARPATA 		<ul style="list-style-type: none"> • CARTA GEOMORFOLOGICA
6	ARCHIVI CROLLI		<ul style="list-style-type: none"> • PRINCIPALI EVENTI STORICI DI CROLLO 		<ul style="list-style-type: none"> • SCHEDE TECNICHE O CARTA DEGLI EVENTI STORICI DI CROLLO
7	ORTOFOTO		<ul style="list-style-type: none"> • USO DEL SUOLO – TIPI DI SUOLO – VEGETAZIONE – SCARPATE ATTIVE 		<ul style="list-style-type: none"> • CARTE DELL'USO DEL SUOLO • CARTE DELLA TESSITURA DEI SUOLI • CARTA VEGETAZIONALE
8	AFFIORAMENTI – TIPI DI SUOLO USO DEL SUOLO		<ul style="list-style-type: none"> • TIPI DI SUOLO • USO DEL SUOLO • COEFFICIENTI DI RIMBALZO, ROTOLAMENTO E SCIVOLAMENTO 		<ul style="list-style-type: none"> • CARTA DEGLI AFFIORAMENTI E DELL'USO DEL SUOLO

*DTM = digital terrain model – AL = air laser

**DSM = digital surface model – AL = air laser

Tabella 7: raccolta dati scala locale

SCALA LOCALE		SCALA DI ANALISI 1:5.000-1:10.000			GRID ≤ 5 m
ID	DATI	INFORMAZIONI DIRETTE	RACCOLTA DATI ED ANALISI	ACCURATEZZA	DATI DI USCITA
1	DTM-AL	TOPOGRAFIA	<ul style="list-style-type: none"> INCLINAZIONE VERSANTE ESPOSIZIONE VERSANTE PROFILI TOPOGRAFICI 	GRID ≤ 5 m	<ul style="list-style-type: none"> CARTE DELLA PENDENZA/ACCLIVITA' (>50°, >60°, >70°) CARTE DELLA DIREZIONE DELLE PENDENZE
2	DSM-AL	VEGETAZIONE USO DEL SUOLO TIPI DI SUOLO	<ul style="list-style-type: none"> USO DEL SUOLO (ALTEZZA ALBERI) VOLUME DEI BLOCCHI SULLA SCARPATA 	GRID ≤ 5 m	<ul style="list-style-type: none"> CARTE DELL'USO DEL SUOLO CARTE DELLA TESSITURA DEL TERRENO
3	CARTA GEOLOGICA		<ul style="list-style-type: none"> LITOLOGIA 	SCALA DI INDAGINE = SCALA DI ANALISI	<ul style="list-style-type: none"> CARTA GEOLOGICA CARTA LITOLOGICA (DEFINIZIONE DELLE UNITA' GEOTECNICO-LITOLOGICHE)
4	CARTA TETTONICA		<ul style="list-style-type: none"> ELEMENTI STRUTTURALI 		<ul style="list-style-type: none"> CARTA TETTONICA (NELLA CARTA GEOLOGICA)
5	CARTA GEOMORFOLOGICA		<ul style="list-style-type: none"> PROCESSI ATTIVI E FORME – CARATTERISTICHE DELLA SCARPATA 		<ul style="list-style-type: none"> CARTA GEOMORFOLOGICA CARATTERISTICHE DELLA SCARPATA/DETRITO DI FALDA (NELLA CARTA GEOMORFOLOGICA)
6	ARCHIVI CROLLI		<ul style="list-style-type: none"> EVENTI STORICI DI CROLLO 	DISPONIBILITA' DEL DATO	<ul style="list-style-type: none"> SCHEDE TECNICHE O CARTA DEGLI EVENTI STORICI DI CROLLO IN GIS
7	ORTOFOTO	USO DEL SUOLO TIPO DI SUOLO/VEGETAZIONE SCARPATE ATTIVE	<ul style="list-style-type: none"> USO DEL SUOLO – TIPI DI SUOLO – VEGETAZIONE – SCARPATE ATTIVE 	DA LASERSCAN O ACCURATEZZA DIGITALE	<ul style="list-style-type: none"> CARTE DELL'USO DEL SUOLO CARTE DELLA TESSITURA DEI SUOLI CARTA VEGETAZIONALE COMPARAZIONE DI SCARPATA/DETRITO DI FALDA SU ANNI DIVERSI
8	PUNTI DI OSSERVAZIONE		<ul style="list-style-type: none"> SORGENTE CADUTA MASSI (SCARPATA) POTENZIALI VOLUMI CRITICI STIMA DI J_v, V_b DA INDICI GSI E COMPARAZIONE CON I PUNTI ID 9 E 10 	IL MAGGIOR NUMERO POSSIBILE	<ul style="list-style-type: none"> SCHEDE DELLE AREE SORGENTI DI CADUTA MASSI (SCARPATA) SCHEDE DEI POTENZIALI VOLUMI CRITICI CARTA DI J_v / V_b E GSI IN ACCORDO CON I PUNTI ID 9 E 10
9	RILIEVO GEOMECCANICO		<ul style="list-style-type: none"> CARATTERIZZAZIONE DELLE DISCONTINUITA' - IDENTIFICAZIONE DELLE FAMIGLIE DI GIUNTI E FORMA DEI BLOCCHI BRMR; Q GSI, J_v, V_b E COMPARAZIONE CON I PUNTI ID 8 E 10 	≥ 3 PER OGNI AREA OMOGENEA	<ul style="list-style-type: none"> SCHEDE PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA DELL'AMMASSO ROCCIOSO: STAZIONI DI RILEVAMENTO CLASSIFICAZIONE DELLA MASSA ROCCIOSA: MISURA DELLA DIMENSIONE DEI BLOCCHI – COMPARAZIONE CON LA SORGENTE DI CROLLO – CARTA DI J_v / V_b IN ACCORDO CON I PUNTI ID 8 E 10 QUANTIFICAZIONE DI GSI – CARTA DI GSI IN ACCORDO CON I PUNTI ID 8 E 10

SCALA LOCALE		SCALA DI ANALISI 1:5.000-1:10.000			GRID ≤ 5 m
ID	DATI	INFORMAZIONI DIRETTE	RACCOLTA DATI ED ANALISI	ACCURATEZZA	DATI DI USCITA
10	ALS NADIRALE ALS OBLIQUO		<ul style="list-style-type: none"> STIMA DI Jv, Vb DA GSI E COMPARAZIONE CON I PUNTI ID 8 E 9 DETERMINAZIONE DEL VOLUME CRITICO 	0,1 ÷ 0,2 m	<ul style="list-style-type: none"> CARTA DI Jv / Vb E GSI IN ACCORDO CON I PUNTI ID 8 E 9 MODELLI 3D E/O SEZIONI OGNI 2 ÷ 5 METRI DEI VOLUMI POTENZIALMENTE CRITICI
11	FAMIGLIE DI GIUNTI (INCLINAZIONE DIREZIONE / DIREZIONE DELL'IMMERSIONE)		<ul style="list-style-type: none"> FAMIGLIE DI GIUNTI (INCLINAZIONE DIREZIONE / DIREZIONE DELL'IMMERSIONE) ATTRAVERSO L'ANALISI LIDAR DIRETTAMENTE DAL DEM 	GRID ≤ 5 m	<ul style="list-style-type: none"> A COMPLETAMENTO DELLE FAMIGLIE DI GIUNTI DEL PUNTO ID 9
12	POTENZIALI ZONE DI SCIVOLAMENTO		<ul style="list-style-type: none"> POTENZIALI ZONE DI MOVIMENTO PER OGNI FAMIGLIA DI GIUNTO (PLANARE E INTERSEZIONE) 	GRID ≤ 5 m	<ul style="list-style-type: none"> MAPPA DELLE POTENZIALI ZONE DI SCIVOLAMENTO E COMPARAZIONE CON LA CARTA DELLE PENDENZA/ACCLIVITA' (>50°, >60°, >70°) E L'AREA SORGENTE DI CROLLO
13	AFFIORAMENTI – TIPI DI SUOLO USO DEL SUOLO		<ul style="list-style-type: none"> TIPI DI SUOLO USO DEL SUOLO COEFFICIENTI DI RIMBALZO, ROTOLAMENTO E SCIVOLAMENTO 	GRID ≤ 5 m	<ul style="list-style-type: none"> CARTA DEGLI AFFIORAMENTI E DELL'USO DEL SUOLO
14	OPERE DI DIFESA PER CROLLI ESISTENTI	DSM – DEM - RILEVAMENTO	<ul style="list-style-type: none"> RETI IN ADERENZA (EFFICACIA) RETI PARAMASSI (EFFICACIA) MURI (EFFICACIA) VALLI/RILEVATI (EFFICACIA) GALLERIE PARAMASSI (EFFICACIA) 	IN SPECIFICA CHECK LIST SUL TERRENO	<ul style="list-style-type: none"> CARTA DELL'EFFICIENZA DELLE OPERE DI DIFESA PER CROLLI - SCHEDE DELLE OPERE DI DIFESA

Tabella 8: raccolta dati scala sito specifico

SCALA SITO SPECIFICO			SCALA DI ANALISI 1:500-1:5.000		GRID ≤ 2 m	
ID	DATI	INFORMAZIONI DIRETTE	RACCOLTA DATI ED ANALISI	ACCURATEZZA	DATI DI USCITA	
1	DTM-AL	TOPOGRAFIA	<ul style="list-style-type: none"> INCLINAZIONE VERSANTE ESPOSIZIONE VERSANTE PROFILI TOPOGRAFICI 	GRID ≤ 2m	<ul style="list-style-type: none"> SLOPE ANGLE MAP (>50°, >60°, >70°) SLOPE ASPECT MAP 	
2	DSM-AL	VEGETAZIONE USO DEL SUOLO TIPI DI SUOLO	<ul style="list-style-type: none"> USO DEL SUOLO (ALTEZZA ALBERI) VOLUME DEI BLOCCHI SULLA SCARPATA 	GRID ≤ 2m	<ul style="list-style-type: none"> CARTE DELL'USO DEL SUOLO CARTE DELLA TESSITURA DEL TERRENO 	
3	CARTA GEOLOGICA		<ul style="list-style-type: none"> LITOLOGIA 	SCALA DI INDAGINE = SCALA DI ANALISI	<ul style="list-style-type: none"> CARTA GEOLOGICA CARTA LITOLOGICA (DEFINIZIONE DELLE UNITA' GEOTECNICO-LITOLOGICHE) 	
4	CARTA TETTONICA		<ul style="list-style-type: none"> ELEMENTI STRUTTURALI 		<ul style="list-style-type: none"> CARTA TETTONICA (NELLA CARTA GEOLOGICA) 	
5	CARTA GEOMORFOLOGICA		<ul style="list-style-type: none"> PROCESSI ATTIVI E FORME - CARATTERISTICHE DELLA SCARPATA 		<ul style="list-style-type: none"> CARTA GEOMORFOLOGICA CARATTERISTICHE DELLA SCARPATA/DETRITO DI FALDA (NELLA CARTA GEOMORFOLOGICA) 	
6	ARCHIVI CROLLI		<ul style="list-style-type: none"> EVENTI STORICI DI CROLLO 	DISPONIBILITA' DEL DATO	<ul style="list-style-type: none"> SCHEDE TECNICHE O CARTA DEGLI EVENTI STORICI DI CROLLO IN GIS 	
7	ORTOFOTO	USO DEL SUOLO TIPO DI SUOLO/VEGETAZIONE SCARPATE ATTIVE	<ul style="list-style-type: none"> USO DEL SUOLO - TIPI DI SUOLO - VEGETAZIONE - SCARPATE ATTIVE 	DA LASERSCAN	<ul style="list-style-type: none"> CARTE DELL'USO DEL SUOLO CARTE DELLA TESSITURA DEI SUOLI CARTA VEGETAZIONALE COMPARAZIONE DI SCARPATA/DETRITO DI FALDA SU ANNI DIVERSI 	
8	PUNTI DI OSSERVAZIONE		<ul style="list-style-type: none"> SORGENTE CADUTA MASSI (SCARPATA) POTENZIALI VOLUMI CRITICI STIMA DI J_v, V_b DA INDICI GSI E COMPARAZIONE CON I PUNTI ID 9 E 10 	IL MAGGIOR NUMERO POSSIBILE	<ul style="list-style-type: none"> SCHEDE DELLE AREE SORGENTI DI CADUTA MASSI (SCARPATA) SCHEDE DEI POTENZIALI VOLUMI CRITICI CARTA DI J_v / V_b E GSI IN ACCORDO CON I PUNTI ID 9 E 10 	
9	RILIEVO GEOMECCANICO		<ul style="list-style-type: none"> CARATTERIZZAZIONE DELLE DISCONTINUITA' - IDENTIFICAZIONE DELLE FAMIGLIE DI GIUNTI E FORMA DEI BLOCCHI BRMR; Q GSI, J_v, V_b E COMPARAZIONE CON I PUNTI ID 8 E 10 	≥ 3 PER OGNI AREA OMOGENEA	<ul style="list-style-type: none"> SCHEDE PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA DELL'AMMASSO ROCCIOSO: STAZIONI DI RILEVAMENTO CLASSIFICAZIONE DELLA MASSA ROCCIOSA: MISURA DELLA DIMENSIONE DEI BLOCCHI - COMPARAZIONE CON LA SORGENTE DI CROLLO - CARTA DI J_v / V_b IN ACCORDO CON I PUNTI ID 8 E 10 QUANTIFICAZIONE DI GSI - CARTA DI GSI IN ACCORDO CON I PUNTI ID 8 E 10 	

SCALA SITO SPECIFICO		SCALA DI ANALISI 1:500-1:5.000			GRID ≤ 2 m
ID	DATI	INFORMAZIONI DIRETTE	RACCOLTA DATI ED ANALISI	ACCURATEZZA	DATI DI USCITA
10	ALS NADIRALE E OBLIQUO LASER SCAN TERRESTRE TLS		<ul style="list-style-type: none"> STIMA DI Jv, Vb DA GSI E COMPARAZIONE CON I PUNTI ID 8 E 9 DETERMINAZIONE DEL VOLUME CRITICO 	0,10 ÷ 0,20 m (ALS) 0,02 ÷ 0,10 m (TLS)	<ul style="list-style-type: none"> CARTA DI Jv / Vb E GSI IN ACCORDO CON I PUNTI ID 8 E 9 MODELLI 3D E/O SEZIONI OGNI 2 ÷ 5 METRI DEI VOLUMI POTENZIALMENTE CRITICI
11	FAMIGLIE DI GIUNTI (INCLINAZIONE DIREZIONE / DIREZIONE DELL'IMMERSIONE)		<ul style="list-style-type: none"> FAMIGLIE DI GIUNTI (INCLINAZIONE DIREZIONE / DIREZIONE DELL'IMMERSIONE) ATTRAVERSO L'ANALISI LIDAR DIRETTAMENTE DAL DEM – TLS 	GRID ≤ 2 m	<ul style="list-style-type: none"> A COMPLETAMENTO DELLE FAMIGLIE DI GIUNTI DL PUNTO ID 9
12	POTENZIALI ZONE DI SCIVOLAMENTO		<ul style="list-style-type: none"> POTENZIALI ZONE DI MOVIMENTO PER OGNI FAMIGLIA DI GIUNTO (PLANARE E INTERSEZIONE) 	GRID ≤ 2 m	<ul style="list-style-type: none"> MAPPA DELLE POTENZIALI ZONE SI SCIVOLAMENTO E COMPARAZIONE CON LA CARTA DELLE PENDENZA/ACCLIVITA' (>50°, >60°, >70°) E L'AREA SORGENTE DI CROLLO
13	DOMINI DELLE FAMIGLIE DI GIUNTI DIP DIR/DIP COMBINAZIONE ALTEZZA PENDIO CUNEO DI CALCOLO PRESSIONI INTERSTIZIALI ACCELERAZIONE SISMICA		<ul style="list-style-type: none"> ALTEZZA DEL VERSANTE O ALTEZZA DEL VERSANTE DA ANALISI SOGGETTIVE PENDENZA>50°+COMBINAZIONE DELLA CARTA DELLA PENDENZA E ORIENTAZIONE DELLA PENDENZA (DIP DIR/DIP COMBINAZIONE) AREE OMOGENEE (DOMINI DEI GIUNTI + ALTEZZA PENDIO + A SCALA DEL CUNEO + PRESSIONI INTERSTIZIALI + ACCELERAZIONE SISMICA) ANALISI DEL CUNEO – Ed/Rd PER AREE OMOGENEE IN COMBINAZIONE CON DIP DIR/DIP DEL VERSANTE ANALISI AL RIBALTAMENTO PER AREE OMOGENEE IN COMBINAZIONE CON DIP DIR/DIP DEL VERSANTE 		<ul style="list-style-type: none"> SLOPE>50°+SLOPE ASPECT COMBINATION MAP (DIP DIR/DIP COMBINATION) ANALISI CUNEO – Ed/Rd CARTA MAPPATURA VOLUME DEL CUNEO vs Ed/Rd – DETERMINAZIONE PER ZONE OMOGENEE E COMBINAZIONE DIP DIR/DIP DEL VERSANTE ANALISI AL RIBALTAMENTO – Ed/Rd CARTA PER TUTTE LE SIMULAZIONI – DISTRIBUZIONE DELLA Ed/Rd FOR DIP DIR / DIP COMBINAZIONE DEL VERSANTE E VOLUME CUNEO/BLOCCO - PER Ed/Rd < 1 CARTA DELLA PROBABILITA' AL COLLASSO CARTA DELLA PROBABILITA' DEL COLLASSO CARTA DEI VOLUMI DEI BLOCCHI MOBILIZZABILI (COMBINAZIONE V_B DA ANALISI DEL CUNEO E RILEVAMENTO)
14	AFFIORAMENTI – TIPI DI SUOLO USO DEL SUOLO		<ul style="list-style-type: none"> TIPI DI SUOLO USO DEL SUOLO COEFFICIENTI DI RIMBALZO, ROTOLAMENTO E SCIVOLAMENTO 	GRID ≤ 2 m	<ul style="list-style-type: none"> CARTA DEGLI AFFIORAMENTI E DELL'USO DEL SUOLO
15	OPERE DI DIFESA PER CROLLI ESISTENTI	DSM – DEM – RILEVAMENTO	<ul style="list-style-type: none"> RETI IN ADERENZA (EFFICACIA) RETI PARAMASSI (EFFICACIA) MURI (EFFICACIA) VALLI/RILEVATI (EFFICACIA) GALLERIE PARAMASSI (EFFICACIA) 	IN SPECIFICO CHECK LIST SUL TERRENO	<ul style="list-style-type: none"> CARTA DELL'EFFICIENZA DELLE OPERE DI DIFESA PER CROLLI - SCHEDA DELLE OPERE DI DIFESA

Tabella 9: parametri minimi per lo studio delle frane di crollo, in funzione della scala, con riferimento alla qualità dei dati delle tabelle 6,7,8

Requisiti minimi per le frane di crollo			Mappe								
			R Regionale			L Locale			S Sito-specifica		
			Innesco	Propagazione	Suscettibilità	Innesco	Propagazione	Suscettibilità	Innesco	Propagazione	Pericolosità
Dati di base	Geologia	Litologia (GTL)	Red	Green	Yellow	Red	Red	Red	Red	Red	Red
		Orientazione delle discontinuità, struttura dell'ammasso	White	White	White	Red	Red	Red	Red	Red	Red
		Strutture tettoniche /lineamenti	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Red	Red	Red
	Inventario dei crolli	Archivio di eventi	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Red	Red	Red
		Dati da rilevamento di terreno	Green	Green	White	Red	Red	Red	Red	Red	Red
	Topografia	Foto aeree, mappe topografiche		White	White	White	Green	Green	Green	Green	Green
		LIDAR - da aereo o elicottero	Immagine inclinate	Green	White	White	Green	Green	Green	Yellow	Yellow
			Immagine verticali*	White	White	White	Yellow	White	Yellow	Yellow	Yellow
		LIDAR – terrestre*	White	White	White	White	White	White	Yellow	Yellow	Yellow
	Digital Elevation Model (DEM)	Cell size ≤ 30m		Red	Red	White	White	White	White	White	White
		Cell size ≤ 5m		Yellow	Yellow	Yellow	Red	Red	Red	Red	Red
		Cell size ≤ 2m		Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Red
	Uso del suolo	Scala ≥1:50.000		Red	Red	Red	White	White	White	White	White
		Scala 1:25.000 – 1:5.000		Yellow	Yellow	Yellow	Red	Red	Red	Red	Red
		Scala ≥1:5.000		Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Red
Precisione di analisi	Aree sorgenti	Bassa	Red	White	Red	White	White	White	White	White	
		Media	Yellow	White	Yellow	Red	White	Red	White	White	
		Alta- eccellente	White	White	White	Yellow	White	Yellow	Red	Red	
	Propagazione	Bassa	White	Red	Red	White	White	White	White	White	
		Media	White	Yellow	Yellow	White	Red	Red	Red	Red	
		Alta- eccellente	White	White	White	White	White	White	Red	Red	
Scopi	Informazione, screening		Red	Red	Red	White	White	White	White	White	
	Pianificazione del territorio		White	White	White	Red	Red	Red	Red	Red	
	Progettazione contromisure		White	White	White	White	White	White	Red	Red	

* in funzione delle dimensioni del sito può essere sostituito da rilievi topografici di dettaglio.

	Necessario (rosso)
	Raccomandato (giallo)
	Informazioni ausiliarie per livello avanzato (verde)
	Non rilevante (bianco)

1.5 Diagramma di flusso procedurale

Lo schema di flusso da seguire per definire parametri e dati di base secondo un approccio a scala regionale, locale o di sito specifico è riportato nel diagramma 1.

La scala regionale, locale o di sito specifico definisce un dominio strutturale con grado di accuratezza crescente:

- A **scala regionale** si analizzano a grande scala dati già esistenti (geologia, tettonica, geomorfologia, geomeccanica) arrivando a definire il dominio strutturale regionale.
- A **scala locale** si procede con analisi di maggior dettaglio per valutare le caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso procedendo con analisi statistico-strutturali delle discontinuità più significative in termini di continuità e/o di frequenza, secondo i suggerimenti metodologici della Società Internazionale di Meccanica delle Rocce (ISRM, 1979) e dell'Associazione Geotecnica Italiana (AGI, 1992) per definire il dominio strutturale locale.
- A **scala di sito specifico** le indagini di maggior dettaglio prevedono di determinare il tipo di cinematismo potenzialmente instabile che può portare a fenomeni di scivolamento e ribaltamento in roccia. Un'analisi di stabilità condotta con il metodo dell'equilibrio limite viene poi svolta per ogni possibile cinematismo di scivolamento o ribaltamento così determinato, ottenendo i rispettivi fattori di sicurezza. La combinazione di tre carte di sintesi, quali la carta dei volumi dei blocchi mobilizzabili, la carta della probabilità del collasso e la carta del fattore di sicurezza, portano a definire il dominio strutturale a scala di sito specifico.

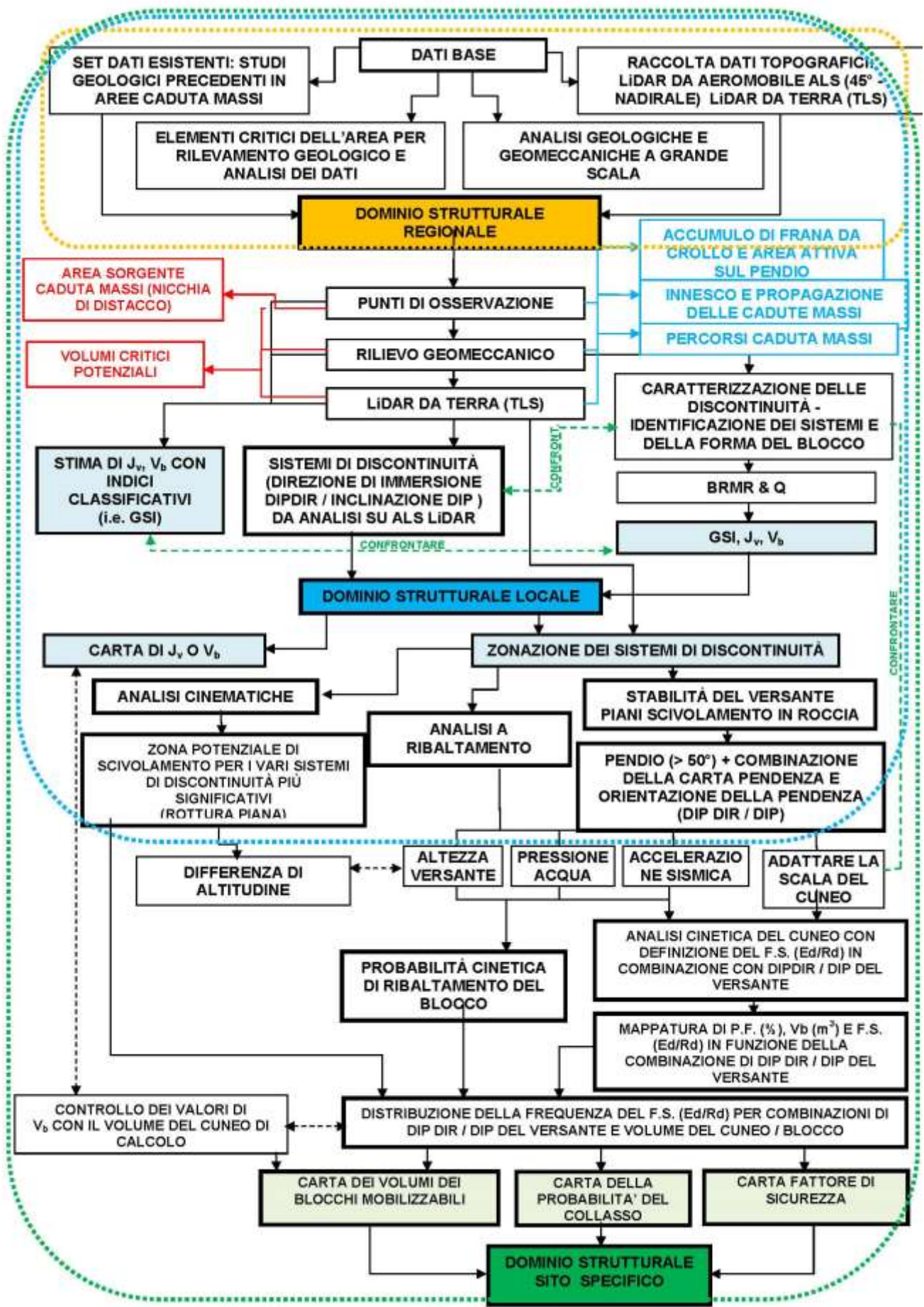


Diagramma 1: diagramma di flusso procedurale

Capitolo 2

Metodi per la zonazione della suscettibilità e pericolosità per le frane di crollo

Nei vari metodi descritti viene indicata la sigla che riconduce agli strumenti operativi del capitolo 1.

2.1 Suscettibilità all'innescò

In questa sezione si assume che le zone di distacco dei massi (sorgenti) siano già state identificate tramite opportuni approcci (ad esempio morfometrici, geomorfologici, geomeccanici). Una volta che le fonti sono state identificate possono essere classificate in base alla loro suscettibilità all'innescò, cioè alla propensione a generare frane di crollo. La classificazione della suscettibilità all'innescò può essere eseguita con metodi euristici, statistici, o analisi di stabilità.

2.1.1 Classificazione euristica della suscettibilità all'innescò

(R_O2, L_O1, S_O1)

La classificazione euristica può essere effettuata usando diversi approcci:

- metodi diretti
- metodi euristici indiretti
- metodi statistici

2.1.1.1 Metodi diretti

I metodi diretti consistono nella valutazione soggettiva della suscettibilità all'innescò sulla base dell'esperienza. Questo approccio richiede un'esperienza diretta dell'area di studio e, di solito, è adatto per un'analisi a scala locale e sito-specifica (L_O1, S_O1).

Un esempio di tale metodologia è stata proposta da Harp e Noble (1993) in relazione ad aree interessate da fenomeni di crollo/ribaltamento indotti da un terremoto $M = 6.0$. Sulla base del valore di qualità dell'ammasso roccioso (Q), determinato in sito secondo la classificazione di Barton modificata (1998) è possibile determinare indicativamente il numero di crolli/ribaltamenti attesi. Sulla base di tale metodologia è possibile effettuare una discretizzazione in classi con suscettibilità crescente in funzione del valore di Q dell'affioramento di ammasso roccioso considerato (categoria A, con $Q = 0.1 - 1.41$ molto suscettibile, categoria B, con $Q = 1.42 - 2.83$ suscettibile, categoria C, con $Q = 2.84 - 3.87$ moderatamente stabile e categoria D, con $Q > 3.87$).

2.1.1.2 Metodi euristici indiretti

I metodi euristici indiretti si basano sulla definizione dei rapporti funzionali tra i parametri di controllo geo-ambientali e la suscettibilità all'innescò. L'approccio più semplice (L_O1) si basa sull'uso di informazioni topografiche, geologiche, mappe dell'uso del territorio e delle infrastrutture (Baillifard et al., 2003). Essendo queste mappe normalmente disponibili anche a scala regionale, questo approccio è adatto per l'analisi su scala regionale.

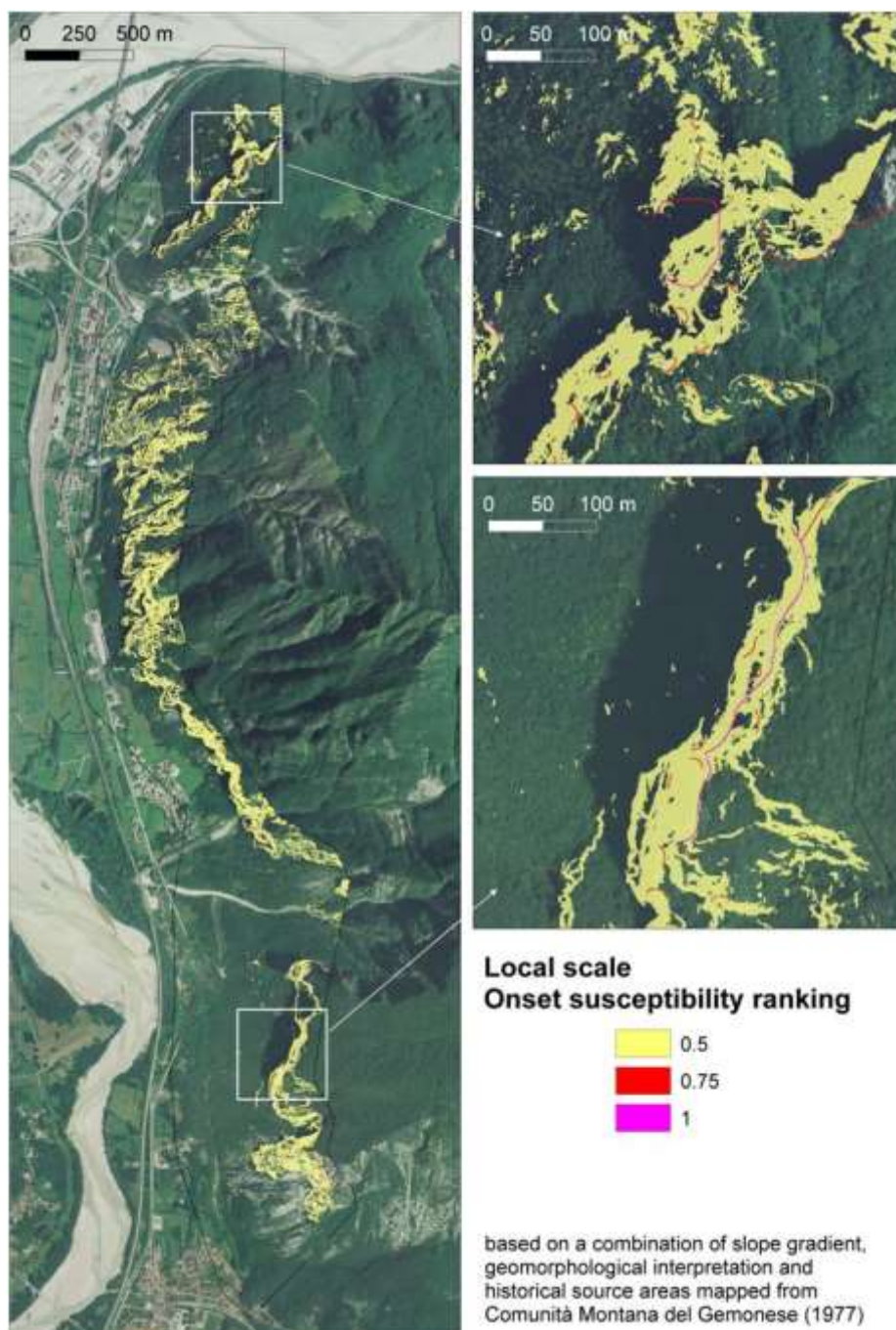


Figura 1. Esempio della classificazione della suscettibilità all'innesco (ref: L_O1) con un semplice approccio euristico per l'area di studio di Venzone-Carnia (Friuli Venezia Giulia). L'approccio si basa sulla somma di fonti di informazioni (rilievo geomorfologico, mappa delle aree sorgenti storiche, pendenza elevata) da cui sono mappate le aree sorgenti: 0.5 = una fonte; 0.75 = due fonti; 1 = tre fonti.

Metodi euristici più avanzati (ad esempio per **S_O1**) fanno uso di dati geomeccanici per la definizione della suscettibilità all'innesco. Un possibile approccio è il metodo RHAP (Rockfall Hazard Assessment Procedure - Mazzoccola e Sciesa, 2000) presentato nell'ambito del Progetto Interreg Falaise (figura 2).

La metodologia denominata RHAP, sviluppata nell'ambito del progetto Interreg II C – Falaises, si riferisce alla valutazione della pericolosità da crollo di singoli blocchi o per crolli di massi fino a una volumetria massima complessiva di 1000 m³. Nonostante sia stata sviluppata per la risoluzione di problematiche inerenti al territorio

lombardo, essa risulta applicabile a qualunque parete rocciosa soggetta a crolli in quanto non legata a particolari condizioni litologiche, strutturali o morfologiche.

La zonazione della pericolosità da crollo risultante dall'applicazione della metodologia, valida per una scala di dettaglio, è sito specifica e non è confrontabile con altri siti studiati separatamente. Questo è dovuto al fatto che ciascun sito analizzato risulterà sempre suddiviso in aree a pericolosità da bassa a elevata, indipendentemente dal valore assoluto della pericolosità. Nei casi in cui la probabilità di accadimento sia estremamente bassa, la metodologia prevede un valore soglia al di sotto del quale la zonazione della pericolosità non è più significativa.

Da un punto di vista applicativo la metodologia consta di due fasi principali:

- 1- La valutazione delle traiettorie e delle aree di possibile espansione delle frane. In questa fase viene realizzata una zonazione della pericolosità preliminare. La metodologia prevede un approccio semi-quantitativo dovuto alla difficoltà di reperire dati in tempi ristretti e quindi all'impossibilità di una completa valutazione dell'intensità del fenomeno che funzione anche del suo volume e della sua velocità.
- 2- La valutazione della pericolosità di accadimento dei fenomeni, risultante in una zonazione della pericolosità delle aree di distacco. In termini rigorosamente probabilistici, la probabilità d'accadimento andrebbe valutata in base a serie storiche da cui ricavare periodi di ritorno. Anche in questo caso, data la difficoltà di reperire dati storici completi, si ricorre ad una valutazione dei sintomi d'attività.

Le due zonazioni così ottenute sono poi integrate per ottenere la pericolosità totale.

Per applicare la metodologia è necessario individuare i settori della parete rocciosa soggetti a crolli. In seguito si procede con la delimitazione delle aree omogenee sulla base delle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso ricavate da rilievi in sito e delle caratteristiche morfologiche del versante lungo le traiettorie di discesa (zone di transito e d'arresto) dei blocchi (e.g. altezza della parete e pendenza del versante sottostante); questi parametri vengono poi utilizzati nella modellazione numerica. In ciascuna delle aree omogenee così definite, vengono selezionate una o più traiettorie di discesa dei blocchi su cui effettuare analisi di rotolamento tramite simulazioni di caduta con modelli numerici di tipo stocastico supportate da rilievi geomeccanici e da osservazione degli accumuli di detrito.

Le simulazioni di caduta massi con modelli numerici devono considerare i seguenti parametri:

- 1- Zona sorgente dei blocchi, in genere la sommità della parete;
- 2- Volumetria dei massi: le dimensioni modali, valutate tramite analisi statistica (istogramma di frequenza) del detrito alla base della parete in esame e/o in base alla fratturazione in parete, ricavata da rilievi geomeccanici. Possono essere considerati più valori modali nel caso in cui la distribuzione sia bi- o polimodale. Oltre ai volumi modali si prenda in considerazione anche il volume maggiore o quello del blocco che ha raggiunto la distanza massima ed eventualmente il blocco potenzialmente instabile di maggiori dimensioni riscontrato in parete.
- 3- Forma: dovrà essere utilizzata nella simulazione la forma più simile alla quella modale osservata nel detrito o in parete.
- 4- Coefficienti di restituzione e rugosità: vanno valutati attraverso un rilievo puntuale delle traiettorie di caduta, sia preesistenti che ipotizzate, prestando particolare attenzione al tipo di superficie, tipo di vegetazione presente, profondità e distanza tra solchi di impatti precedenti, eventuali danni a strutture e piante, ecc.
- 5- Numero di simulazioni: essendo un'analisi di tipo probabilistico, è necessario effettuare numerose simulazioni di caduta (si consigliano 400 cadute per ogni traiettoria).

Sulla base dei risultati ottenuti si esegue una zonazione preliminare, longitudinale, delle traiettorie di caduta suddividendole in 3 zone:

- a) di transito e di arresto del 70% dei blocchi,
- b) di arresto del 95% dei blocchi,
- c) di arresto del 100% dei blocchi.

Queste percentuali sono valutate sulla totalità delle simulazioni effettuate, per ogni traiettoria, sui blocchi modali di qualsiasi forma considerata. A queste zone vengono assegnate le classi di pericolosità relativa: 4 (a), 3 (b), 2 (c). In aggiunta si delimita un'area di pericolosità residua (zona I) utilizzando la distanza massima raggiunta dal blocco di maggiori dimensioni oppure la distanza massima raggiunta da massi di crolli precedenti.

In seguito si effettua la valutazione della probabilità di accadimento del fenomeno in ciascuna delle aree omogenee, definendo la propensione al distacco dei blocchi. A tale scopo la parete viene suddivisa in maglie con lato variabile da 5 m fino ad un massimo di 20 m, in funzione della complessità geomeccanica dell'area omogenea in esame o in base alle dimensioni della parete investigata. Per ciascuna maglia si verifica la presenza dei seguenti elementi di instabilità:

- 1- fratture aperte con evidenze di attività associate a cinematismi possibili;
- 2- blocchi ruotati;
- 3- zone intensamente fratturate;
- 4- superfici non alterate che testimoniano recenti distacchi;
- 5- emergenze di acqua alla base dei blocchi.

Ad ogni maglia viene quindi associato un valore dato dalla somma del numero di elementi di instabilità presenti. Poi, per ogni area omogenea viene calcolata la somma di tutti gli elementi di instabilità presenti ricavando la percentuale di instabilità in relazione al numero massimo ottenibile nell'area omogenea, dando a ciascuna maglia il valore massimo 5.

In base alle percentuali ricavate, le aree omogenee vengono raggruppate in 3 gruppi a differente attività relativa per il sito indagato: alta, media, bassa. Non vengono indicati valori di percentuali assolute per evitare che gran parte delle aree omogenee risultino avere lo stesso valore di pericolosità, impedendo una zonazione. Tuttavia, nel caso in cui tutte le aree omogenee presentino percentuali inferiori al 10% non si ritiene necessario effettuare la zonazione della pericolosità.

La zonazione finale della pericolosità viene definita utilizzando i valori delle classi di pericolosità relativa della zona di transito e accumulo dei blocchi, opportunatamente aumentati di 1, mantenuti costanti, o diminuiti di 1 a seconda che le pareti sovrastanti appartengano ai gruppi di attività alta, media o bassa rispettivamente. Si ottengono in questo modo le 5 classi di pericolosità previste dalla metodologia, da H1 a H5.

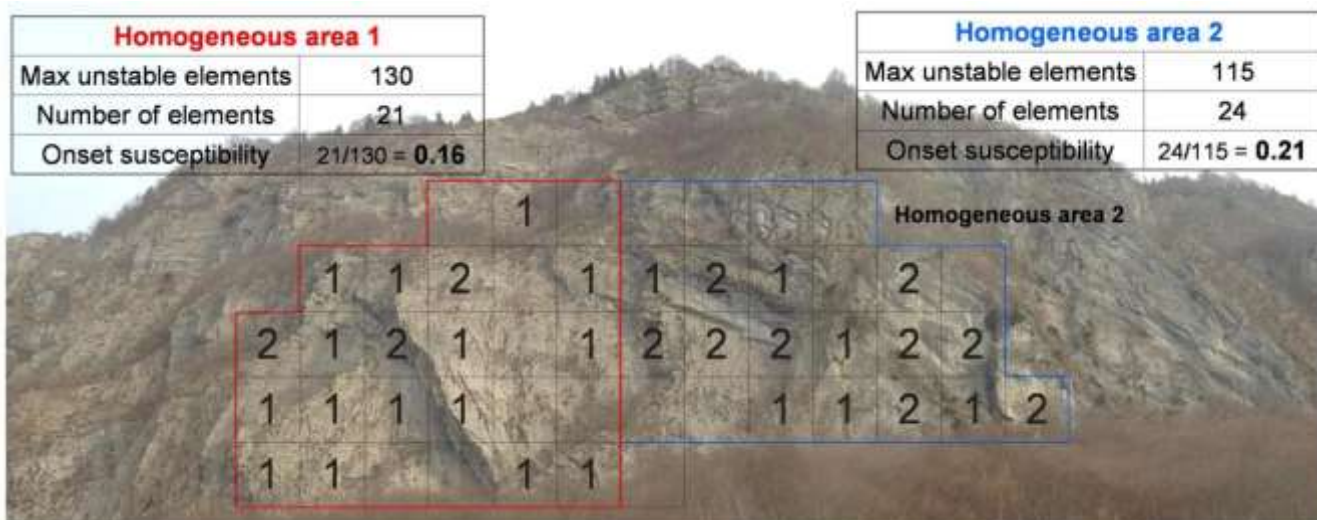


Figura 2. Esempio di zonazione della suscettibilità sito-specifica (**S_01**) con il metodo RHAP per una sub-area della zona di studio di Timau (Friuli Venezia Giulia).

2.1.1.3 Metodi statistici

La relazione funzionale tra i parametri di controllo geo-ambientali e la suscettibilità all'innescò può essere analizzata utilizzando approcci statistici bivariati o multivariati. Un esempio è stato presentato da Frattini et al. (2008) per un'analisi su scala regionale. L'approccio è basato sull'uso di analisi discriminante per classificare l'attività di pareti rocciose in base a diversi parametri geo-ambientali (litologia, densità di lineamenti, pendenza, esposizione, curvatura, ecc.).

2.1.2 Analisi di stabilità (L_02, S_02)

L'analisi di stabilità dell'ammasso roccioso consente sia di valutare la fattibilità cinematica di modalità specifiche di rottura (Hoek e Bray, 1981), sia di calcolare il fattore di sicurezza di blocchi sottoposti a specifici set di sforzi resistenti e destabilizzanti. Ai fini della valutazione della suscettibilità da crollo, l'analisi di stabilità permette di discriminare i settori di una parete rocciosa che sono cinematicamente più adatti a crollare, o più vicini a condizioni critiche (limite di equilibrio), e classificare di conseguenza la loro suscettibilità. Possono essere individuate e considerate idonee due principali sistemi di analisi di stabilità:

- analisi cinematica;
- analisi all'equilibrio limite.

2.1.2.1 Analisi cinematica

L'analisi cinematica distribuita (Guenther, 2003; Guenther et al, 2004) include diversi metodi per verificare la fattibilità cinematica per rottura planare, a cuneo, o ribaltamento in funzione dell'orientamento dei giunti e dell'esposizione del versante. Esistono metodi che combinano tutti gli orientamenti delle discontinuità misurate (Matheson, 1983) o solo i valori di orientamento modali per diversi set di discontinuità. I metodi di analisi cinematica presuppongono in generale discontinuità planari e persistenti, resistenza al taglio puramente attritiva, ed in generale forniscono risultati conservativi. Dato un certo numero di possibili meccanismi di rottura, una suscettibilità di innescò può essere valutata in base al numero totale di possibili modalità di rottura per ciascuna unità di versante, oppure in base al rapporto tra il numero di possibili modalità di rottura e tutte le modalità di rottura teoriche.

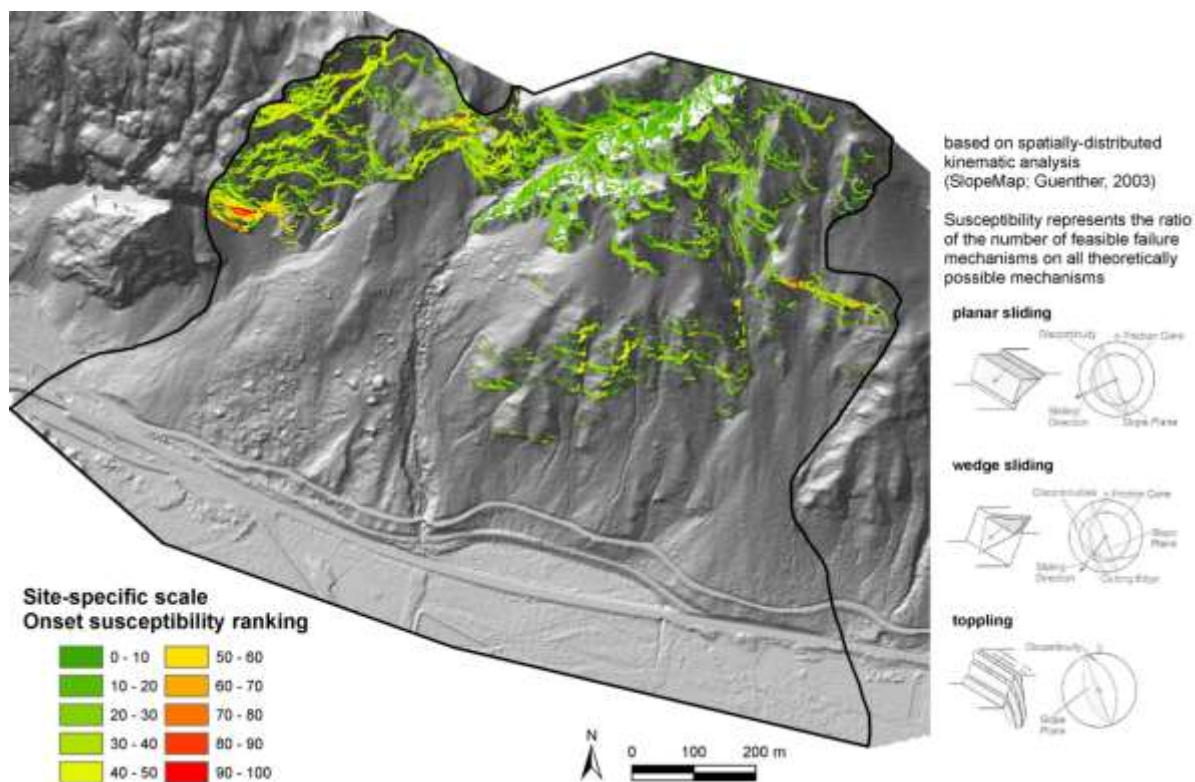


Figura 3. Esempio di classificazione della suscettibilità all'innesco sito-specifica (**S_O2**) con analisi cinematica spazialmente distribuita per rotture planari, a cuneo e ribaltamenti. Sub-area della zona di studio di Villa Santina (Friuli Venezia Giulia).

Dati di input (per la modellizzazione in GIS):

- geometria del versante: pendenza ed esposizione da DEM (la risoluzione è importante)
- parametri: orientazione delle discontinuità e stima dell'angolo d'attrito sulle pareti dei giunti.

Dati di output:

- mappa della fattibilità cinematica per diverse modalità di rottura

Vantaggi:

- facile implementazione in ambiente GIS
- facile zonazione della suscettibilità

Svantaggi:

- conservativo
- non considera le forze e non effettua una valutazione del fattore di sicurezza

2.1.2.2 Analisi all'equilibrio limite

L'analisi all'equilibrio limite (LEA) può essere eseguita per determinati tipi di condizioni di instabilità, geometrie e condizioni al contorno. La LEA può essere effettuata con un approccio deterministico o probabilistico per includere incertezze e variabilità dei parametri, nello specifico con un approccio probabilistico si ottiene una probabilità di rottura.

Una predizione temporale può essere associata ad uno scenario determinato se è possibile incorporare nell'analisi il tempo di ricorrenza di un specifico evento scatenante (ad es. magnitudo dei terremoti, precipitazioni, ecc.).

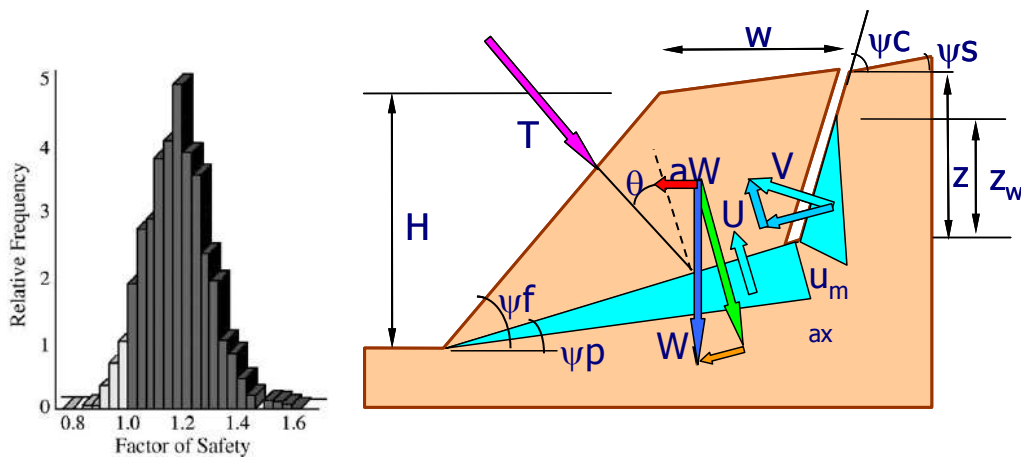


Figura 4. Esempio di analisi all'equilibrio limite per la rottura planare di un blocco di pre-definita geometria sottoposto ad una serie di sforzi. L'analisi può essere eseguita utilizzando un approccio probabilistico volto a stimare una probabilità di rottura.

Dati di input:

- geometria del versante: pendenza ed esposizione da DEM (la risoluzione è importante);
- dimensione e forma dei blocchi;
- entità e direzione degli sforzi agenti.

Dati di output:

- fattore di sicurezza (approccio deterministico);
- probabilità di rottura (approccio probabilistico).

Vantaggi:

- valutazione robusta del fattore di sicurezza;
- possibilità di analisi probabilistica.

Svantaggi:

- difficoltà nell'implementare un modello spazialmente distribuito.

2.2 Modellazione della propagazione

Attualmente esiste una grande varietà di modelli di calcolo per la modellazione della propagazione dei blocchi. I modelli esistenti possono essere classificati in due gruppi principali: modelli empirici e modelli fisicamente basati (Dorren, 2003). I modelli empirici sono basati su ipotesi semplificate e generalmente si basano sui dati acquisiti in una zona studio, analizzati con metodi statistici. I modelli fisicamente basati permettono di descrivere o simulare i processi fisici di moto di caduta massi sulla superficie topografica.

2.2.1 Metodi empirici (R_01)

Per la determinazione dell'area interessata da caduta massi su scala regionale sono stati proposti diversi approcci empirici (Domaas, 1994, Keylock e Domaas, 1999). Il metodo più largamente adottato per analizzare la distanza di propagazione di frane di crollo si basa su approcci geometrici: 1) l'angolo della linea più breve tra la parte superiore della scarpata da cui si sono distaccati i blocchi e il punto di arresto ("Fahrböschung" Heim, 1932, Toppe, 1987; reach angle, Corominas, 1996; geometrical slope angle, Meißl, 1998) e 2) l'angolo della linea più breve tra l'apice del cono di detriti e il punto di arresto dei blocchi (Lied, 1977; minimum shadow angle, Evans e Hungr, 1993) (Fig. 5)

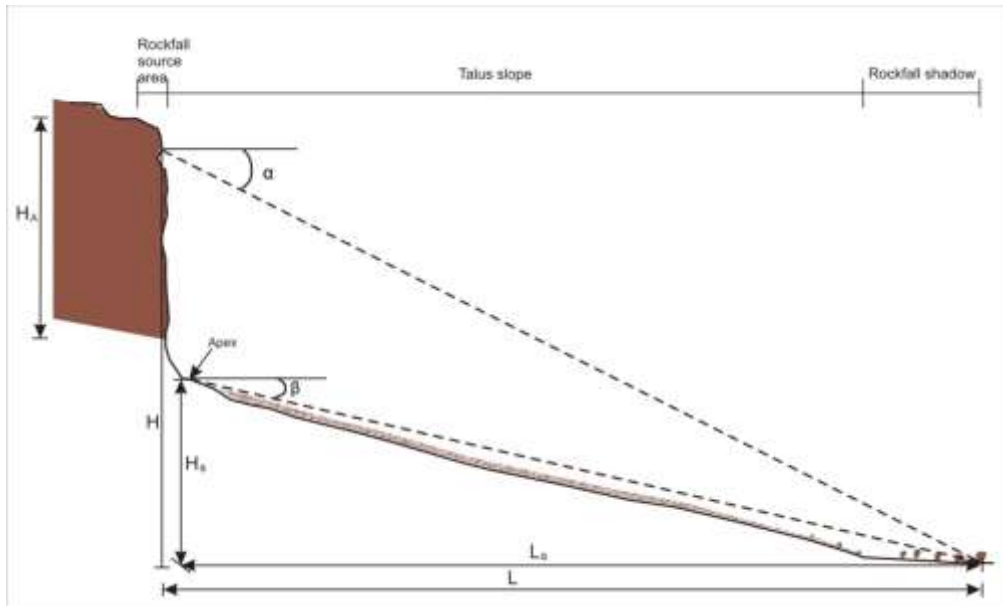


Figura 5: Schema di un tipico profilo di caduta massi con indicazione dell'angolo α e dell'angolo β (da Meißl 1998)

I metodi empirici possono essere applicati nella pratica utilizzando diversi approcci:

- Analisi lungo profili selezionati per cui viene calcolata la distanza massima usando l'angolo α o β , e quindi interpolazione manuale dei risultati lungo profili per definire una zona di caduta massi;
- applicazione di un modello bidimensionale in ambiente GIS per definire la zona d'ombra tra il punto di origine e la zona definita distalmente dall'angolo α (o β) (per es. CONEFALL, Jaboyedoff e Labiouse, 2003).

2.2.1.1 Angolo α (reach angle, geometrical slope angle)

L'angolo della linea più breve tra la parte superiore della parete sorgente da cui si sono distaccati i blocchi e il punto di arresto è basato sulla teoria della "linea di energia" (Heim, 1932).

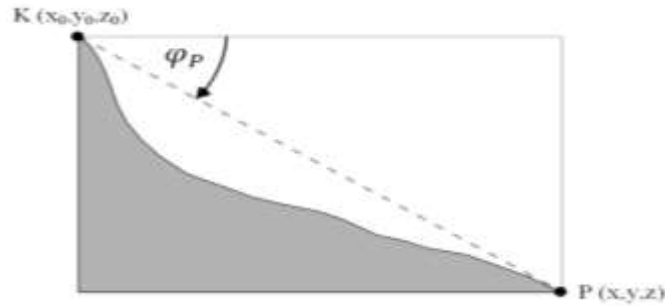


Figura 6: Geometrical sketch for energy-line approach (Heim, 1932).

Dal rapporto geometrico tra un punto K della parete con coordinate (x_0, y_0, z_0) e un punto sottostante casuale ($z < z_0$) P con coordinate (x, y, z) (Fig. 6), vale la seguente relazione matematica (Jaboyedoff, 2003):

$$0 > (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 - \tan\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_P\right)^2 * [(z - z_0)I]^2$$

In letteratura sono stati riportati diversi valori dell'angolo α : 28,5 ° (Onofri e Candian, 1979), 32 ° (Toppe, 1987), 37 ° (Meißl, 1998), 33 ° (Heinimann et al 1998)., 36,9 ° (Copons et al, 2009);. 34-40 ° (Melzner, 2009).

Questi valori possono essere molto diversi in funzione di: altezza della parete, uso del percorso effettivo rispetto alla linea diretta, percentuale di blocchi involuppati da un certo angolo, ecc. Di conseguenza, l'applicabilità dell'angolo α è limitato da questi problemi e i valori devono essere calibrati per ogni singolo caso di studio.

Dati di input:

- geometria del versante: DEM (la risoluzione non è molto importante);
- aree sorgenti: punti, linee o poligoni;
- parametri: angolo α , (opzionale) apertura del cono rispetto alla direzione della pendenza (per approccio 2D).

Dati di output:

- distanza di massima propagazione o zona interessata dalla massima propagazione;
- (opzionale) numero di celle che potenzialmente contribuiscono alla caduta in ogni cella, velocità calcolata con l'approccio della linea di energia.

Vantaggi:

- bassa sensibilità alla risoluzione del DEM;
- facile implementazione su aree di grandi dimensioni;
- facile zonazione della "susceptibilità".

Svantaggi

- necessità di calibrazione sito per sito dell'angolo α , soprattutto in relazione all'altezza della parete;
- impossibilità di assegnare un susceptibilità di innesco.

2.2.1.2 Angolo β (minimum shadow angle)

L'angolo β si basa sull'idea che la distanza è controllata dalla propagazione lungo la scarpata, poiché l'energia cinetica acquisita durante la caduta dalla roccia è in gran parte persa al primo impatto con la scarpata (Evans S.G. e Hungr O., 1993). Il vantaggio dell'angolo β è che è meno sensibile alla altezza della parete rocciosa. Tuttavia, i valori riportati in letteratura sono significativamente diversi anche per questo angolo: 28-30 ° (Lied, 1977), 17 ° (Domaas, 1994), 31,5 ° (Meißl, 1998), 22 ° (Wieczorek et al, 1998.), 24 ° -27,5 (Evans S.G. e Hungr O., 1993), 25,5 ° (Copons e Villaplana, 2008), 21 ° (Holm e Jakob, 2009).

Dati di input:

- geometria del versante: DEM (la risoluzione non è molto importante);
- apice della scarpata: punti, linee o poligoni;
- parametri: angolo β , (opzionale) apertura del cono rispetto alla direzione della pendenza (per approccio 2D).

Dati di output:

- distanza di massima propagazione o zona interessata dalla massima propagazione;
- (opzionale) numero di celle che potenzialmente contribuiscono alla caduta.

Vantaggi:

- bassa sensibilità alla risoluzione del DEM;
- facile implementazione su aree di grandi dimensioni;
- facile zonazione della "susceptibilità";
- limitata sensibilità all'altezza della parete.

Svantaggi:

- impossibilità di assegnare un susceptibility di innesco.

2.2.2 Modellazione 2D

I modelli 2D simulano il movimento (caduta, rimbalzo e rotolamento) dei blocchi lungo un profilo (Bozzolo e Pamini, 1986; Pfeiffer e Bowen, 1989; Stevens, 1998; Jones et al, 2000). Analizzando grandi superfici è necessario individuare una serie di profili "rappresentativi" ed eseguire una simulazione per ciascun profilo (Fig. 7). I risultati possono essere spazialmente distribuiti tramite interpretazione geomorfologica o mediante interpolazione dei dati in uscita sull'energia o sulla frequenza del blocco arrestato lungo il pendio 2D.

Dati di input:

- geometria del versante: sezioni trasversali lungo i percorsi più probabili;
- materiali del versante: coefficienti di restituzione per l'impatto e di attrito per il rotolamento. Possibilità di introdurre una variazione stocastica ai parametri.

Dati di output:

- traiettorie 2D, profili di velocità, distribuzione dei punti di arresto.

Vantaggi:

- facile implementazione con profili di pendenza;
- facile visualizzazione di impatti e rimbalzi lungo il profilo.

Svantaggi:

- non possono essere considerati gli effetti 3D;
- difficoltà di interpolare tra i diversi profili;
- soggettività nella scelta della posizione del profilo.

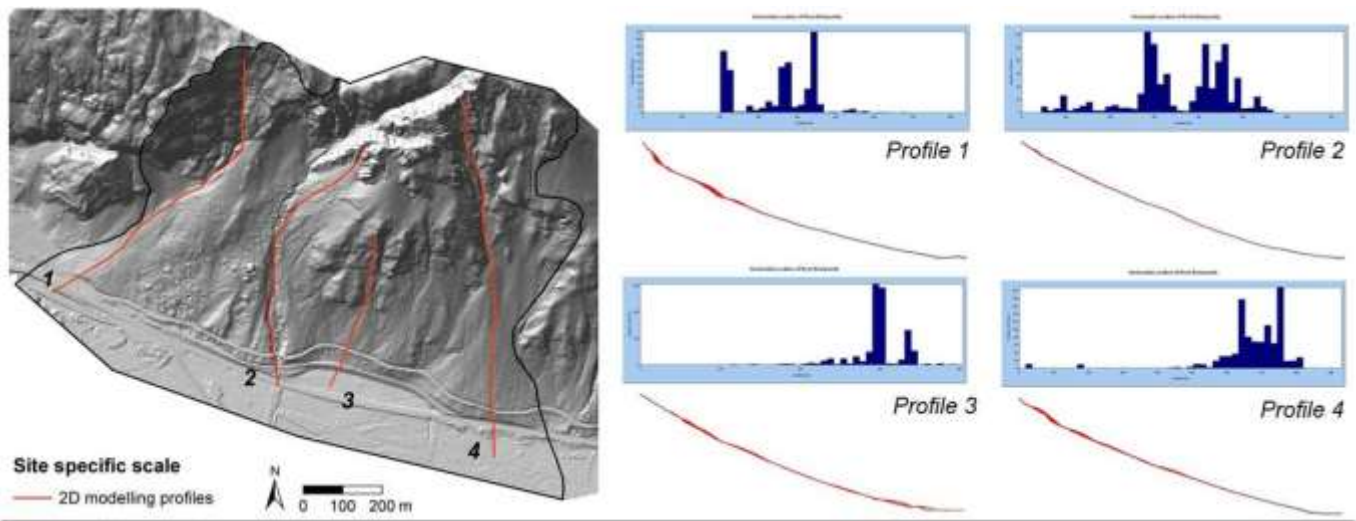


Figura 7. Esempio di modellazione 2D sito specifica (**S_R**) per una sub-area della zona di studio di Villa Santina (Friuli Venezia Giulia).

2.2.3 Modellazione 3D

I modelli 3D sono in grado di simulare il movimento di un blocco lungo un pendio includendo la dispersione laterale delle traiettorie a causa della complessità morfologica (Descoedres e Zimmermann, 1987; Guzzetti et al, 2002; Agliardi e Crosta, 2003; Crosta et al, 2004; Dorren et. al, 2006; Lan et al, 2007). I risultati sono distribuiti su tutta l'area di studio, senza necessità di interpolazione dei dati (Fig. 8). La modellazione 3D richiede una copertura completa spaziale dei dati, che in generale sono più complessi e difficili da maneggiare. L'affidabilità di questi modelli dipende dalla qualità degli algoritmi utilizzati per la simulazione di processi fisici, dalle ipotesi introdotte, dalla disponibilità e qualità dei dati, ecc..

Dati di input:

- geometria del versante: DEM (la risoluzione è molto importante);
- aree sorgenti: layer raster con localizzazione delle celle di origine;
- parametri: coefficienti di restituzione, coefficiente di attrito volvente, massa, volume e forma del blocco, altri parametri per fenomeni complessi.

Dati di output:

- traiettorie 3D;
- statistiche per ogni cella (ad esempio per numero di transiti, velocità, altezza, energia).

Vantaggi:

- simulazione di effetti 3D;
- possibilità di effettuare una valutazione quantitativa dei pericoli;
- facile zonazione della pericolosità;
- possibilità di simulare fenomeni complessi;

Svantaggi:

- forte sensibilità alla risoluzione del DEM;
- necessità di calibrazione dei parametri che sono spesso sconosciuti;
- necessità di algoritmi robusti e significativi;
- calibrazione più difficile.

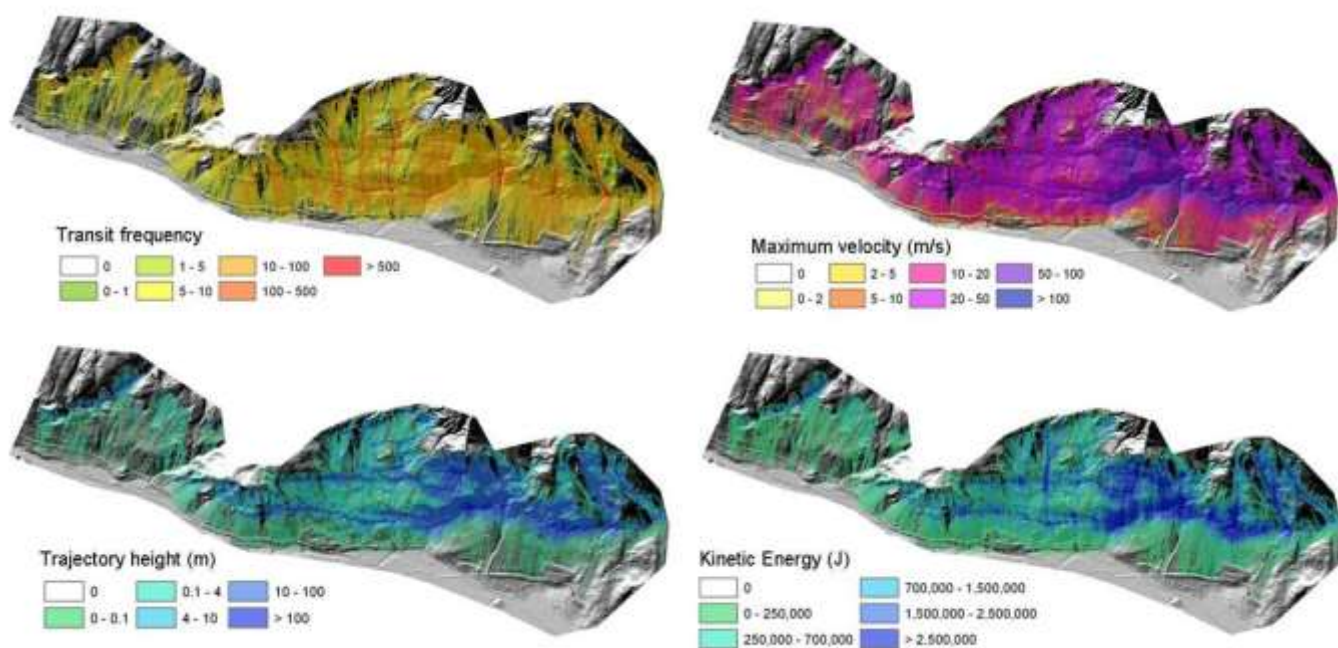


Figura 8. Esempio di modellazione 3D a scala locale (ref: L_R) per l'area di studio di Timau (Friuli Venezia Giulia).

2.3 Zonazione della suscettibilità

2.3.1 Massimo espandimento, zonazione dell'area di massimo espandimento (R_S1, R_S2)

La forma più semplice di zonazione della suscettibilità da caduta massi è la mappatura della massima area potenzialmente interessata da caduta massi. In questo caso non viene fornita una zonazione ulteriore basata sulla probabilità di transito e non si dice nulla sulla distribuzione spaziale dell'intensità (ad esempio velocità, energia cinetica, altezza). Un'ulteriore valutazione della suscettibilità richiede una stima della frequenza relativa di transito dei blocchi in un certo punto del versante. Questa informazione può essere facilmente ottenuta utilizzando strumenti di modellazione 2D e 3D. In generale, una semplice valutazione del massimo espandimento della caduta massi (senza ulteriore zonazione) è considerata utile solo come "requisito minimo" per studi su scala regionale, dove la modellazione 2D non è fattibile e la modellazione 3D potrebbe essere troppo onerosa per le finalità di una semplice analisi preliminare della caduta massi. In questi casi, una prima stima di caduta massi può essere effettuata utilizzando l'approccio del cono d'ombra, con o senza una semplice zonazione in base al numero di "coni d'ombra" (ciascuno proveniente da una cella sorgente) che insistono su ogni punto della scarpata (Jaboyedoff e Labiouse, 2003).

2.3.2 Suscettibilità all'innescò + frequenza di transito (L_S)

Un approccio tipico di valutazione della suscettibilità tramite l'utilizzo di modelli 2D è l'analisi della percentuale di blocchi che passano oltre una certa distanza. Questo approccio permette di tracciare linee di pari "probabilità" di transito o di arresto interpolando tra più profili i risultati di modelli 2D. Il principale limite di tale approccio è che un modello 2D non può simulare la possibile deviazione laterale delle traiettorie, sopravvalutando di fatto la frequenza dei blocchi che passano attraverso ogni profilo. Utilizzando modelli 3D è possibile definire una frequenza di transito per ogni elemento di scarpata tenendo conto della possibile deviazione laterale delle traiettorie causata da morfologie complesse. Normalmente l'analisi della frequenza di transito viene eseguita simulando un gran numero di blocchi da ogni area sorgente ed introducendo un'incertezza sui parametri (volume del blocco, coefficienti di restituzione, coefficienti di attrito volvente, ecc.) attraverso un approccio stocastico.

Un esempio di questo approccio è dato dalla metodologia RHAP (Mazzacolla e Sciesa, 2000). Concepito per l'utilizzo con modelli 2D, il metodo RHAP si applica a frane di crollo sia in singoli blocchi sia in massa con volumi superiori a 1000 m³, ed è adatto per studi a scala locale. Il metodo permette di classificare la suscettibilità da crollo in modo relativo per un singolo sito. Per questo motivo, suscettibilità calcolate per siti diversi non sono comparabili in valore assoluto. La metodologia consente di combinare un'zonazione euristica della suscettibilità all'innescò con un'analisi 2D della propagazione dei blocchi. Per ciascuna zona sorgente caratterizzata da un certo valore di suscettibilità all'innescò, vengono individuate uno o più traiettorie rappresentative per eseguire simulazioni 2D con approccio stocastico. Le simulazioni sono effettuate considerando i volumi modali di blocchi e la forma tipica, mentre la taratura dei coefficienti di restituzione è effettuata utilizzando i dati storici o l'estensione di depositi di detrito alla base delle pareti. Dalla percentuale di blocchi che passa ad una distanza determinata il versante è suddiviso in 4 zone con diversi livelli preliminari di suscettibilità: 4 (75% dei blocchi), 3 (90%), 2 (100%), 1 (estensione di blocchi eccezionali). La classificazione preliminare viene modificata in base alla suscettibilità all'innescò in modo semplice. Quest'ultima viene riclassificata in tre classi di attività: bassa, media, alta. Questa classificazione viene poi utilizzata per modificare la mappa preliminare di suscettibilità incrementando (attività alta) o decrementando (attività bassa) il grado di suscettibilità finale.

2.3.3 Suscettibilità all'innesco + frequenza di transito + energia (L_S)

Utilizzando modelli 2D o 3D è possibile calcolare una frequenza di transito per ciascun punto del versante (di solito un pixel), nonché una serie di descrittori di intensità (per es. velocità, energia cinetica, altezza). Normalmente, l'analisi viene eseguita simulando un gran numero di blocchi di partenza da ogni area sorgente, e introducendo l'incertezza di parametri (volume del blocco, coefficienti di restituzione, coefficienti di attrito volvente, ecc.) attraverso un approccio stocastico. Un approccio concettualmente simile (per es. combinando la frequenza di transito e l'intensità) è stato implementato con la modellazione 2D da Jaboyedoff et al. (2005), al fine di consentire la valutazione della suscettibilità ai sensi della normativa svizzera.

Nell'approccio RHV (Rockfall Hazard Vector - Crosta e Agliardi, 2003), la suscettibilità in un determinato punto si presume essere una funzione della frequenza di transito, dell'energia cinetica del blocco e dell'altezza della traiettoria. L'approccio valuta così la suscettibilità, tenendo conto sia della frequenza sia dell'intensità. I parametri richiesti possono essere calcolati per ciascun punto eseguendo una modellazione 3D di propagazione a un livello di dettaglio adeguato (a seconda della scala di analisi).

La metodologia segue questi step:

- individuazione delle sorgenti potenziali di caduta massi e caratterizzazione della loro suscettibilità all'innesco;
- modellazione della propagazione della caduta massi utilizzando uno strumento di modellazione 3D;
- estrazione e riclassificazione per ogni cella del modello di: frequenza di transito (c), altezza massima (h) ed energia cinetica media o massima (k) (Fig. 9);
- calcolo del modulo dell'RHV definito come:

$$|RHV| = \sqrt{c^2 + e_c^2 + h^2}$$

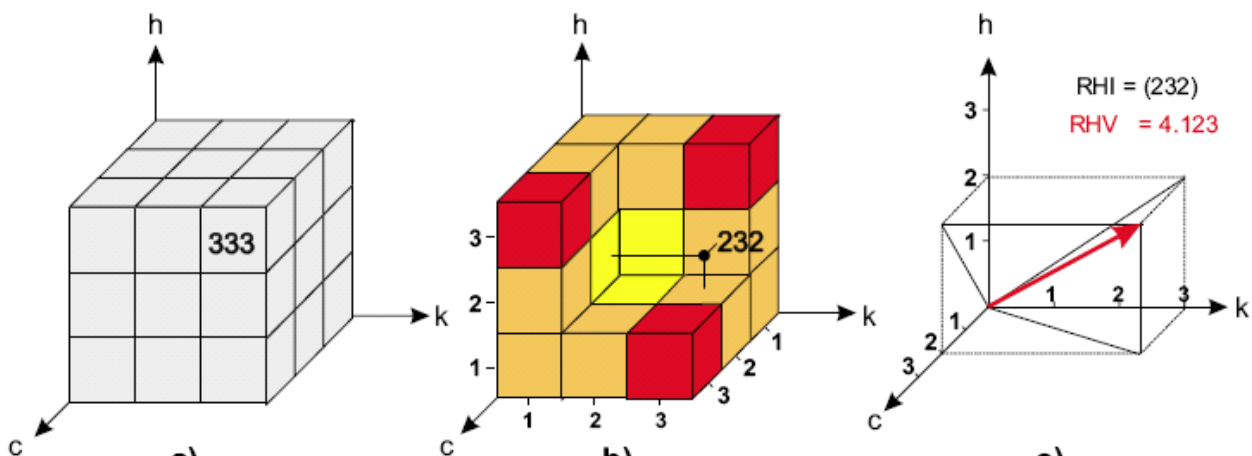


Figura 9. definizione dei parametri per il metodo RHV (da Crosta e Agliardi, 2003).

class	c (normalised)		k (kJ)	h (m)
	regional scale	local scale		
1	< 0.2	< 0.01	≤ 700	≤ 4
2	0.2 – 1	0.01 – 0.1	700 – 2500	4 – 10
3	> 1	> 0.1	≥ 2500	≥ 10

Tabella 10. Esempio di Riclassificazione dei parametri nel metodo RHV (da Crosta e Agliardi, 2003).

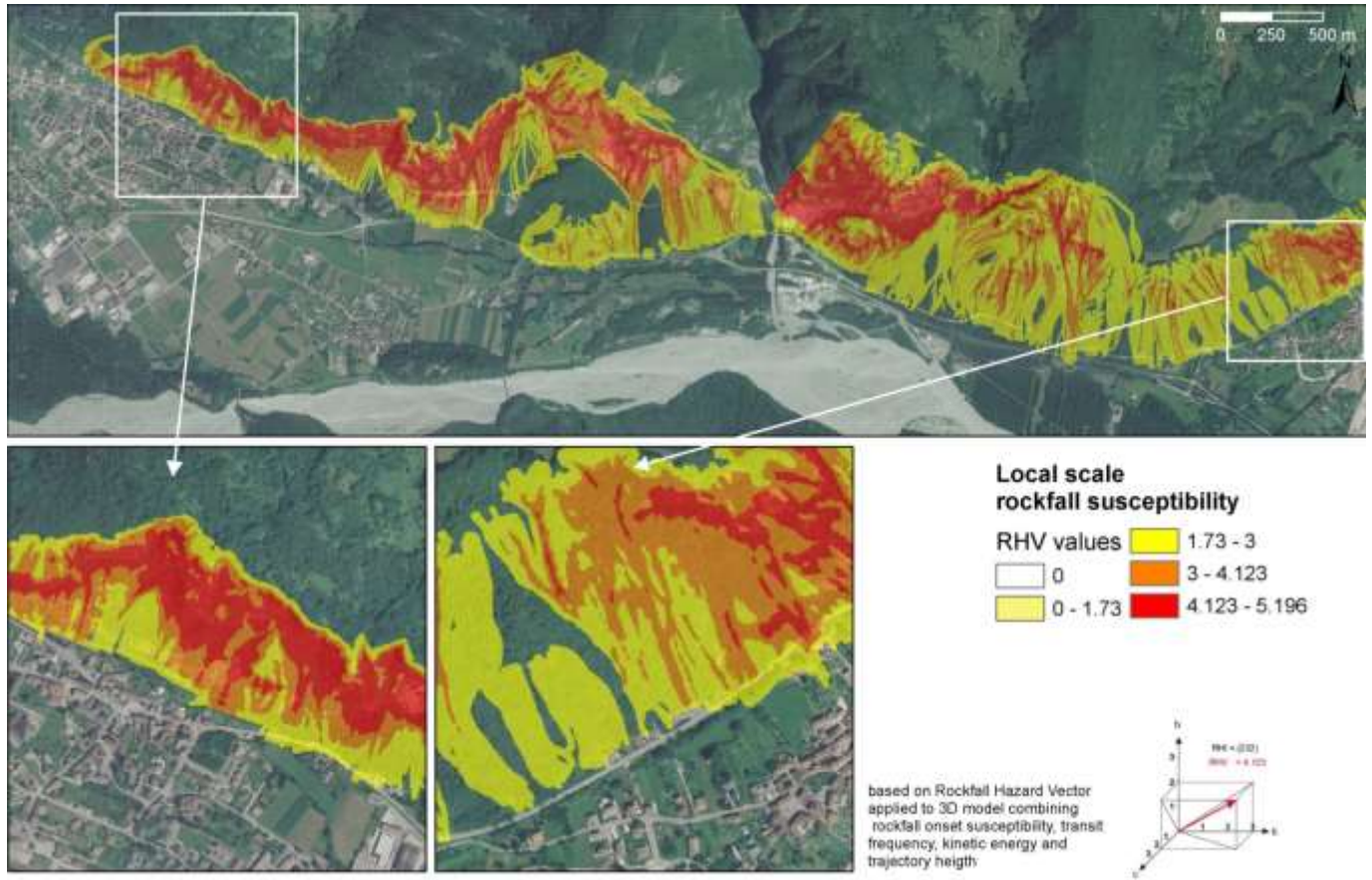


Figura 10. Esempio di zonazione della suscettibilità a scala locale con l'approccio dell' RHV (**L_S**) per l'area di studio di Villa Santina (Friuli Venezia Giulia).

2.4 Zonazione della pericolosità

Il passaggio che porta alla definizione della pericolosità e alla sua successiva zonazione è la ricorrenza temporale di un fenomeno che resta l'incognita fondamentale e più difficile da determinare.

2.4.1 Frequenza attesa associata ad uno scenario di riferimento

L'approccio più semplice e semplicistico per la valutazione della probabilità temporale è di assegnare una frequenza attesa ad uno scenario che è considerato il più "rappresentativo" per l'area di studio. Questa è una forte semplificazione, poiché è ben noto che la frequenza dipende dal volume della frana.

La frequenza prevista può essere definita utilizzando approcci euristici o statistici.

2.4.1.1 Approccio euristico (L-H1, L-H2, S_H1)

La valutazione euristica della probabilità viene eseguita tramite una stima soggettiva della frequenza degli eventi basata su:

- conoscenza approfondita delle condizioni geologiche (sismicità, strutture, litologia, ecc.);
- frequenza degli eventi passati;
- somiglianza con altre aree per le quali sono disponibili dati.

Un esempio di stima euristica della probabilità temporale è l'approccio utilizzato nella metodologia BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 1998). Questa metodologia richiede una stima della frequenza e dell'intensità, consentendo così di eseguire, anche se in maniera semplificata, una valutazione della pericolosità reale. La metodologia BUWAL richiede in primo luogo l'individuazione di aree potenzialmente interessate da uno scenario di caduta massi. Normalmente è considerato un solo scenario, essendo questo lo scenario più "rappresentativo". Per questo scenario, viene stimata l'intensità in termini di volume prevedibile e velocità, utilizzando tabelle che permettono di assegnare classi di intensità in base a intervalli di valori di questi due parametri. Per quanto riguarda la velocità, i fenomeni di caduta massi appartengono sempre alla classe 3 secondo la classificazione BUWAL. Per lo scenario "rappresentativo", la probabilità è stimata utilizzando quattro classi di tempo di ricorrenza, T_r : alto ($T_r < 30$ anni), medio ($30 < T_r < 100$ anni), basso ($100 < T_r < 300$ anni), molto basso ($T_r > 300$ anni). La tabella 11 fornisce un collegamento tra l'attività delle frane e il tempo di ricorrenza previsto. La notevole ampiezza degli intervalli di frequenza consente di assimilare l'incertezza nella stima.

Classe di frequenza	Tempo di ricorrenza, T_r (yr)	Attività
1	< 30	Frana attiva o quiescente con elevata frequenza di riattivazione
2	30 – 100	Frana quiescente con media frequenza di riattivazione
3	100 – 300	Frana quiescente con bassa frequenza di riattivazione
4	> 300	Frana relitta

Tabella 11. Definizione delle classi di frequenza nella metodologia BUWAL (1998).

Vantaggi:

- il metodo è semplice;
- il metodo consente di assegnare frequenze diverse a diversi settori dell'area di studio.

Svantaggi:

- il metodo è soggettivo;
- data l'incertezza, la frequenza è più o meno stimata per le classi dei tempi di ricorrenza utilizzando un'ampia gamma di valori.

Applicabilità:

- il metodo richiede un'esperienza diretta dell'esperto per quanto riguarda problemi di caduta massi in una certa area. Pertanto esso è adatto per analisi su scala locale, mentre quando viene applicato a studi su scala regionale la stima diventa molto incerta e arbitraria.

Nelle procedure di classificazione delle pericolosità nei Piani di Assetto Idrogeologico (PAI) attualmente viene utilizzato un metodo BUWAL modificato (ADBVE, 2007)¹.

2.4.1.2 Statistiche dei dati storici (L_H2)

Un approccio statistico è basato sull'analisi di eventi storici volti a identificare un tempo medio di ricorrenza indipendentemente dal volume. Poiché il numero di eventi solitamente disponibili è limitato, le statistiche devono essere calcolate utilizzando dati di regioni di grandi dimensioni, supponendo che la frequenza sia uguale per l'intera area.

Vantaggi:

- il metodo è oggettivo e basato su dati;
- il metodo è semplice.

Svantaggi:

- gli eventi di caduta massi sono raramente raccolti per piccoli volumi e per eventi che si verificano nelle zone rurali, senza danni alle infrastrutture, di conseguenza la frequenza media è normalmente sottovalutata;
- la frequenza è assunta costante su grandi aree.

Applicabilità:

- il metodo è adatto per grandi aree, in cui il numero di eventi è sufficiente per stimare un valore affidabile del tempo di ritorno (sebbene sottovalutato).

¹ Le pericolosità PAI sono suddivise in quattro classi ad intensità crescente da P1 a P4, cui corrispondono vincoli crescenti nell'uso del territorio.

2.4.2 Relazioni Magnitudo Frequenza (MF) (S-H2)

Al fine di ottenere una valutazione completamente quantitativa della pericolosità legata al verificarsi di caduta massi, la frequenza annuale di eventi deve essere stimata con riferimento a diversi scenari di magnitudo (volumi), come normalmente effettuato per gli eventi alluvionali o i terremoti. Questo richiede di conoscere o assumere la distribuzione di magnitudo-frequenza degli eventi di caduta massi in una data area caratterizzata da specifiche caratteristiche geologiche e geomorfologiche. Per la caduta di massi, alcuni autori (Hungry et al, 1999; Dussauge et al, 2003; Malamud. Et al, 2004) hanno dimostrato che la relazione di magnitudo-frequenza cumulata (MCF) degli eventi per j -esime classi di volume può essere descritta da una legge di potenza nella forma:

$$\log N(V) = N_0 + b \log V$$

dove $N(V)$ è la frequenza cumulata annuale di eventi di caduta massi superiori a un dato volume, N_0 è il numero totale annuo di eventi di caduta massi, e b è l'esponente della legge di potenza. La frequenza annuale degli eventi di caduta massi in una data classe di volume può essere derivata dalle curve Magnitudo Frequenza Cumulate (MCF) sottraendo le frequenze cumulate per ciascuna classe di volume considerata (Hungry et al., 1999). I parametri delle curve di MCF non hanno alcun significato universale, anche se l'esponente b varia normalmente in un range piuttosto stretto, tra -0,7 e -0,4 (Hungry et al, 1999; Dussauge et al, 2003). La corretta parametrizzazione della curva MCF dovrebbe essere basata su un inventario completo di dati storici di eventi. Purtroppo database storici e inventari di eventi di frana sono raramente disponibili, e una raccolta ad hoc può essere impraticabile per aree di grandi dimensioni. I valori di volume riportati nei database storici possono essere incompleti o stimati con una certa approssimazione (es: ordine di grandezza, Hungry et al., 1999). Inoltre, i dati di inventario possono essere incompleti sia nello spazio (ossia i dati si riferiscono solo a sotto-aree specifiche) che nel tempo (ossia i dati si riferiscono soltanto a una determinata finestra di tempo).

Quando disponibili, le relazioni di magnitudo frequenza forniscono un mezzo per stimare il tempo di ritorno di frane che superano una determinata magnitudo/volume, $T(V) = 1 / N(V)$, e quindi la probabilità che un certo numero di eventi possa verificarsi in un dato intervallo di tempo, permettendo così una completa valutazione probabilistica della pericolosità da frana.

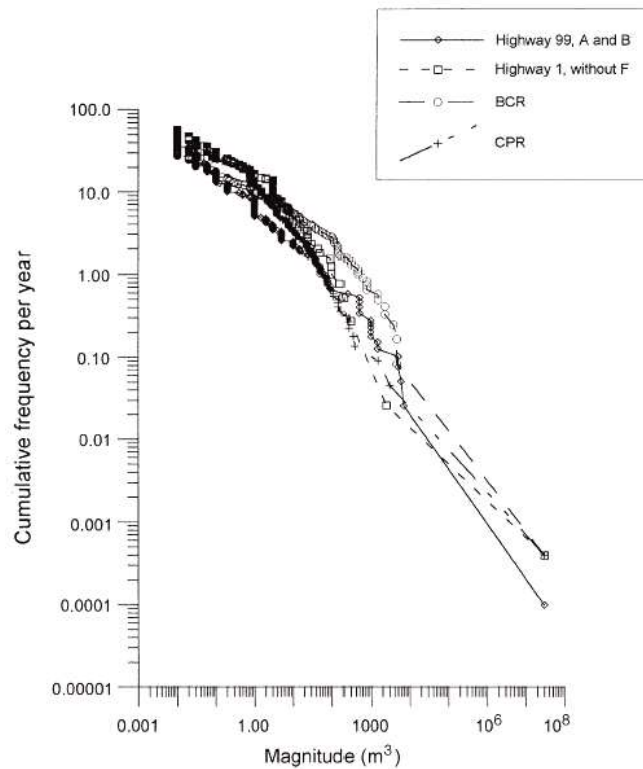


Figura 11. Esempio di curve di Magnitudo Frequenza Cumulate (magnitudo-cumulative frequency, MCF) per la caduta massi (Hungry et al., 1999).

2.4.3 Combinazione della frequenza con la suscettibilità: pericolosità da crollo

Per valutare la pericolosità da caduta massi (compresa la frequenza attesa di eventi) a diversi livelli (vedi precedenti paragrafi) è necessario combinare la frequenza di evento con la suscettibilità all'innesco e al transito, al fine di ottenere mappe di pericolosità che considerino tutti questi aspetti.

Sono disponibili diversi approcci possibili (a diversi livelli di complessità):

- 1) produzione di mappe basate su scenari di suscettibilità, modellando volumi di blocchi corrispondenti a determinati tempi di ritorno (solo un "volume di progetto" se è disponibile solo una stima euristica o statistica della frequenza, diversi volumi se è disponibile una curva Magnitudo-Frequenza (MF));
- 2) adattamento di un approccio tipo RHAP e RHV, scalando la probabilità di transito in ogni punto del pendio con la probabilità di innesco corrispondente a determinati tempi di ritorno (moltiplicazione);
- 3) modifica dell'approccio BUWAL, come già proposto da alcune Amministrazioni e Autorità di bacino in Italia al fine di incorporare (come dati di input matrice) la frequenza degli eventi (stimata in modo euristico, statistico o tramite curve MF) e l'intensità (energia cinetica) ottenuta da modellazione numerica con volumi coerenti con le frequenza di innesco. In questo caso l'uso separato del "Buwal modificato" della tabella della velocità e della tabella della dimensione dei blocchi non sarebbe necessario perché verrebbe utilizzata direttamente l'energia cinetica. Questo approccio potrebbe anche consentire l'utilizzo del metodo per ogni unità di territorio (per es. cella elementare) in modo da rappresentare la variabilità dell'intensità di caduta massi lungo il pendio.

Bibliografia

- Agliardi F. and Crosta G.B., 2003: High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(4), 455-471
- Abellán A., Vilaplana J.M., Martínez J., 2006: Application of a long-range Terrestrial Laser Scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain). *Engineering Geology*, 88, 136–148
- ADBVE (Autorità di Bacino dei fiumi dell'alto Adriatico), 2007: Progetto di Piano stralcio per l'assetto idrogeologico dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Piave, Brenta-Bachiglione. Relazione tecnica, adottata con delibera del comitato istituzionale n.4 del 19 giugno 2007, 113-118.
- Baillifard F., Jaboyedoff M, and Sartori M, 2003: Rockfall hazard mapping along a mountainous road in CH using a GIS-based parameter rating approach. *NHESS*, 3, 431–438
- Bäk R., Kranitz F., Torresin M., Mariani R., 2011: Minimal standard for creation of hazard maps for land slides and rock fall as a tool for preventive disaster reduction. INTERREG IV A Italy/Austria, Project 1381-302, Akronym MassMove, Wildbach- und Lawinenverbau, 166, 176 - 197
- Bozzolo D. and Pamini R., 1986: Simulation of rock falls down a valley side. *Acta Mechanica*, 63, 113–130
- BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft), 1998: Amt für Raumplanung Graubünden. Ufficio Cantonale di Pianificazione. Grundlage zur FAN-Tagung vom 13-16 October 1998 in Ittingen, 15 pp.
- Cai M., Kaiser P.K., Uno H., Tasaka Y., Minami M., 2004: Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 3-19
- Copons R., Vilaplana J.M., 2008: Rockfall susceptibility zoning at a large scale: from geomorphological inventory to preliminary land use planning. *Engineering Geology*, 102, 142–151
- Copons R., Vilaplana J.M., Linares R., 2009: Rockfall travel distance analysis by using empirical models (Solà d'Andorra la Vella, Central Pyrenees). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 6, 2107-2118
- Corominas J., 1996: The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Can. Geotech. J.*, 33, 260–271
- Crosta G.B. and Agliardi F., 2003: A new methodology for physically-based rockfall hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 407–422
- Crosta G. B., Agliardi, F., Frattini P. and Imposimato S., 2004: A three-dimensional hybrid numerical model for rockfall simulation. *Geophysical Research Abstracts*, 6, 04502
- Crosta G.B., Frattini P., 2008: Rainfall induced landslides and debris flows. *Hydrological Processes*, 22, 473-477, [doi:10.1002/hyp.6885](https://doi.org/10.1002/hyp.6885)
- Descoedres F., Zimmermann T., 1987: Three-dimensional dynamic calculation of rockfalls. In Herget, G. and Vongpaisal, S., editors, *Proceedings of the Sixth International Congress on Rock Mechanics*. Montreal. Rotterdam, Balkema, 37–42

- Domaas U., 1994: Geometrical methods of calculating rockfall range, Norwegian Geotechnical Institute, Report 585910-1, 21 pp.
- Dorren L.K.A., 2003: A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography*, 27, 1, 69–87
- Dorren L.K.A., Berger, F., Putters, U.S., 2006: Real size experiments and 3D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6, 145–153
- Dussauge C., Grasso, J.R., Helmstetter, A., 2003: Statistical analysis of rockfall volume distributions: implications for rockfall dynamics. *Journal of Geophysical Research*, 108(B6), 2286
- Evans S.G., Hungr O., 1993: The assessment of rock fall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 30, 620–636
- Fratini P., Crosta G.B., Carrara A., Agliardi F., 2008: Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically-based approaches. *Geomorphology*, 94, 419-437
- Günther A, Carstensen A, and Pohl W, 2004: Automated sliding susceptibility mapping of rock slopes, *NHESS*, 4, 95–102
- Günther A., 2003: SLOPEMAP: programs for automated mapping of geometrical and kinematical properties of hard rock hill slopes. *Computers & Geosciences* 29, 865–875
- Guzzetti F., Crosta G.B, Detti R. and Agliardi F., 2002: STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Computers and Geosciences*, 28 (9), 1081-1095
- HARP, E. L., and NOBLE, M. A. (1993). An engineering rock classification to evaluate seismic rock-fall susceptibility and its application to the Wasatch Front. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 30(3), 293-319.
- Heim A., 1932: *Bergsturz und Menschenleben*. Zurich, Fretz and Wasmuth Verlag, 218 pp.
- Heinimann H.R., Holtenstein K., Kienholz H., Krummenhacher B., Mani P., 1998: *Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren*. Umwelt-Materialien 85, Naturgefahren, BUWAL, Bern (in German)
- Hoek E., Bray J.W., 1981: *Rock Slope Engineering* (5th edn), The Institution of Mining and Metallurgy, London
- Holm K., Jakob M., 2009: Long rockfall runout, Pascua Lama, Chile. *Canadian Geotechnical Journal*, 46, 225–230
- Hungr O., 1995: A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, 32, 610–623
- Hungr O., Evans S.G. 1988: Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides*, Lausanne, Switzerland, 1, 685–690
- Hungr O., Evans S.G. and Hazzard J., 1999: Magnitude and frequency of rockfalls and rock slides along the main transportation corridors of south-western British Columbia. *Canadian Geotechnical Journal*, 36, 224–238
- Jaboyedoff M., 2003: Design of a pseudo-3D topographic analysis computer program: COLTOP-3D. Project Proposal, PROJECT – 01, Quanterra, www.quanterra.org.
- Jaboyedoff M., Dudt J.P., and Labiouse V., 2005: An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 621–632

- Jaboyedoff M. and Labiouse V., 2003: Preliminary assessment of rockfall hazard based on GIS data. In: 10th International Congress on Rock Mechanics ISRM 2003 – Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, South Africa, 575–578
- Jones C.L., Higgins J.D., Andrew R.D., 2000: Colorado Rock fall Simulation Program Version 4.0. Colorado Department of Transportation, Colorado Geological Survey, 127 pp.
- Keylock C. and Domaas U., 1999: Evaluation of topographic models of rockfall travel distance for use in hazard applications. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 31(3), 312–320
- Lan H.X., Martin C.D. and Lim C.H., 2007: RockFall analyst: a GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modelling. *Computers & Geosciences*, 33, 262–279
- Lied K., 1977: Rockfall problems in Norway. In: *Rock fall dynamics and protective work effectiveness*, 90. Bergamo, Italy, ISMES, 51-53
- Matheson G.C., 1983: *Rock Stability Assessment in Preliminary Site Investigations - Graphical Methods*. Transport and Road Research Laboratory, Report 1039, Crowthorne, Berkshire
- Mazzoccola D., and Sciesa E., 2000: Implementation and comparison of different methods for rockfall hazard assessment in the Italian Alps. *Proc. 8th Int. Symp. on Landslides*, Cardiff, Balkema, Rotterdam, 2, 1035-1040
- Malamud B.D., Turcotte D.L., Guzzetti F. and Reichenbach P., 2004: Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29 (6), 687-711
- Meißl G., 2001: Modelling the runout distances of rockfalls using a geographic information system. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 125, 129-137
- Meißl G., 1998: Modellierung der Reichweite von Felsstürzen. Fallbeispiele zur GISgestützten Gefahrenbeurteilung aus dem Beierischen und Tiroler Alpenraum. *Innsbrucker Geografischen Studien* 28. Ph.D. Thesis, Universität Innsbruck, Innsbruck, 249 pp.
- Onofri R. e Candian C., 1979: Indagine sui limiti di massima invasione dei blocchi rocciosi franati durante il sisma del Friuli del 1976. Regione Autonoma Friuli-Venezia-Giulia, CLUET, 42 pp.
- Pfeiffer T.J., Bowen T.D., 1989: Computer simulations of rockfalls. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 26, 135–146
- Stevens W., 1998: *RockFall: a tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls*. M.A.Sc. Thesis. Department of Civil Engineering, University of Toronto. Canada, 105 pp.
- Tianchi L, 1983: A mathematical model for predicting the extent of a major rockfall. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 24, 473-482.
- Toppe R., 1987: Terrain models as a tool for natural hazard mapping. In *Avalanche Formation, Movement and Effects*, ed. B. Salm and H. Gubler. International association of Hydrological Sciences, Wallingford, UK, Publication, 162, 629–638
- Wieczorek G.F., Snyder J.B., 1999: Rock falls from Glacier Point above Camp Curry, Yosemite National Park, California. *US Geol. Surv., Open-File Report*, 13 99–385