



Accordo

tra

Segretariato Regionale del Ministero dei Beni e delle
Attività Culturali e del Turismo della Liguria

e

Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica
del Consiglio Nazionale delle Ricerche

RAPPORTO SU “AZIONE 2 – ATTIVITÀ A: IDENTIFICAZIONE DELLA MODELLISTICA OTTIMALE PER I DIFFERENTI TIPI DI DISSESTO IDROGEOLOGICO”



AUTORI

Il documento è stato redatto da:

- Dott. Mauro Rossi
- Ing. Silvia Peruccacci
- Dott.ssa Maria Teresa Brunetti



INDICE

AUTORI	2
INDICE.....	3
SOMMARIO.....	4
DOCUMENTI APPLICABILI E DI RIFERIMENTO	5
ABBREVIAZIONI E ACRONIMI	6
1 LE FRANE.....	7
1.1 Classificazione delle frane.....	7
1.1.1 Tipologia di movimento	7
1.1.2 Velocità	9
1.1.3 Fasi	10
1.2 Fattori ambientali che controllano la franosità	10
1.3 Danni prodotti dalle frane	12
2 MODELLISTICA DELLE FRANE	13
2.1 Stato dell'arte	13
2.2 Scala e tipologia della modellistica.....	18
2.3 Modellistica per tipologia di frana	20
3 MODELLISTICA A SCALA REGIONALE	22
3.1 Stima della suscettibilità e della pericolosità da frana	22
3.2 Soglie di pioggia	25
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	29



SOMMARIO

Gli obiettivi del documento sono quelli di: (i) identificare la tipologia e le caratteristiche dei movimenti franosi, (ii) definire e analizzare criticamente le diverse tecniche di modellistica utilizzabili per diverse tipologie di frana.

Il documento descrive sinteticamente le diverse tipologie di frana, le loro principali caratteristiche e la loro classificazione, elencando i principali fattori ambientali che ne controllano l'occorrenza e gli impatti/danni che possono produrre (Capitolo 1).

La modellistica delle frane è fondamentale per la comprensione dei movimenti franosi, dei loro meccanismi di innesco e per la mitigazione dei rischi ad essi connessi. In generale, i modelli possono essere differenti in funzione (i) del tipo di risultato modellistico/previsione modellistica attesa, (ii) del tipo di approccio modellistico che si intende utilizzare, (iii) della scala di applicazione del modello, (iv) della tipologia di fenomeno franoso analizzato. Tali aspetti sono descritti nel Capitolo 2.

Nel Capitolo 3 sono descritti in dettaglio gli elementi fondamentali e le principali criticità legate alla modellistica da realizzare nelle aree di studio in relazione alla tipologia di fenomeni presenti.

Il Capitolo 4 riporta la bibliografia di riferimento.



DOCUMENTI APPLICABILI E DI RIFERIMENTO

- DA-001 Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri, del 27 febbraio 2004. Indirizzi operativi per la gestione organizzativa e funzionale del sistema di allertamento nazionale e regionale per il rischio idrogeologico ed idraulico ai fini di protezione civile. Supplemento ordinario n. 39 alla Gazzetta Ufficiale n. 59 del 11 marzo 2004
- DA-002 Accordo di Programma quadro tra la Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento della Protezione Civile, e il Consiglio Nazionale delle Ricerche, del 8 giugno 2011.
- DA-003 Accordo tra il Segretariato Regionale del Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo della Liguria e l'istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica, del Consiglio Nazionale delle Ricerche. Firmata digitalmente il 15 febbraio 2017. Oggetto: Sito UNESCO "Porto Venere, Cinque Terre e Isole (Palmaria, Tino e Tinetto)" Progetto Paesaggi Sicuri: strategie di prevenzione e adattamento.
- DR-001 Rapporto su "Azione 1 – attività a: raccolta e organizzazione dei dati e delle informazioni disponibili nelle banche dati regionali, degli enti e degli istituti di ricerca che hanno cooperato nel tempo con la regione Liguria circa il censimento dei fenomeni franosi e delle aree di instabilità nella zona del sito UNESCO". Accordo tra il Segretariato Regionale del Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo della Liguria e il CNR IRPI. Versione 1.1, dell'8 marzo 2017, 5 pp.



ABBREVIAZIONI E ACRONIMI

AVI	Archivio Aree Vulnerate Italiane
CNR	Consiglio Nazionale delle Ricerche
DGPV	Deformazioni Gravitative Profonde di Versante
DTM	<i>Digital Terrain Model</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GNDCI	Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche
IAEG	<i>International Association of Engineering Geology and the Environment</i>
IFFI	Inventario Fenomeni Franosi in Italia
IRPI	Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica
SU	<i>Slope Units</i>
SW	<i>Software</i>
UCU	<i>Unique Condition Units</i>
UCR	Unità Cartografica di Riferimento
UNESCO	<i>United Nations Educational Scientific and Cultural Organization</i>
WP/WLI	<i>Working Party on the World Landslide Inventory</i>



1 LE FRANE

Le frane sono movimenti di una massa di roccia, detrito o terra lungo un versante. Le frane possono essere innescate da numerose cause, sia naturali che antropiche. Fra le cause naturali vi sono le piogge intense e prolungate, la rapida fusione della neve, i terremoti e le eruzioni vulcaniche. Fra le azioni antropiche che possono generare frane vi sono scavi o riporti, cambiamenti nell'uso del suolo, deforestazione, aratura ed irrigazione. La dimensione di una frana può variare per oltre 8 ordini di grandezza, da pochi metri quadri ad alcune migliaia di chilometri quadrati. Il volume delle frane è di difficile misurazione e anch'esso varia sensibilmente da pochi decimetri cubi ad alcuni chilometri cubi. La velocità di un fenomeno franoso può variare da pochi millimetri all'anno ad oltre 100 chilometri all'ora (14 ordini di grandezza). I movimenti franosi possono avvenire singolarmente o in gruppi anche di diverse migliaia di dissesti. Durante un singolo evento meteorologico o sismico il totale dell'area coinvolta dai dissesti può superare i 100 chilometri quadrati.

Uno stesso evento può innescare frane di tipologia ed estensione molto diverse, in funzione dell'assetto geomorfologico e litologico locale, delle condizioni antecedenti e dell'intensità dell'evento. Un fenomeno franoso può evolvere con diverse tipologie di forme o movimento. Si possono avere frane di tipo crollo, scivolamento, colata e di una qualsiasi delle loro possibili combinazioni. Le colate di detrito (*debris flows*) possono anche essere viste come un fenomeno intermedio fra i movimenti franosi e le piene vista la significativa quantità d'acqua coinvolta, mentre le deformazioni gravitative profonde di versante (DGPV) sono una forma intermedia fra i movimenti franosi ed i fenomeni di tettonica gravitativa.

1.1 CLASSIFICAZIONE DELLE FRANE

Data la complessità e la varietà tipologica dei movimenti franosi non esiste un'unica classificazione delle frane. In ambito internazionale si è cercato di adottare una terminologia convenzionale (standard) per la descrizione delle frane, in conformità a quanto suggerito dal *Working Party on Landslides and Other Mass-movements della International Association of Engineering Geology and the Environment (IAEG)* e dal *Working Party on the World Landslide Inventory (WP/WLI)* dell'UNESCO.

1.1.1 Tipologia di movimento

In base alla tipologia del movimento si possono distinguere 6 tipologie principali di frane:

- I Crolli (*Fall*) sono distacchi di terra, detrito o roccia da un pendio ripido o sub-verticale. Il materiale liberato dalla parete procede in caduta libera, per salti, rimbalzi e rotolii. La velocità è da rapida ad estremamente rapida. Assieme alle colate di detrito, i crolli sono le frane che più frequentemente causano vittime.
- I Ribaltamenti (*Topple*) sono prodotti dalla rotazione verso l'esterno del pendio di una massa di terreno, detrito o roccia attorno ad un punto situato sotto il centro di gravità



della massa in movimento. Uscito dal baricentro, il materiale prosegue spesso in caduta, come un crollo.

- Gli Scivolamenti (*Slide*) sono movimenti di una porzione di terreno o di roccia delimitata da una superficie di rottura ben definita. Lo spessore della superficie di rottura è minimo se confrontato allo spessore del corpo di frana. Negli scivolamenti la massa in movimento resta sostanzialmente integra e non subisce deformazioni significative, essendo la deformazione concentrata lungo la superficie di scivolamento. Il movimento può avvenire lungo superfici curve o concave, come nel caso degli scivolamenti rotazionali (*rotational slide* o *slump*), o lungo superfici planari o debolmente ondulate, come nel caso degli scivolamenti traslativi (*translational slide*). In questi ultimi, la superficie di scorrimento è generalmente sub-parallela alla superficie topografica prima del movimento. Negli scorrimenti la velocità di movimento varia da estremamente lenta a rapida. Le aree coinvolte dagli scivolamenti variano da poche decine di metri quadrati ad alcuni chilometri quadrati.
- Gli Insaccamenti (*Sagging*) sono complessi fenomeni di deformazione lenta e profonda di estese porzioni di versante prodotte dalla gravità, ossia indotti dal peso del materiale coinvolto nel movimento. Sono anche chiamati Deformazioni Gravitative Profonde di Versante (DGPV). Si verificano prevalentemente in rocce competenti e laddove l'erosione accelerata od il rapido sollevamento tettonico hanno prodotto valli profonde. Le velocità di movimento sono estremamente lente, spesso al di sotto del limite della possibilità di misura.
- Gli Espandimenti laterali (*Lateral Spread*) sono fenomeni di trazione a cui è soggetto un ammasso di roccia od un terreno coesivo a causa della deformazione e della rottura di materiali sottostanti più deformabili. Sono in genere movimenti lenti, e possono coinvolgere aree estese decine o centinaia di ettari.
- Le Colate (*Flow*), sono movimenti spazialmente continui in cui la distribuzione verticale e longitudinale delle velocità è simile a quella che si produce in un liquido viscoso. Esiste un'ampia tipologia di colate, in funzione del tipo di materiale coinvolto (granulare, coesivo, plastico), della quantità d'acqua, e della velocità di movimento. Gli *earthflow* (detti anche *mudslide*) sono colate che interessano materiali prevalentemente argillosi, plastici, in pendii poco acclivi. Hanno velocità da moderata a molto lenta, possono rimanere attivi per periodi di tempo anche molto lunghi intervallati da periodi di quiescenza o stasi, e possono interessare aree estese decine o centinaia di ettari. Le colate di detrito (*debris flows*) sono generalmente innescate da piogge intense. Si generano dall'evoluzione (trasformazione) di altre frane, quali ad esempio gli scivolamenti di suolo superficiali (*soil slip*), ma possono essere anche prodotte dalla trasformazione di scorrimenti, come pure da forme particolarmente intense di erosione incanalata. Sono in genere movimenti veloci o molto veloci, e si verificano quando una massa satura fluisce lungo un pendio molto acclive od all'interno di un'area incanalata. Le colate di detrito possono anche formarsi a seguito della rottura di uno sbarramento naturale costituito da detriti di frane preesistenti, da morene glaciali, o da ghiaccio. Hanno l'insolita e distruttiva capacità di aumentare di



volume durante il movimento. Data la loro difficile prevedibilità, e la loro grande capacità distruttiva, sono fra i movimenti franosi che provocano il maggior numero di vittime. Le valanghe di roccia (*rock avalanche*) sono colate di materiale roccioso granulare incoerente, prevalentemente secco, che può viaggiare a velocità anche molto elevate, fino ad alcune centinaia di chilometri all'ora. Coinvolgono volumi di roccia di decine o di centinaia di milioni di metri cubi. Si tratta di eventi rari, tuttavia l'elevata velocità e gli enormi volumi le rendono particolarmente pericolose.

- Le frane Complesse (*Complex*) o Composite (*Compound*) sono caratterizzate da una o più delle tipologie di movimento sopra descritte, presenti contemporaneamente od in tempi differenti nello stesso dissesto.

La Figura 1 riporta alcune tipologie di frane presenti in Italia.

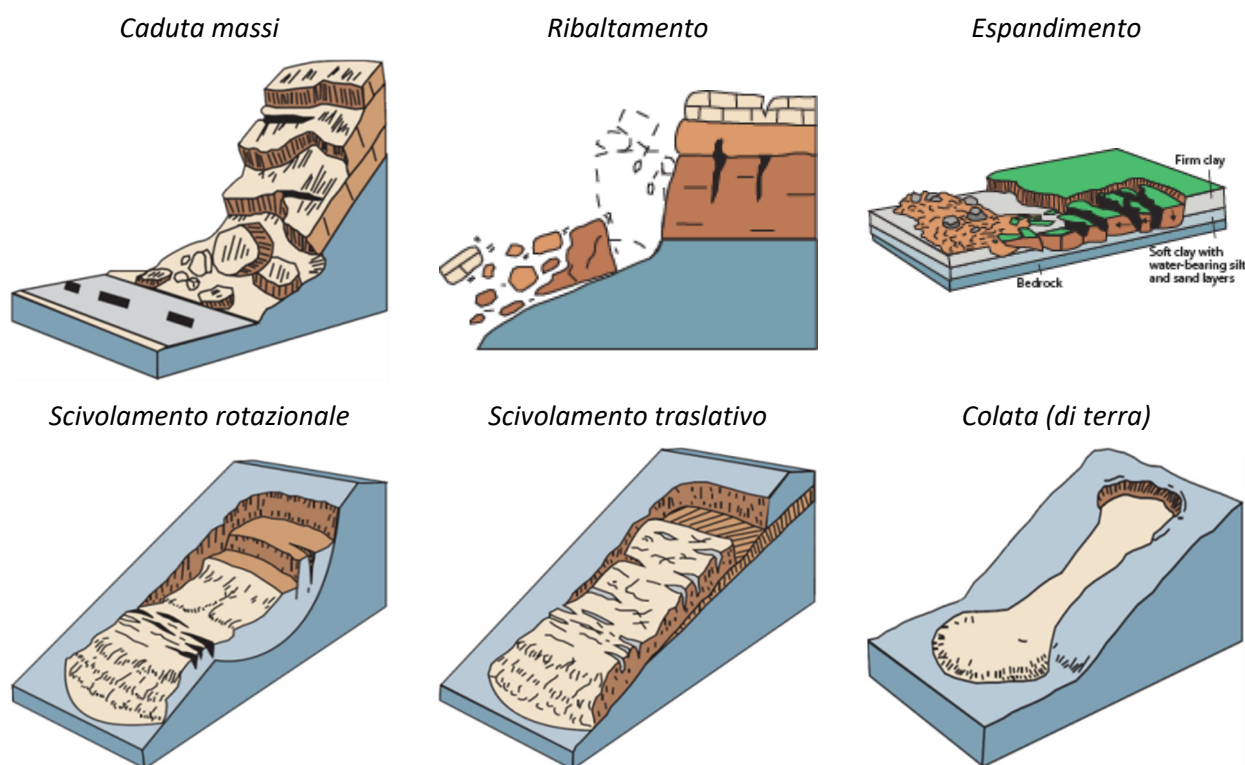


Figura 1. Alcune delle principali tipologie di frana in Italia.

I movimenti di massa, oltre che sulla base della tipologia prevalente di movimento, possono anche essere classificati in base al tipo di materiale coinvolto nel movimento (es. roccia, detrito, terra), o in base al comportamento del materiale durante il movimento che può essere di tipo coerente o non coerente. Una ulteriore distinzione può essere fatta in base alla profondità del movimento, distinguendo tra frane superficiali e frane profonde. In generale, nelle frane superficiali lo spessore del corpo si frana non eccede i 5-10 metri.

1.1.2 Velocità

La velocità delle frane varia per oltre 14 ordini di grandezza. La velocità di una frana è una caratteristica importante e può essere utilizzata per valutare la potenzialità distruttiva ed il



livello di rischio del posto dal dissesto. La Tabella 1 riporta una classificazione delle frane basata sulla velocità del movimento.

Tabella 1. Classificazione delle frane sulla base della velocità del movimento.

Classe di velocità	Descrizione del movimento	Velocità (mm/s)	Velocità (m/s)	Velocità (km/h)
1	Estremamente lento	$< 5 \times 10^{-7}$	$< 5 \times 10^{-10}$	$< 2 \times 10^{-9}$
2	Molto lento	$5 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-10} - 5 \times 10^{-8}$	$2 \times 10^{-9} - 2 \times 10^{-7}$
3	Lento	$5 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-8} - 5 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-7} - 2 \times 10^{-5}$
4	Moderato	$5 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-1}$	$5 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-3}$
5	Rapido	$5 \times 10^{-1} - 5 \times 10^1$	$5 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-3} - 2 \times 10^{-1}$
6	Molto rapido	$5 \times 10^1 - 5 \times 10^3$	$5 \times 10^{-2} - 5 \times 10^0$	$2 \times 10^{-1} - 2 \times 10^1$
7	Estremamente rapido	$> 5 \times 10^3$	$> 5 \times 10^0$	$> 2 \times 10^1$

1.1.3 Fasi

In una frana possono essere distinte quattro fasi principali di movimento:

- La fase di pre-rottura, durante la quale il pendio è soggetto a deformazione ma, nel suo complesso, resta sostanzialmente integro.
- La fase di innesco della frana, caratterizzata dalla formazione di una superficie continua di rottura.
- La fase di post-rottura, include il movimento della frana a partire dall'istante successivo alla rottura e fino all'arresto.
- La fase di riattivazione. Si verifica quando la frana scorre lungo una o più superfici di scorrimento pre-esistenti, ossia già utilizzate in precedenza da altri movimenti. La riattivazione può essere occasionale o continua, con variazioni nella velocità del movimento stagionali o di lungo periodo.

1.2 FATTORI AMBIENTALI CHE CONTROLLANO LA FRANOSITÀ

I fattori che condizionano la propensione al dissesto di un territorio (fattori predisponenti) includono l'assetto morfologico, geologico (litologico, stratigrafico, strutturale, tettonico) e climatico di un luogo, ma anche la tipologia e l'uso del suolo. I fattori geologici e morfologici possono essere considerati sostanzialmente "invarianti" nell'ambito della scala temporale di un singolo fenomeno franoso o di un sistema di monitoraggio o previsione delle frane. Al contrario, i fattori climatici, inclusi quelli meteorologici, ed i fattori connessi al tipo ed all'uso del suolo, sono variabili sia alle scale temporali di riferimento per il fenomeno, sia a quelle tipiche di tali sistemi.

In Italia, le principali cause (fattori innescanti) delle frane sono:

- di tipo meteorologico o climatico,
- di tipo geofisico, e



- di tipo antropico.

Le cause meteorologiche e climatiche che possono innescare le frane, siano esse singole o diffuse, sono riconducibili a piogge intense o prolungate, alla rapida fusione della neve e, più limitatamente, agli effetti dei cicli ripetuti di gelo e disgelo e al ritiro del permafrost. Fra le cause geofisiche vi sono i terremoti, le eruzioni vulcaniche, ed i fenomeni di scuotimento e cambiamento più o meno repentino della superficie topografica ad essi connessi. Fra le cause antropiche che possono produrre frane vi sono scavi o riporti, cambiamenti nell'uso del suolo, deforestazione, aratura ed irrigazione.

La predisposizione di un pendio alla rottura (ossia a franare), come pure la distribuzione spaziale e temporale dei dissesti in un territorio, sono controllate da molti fattori ambientali, alcuni dei quali possono cambiare in modo significativo anche in tempi brevi. I fattori d'instabilità possono essere raggruppati in: (i) fattori esterni al pendio, che aumentano le sollecitazioni di taglio nei materiali che costituiscono il versante, e (ii) fattori interni al pendio, che riducono la resistenza al taglio dei materiali nel pendio.

I fattori esterni comprendono:

- Variazioni della geometria del pendio (prodotti da scavi al piede, erosione, incisione fluviale, scavi artificiali che producono variazioni di altezza, lunghezza o pendenza del versante);
- Scarichi (causati da erosione, incisioni fluviali, scavi artificiali, ecc.);
- Carichi (causati dall'aggiunta di materiale, dall'aumento di altezza o di acclività del pendio);
- Scosse e vibrazioni (indotte da terremoti, eruzioni vulcaniche, esplosioni, od altri eventi artificiali);
- Variazioni della falda idrica (indotte da cambiamenti del livello di laghi o serbatoi, da drenaggi, ecc.);
- Cambiamenti nel regime idraulico superficiale e sotterraneo dei versanti (dovuti a pioggia, alla presenza di drenaggi, ad irrigazioni, ecc.).

I fattori interni comprendono, fra gli altri:

- Rottura progressiva (che segue fenomeni di espansione laterale, di fessurazione e di erosione);
- Fenomeni di alterazione (*weathering*, cicli di gelo e disgelo, essiccamento, riduzione di coesione, riduzione del grado di cementazione, ecc.);
- Erosione legata a processi di filtrazione (soluzione, *piping*, ecc.).

I fattori elencati possono far aumentare, da soli o in combinazione, l'instabilità di un pendio e possono portare all'innescare o alla riattivazione di una frana. Tuttavia, soltanto alcuni di essi producono una chiara espressione in superficie (es. variazioni geometriche e topografiche) e quindi possono essere rilevati dall'esterno, ad esempio con tecniche di



monitoraggio strumentale in situ (es. GPS, inclinometri, catene inclinometriche, estensimetri, ecc.), prossimale (droni) o remoto (es. aereo, satellite). Altri fattori, come ad esempio le condizioni geologiche ed idrauliche profonde, la rottura progressiva, ed i diversi fenomeni di alterazione, producono effetti non necessariamente visibili sulla superficie topografica. Ciò implica che la determinazione di molte delle caratteristiche importanti per la valutazione della stabilità di un versante debbano necessariamente (o prevalentemente) basarsi su indagini a terra, in superficie e nel sottosuolo.

1.3 DANNI PRODOTTI DALLE FRANE

Le frane si collocano in un contesto geologico-geomorfologico-idrologico di straordinaria ampiezza. La grande diversità e variabilità delle frane rende assai difficile (se non impossibile) definire un unico quadro di riferimento per l'identificazione, la mappatura e il monitoraggio delle frane, per la definizione della pericolosità ad esse connessa, e per l'identificazione di strategie per la mitigazione del rischio.

Le frane sono fenomeni del tutto naturali nell'evoluzione di un territorio. I movimenti franosi diventano pericolosi (ossia pongono un rischio) quando interferiscono con l'ambiente antropico ossia con gli elementi a rischio presenti (es. popolazione, strutture, infrastrutture, i beni, attività e interessi dei singoli o della collettività). Data la grande diversità dei tipi, forme, dimensioni, tipologie e velocità di movimento, le frane possono produrre danni di carattere ed intensità molto diversi. A tal proposito è utile classificare i dissesti in base alla velocità di movimento. Frane veloci e molto veloci, quali le colate di detrito, i crolli e le cadute massi, rappresentano un grave rischio per la popolazione. Dalle frane veloci è difficile fuggire, in quanto imprevedibili (nel tempo), improvvise e rapide. Movimenti veloci anche di piccole dimensioni possono essere fatali. Le frane che oltre ad essere veloci coinvolgono un volume considerevole di roccia o detrito sono particolarmente distruttive. È il caso delle colate di detrito (es. le colate che hanno colpito Episcopio e Quindici il 5 maggio 1998) e delle valanghe di roccia (ad esempio la frana di Val Pola del 27 luglio 1987). I movimenti franosi lenti o molto lenti generalmente non causano danni diretti alle persone, ma possono provocare danni ingenti alle strutture ed alle infrastrutture. La frana di Ancona del 13 dicembre 1982 ha coinvolto 342 ettari di terreni urbani e sub-urbani, ha danneggiato due ospedali e la Facoltà di Medicina dell'Università di Ancona, ha danneggiato o distrutto 280 edifici, per un totale di 862 appartamenti, numerose strade e la ferrovia adriatica per oltre 2 km, ed ha causato un morto e l'evacuazione di oltre 1000 famiglie (3661 persone). Il danno economico fu all'epoca stimato in circa 1000 miliardi di lire.

È evidente che non è possibile definire un'unica strategia per la valutazione della pericolosità o per la stima dei danni prodotti dai movimenti franosi, e garantire lo stesso grado di successo e la stessa affidabilità a tutte le scale, per tutte le tipologie di frana, ed in tutte le condizioni fisiografiche presenti in Italia. In letteratura sono pochi i casi in cui tali analisi sono state effettuate e raramente hanno prodotto modelli per la valutazione del danno largamente esportabili ed applicabili.



2 MODELLISTICA DELLE FRANE

La modellistica delle frane è un'attività fondamentale per la comprensione dei movimenti franosi e per la mitigazione dei rischi ad essi connessi. Gli obiettivi della modellistica dei fenomeni franosi sono vari, e possono essere riassunti nel tentativo di prevedere dove (modellazione spaziale), quanto frequentemente (modellazione temporale), come (modellazione fenomenologia) e quando (modellazione di previsione/preannuncio) accadranno nuove frane, o riattivazioni di movimenti franosi esistenti. Prima di entrare nel dettaglio della descrizione della modellistica delle frane è necessario introdurre le seguenti definizioni.

Suscettibilità: La propensione di un territorio a produrre dissesti. In termini probabilistici è la probabilità spaziale (geografica) dei dissesti, ottenuta dall'analisi di carte inventario e dati territoriali tematici.

Ricorrenza: La ripetitività nello spazio (ricorrenza geografica) o nel tempo (ricorrenza temporale) di un evento di frana. Ottenuta attraverso l'analisi di cataloghi storici e carte inventario multi-temporali delle frane.

Pericolosità: La probabilità che una frana di dimensioni (od intensità o magnitudo) note si verifichi in un'area ed in periodo di tempo prestabiliti. È la probabilità congiunta della dimensione, della ricorrenza temporale, e della probabilità geografica delle frane.

Vulnerabilità: Il danno atteso ad un elemento a rischio (inclusa la popolazione) a seguito del verificarsi di un movimento franoso. Varia in funzione della tipologia del dissesto, e delle caratteristiche degli elementi a rischio.

Rischio: È valutato in base alla pericolosità stimata o prevista, alla distribuzione e tipologia degli elementi a rischio, ed alla loro vulnerabilità nota o presunta. Può essere definito sia in termini quantitativi (probabilistici) che in termini qualitativi (euristici, descrittivi).

Analisi d'impatto: Dove le informazioni non sono sufficienti a definire il rischio, l'analisi d'impatto individua la localizzazione e la distribuzione geografica dei beni potenzialmente esposti a rischio da frana, inclusa la popolazione.

Unità territoriale: La suddivisione geografica di riferimento utilizzata per valutare e cartografare la suscettibilità e la pericolosità da frana o più in generale quella porzione di territorio a cui riferire una previsione della possibile occorrenza di frana.

2.1 STATO DELL'ARTE

La zonazione di un territorio sulla base della suscettibilità, della pericolosità o del rischio da frana sono argomenti largamente investigati nella letteratura scientifica e tecnica per oltre 30 anni. Il contesto del problema è stato definito per la prima volta da David Varnes e e dall'*International Association of Engineering Geology* (IAEG) nel 1984. Da allora sono centinaia le pubblicazioni che hanno trattato, a vario titolo, i temi: (i) della produzione e



dell'utilizzo a scopi di zonazione di carte inventario delle frane, (ii) dello sviluppo di procedure, metodi e tecniche per la definizione e la mappatura della suscettibilità, (iii) della stima della probabilità da frana, e (iv) della valutazione del rischio da frana. Nella maggior parte dei casi, le tecniche di zonazione sono state applicate a territori di piccola o media estensione (da alcune decine a diverse centinaia di chilometri quadrati), ma esistono alcuni esempi di zonazione a scala regionale o nazionale.

La letteratura scientifica e tecnica sui temi della suscettibilità, della pericolosità e della valutazione del rischio da frana è ampia e complessa, ed una sua revisione è al di fuori degli scopi di questo documento. Tuttavia, una breve disamina dei principali risultati raggiunti e dei problemi aperti in questo campo è utile a comprendere il contesto tecnico e scientifico nell'ambito del quale sono state definite le attività di modellazione del progetto Paesaggi Sicuri definito. Nel seguito, sono descritti i principali prodotti di zonazione, e le tecniche e le metodologie utilizzate per ottenerli, con particolare riferimento alle tecniche ed ai prodotti innovativi sviluppati dal CNR IRPI.

Le carte inventario delle frane riportano la localizzazione e – se note – le caratteristiche tipologiche delle frane avvenute in un territorio. Le carte inventario possono essere prodotte per territori di diversa estensione, da un singolo versante ad un'intera nazione. Le tecniche impiegate e le scale utilizzate per la produzione delle carte inventario dipendono dagli scopi della ricerca, dalla tipologia e dall'abbondanza dei dissesti, dall'estensione dell'area oggetto di studio, e dalle risorse umane, conoscitive, strumentali ed economiche disponibili. In linea generale, le carte inventario possono essere classificate in: (i) inventari storici, (ii) carte di tipo geomorfologico, (iii) cartografie d'evento, e (iv) carte multi-temporali. Ciascun tipo di cartografia ha caratteristiche, metodi di preparazione, e campi d'applicazioni differenti. Gli inventari storici sono il risultato cartografico di indagini storico-archivistiche che possono interessare territori anche estremamente vasti. Nel corso degli anni, il CNR IRPI, anche nell'ambito del progetto AVI del CNR – GNDCI, ha realizzato carte inventario di tipo storico per l'intero territorio nazionale. Le carte inventario geomorfologiche sono ottenute prevalentemente attraverso l'interpretazione di fotografie aeree a media o piccola scala e limitati controlli in campagna. Le carte geomorfologiche possono essere ottenute anche per territori molto vasti: il CNR IRPI, ha prodotto carte inventario di tipo geomorfologici per la Regione dell'Umbria, per la Regione Marche, e per ampi settori della Regione Lombardia. Il progetto IFFI, del SGN, ha realizzato una carta inventario delle frane di tipo geomorfologico per l'intero territorio nazionale, componendo gli inventari geomorfologici realizzati dalle diverse amministrazioni regionali. Le carte inventario d'evento sono prodotte a seguito di eventi meteorologici o geofisici che hanno innescato dissesti. Le cartografie d'evento riportano solo le frane d'evento, e sono prodotte attraverso indagini di campagna e/o l'interpretazione di fotografie aeree riprese ad hoc a seguito di un evento calamitoso. Infine, le carte inventario multi-temporali sono realizzate attraverso l'interpretazione di più voli di fotografie aeree di età diversa, e da rilevamenti di campagna anche molto accurati. Le carte multi-temporali sono le cartografie dei dissesti più avanzate oggi disponibili, ma sono anche le più difficili e complesse da preparare.



Le carte inventario rappresentano un elemento essenziale per ogni tentativo di valutazione della suscettibilità, della pericolosità, e del rischio da frana, a qualsiasi scala geografica ciò sia tentato. Gli inventari storici possono essere impiegati per zonazioni sinottiche, per definire l'abbondanza e la densità degli eventi a scala nazionale, e per produrre carte della ricorrenza temporale degli eventi franosi, o anche per la definizione di modelli di previsione/preannuncio della possibile occorrenza di frana (es. soglie di pioggia). Le carte geomorfologiche sono la base per ogni tentativo di valutazione della suscettibilità da frana, anche per territori ampi e fisiograficamente diversificati. Le cartografie d'evento, oltre a dare una visione per quanto possibile "oggettiva" e realistica della distribuzione geografica e dell'abbondanza delle frane innescate da un singolo evento meteorologico o geofisico – fatto questo per se rilevante a fini di protezione civile – sono essenziali per una corretta validazione quantitativa dei modelli predittivi di suscettibilità, di pericolosità e di rischio da frana, e sono utili a stimare la probabilità delle dimensioni (area, volume) dei dissesti attesi in un territorio. Infine, le carte inventario multi-temporali sono le uniche a permettere una completa definizione probabilistica della pericolosità da frana a scala di bacino.

Là dove sono disponibili carte inventario (siano esse storiche, geomorfologiche, d'evento o multi-temporali) è possibile stimare in termini quantitativi la distribuzione geografica delle frane. Ciò costituisce un primo, semplice passo verso la valutazione della suscettibilità da frana, e può essere ottenuto attraverso la preparazione di carte di densità da frana. Le carte di densità sono prodotti semplici che possono essere ottenuti con tecniche d'interpolazione differenti, ed anche per territori molto vasti. Il loro limite è quello di non permettere una comprensione "fenomenologica" delle ragioni della distribuzione areale (geografica) delle frane. Le carte di densità descrivono quindi in modo più o meno oggettivo lo stato di fatto, ma non possono essere impiegate per prevedere l'occorrenza dei dissesti in futuro.

Per prevedere dove le frane potranno avvenire (previsione areale) è possibile produrre carte di suscettibilità da frana. La suscettibilità da frana può essere ottenuta in modo quantitativo ("oggettivo") a partire da carte inventario delle frane e da informazioni tematiche geograficamente distribuite. Le tecniche per la valutazione della suscettibilità proposte in letteratura sono molte e diversificate, ma si possono riassumere in: (i) mappatura diretta della suscettibilità, (ii) metodi euristici, basati su indici empirici, (iii) metodi statistici, e (iv) metodi fisicamente basati (geotecnica, concettuali). Le poche revisioni sistematiche della vastissima letteratura tecnica sulla stima della suscettibilità da frana rivelano che i metodi più adatti alla zonazione di un territorio sulla base della suscettibilità sono quelli statistici, applicabili anche a territori estesi e fisiograficamente differenziati. A tal proposito, il CNR IRPI ha prodotto carte di suscettibilità da frana basate su modelli statistici per territori ampi diverse migliaia di chilometri quadrati (l'alto bacino del Fiume Tevere), e ha allo studio zonazioni della pericolosità a scala nazionale, basate su informazioni storiche (archivio SICI) e tecniche di classificazione statistica multivariata. A tal fine il CNR IRPI ha sviluppato diversi strumenti modellistici e definito modalità standardizzate per una valutazione coerente, misurabile e ripetibile delle suscettibilità da frana di un dato territorio. Nel corso degli ultimi anni sono emerse applicazioni interessanti di modelli fisicamente basati per la valutazione della suscettibilità. I risultati migliori sono stati ottenuti nel campo della previsione spaziale



(e temporale) di dissesti superficiali indotti da piogge intense o prolungate, e nella zonazione della suscettibilità indotta dai fenomeni di caduta massi e crollo. In questo contesto, il CNR IRPI ha (i) messo a punto SW specifici per la simulazione tridimensionale dei fenomeni di caduta massi applicabili a territori anche molto estesi (ad esempio, un'intera valle alpina), (ii) realizzato modelli per la previsione congiunta di frane e processi di erosione sotto diversi scenari di cambiamento, (iii) testato, applicato e co-sviluppato diversi strumenti fisicamente basati noti in letteratura per la previsione di frane di tipo scivolamento, colata e crollo.

Per prevedere quando le frane potranno avvenire (previsione temporale) occorre disporre di informazioni sulla ricorrenza temporale dei dissesti. Tali informazioni sono rare in Italia (come altrove), perché difficili e costose da reperire. Come detto in precedenza, informazioni temporali sulle frane possono essere ottenute da cataloghi ed inventari storici, e da inventari multi-temporali. Dove le informazioni storiche sono state raccolte ed organizzate – e se le informazioni sono sufficientemente complete – la stima probabilistica della ricorrenza temporale degli eventi di frana è ottenibile attraverso più o meno sofisticate analisi statistiche che, in linea di massima, si basano sulla statistica degli eventi estremi (*extreme values theory*). È questo uno dei settori meno sviluppati della ricerca geomorfologica sui dissesti, ma anche uno di quelli oggi più attivi e per il quale gli sviluppi attesi sono più significativi.

Per prevedere quanto grandi potranno essere le frane (previsione dimensionale) occorre disporre di accurati inventari d'evento o multi-temporali. Dove gli inventari sono disponibili in formato digitale, è possibile definire la probabilità che una frana abbia una dimensione (area, volume) uguale o superiore ad una dimensione prestabilita. Le tecniche per l'acquisizione delle informazioni dimensionali dalle frane sono semplici e note da tempo (in particolare per la misura dell'area delle frane). Più difficile ed incerta è la definizione di opportune distribuzioni probabilistiche adatte a rappresentare le distribuzioni empiriche osservate in natura, in particolare per quanto concerne le aree delle frane. In questo contesto, il CNR IRPI ha contribuito a definire una delle due distribuzioni di probabilità delle aree di frana oggi comunemente utilizzate nella letteratura (*Inverse Gamma Function*). La probabilità dimensionale delle frane è spesso utilizzata come misura indiretta (*proxy*) della magnitudo o dell'intensità della frana, od anche come misura indiretta della distruttività del dissesto. Ciò perché misure dirette della magnitudo, dell'intensità e della distruttività delle frane non sono generalmente disponibili.

Stimare la pericolosità da frana significa valutare – con una certa probabilità – dove avverrà, quando o quanto frequentemente avverrà e quanto grande sarà la frana. Ciò comporta la stima di tre diverse probabilità: (i) la probabilità d'occorrenza spaziale (ossia la suscettibilità), (ii) la probabilità d'occorrenza temporale, e (iii) la probabilità che la frana abbia od ecceda una data dimensione (previsione dimensionale). A partire dal 2005, il CNR IRPI ha messo a punto una metodologia ed un modello per la stima probabilistica della pericolosità da frana. Il metodo è stato sperimentato con successo in due aree dell'Appennino centrale e settentrionale. Il CNR IRPI ha in corso sperimentazioni per la stima della pericolosità a scala sinottica. L'approccio è basato sull'utilizzo di informazioni storiche sugli eventi di frana



occorsi in Italia (archivio SICI) e sui danni diretti alla popolazione (morti, dispersi, feriti) causati dai dissesti.

Per la stima della suscettibilità, della ricorrenza temporale, e della probabilità dimensionale dei dissesti – e di conseguenza per la valutazione probabilistica della pericolosità da frana – si fa (quasi) sempre riferimento ad informazioni e dati su dissesti avvenuti nel passato. La previsione del futuro sulla base di quanto è avvenuto nel passato è una pratica comune nelle Scienze della Terra, ed in particolare nello studio dei fenomeni naturali potenzialmente calamitosi (incluse le frane). È tuttavia una pratica non priva di rischio. Il rischio è particolarmente importante nel caso delle frane; fenomeni naturali influenzati in modo significativo da cambiamenti climatici, ambientali ed antropici.

La modellistica di preannuncio delle frane si occupa di prevedere in anticipo quando una frana potrà occorrere. I modelli di preannuncio sono molteplici e diversificati per tipologia di frana, possono utilizzare approcci modellistici molto differenti e ai fini della previsione possono sia investigare grandezze/variabili che controllano l'innesco di una frana (es. pioggia) che monitorare caratteristiche del movimento franoso (es. spostamenti, deformazioni, velocità o accelerazione del corpo franoso). Tali modelli sono una componente fondamentale dei sistemi di allertamento (*early-warning*) da frana. CNR IRPI ha sviluppato modelli e sistemi per il preannuncio di frana in diversi contesti geo-ambientali, per diverse tipologie di frana sia in Italia che all'estero utilizzando gli approcci (singoli o combinati) sopra descritti.

Il rischio da frana può essere definito in modo qualitativo (euristico, descrittivo) o quantitativo (probabilistico). La revisione della letteratura evidenzia come, ad oggi, non esistano metodi e tecniche collaudate o largamente accettate dalla comunità tecnico-scientifica per la valutazione del rischio da frana. In linea di massima, i pochi autori che si sono cimentati con applicazioni pratiche (“reali”) hanno messo a punto ed utilizzato tecniche e metodi definiti “ad hoc”, o adattati al problema specifico, alle caratteristiche fisiografiche locali, incluse la tipologia e l'abbondanza delle frane presenti nell'area di oggetto di studio. Il CNR IRPI da anni si occupa della definizione del rischio da frana, a varie scale ed in diversi contesti. Fra i risultati ottenuti vi sono: (i) metodi statistici per la stima del rischio sociale ed individuale per la popolazione, e (ii) metodi per la valutazione euristica del rischio da frana su base geomorfologica.

Per la definizione del rischio sono indispensabili informazioni sulla vulnerabilità degli elementi a rischio, inclusa la popolazione. Tali informazioni sono generalmente mancanti, o sono estremamente limitate. La mancanza di informazioni sulla vulnerabilità alle frane degli elementi a rischio limita l'affidabilità e l'utilità delle stime di rischio da frana. Da qualche tempo, il CNR IRPI ha in corso una ricerca per la definizione di curve di vulnerabilità da frana per differenti tipologie di dissesto (scorrimenti, colate, ecc.), e per diverse tipologie di bene. Le curve possono essere utilizzate nella stima quantitativa e spazialmente distribuita del rischio da frana, e per il disegno di scenari di rischio. Il CNR IRPI ha inoltre sviluppato metodologie per la stima del danno economico arrecato alle infrastrutture viarie in seguito di frane innescate da eventi metrologici intensi e/o prolungati. Tali analisi possono essere



applicate in differenti contesti geo-ambientali anche considerando fattori di innesco differenti.

Là dove sussiste un rischio da frana – noto o presunto – ma non si hanno sufficienti informazioni per una definizione oggettiva (quantitativa o qualitativa) delle condizioni di rischio, è comunque possibile individuare il possibile impatto che le frane possono avere sui beni a rischio, ed in particolare sulla popolazione, le strutture e le infrastrutture. Il CNR IRPI ha sperimentato la definizione del possibile impatto dei movimenti franosi sulle aree abitate e sulle infrastrutture di trasporto nel territorio della Regione dell'Umbria, e sulla popolazione nel territorio del Comune di Perugia, in Umbria. Il CNR IRPI ha inoltre sviluppato metodologie per l'analisi del rischio posto dalle frane su infrastrutture di tipo lineare e le applicate nella provincia di Messina. Tali sperimentazioni sono applicabili ad aree territoriali più ampie e a contesti geografici differenti.

2.2 SCALA E TIPOLOGIA DELLA MODELLISTICA

In funzione della scala del problema e della tipologia di fenomeno gli approcci modellistici possono essere differenti. A causa della varietà tipologica e fenomenologica dei movimenti franosi, le metodologie, le tecniche e gli strumenti sviluppati per la modellistica sono numerosi e diversificati. In generale, è possibile distinguere tre principali tipologie di modelli:

- modelli fisici o analogici,
- modelli numerici a scala locale,
- modelli a scala regionale o di bacino.

I modelli fisici (o analogici) hanno lo scopo di riprodurre, a scala ridotta, le geometrie e le caratteristiche morfologiche e litologiche di una frana o di un intero versante, con l'obiettivo di studiarne il comportamento meccanico e di determinarne le caratteristiche cinematiche e dinamiche. La modellazione fisica/analogica è di difficile realizzazione, è costosa, e viene generalmente limitata all'analisi di casi di studio, od a supporto delle ricerche su tipologie di frane dal comportamento particolare, come ad esempio le colate di detrito. Negli anni, lo sviluppo di modelli di questo tipo è andato diminuendo, a causa dei costi elevati e grazie allo sviluppo di sofisticati strumenti informatici per la modellistica numerica, grazie anche alla disponibilità e diffusione di computer dalle elevate potenze e capacità di calcolo.

I modelli numerici a scala locale hanno l'obiettivo di comprendere e prevedere il comportamento di singoli fenomeni franosi (o di porzioni limitate di versante) preventivamente riconosciuti a scala di bacino con tecniche cartografiche o di *reconnaissance*. I modelli a scala locale sono sviluppati per verificare la stabilità dei pendii generalmente lungo sezioni bidimensionali del versante. Allo scopo si utilizzano metodi all'equilibrio limite (non lineari) per la verifica della stabilità (Bishop, Janbu, Morgenstern and Price, ecc.). Il metodo dell'equilibrio limite consiste nel confrontare le forze destabilizzanti (peso, pressioni idriche, accelerazioni dinamiche indotte da terremoti, carichi esterni, ecc.) con le forze resistenti (attrito, coesione, opere di sostegno, ecc.) presenti in un versante. Il fattore di sicurezza è il rapporto fra la somma delle componenti delle forze resistenti e la



somma delle forze destabilizzanti, ed indica in modo semplice il grado di stabilità o l'instabilità dell'intero versante. La stabilità (od instabilità) del pendio viene verificata lungo superfici di scorrimento circolari, planari o complesse. I *software* che implementano i metodi d'analisi dell'equilibrio limite consentono di ricercare automaticamente la superficie di scivolamento più probabile, e permettono di considerare l'effetto delle opere di stabilizzazione (riprofilature, drenaggi, opere di contenimento, ecc.). Recentemente sono stati sviluppati *software* che considerano anche il possibile ruolo della vegetazione nella stabilità di un versante. Sono anche disponibili *software* per la modellazione tri-dimensionale dei versanti con il metodo dell'equilibrio limite. Il pregio dei metodi basati sull'equilibrio limite è la loro semplicità, unita alla facile implementazione. Il principale difetto è quello di non consentire la modellazione dell'evoluzione spaziale (e temporale) del movimento. A scala di singola frana o del singolo versante possono inoltre applicati modelli per l'analisi delle condizioni tensionali (sforzi, *stress*) e deformativi (*strain*) presenti in un versante. Da tempo sono state applicate (adattate) alla modellistica dei versanti procedure e metodi analitici utilizzati in altri campi dell'analisi meccanica, quali i metodi agli elementi finiti (FEM), alle differenze finite (FDM) o degli elementi distinti (DEm). Tali metodi adottano procedure analitiche o numeriche per risolvere sistemi di equazioni che governano lo stato tensionale e deformativo del versante o dell'ammasso roccioso. Sono disponibili diversi codici di calcolo che operano in due e tre dimensioni. Il principale vantaggio dei metodi dell'analisi tensionale e deformativa rispetto a più elementari modelli dell'equilibrio limite è quello di poter prevedere in modo rigoroso la possibile dinamica dei movimenti franosi, anche dopo l'inizio del movimento e durante la fase di collasso. Fra gli svantaggi, vi sono la necessità d'informazioni dettagliate sulle caratteristiche geomeccaniche dei materiali coinvolti (non sempre disponibili), una maggior difficoltà nell'implementazione dei modelli, ed una maggior difficoltà interpretativa dei risultati.

I modelli a scala regionale o di bacino hanno l'obiettivo di definire la pericolosità (o la suscettibilità) idrogeologica per territori ampi, compresi generalmente da poche decine ad alcune migliaia di chilometri quadrati. Tali modelli richiedono la conoscenza dei parametri in modo distribuiti su tutta l'area di applicazione. Il territorio oggetto di studio è di norma essere suddiviso in unità cartografiche elementari. Sono possibili diverse suddivisioni territoriali, fra cui: celle, *unique condition units*, versanti elementari, unità idro-morfo-litologiche, unità topografiche, tubi di flusso e unità di tipo amministrativo. Le metodologie più comuni per la modellazione della franosità a scala regionale o di bacino consistono:

- nella valutazione empirica o semi-empirica della predisposizione all'instabilità dei versanti sulla base del rilevamento geomorfologico (modelli "euristici");
- nell'analisi statistica (generalmente multivariata) della distribuzione delle frane e dei fattori considerati responsabili della franosità (modelli "statistici"); e
- nell'applicazione distribuita del modello dell'equilibrio limite ad un "pendio infinito", eventualmente accoppiato a modelli d'infiltrazione ed idrologici bi- o tri-dimensionali (modelli "deterministici" o "idro-geotecnici").



I modelli euristici si basano essenzialmente sulle conoscenze pregresse del territorio e delle cause note della franosità. La loro qualità è variabile ed i risultati sono difficilmente verificabili o replicabili. I modelli statistici definiscono in modo oggettivo e quantitativo le relazioni fra i fattori ritenuti importanti per la franosità, e forniscono i migliori risultati per aree vaste e fisograficamente diversificate. I modelli statistici sono i più indicati a produrre cartografie utili alla pianificazione territoriale, a varie scale. I modelli deterministici consentono di studiare la distribuzione dei valori del fattore di sicurezza nell'area oggetto di studio, compresa la loro evoluzione temporale in corso d'evento (meteorologico o sismico). Forniscono i migliori risultati per aree limitate per le quali siano disponibili informazioni topografiche e tematiche di dettaglio, e sono particolarmente interessanti a supporto della modellistica "d'evento". I modelli del pendio infinito si basano sull'assunzione che il pendio sia "infinitamente esteso" in lunghezza e larghezza, che la superficie di rottura sia planare e parallela alla superficie topografica, e che lo spessore del materiale instabile sia limitato rispetto alle dimensioni del versante. Queste assunzioni limitano (condizionano) l'applicazione del metodo a frane superficiali e di piccole dimensioni. Per eliminare tali criticità sono stati sviluppati modelli distribuiti che adottano rappresentazioni più complesse del corpo di frana, estendendo il concetto di concio bidimensionale proprio di alcune tipologie di analisi all'equilibrio limite (es. Sarma, Janbu, Morgenstern and Price, ecc.) ad uno spazio tridimensionale. Tali modellistiche oltre alla conoscenza distribuita dei parametri di input richiedono macchine con potenze e capacità di calcolo elevate. I modelli deterministici possono essere accoppiati in vario modo con modelli d'infiltrazione ed idrologici più o meno complessi rendendo possibile l'analisi delle stabilità di un versante in regime transiente.

2.3 MODELLISTICA PER TIPOLOGIA DI FRANA

Data la sensibile variabilità tipologica delle frane ed in particolare delle loro caratteristiche dimensionali, di movimento e dei loro meccanismi di innesco, nel tempo sono stati sviluppate modelli e approcci modellistici differenziati. Allo stato dell'arte non esiste un singolo modello o un singolo approccio modellistico applicabile a tutte le tipologie di frana. La modellistica dei fenomeni di caduta massi può essere effettuata con modelli euristici di tipo empirico e modelli matematici. I primi si basano sull'osservazione dell'espandimento dei blocchi al di sotto di una parete per determinare delle relazioni empiriche tra altezza della parete e lunghezza dell'espandimento dei blocchi. Tali modelli possono essere sviluppati sia a scala locale sia regionale. I modelli matematici si basano sulla simulazione del moto dei blocchi lungo un profilo (modelli 2D), e sono tradizionalmente applicati a scala locale. Per l'utilizzo a scala regionale sono richiesti modelli matematici specifici, in grado di descrivere l'andamento tridimensionale dei blocchi e di operare su ampie aree utilizzando parametri distribuiti nello spazio.

La modellistica degli scivolamenti a scala locale può essere effettuata tramite metodi empirici (analisi cinematica, l'analisi semi-empirica degli spostamenti) o matematici (analisi all'equilibrio limite globale, analisi sforzi – deformazioni). I metodi matematici sono caratterizzati da metodi risolutivi di diverso tipo (soluzioni complete e non per i metodi all'equilibrio limite, di tipo bi- e tri-dimensionale, ecc.; metodo degli elementi finiti, differenze



finite, elementi al contorno, elementi distinti, metodi ibridi) con possibilità di introdurre diversi fattori di controllo esterni (carichi statici e dinamici, etc.). A scala regionale, la valutazione della pericolosità dovuta agli scivolamenti è realizzata tradizionalmente con metodi euristici e statistici. Tra i metodi statistici, i più avanzati sono quelli basati su analisi multivariata dei fattori di controllo della franosità. L'utilizzo di modelli matematici a scala regionale è limitato agli scivolamenti superficiali, per i quali sono disponibili modelli fisicamente basati che accoppiano modelli idrologici semplificati e modelli di stabilità all'equilibrio limite molto semplici, quale il metodo del pendio indefinito.

La modellistica dei flussi (colate di terra, colate di detrito, *lahar*, *rock avalanche*, ecc.), sia a scala locale, sia a scala regionale, viene effettuata utilizzando tipicamente modelli empirici e modelli matematici. In ogni caso, per questa tipologia di fenomeni la modellazione si concentra prevalentemente sulla fase di espansione, ossia di propagazione verso valle dei materiali in movimento. Per la modellazione a scala regionale sono richiesti modelli semplificati di innesco e trasporto, adattabili a una modellazione distribuita.

La modellistica della pericolosità temporale è un aspetto molto critico nello studio delle frane e in genere prevede l'utilizzo di modelli che analizzano la probabilità di occorrenza o di eccedenza di frana utilizzando approcci modellistici di tipo statistico. Tali modelli possono essere applicati a diverse tipologie di frana.

Per la previsione o il preannuncio di varie tipologie di frana si utilizzano approcci modellistici alternativi analizzano la correlazione esistente tra il momento o la data di innesco delle frane e fattori che ne controllano l'occorrenza o che ne monitorano il comportamento. Il tipo di fattore considerato può essere differente in funzione del tipo di frana considerato. Per le frane più grandi è possibile analizzare i dati di spostamento ed individuare il comportamento della frana per poterne prevedere il possibile rilascio. Le relazioni esistenti tra il movimento e la possibile evoluzione della frana in genere descritte e modellate con modelli empirici semplificati. Per le frane innescate dalle piogge, invece, è possibile individuare un livello di precipitazione corrispondente alla soglia di innesco dei fenomeni. La definizione delle soglie pluviometriche è resa difficoltosa dalle complesse relazioni che intercorrono tra afflussi, deflussi, infiltrazione efficace e risposta della pressione dei pori. Gli approcci adottati possono essere ricondotti a modelli statistici o empirici (basati sulla correlazione tra altezza di precipitazione e innesco dei movimenti franosi), modelli matematici (per la previsione delle diverse componenti del bilancio idrico del versante) e modelli misti.



3 MODELLISTICA A SCALA REGIONALE

Nell'ambito del progetto "Paesaggi Sicuri: strategie di prevenzione e adattamento per il sito UNESCO Porto Venere, Cinque Terre e Isole (Palmaria, Tino e Tinetto)" è prevista (i) la modellazione della suscettibilità e della pericolosità da frana e (ii) la definizione di soglie di pioggia per il possibile innesco di frane nell'area di studio. Nel presente capitolo è riportata una analisi più approfondita di tali tipi di modellazione.

3.1 STIMA DELLA SUSCETTIBILITÀ E DELLA PERICOLOSITÀ DA FRANA

Una **zonazione della suscettibilità** da frana suddivide e classifica un territorio sulla base della propensione che lo stesso ha di produrre frane. I metodi più comunemente utilizzati per la valutazione della suscettibilità da frana, e per la produzione di carte di suscettibilità, possono essere classificati in metodi quantitativi o qualitativi, e diretti od indiretti. I metodi quantitativi forniscono una valutazione numerica e quantitativa del grado di pericolosità, generalmente in termini di probabilità d'occorrenza. I metodi qualitativi effettuano una valutazione qualitativa (euristica) del grado di suscettibilità da frana. I metodi diretti valutano direttamente la suscettibilità, mentre quelli indiretti stimano la suscettibilità a partire da informazioni tematiche ritenute significative per comprendere la distribuzione delle frane (geologia, litologia, struttura, pendenza dei versanti, morfologia, stadio evolutivo della rete drenante, uso del suolo, ecc.) (Carrara *et al.* 1995, 1999; Guzzetti *et al.* 1999).

L'analisi della letteratura (Guzzetti *et al.* 1999; Guzzetti, 2006) indica come i metodi principali per la zonazione della suscettibilità da frana possono essere raggruppati in:

- Metodi diretti, o geomorfologici. Si basano sulla mappatura diretta (euristica) del territorio in settori a diverso gradi di suscettibilità. Sono largamente soggettivi e difficilmente riproducibili.
- Metodi euristici, o a indici. Si basano su di una combinazione empirica e qualitativa di fattori ritenuti importanti per spiegare la distribuzione e l'abbondanza della franosità in un territorio. Presuppongono una conoscenza dettagliata delle relazioni fra la franosità e l'assetto territoriale, e possono essere implementati in un GIS. Sono anch'essi – almeno in parte – soggettivi.
- Metodi statistici, o "funzionali". Utilizzano tecniche di classificazione per suddividere il territorio in aree suscettibili ed aree non suscettibili a produrre dissesti. Sono metodi indiretti e quantitativi, la cui qualità (affidabilità) dipende in gran parte dalla qualità e rilevanza delle informazioni tematiche ed ambientali disponibili. I metodi statistici si sono rivelati adatti alla stima della vulnerabilità di diverse tipologie di frana, a diverse scale geografiche, ed in differenti ambienti fisiografici.
- Metodi deterministici, o "fisicamente basati". Si basano sull'applicazione di semplici modelli fisici per spiegare la distribuzione e l'evoluzione dei movimenti franosi. Necessitano, oltre che di una comprensione approfondita dei meccanismi che controllano la franosità (non sempre disponibile) di una grande mole di informazioni



territoriali di dettaglio. Sono particolarmente adatti a studiare aree di limitata estensione o tipologie di frana particolari, come le cadute massi, od i *soil slips*.

Le **zonazioni della pericolosità** da frana sono più complesse di quelle relative alla semplice zonazione della suscettibilità. La stima della pericolosità prevede infatti che, oltre alla probabilità geografica (spaziale) delle frane, vengano definite anche la probabilità temporale e la probabilità dimensionale delle frane. Quest'ultima è un *proxy* della distruttività o della magnitudo dei dissesti. La probabilità temporale e la probabilità dimensionale sono più difficili – e incerte – da definire della suscettibilità. Allo stato delle conoscenze, sono pochi i modelli di pericolosità sviluppati (Guzzetti et al., 2005, 2006), e tutti per aree di estensione limitata (alcune decine di chilometri quadrati) e per le quali sono disponibili informazioni dettagliate sulla localizzazione, sulla frequenza, e sulle dimensioni delle frane. La maggior parte di tali informazioni sono ottenute da carte inventario multi-temporali (Malamud et al., 2004). Tali modelli sfruttano in genere approcci statistici per la combinazione delle tre componenti di pericolosità. Alcuni modelli fisicamente basati, riescono a prevedere solo due componenti fondamentali della pericolosità. I modelli di cadute massi integrano ad esempio la previsione della localizzazione (suscettibilità) e della magnitudo (es. velocità, altezza di rimbalzo) associata ad un possibile masso. Un secondo esempio è rappresentato dai modelli di colata che possono restituire informazioni sulle possibili zone (suscettibilità) raggiunte dai flussi e sulle relative velocità (magnitudo). Entrambi i modelli descritti nei precedenti esempi, anche se di tipo deterministico, possono essere eseguiti ripetutamente (*ensemble*) simulando variazioni dei relativi parametri di input. I risultati delle singole modellazioni possono essere integrati per la definizione di mappe probabilistiche che descrivono la pericolosità posta da una data tipologia di frana nel territorio oggetto di analisi. In tali casi la metodologia permette anche una stima della incertezza associata alla pericolosità da frana.

Propedeutica alla zonazione di un territorio sulla base della suscettibilità o della pericolosità da frana, è la scelta di una opportuna unità cartografica di riferimento (UCR). La scelta dell'unità di riferimento è un passaggio fondamentale nella modellazione della suscettibilità e della pericolosità posta da una frana e condiziona sia la scelta del tipo di approccio modellistico, sia la preparazione e gestione dei dati di input dei modelli, ma anche e soprattutto il significato e l'applicabilità della previsione modellistica. Tra le diverse unità cartografiche di riferimento utilizzate in letteratura per la zonazione della suscettibilità e della pericolosità da frana vi sono:

- Le unità geomorfologiche, basate sulle relazioni tra materiali, forme e processi geomorfologici di versante. Danno luogo a limiti morfologicamente riconoscibili sul terreno che riflettono differenze d'ordine geologico, pedologico, geomorfologico, idrologico, e di copertura del suolo. Sono definite in modo soggettivo dall'operatore, direttamente in campagna, attraverso l'analisi di fotografie aeree, od a partire da carte topografiche.
- Le celle (i *pixel*), caratteristiche di un modello di rappresentazione dei dati geografici di tipo raster. Comportano la suddivisione del territorio in una griglia regolare di



dimensione e geometria predefinita. Gli elementi della griglia sono generalmente quadrati, ma possono essere rettangolari, triangolari od esagonali. Dal punto di vista computazionale, il territorio assume le caratteristiche di una matrice. In una suddivisione del territorio in celle, la rappresentazione geometrica non ha nessuna relazione con le caratteristiche geologiche e geomorfologiche del territorio. Ciò rappresenta un problema, in particolare quando le celle sono vaste in confronto alla dimensione delle frane, ed all'accuratezza dei dati tematici.

- Le unique condition units (UCU), ottenute sovrapponendo i livelli tematici disponibili, o ritenuti importanti per spiegare la distribuzione geografica e l'abbondanza delle frane. L'intersezione geometrica dei livelli tematici produce unità territoriali caratterizzate dalla diversa combinazione dei diversi tematismi utilizzati. Come nel caso delle unità geomorfologiche, le UCU hanno limiti riconoscibili sul terreno che riflettono differenze morfologiche, geologiche, pedologiche, di copertura del suolo, ecc. A differenza delle unità geomorfologiche, sono definite in modo "oggettivo", e quindi riproducibile. Il numero, la dimensione e la natura delle UCU dipende dal numero e dalla complessità delle carte tematiche utilizzate, e dal numero delle classi utilizzate nelle singole carte tematiche. Il limite principale delle UCU è insito nelle funzioni GIS utilizzate per produrle. Se i livelli tematici sono numerosi, la loro intersezione produce un grande numero di poligoni di difficile (od inefficiente) gestione in un GIS vettoriale. Oltre a ciò, le ripetute intersezioni producono poligoni di piccole o piccolissime dimensioni, il cui significato statistico e geomorfologico è di difficile valutazione. Poligoni molto piccoli possono rappresentare reali e significative condizioni territoriali, od essere il risultato di imperfezioni cartografiche ed errori di mappatura.
- Le unità di versante (*slope units*, SU) sono ottenute suddividendo un territorio in unità idro-morfologiche elementari, delimitate da linee di drenaggio (impluvi) e linee di spartiacque (displuvi). Le SU possono essere delineate manualmente, a partire dalle carte topografiche, od automaticamente, a partire da un modello digitale del terreno (DTM), ed utilizzando appositi SW per la ricostruzione delle reti di drenaggio e degli spartiacque. Dal punto di vista geomorfologico, il principale vantaggio delle SU rispetto alle altre unità cartografiche di riferimento è quello di stabilire una relazione fisica diretta con il fenomeno oggetto di studio: le frane avvengono infatti all'interno dei versanti. Come nel caso delle UCU, la suddivisione territoriale è oggettiva e replicabile, tuttavia, a differenza di quanto avviene per le UCU, la dimensione delle SU non è influenzata dalle operazioni geografiche effettuate.
- Le unità idro-morfo-litologiche sono una derivazione delle SU, ottenute intersecando in un GIS una mappa litologica semplificata alla suddivisione in SU. In alcune condizioni, risolvono il problema intrinseco alle SU di includere all'interno della stessa UCR condizioni litologiche molto differenti, e con diversa propensione al dissesto.
- Le unità amministrative considerano le suddivisioni amministrative di un territorio (particelle catastali, comuni, province, ecc.). Il limite di tale UCR è quello di non avere (generalmente) nessun legame fisico diretto con il territorio, e tanto meno con la



franosità. Il loro principale vantaggio è quello di produrre zonazioni facilmente utilizzabili dagli amministratori.

La valutazione oggettiva misurabile e ripetibile delle performance di un modello di pericolosità o suscettibilità, è un passaggio fondamentale sia per la costruzione di un modello che per il suo successivo utilizzo. Diverse metriche e indici possono essere utilizzati per valutare le prestazioni di un modello di suscettibilità e di pericolosità (Guzzetti et al., 2006; Rossi et al., 2010). Indipendentemente dalle metriche o dagli indici utilizzati, esiste una differenza importante tra la valutazione delle *performance* modello in fase di calibrazione e delle *performance* del modello in previsione. Il primo (valutazione del *fit* del modello) misura la capacità del modello di descrivere i dati di frana osservati in *input* al modello e si ottiene confrontando i risultati del modello con le stesse informazioni di frana che vengono utilizzate per calibrarlo. La valutazione delle *performance* in fase di previsione, misura la capacità del modello di prevedere altre frane non utilizzate in *input* e si ottiene confrontando i risultati del modello con informazioni indipendenti di frana che non sono state utilizzate per calibrarlo. La valutazione delle *performance* in fase di previsione del modello è una misura del potere predittivo di un modello di suscettibilità (Chung e Fabbri, 1999, 2006; Guzzetti et al., 2006; Rossi et al., 2010). Tale valutazione è più difficile da ottenere rispetto alla valutazione del grado di *fitting* del modello. La valutazione della performance in previsione del modello è equivalente alla validazione del modello, tuttavia, in letteratura il termine "validazione" è anche (erroneamente) utilizzato per fare riferimento alla valutazione della capacità di *fitting* del modello.

L'eterogeneità dei fenomeni franosi anche nell'ambito di una stessa tipologia, la variabilità dei fattori predisponenti o di innesco utilizzati in input e le assunzioni alla base dei diversi approcci modellistici condizionano fortemente i risultati di un modello. Sotto tali premesse, l'analisi e valutazione dell'incertezza associata ai risultati di modello è una attività imprescindibile nella modellazione della suscettibilità e pericolosità. In letteratura tali valutazioni sono spesso assenti e quando presenti sono molto diversificate sia in termini di metodologie utilizzate per la stima dell'incertezza che in termini di informazioni fornite. Tuttavia tale informazioni quanto presenti risultano fondamentali per la corretta interpretazione dei risultati modellistici e per il loro utilizzo.

3.2 SOGLIE DI PIOGGIA

È noto che le frane possono essere innescate da numerose cause, sia naturali che antropiche. Fra le cause naturali vi sono le piogge intense e prolungate, la rapida fusione della neve, i terremoti, e le eruzioni vulcaniche. In Italia, la maggior parte delle frane indotte da cause naturali sono prodotte da fenomeni meteorologici, ed in particolare da piogge intense o prolungate, e dalla più o meno rapida fusione della neve. È possibile pensare di prevedere – con ore o giorni d'anticipo e con una certa probabilità – l'occorrenza nello spazio (geografica) e nel tempo dei fenomeni franosi, sulla base di misure, stime e previsioni della precipitazione.



Nella letteratura scientifica, sono numerosi i tentativi effettuati per stabilire le quantità di precipitazione, ed in particolare di pioggia, che producono l'innescò di fenomeni franosi, singoli o multipli, localizzati o diffusi. Le frane innescate dalla precipitazione sono dovute all'aumento della pressione dell'acqua nel terreno. Le condizioni idrogeologiche responsabili della franosità sono, a loro volta, legate alla precipitazione attraverso l'infiltrazione, alle caratteristiche locali dei suoli, alle condizioni di umidità del suolo precedenti l'evento pluviometrico, ed alle caratteristiche evolutive dell'evento stesso. Nel complesso, questi fenomeni sono ancora poco conosciuti, e la previsione dell'occorrenza dei movimenti franosi indotti dalla precipitazione rimane una problematica aperta.

il CNR IRPI ha condotto una revisione della letteratura nazionale ed internazionale sulla definizione di soglie meteo-pluvio-idrometriche per l'innescò di movimenti franosi, e sul loro possibile utilizzo nell'ambito di sistemi previsionali d'allerta, a differenti scale geografiche e temporali. La ricerca ha confermato che la previsione delle frane indotte dalla precipitazione può essere effettuata: (i) su basi "fisiche", sviluppando ed applicando modelli concettuali o fisicamente basati, e (ii) su basi "statistiche" (empiriche), costruendo e analizzando serie storiche d'eventi di precipitazione che abbiano (o non abbiano) prodotto dissesti.

L'approccio "fisicamente basato" mira ad estendere nello spazio i semplici modelli di stabilità dei versanti (come ad esempio il modello del "pendio infinito") comunemente utilizzati nella pratica geo-ingegneristica per valutare le condizioni di stabilità (o d'instabilità) di un pendio, o di una porzione di esso. Per legare le caratteristiche e l'evoluzione spazio-temporali della precipitazione alle condizioni ed alle variazioni di stabilità (o d'instabilità) dei versanti, i modelli fisicamente basati adottano modelli dell'infiltrazione, più o meno complessi. In linea di principio, i modelli fisicamente basati permettono di prevedere le quantità di precipitazione necessarie all'innescò delle frane, la localizzazione dei dissesti, ed il tempo d'innescò dei dissesti. Ciò li rende potenzialmente adatti alla previsione delle frane a scopi di protezione civile. Tuttavia esistono delle limitazioni importanti, la principale delle quali è insita nella complessità dei modelli fisicamente basati. Anche i modelli più semplici hanno, infatti, non meno di 7 parametri, molti dei quali di difficile stima o calibrazione, soprattutto per territori ampi e diversificati. Oltre a ciò, i modelli fisicamente basati se sono adatti a predire l'occorrenza di frane superficiali (colate di detrito e scivolamenti superficiali per i quali è più diretto il rapporto fra precipitazione ed innescò dei dissesti), non sono altrettanto efficaci nel prevedere l'occorrenza delle frane profonde e complesse.

La revisione della letteratura ha evidenziato come la maggior parte dei tentativi mirati a stabilire un legame fra misure, stime o previsioni della precipitazione ed il possibile (o probabile) verificarsi di fenomeni franosi, si basi su di un approccio empirico, ed in particolare sulla definizione di soglie pluviometriche. In linea di massima, le soglie pluviometriche possono essere classificate in base: (i) all'estensione dell'area per la quale sono state definite (soglie globali, regionali, locali), e (ii) alla tipologia dei dati pluviometrici, meteorologici o climatici utilizzati (Guzzetti et al., 2007, 2008). Le misure o le stime di precipitazione utilizzate nella definizione delle soglie pluviometriche sono numerose, ed includono:



- La durata della pioggia (D);
- La durata della pioggia critica (D_C);
- La pioggia cumulata durante l'evento, anche nota come pioggia d'evento (C);
- La pioggia critica, corrispondente al totale della pioggia misurata dal momento in cui si verifica un repentino incremento dell'intensità di pioggia fino al momento in cui si innesca la prima frana (C_C);
- La pioggia totale giornaliera (R);
- L'intensità media della pioggia (I);
- La massima intensità oraria della pioggia (I_{MAX});
- L'intensità di picco, (I_P);
- L'intensità media della pioggia per particolari periodi dell'evento pluviometrico (ad esempio, per la parte finale dell'evento pluviometrico) (I_t);
- L'intensità di pioggia in corrispondenza del verificarsi dei dissesti (I_F);
- L'intensità oraria critica (I_C);
- La pioggia antecedente, per un periodo variabile di giorni (A_D).
- Nel tentativo di considerare l'effetto di differenti regimi climatici nello sviluppo delle precipitazioni che possono innescare frane, le misure di pioggia elencate possono essere normalizzate utilizzando differenti parametri climatici, i più comuni dei quali sono:
- La pioggia media annua (MAP);
- Il numero medio di giorni piovosi in un anno (RDs); e
- Il parametro RDN, ottenuto come il rapporto fra il valore della pioggia media annua (MAP) ed il numero medio di giorni piovosi (RDs).

Le differenti soglie empiriche per l'innescamento dei movimenti franosi definite in letteratura possono essere raggruppate in:

- Soglie che utilizzano misure di pioggia relative ad un unico evento pluviometrico;
- Soglie che considerano le condizioni pluviometriche antecedenti l'evento; e
- Altri tipi di soglie (incluse le soglie idrologiche).

Le soglie che utilizzano misure di pioggia relative ad uno specifico evento meteorologico o pluviometrico possono essere a loro volta suddivise in:

- Soglie basate sull'intensità media e sulla durata della pioggia (ID), anche normalizzate;
- Soglie basate sulla pioggia cumulata durante l'evento;
- Soglie basate sulla pioggia cumulata e sulla durata dell'evento (CD), anche normalizzate; e
- Soglie basate sulla pioggia cumulata dell'evento e sull'intensità della precipitazione (CI), anche normalizzate.



Fra le diverse tipologie di soglie possibili, le soglie *ID* e *CD* sono le più utilizzate. Tali soglie sono definite attraverso l'analisi di eventi pluviometrici che hanno (o non hanno) prodotto frane, per i quali siano note le caratteristiche di durata, cumulata e intensità media della precipitazione. Il CNR IRPI ha posto particolare attenzione alla definizione di criteri oggettivi e riproducibili per (i) la raccolta, l'organizzazione e l'analisi di informazioni (meteorologiche, pluviometriche, climatiche, geomorfologiche, ecc.) relative a eventi pluviometrici che hanno (o non hanno) prodotto frane in Italia, (ii) lo sviluppo di metodi statistici per la definizione di soglie empiriche di pioggia (*ID* e *CD*) e per la valutazione dell'incertezza connessa alla definizione delle soglie (Brunetti et al. 2010; Peruccacci et al. 2012; Peruccacci et al. 2017; Rossi et al. 2017), e (iii) la definizione e la codifica di procedure per la definizione di eventi pluviometrici che hanno (o non hanno) prodotto dissesti.



4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Brunetti, M.T., Peruccacci, S., Rossi, M., Luciani, S., Valigi, D., Guzzetti, F., 2010. Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10, 447–458.
- Carrara, A., Guzzetti, F., (eds.), 1995. *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, 353 pp.
- Carrara, A., Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P. 1999. Use of GIS Technology in the Prediction and Monitoring of Landslide Hazard. *Natural Hazards* 20 (2-3), 117-135.
- Chung C.-J.F., Fabbri A.G., 1999. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogram. Eng. Rem. S.* 65 (12), 1389–1399. <https://doi.org/10.1002/9780470012659.ch4>.
- Guzzetti, F. 2006. Ph.D. Thesis, Landslide Hazard and Risk Assessment. Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität University of Bonn, Bonn, Germany. Advisor, Prof. Richard Dikau; adjunct advisor, Dr. Thomas Glade. Available at: http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online/math_nat_fak/2006/guzzetti_fausto/ 389 pp.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P. 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* 31, 181-216.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., Ardizzone, F., 2005. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology* 72, 272-299.
- Guzzetti, F., Galli M., Reichenbach P., Ardizzone F., Cardinali M., 2006. Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, central Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 6, 115-131.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., Stark, C.P., 2007. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorol. Atmos. Phys.* 98, 239–267.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., Stark, C.P., 2008. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flow: an update. *Landslides* 5, 3–17.
- Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 2004. Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms* 29 (6), 687-711.
- Peruccacci, S., Brunetti, M.T., Luciani, S., Vennari, C., Guzzetti, F., 2012. Lithological and seasonal control on rainfall thresholds for the possible initiation of landslides in central Italy. *Geomorphology* 139-140, 79–90.
- Peruccacci, S., Brunetti, M.T., Gariano, S.L., Melillo, M., Rossi, M., Guzzetti, F., 2017. Rainfall thresholds for possible landslide occurrence in Italy. *Geomorphology*, doi:10.1016/j.geomorph.2017.03.031.



- Rossi, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., Mondini, A.C., Peruccacci, S., 2010. Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts. *Geomorphology* 114 (3), 129–142.
- Rossi, M., Luciani, S., Valigi, D., Kirschbaum, D., Brunetti, M. T., Peruccacci, S., & Guzzetti, F. (2017). Statistical approaches for the definition of landslide rainfall thresholds and their uncertainty using rain gauge and satellite data. *Geomorphology*, 285, 16-27.