2. FRANE E SUSCETTIBILITA': CONCETTI GENERALI

2.1. Fenomeni franosi

Con il termine "frana" si definisce un movimento di materiale (roccia, suolo, detrito, o combinazioni tra questi) controllato dalla forza di gravità (USGS, 2004, Highland et al., 2008). Considerando la varietà dei processi di innesco, della geometria della superficie di distacco, del tipo di movimento e dei materiali coinvolti, le frane sono fenomeni complessi. Esiste quindi l'esigenza di classificare i movimenti di versante con caratteristiche comuni in tipologie ben definite. La classificazione più usata è quella proposta da Varnes (1978), essa differenzia le frane secondo il tipo di materiale coinvolto e il tipo di movimento. Esistono altre classificazioni che tengono conto di variabili quali la velocità del processo, i parametri geotecnici, il contenuto di fase fluida nel materiale o anche i processi legati alla formazione del materiale mobilizzato (Hutchinson,1988; Cruden and Varnes, 1996; Leroueil et al., 1996; Hungr et al., 2001).

2.1.1. Cause

Un movimento franoso si verifica quando la forza di gravità vince la resistenza del materiale che costituisce un versante o una porzione di esso. Le frane non si verificano esclusivamente in zone montagnose, sebbene predominino in queste morfologie; esse si verificano in tutti i tipi paesaggio. Le cause che portano la gravità a prevalere sulle forze resistenti possono essere riconducibili sia a condizioni naturali (e.g. geologia, geomorfologia) che ad effetti antropici.

Tra i fattori geologici è di particolare importanza la qualità della roccia: esiste infatti una chiara associazione tra la presenza di materiale alterato (regolite) e il verificarsi dissesti. Le proprietà del materiale alterato dipendono dall'associazione mineralogica della roccia e dalla storia deformativa che essa ha subito; esistono quindi delle differenze che possono risultare determinanti per il verificarsi dei dissesti. In particolare la resistenza del regolite è fortemente influenzata dalla tettonica passata e attiva che determina la formazione di discontinuità meccaniche attraverso le quali possono contemporaneamente agire i processi di degradazione (Ibetsberger, 1996; Pachauri et al., 1998).

Anche la geometria del versante è tra i principali fattori predisponenti i dissesti. Le pendenze più ripide favoriscono l'azione della gravità e inoltre la forma del

versante influisce sulla dinamica dell'infiltrazione e della circolazione idrica sotterranea, risultando determinante soprattutto per alcune tipologie di movimenti. Versanti concavi concentrano i flussi sotterranei in aree ristrette e in generale sono meno stabili di versanti rettilinei o convessi.

I processi di erosione, a breve e medio termine, influiscono sull'equilibrio dei versanti e possono risultare causa dell'innesco di dissesti. Anche il sovraccarico del materiale eroso e depositato dagli agenti di trasporto può talvolta essere causa di dissesti. In maniera indiretta può incidere anche il sollevamento (tettonico, vulcanico, isostatico) di un territorio.

Laddove le condizioni naturali predispongano alla stabilità l'azione dell'uomo può essere causa, diretta o indiretta, di instabilità. Lo spostamento delle masse in un pendio, con operazioni di scavo (in suolo e sottosuolo) ovvero con i carichi conseguenti la costruzione di manufatti, possono risultare destabilizzanti.

Un elenco più dettagliato delle condizioni e dei processi geologici, geomorfologici e antropici che possono influire sul verificarsi dei dissesti è riassunto in Tabella 2.1.

2.1.2. Fattori innescanti o aggravanti

Alcuni fattori non costituiscono di per sé una condizione predisponente all'instabilità, ma rappresentano un'aggravante in situazioni di stabilità limite. Molte delle cause antropiche discusse nel precedente paragrafo possono essere considerate anche fattori aggravanti.

Con "fattore innescante" si intende un processo episodico che causa un decremento delle caratteristiche di resistenza dei materiali e/o un aumento delle forze destabilizzanti agenti su singolo versante o su aree molto vaste. I fattori innescanti possono essere raggruppati in:

- Azione dell'acqua (precipitazioni parossistiche, rapido scioglimento delle nevi)
- Scuotimento del suolo (terremoti, esplosioni artificiali)
- Attività vulcanica
- Altre frane

La saturazione del terreno esercita un controllo determinante sulla stabilità. Oltre ad appesantire il materiale, una variazione rapida del livello d'acqua è causa, in alcune litologie, di sovrappressioni interstiziali che riducono la resistenza del

materiale. In conseguenza a precipitazioni molto intense o prolungate nel tempo, si possono verificare anche centinaia o migliaia di dissesti quasi simultaneamente (De Vita & Reichenbach, 1998; Glade et al., 2000, Coe et al., 2007).

Cause geologiche	
	Materiali scadenti
	Materiali alterati
	Materiali interessati da faglie o fratture
	Discontinuità della roccia orientate sfavorevolmente
	Contrasto di proprietà meccaniche o idrauliche tra materiali
Cause morfologiche	
	Forma, pendenza ed esposizione dei versanti
	Sollevamento tettonico, vulcanico o glacio-isostatico
	Erosione fluviale o glaciale alla base o nei fianchi dei versanti
	Erosione sotterranea
	Carico da materiale depositato sui versanti
	Rimozione della vegetazione (incendi o siccità)
	Disgelo
	Alterazione da cicli gelo-disgelo
	Alterazione da cicli saturazione-essiccamento
Cause antropiche	
	Asportazione di materiale alla base o nei fianchi dei versanti
	Sovraccarichi sui versanti o in cresta
	Prelievi da bacini idrici
	Deforestazione
	Irrigazione
	Attività di estrazione mineraria
	Vibrazioni artificiali
	Perdite da condotte idriche

Tabella 2.1. Principali cause geologiche, morfologiche e antropiche di dissesto.

Un altro importante fattore di innesco è l'azione della sollecitazione sismica. L'effetto della propagazione delle onde sismiche in aree con condizioni di potenziale instabilità può dar luogo a fenomeni diffusi su aree molto estese; maggiore è la

magnitudo del terremoto, maggiore sarà l'area potenzialmente interessata dai movimenti franosi. Per terremoti con M>7 l'area coinvolta può estendersi anche per decine di migliaia di km^2 (Keefer, 1984, 2000 and 2002; Rodriguez et al., 1999). Il meccanismo di innesco è l'aumento dello stress di taglio che agisce sul materiale conseguente al passaggio delle onde sismiche. Ma le onde sismiche, in particolari litologie, possono provocare anche una temporanea riduzione delle caratteristiche di resistenza del materiale. Il fenomeno è chiamato "liquefazione" e interessa sabbie o limi (sia parzialmente saturi che asciutti) causando fenomeni di fessurazione e di subsidenza.

Alcune delle frane più grandi e distruttive sono state innescate dall'attività dei vulcani. Queste si verificano in occasione di eruzioni: il calore può far sciogliere rapidamente grandi masse di neve e mobilizzare sabbia e cenerei sui ripidi fianchi del vulcano (lahars) o l'eruzione può indebolire la struttura del vulcano causando fenomeni di instabilità, più o meno estesi, sui fianchi.

Infine, il verificarsi stesso di una frana altera gli equilibri delle masse (rimozione e sovraccarico) o della circolazione idrica sotterranea, costituendo talvolta un potenziale innesco per altri fenomeni sullo stesso versante.

2.1.3. Tipologie di frana

La classificazione di Varnes (1978) introdotta all'inizio del paragrafo 2.1 descrive i principali tipi di frana distinguendo tra cinque tipi di movimento in combinazione con due tipi di materiale (Tabella 2.2 e Fig. 2.1). Il materiale può essere roccia o suolo; quest'ultimo è distinto anche in *fine* e *grossolano*.

Crolli (falls)

Ribaltamenti (topples)

Colate (flows)

Espandimenti laterali (lateral spreads)

Frane complesse (complex)

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">TIPO DI MOVIMENTO</td><td colspan="3">TIPO DI MATERIALE</td></tr>
<tr><td rowspan="2">ROCCIA</td><td colspan="2">SUOLO</td></tr>
<tr><td>Grossolano</td><td>Fine</td></tr>
<tr><td colspan="2">CROLLI (falls)</td><td>crolli di roccia</td><td>crolli di detrito</td><td>crolli di terra</td></tr>
<tr><td colspan="2">RIBALTAMENTI (topples)</td><td>ribaltamento di roccia</td><td>ribaltamento di detrito</td><td>ribaltamento di terra</td></tr>
<tr><td rowspan="2">SCIVOLAMENTI (SLIDES)</td><td>ROTAZIONALI</td><td rowspan="2">scorrimento di roccia</td><td rowspan="2">scorrimento di detrito</td><td rowspan="2">scorrimento di terra</td></tr>
<tr><td>TRASLAZIONALI</td></tr>
<tr><td colspan="2">ESPANDIMENTI LATERALI (spreads)</td><td>espandimento di roccia</td><td>espandimento di detrito</td><td>espandimento di terra</td></tr>
<tr><td colspan="2">COLATE (flows)</td><td>flusso di roccia (creep profondo)</td><td colspan="2">colata di detrito (creep superficiale)</td></tr>
<tr><td colspan="2">FRANE COMPLESSE (complex)</td><td colspan="3">combinazione di due o più tipo di movimento nello spazio e/o nel tempo</td></tr>
</table>

Tabella 2.2. Tipologie di frane. Versione abbreviate della classificazione di Varnes (1978) dei movimenti di versante.

Crolli

La caratteristica di questa tipologia consiste nel distacco da una superficie molto inclinata (scarpate, scogliere) di materiale, spesso roccioso, ma anche terra o detrito. Il distacco avviene prevalentemente lungo discontinuità meccaniche esistenti nell'ammasso quali fratture tettoniche o da alterazione e superfici di stratificazione. Nei pendii più ripidi il movimento della massa in frana può avvenire in caduta libera e successivamente per rimbalzo o rotolamento. A causa dell'elevato gradiente topografico e dello scarso attrito durante il movimento, il materiale in crollo può raggiungere velocità molto elevate. I depositi caratteristici sono costituiti da falde di detrito alla base di scarpate, la cui larghezza e inclinazione sono funzione dell'altezza della scarpata stessa e del tipo di materiale.

Ribaltamenti

Per alcuni aspetti i ribaltamenti sono simili ai crolli, ma a differenza di quest'ultimi non si verifica la completa separazione del materiale alla base del distacco. Un ribaltamento si verifica quando una massa isolata dal versante ruota attorno ad un punto più basso del cento di gravità della massa stessa, sotto l'effetto di una spinta (spesso azione combinata di gravità e pressioni di fluidi). Anche nei

ribaltamenti il distacco avviene lungo discontinuità meccaniche preesistenti; le condizioni più favorevoli si verificano in presenza di fratture sub verticali e stratificazione a reggi-poggio ad alto angolo.

Scivolamenti

Uno scivolamento è caratterizzato dal movimento di una massa coerente, o con deformazione interna assente o limitata, lungo una superficie o una banda di taglio ben definita. Il materiale è spesso costituito da terra o detrito, più raramente da roccia. La geometria di questa superficie differenzia gli scivolamenti rotazionali dagli scivolamenti traslazionali. Nei primi la superficie di scivolamento è ricurva verso l'alto, quindi il materiale ruota attorno ad un punto posto al di sopra della massa. Nella parte alta dello scivolamento il movimento ha una componente essenzialmente verticale che si tramuta in dislocazione orizzontale verso il basso. Gli scivolamenti traslazionali avvengono su superfici di taglio pressoché piane, la cui orientazione rispetto al versante risalta la componente di taglio delle forze agenti. Condizioni favorevoli a questi dissesti sono stratificazioni a frana-poggio o il contatto parallelo al versante tra bedrock e materiale superficiale.

A differenza degli scivolamenti rotazionali che tendono a raggiungere l'equilibrio delle forze e quindi la stabilità, in quelli traslazionali la condizione di instabilità può propagarsi a lungo nello spazio e nel tempo.

Espandimenti laterali

Gli espandimenti laterali consistono in un movimento a prevalente componente orizzontale ed infatti avvengono su versanti poco inclinati o addirittura su terreni pianeggianti. Il dissesto è causato dallo slittamento di una massa al di sopra di un livello con comportamento plastico; quest'ultimo consiste spesso di sabbie o limi saturi suscettibili di liquefazione o terreni coesivi. L'innesco di tali fenomeni può essere dovuto allo scuotimento del terreno al passaggio delle onde sismiche o a carichi superficiali. Il movimento laterale è accomodato dal taglio alla base della massa in espansione e dall'apertura di fratture di tensione.

Colate

Una colata è definita come un movimento di versante la cui massa è caratterizzata da deformazione interna. Una colata è continua nello spazio ma le

varie parti che costituiscono in flusso si muovono in maniera indipendente. Il limite di base della massa può essere una singola superficie o una zona più spessa nella quale si distribuisce la deformazione di taglio.

Esistono diverse sottocategorie di colata, ognuna delle quali ha precise caratteristiche. Verranno di seguito descritti i caratteri generali di ogni sottocategoria; quelle d'interesse per il lavoro di tesi saranno approfondite nel capitolo successivo.

Flusso di roccia (rock flow). Masse rocciose intensamente fratturate (macro e micro discontinuità) possono andare incontro a deformazione diffusa senza che questa si concentri lungo una singola superficie.

Colata di detrito (*debris flow*). È un movimento molto rapido di materiale grossolano, solitamente saturo, che si mobilizza su versanti ripidi e tende ad incanalarsi durante la discesa. Le colate di detrito sono generalmente mobilizzate da flussi d'acqua superficiali dovuti a eventi piovosi eccezionali o repentini scioglimenti di masse nevose. Occasionalmente possono verificarsi colate "asciutte" in materiali ad esclusiva componente sabbiosa.

Colate di terra (*earth flow*). Il materiale coinvolto è costituito da una moderata frazione grossolana e da una matrice argillosa. La velocità può essere variabile, ma è comunque inferiore a quella raggiungibile da una colata di detrito; ridotte pendenze possono essere sufficienti all'innesco di questo tipo di colate. Il movimento è spesso episodico e intermittente.

Colate di fango (*mud flow*). Sono il risultato della mobilizzazione di materiale prevalentemente fine, la cui quantità è comunque subordinata a quella della frazione liquida. Le colate di fango possono raggiungere elevate velocità e tendono ad incanalarsi seguendo le incisioni fluviali.

Creep. È un movimento impercettibile, lento e costante, della porzione più superficiale di un versante. Il movimento è causato da uno stress di taglio sul versante sufficiente a produrre una deformazione permanente, ma troppo ridotto per causare la rottura di taglio del materiale. Il movimento può essere sia continuo, che stagionale, legato quindi a fattori meteo-climatici. Indizi di creep attivo su un versante sono deformazioni ad alberi o manufatti e piccole ondulature sul terreno.

Frane complesse

La combinazione di due o più tra i tipi di dissesti descritti è definita frana *complessa*.; questa combinazione tra diversi tipi di movimenti può avvenire sia nello

spazio che nel tempo. In ogni caso, l'osservazione attenta delle morfologie e dei processi permette di riconoscere e comprendere l'evoluzione di un fenomeno complesso.

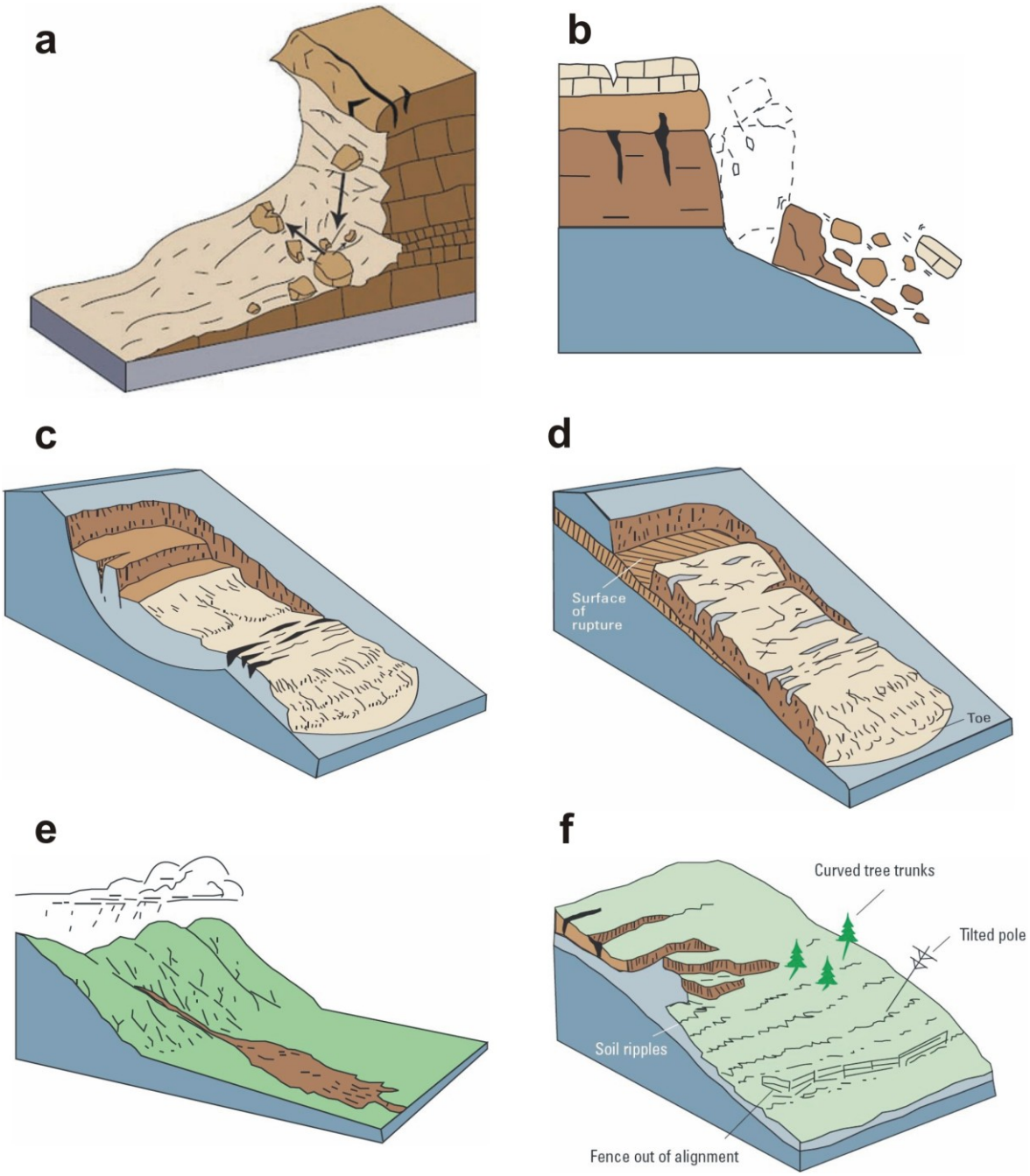

Fig. 2.1. Illustrazioni schematiche di alcuni tipi di movimento franoso secondo Varnes (1978): a: crollo; b: ribaltamento; c: scivolamento rotazionale; d: scivolamento traslazionale; e: colata di detrito; f: creep superficiale (da Highland et al., 2008).

2.2. Mitigazione e prevenzione – Come ridurre gli effetti delle frane

Le conseguenze che una frana ha sul suo intorno sono funzione sia del tipo e della frequenza dei dissesti che della vulnerabilità del territorio coinvolto (densità della popolazione e delle strutture, tipo di attività che vi si svolgono, etc.). Gli effetti sulle persone e sulle infrastrutture possono essere mitigati evitando del tutto le aree esposte al rischio di un evento franoso, o imponendo divieti, restrizioni o limiti alle attività nelle zone di pericolo.

Nel caso in cui invece un dissesto costituisca un pericolo, potenziale o attuale, è possibile limitarne le conseguenze in maniera passiva attraverso opere di protezione (es. reti, barriere, vasche, etc.) o agire in maniera attiva attraverso interventi preventivi (es. stabilizzazioni, muri, riprofilature dei versanti, etc.)

Le amministrazioni regionali o locali possono ridurre *a priori* le conseguenze delle frane attraverso politiche di regolamentazione e gestione del territorio e anche con l'ausilio campagne educative rivolte alla popolazione. Le conoscenze necessarie all'attivazione di queste procedure sono frutto dalla memoria storica del territorio e del giudizio di esperti in grado di valutare nella maniera più adeguata la pericolosità potenziale di un territorio e fornire quindi indicazioni su quali attività è possibile svolgervi.

Solo avendo una conoscenza molto dettagliata del territorio e dei processi connessi ai fenomeni franosi, l'esperto è in grado di fornire un quadro sufficientemente verosimile della pericolosità. Quindi, da un lato devono essere tenuti in considerazione i processi geomorfologici attivi e la storia geologica e, dall'altro, il dissesto nella sua globalità, considerandone i fattori e i meccanismi di innesco, la magnitudo potenziale e le modalità di propagazione e di arresto. Con queste informazioni l'esperto sarà così in grado di elaborare modelli previsionali attendibili.

2.3. Suscettibilità da frana

La suscettibilità ad una data tipologia di dissesto è la probabilità che un evento franoso si verifichi in un determinato luogo considerando l'insieme dei fattori geologico-ambientali di un dato territorio (van Westen et al., 2006; Fell et al., 2008). L'analisi della suscettibilità non include il fattore tempo: la valutazione è elusivamente in termini di probabilità spaziale e non di probabilità spazio-temporale, benché ci si aspetti comunque una frequenza più elevata dei dissesti nelle aree maggiormente suscettibilità.

La valutazione della suscettibilità è la base per la valutazione della pericolosità (hazard); quest'ultima aggiunge alla suscettibilità proprio l'analisi magnitudo/frequenza dei disseti considerati. Quindi alla probabilità spaziale definita dalla suscettibilità si associa anche la probabilità temporale: ovvero la probabilità che un certo evento si verifichi in determinato intervallo di tempo (Fell et al., 2008). Inoltre i dissesti vengono classificati in accordo alla loro "magnitudo", cioè la loro grandezza intesa come volume di materiale coinvolto, estensione superficiale o velocità, secondo la diversa tipologia di frana.

L'analisi di suscettibilità richiede alcune assunzioni di base (Guzzetti et al., 1999). i) ogni evento franoso lascia sul terreno delle tracce caratteristiche che sono riconoscibili e mappabili attraverso rilievi sul terreno o da remoto; ii) i meccanismi di innesco di un qualsiasi fenomeno franoso obbediscono a leggi fisiche, quindi la raccolta dei fattori di instabilità consente la definizione dei modelli di suscettibilità; iii) i dissesti futuri si verificheranno sotto le stesse condizioni che hanno causato i dissesti passati; iv) è possibile determinare la probabilità spaziale e temporale dei dissesti attraverso l'analisi dei fattori geologico-ambientali (Fig.2.2). Quindi, un dato territorio può essere classificato in accordo ai diversi gradi di probabilità di essere soggetto a una determinata tipologia di dissesto.

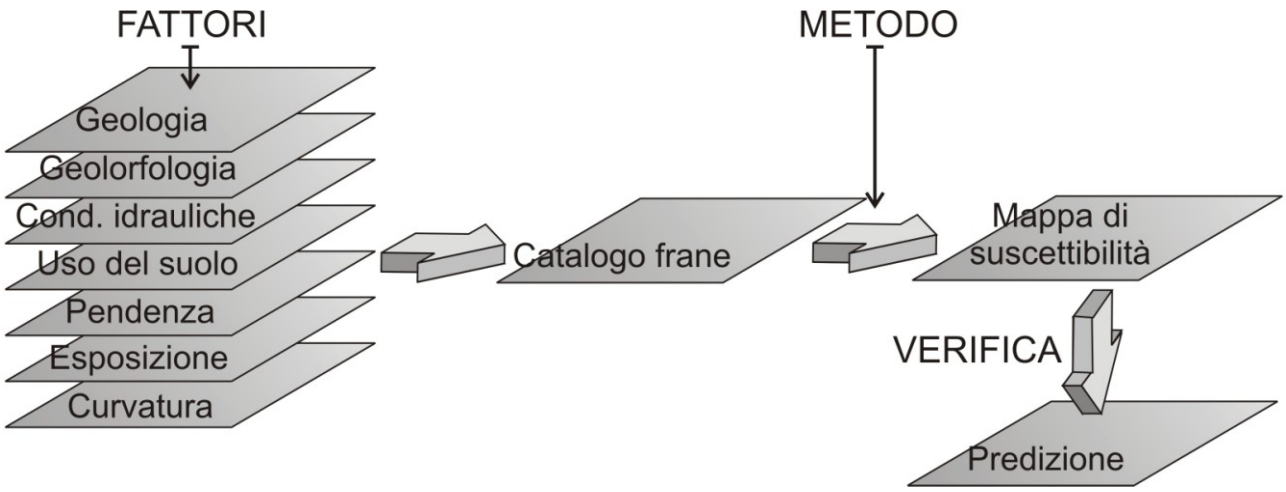

Fig. 2.2. Rappresentazione schematica delle procedure per l'elaborazione di un modello di suscettibilità da frana.

2.3.1. Metodi

L'estrema varietà dei fenomeni franosi, delle loro cause, e dei loro possibili effetti, rende difficile definire una metodologia universale per identificare e mappare una frana o per definirne la suscettibilità e il rischio. Esiste una letteratura specializzata, prodotto dell'esperienza acquisita da esperti del settore in numerose aree in tutto il mondo, che mostra la varietà di strategie, di applicazioni e la possibilità di combinazione tra diversi metodi e tecniche.

In particolare, per la mappatura della suscettibilità, esistono diversi criteri di approccio (Fig. 2.3); essi sono funzione degli scopi e della scala di analisi. In generale, questi criteri sono raggruppabili in tre grandi famiglie: modelli euristici o empirici; metodi statistici; modelli deterministici (Guzzetti et al., 1999; van Westen et al., 2003; Brenning, 2005; van Westen et al., 2008; Cascini, 2008). Per ognuno di essi esistono numerosi metodi applicazione, molti dei quali si sono sviluppati in tempi recenti conseguentemente al diffondersi dell'uso di sistemi informatici territoriali (GIS) (Carrara et al., 19991; van Westen et al., 1997; Carrara et al., 1999).

- Modelli euristici

Si tratta di approcci empirici qualitativi o quantitativi, in parte legati alla soggettività di chi produce il modello. La soggettività in sé non è necessariamente un aspetto negativo, specialmente se è basata sull'opinione di un "esperto". Il successo dipende quindi dal grado di conoscenza che l'operatore possiede del territorio in studio e dei processi morfologici. Inizialmente "l'esperto" individua i fattori che favoriscono, condizionano e determinano i dissesti. Ogni fattore viene suddiviso in classi, ad ognuna delle quali viene attribuito un peso che ne esprime la maggiore o minore propensione al dissesto. Al fine di valutare correttamente l'influenza relativa di ogni classe, se si dispone di un catalogo dei dissesti, può risultare utile analizzare la frequenza degli eventi nelle singole classi di ogni fattore per calibrare il modello.

La carta di suscettibilità viene ottenuta sovrapponendo le mappe relative ad ogni fattore. Ogni unità di territorio di questa mappa risulterà caratterizzata da un indice di suscettibilità il cui valore è uguale alla somma dei pesi di ogni classe. È possibile assegnare anche un peso ad ogni fattore, per esprimerne l'influenza relativa. In questo caso il peso di ogni classe viene moltiplicato per il peso del fattore di appartenenza.

Può capitare la mappa di suscettibilità prodotta non rispecchi la distribuzione delle frane, così come rilevabile attraverso indagini geomorfologiche. È possibile correggere il modello attraverso aggiustamenti successivi tramite confronto con un catalogo dei dissesti.

- Metodi statistici

Attraverso i metodi statistici è possibile valutare quantitativamente e oggettivamente l'incidenza di ciascun parametro sul verificarsi di un evento franoso noto. I pesi sono calcolati con relazioni, diverse per ogni metodo, che considerano il rapporto spaziale tra l'area occupata da ogni classe e l'area in frana nella stessa classe. Esistono due sottogruppi: metodi bivariati e metodi multivariati.

I metodi bivariati considerano i fattori geologico-ambientali come variabili indipendenti nel favorire i dissesti. Tutti i fattori sono correlati con la variabile dipendente (catalogo dei dissesti) e attraverso l'incrocio di ogni fattore con la mappa dei dissesti se ne calcolala quantitativamente la relazione. Inoltre, le tecniche bivariate assumono che le variabili indipendenti non siano tra loro correlate e che concorrono tutte con lo stesso peso nel verificarsi dei dissesti.

Con i metodi multivariati è invece possibile calcolare anche il contributo relativo dei singoli parametri. Si considera infatti l'influenza reciproca dei fattori e si realizzano modelli in cui tutte le variabili agiscono contemporaneamente sulla suscettibilità. Le tecniche statistiche multivariate più usate sono quelle della regressione lineare multipla, dell'analisi discriminante e della regressione logistica.

- Metodi deterministici

I metodi deterministici si basano sulla comprensione e sulla modellazione delle leggi fisiche che governano l'innesco e lo sviluppo delle instabilità. Questi modelli prevedono il calcolo del fattore di sicurezza per ogni unità di mappa, al fine di mapparne la distribuzione spaziale. Il fattore di sicurezza è definito come il rapporto tra forze resistenti e forze agenti lungo la superficie di rottura potenziale. Valori maggiori dell'unità indicano stabilità del pendio, viceversa valori inferiori identificano condizioni di instabilità. I parametri che possono essere presi in considerazione con l'approccio deterministico sono: lo stress normale, l'angolo di attrito del materiale, la coesione, la pressione neutra, lo spessore del suolo, l'accelerazione sismica, i carichi esterni, etc. Inoltre, in relazione alla tipologia di dissesto, si possono associare

modelli di infiltrazione delle piogge e modelli idrogeologici complessi (Montgomery & Dietrich, 1994; Godt et al., 2008).

- Altri metodi

Nella letteratura specialistica sono in unso anche altre metodologie di valutazione della suscettibilità da frana. Metodi probabilistici usano cataloghi multi temporali di dissesti in grado di associare alla probabilità spaziale anche quella temporale.

Esistono anche sistemi complessi (reti neurali artificiali) che prevedono che il modello, opportunamente “addestrato”, sia in grado di minimizzare gli errori e auto-affinarsi (Aleotti & Chawdhury, 1999).

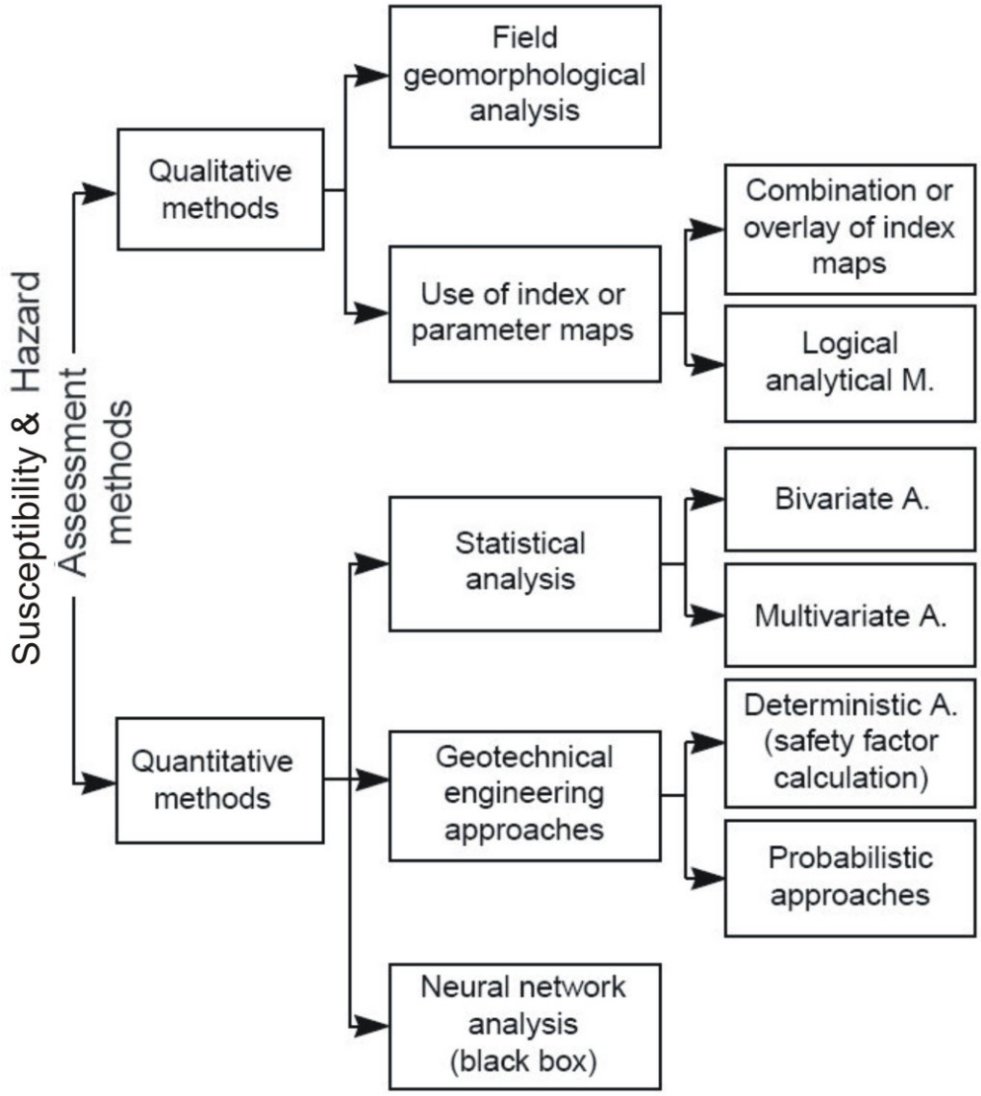

Fig. 2.3. Metodi per la valutazione della suscettibilità e della pericolosità da eventi franosi. Modificato da Aleotti & Chowdhury (1999).

2.3.2. Scala di applicazione

La scala di analisi per la valutazione della suscettibilità è innanzitutto connessa agli scopi che si propone la stessa analisi della suscettibilità e al dettaglio che essi richiedono. Ma la scelta della scala può anche rappresentare una restrizione per la scelta del metodo di analisi e all'atto di reperire i dati. Infatti può risultare privo di significato applicare metodologie di "base" su scale dettagliate o, viceversa, metodi "sofisticati" su aree molto estese. Inoltre la risoluzione e la qualità dei dati deve essere adeguata alla scala di analisi (Cascini, 2008; van Westen et al., 2008) (Tabella 2.3).

In accordo con Cascini (2008), le scale per la valutazione della suscettibilità possono essere classificate in:

Piccola scala (<1:100.000). È solitamente usata per analisi di suscettibilità su scala nazionale o regionale con estensioni dell'ordine di 10^4 km^2 e più. Lo studio a queste scale permette solo applicazione di metodologie di base, spesso di tipo qualitativo, che consentono valutazioni di carattere esclusivamente generale. Può essere utile per l'individuazione delle porzioni di territorio sulle quali approfondire le indagini.

Media scala (1:100.000 – 1:25.000). È indicata per estensioni da 10^3 a 10^4 km^2. Anche questo tipo di scala può essere usata in studi preliminari per l'individuazione di aree con problematiche specifiche che necessitano un approfondimento con un elevato dettaglio.

Grande scala (1:25.000 – 1:5.000). A queste scale è già possibile applicare metodologie quantitative per l'analisi e la zonazione del territorio in classi di suscettibilità con dettaglio sufficiente da poter essere base per interventi di pianificazione territoriale e urbanistica. L'estensione superficiale è solitamente compresa tra 10 a 10^3 km^2.

Scala di dettaglio (>1:5000). Per estensioni non superiori alla decina di km^2. A questa scala è possibile l'applicazione di procedure sofisticate per valutazione della suscettibilità (es. metodi deterministici), conseguentemente il grado di confidenza nella classificazione del territorio è molto elevato. Il dettaglio del prodotto consente il passaggio al piano del rischio, considerando nell'analisi anche gli elementi vulnerabili e il loro valore. Mappe del rischio così prodotte sono validi strumenti per pianificazioni a livello urbano e perimetrazione delle aree a rischio.

Scala		Metodi di zonazione			Livelli di zonazione			Tipi di zonazione	
		Base	Intermedi	Avanzati	Preliminare	Intermedia	Avanzata	Suscettibilità	Pericolosità
Piccola	< 1:100.000	*			*			*	
Media	1:100.000 - 1:25.000	*	(*)		*	(*)		*	(*)
Grande	1:25.000 - 5.000	*	*	*	*	*	*	*	*
Dettagliata	> 1:5.000	[*]	(*)	*	[*]	(*)	*	(*)	*

Tabella 2.3. Metodi, livelli e tipologie di zonazione a scale differenti. *: applicabile; (*): potenzialmente applicabile; [*]: sconsigliato e non usato comunemente. Modificato da Cascini (2008).

2.3.3. Unità di mappa

Per elaborare una mappa di suscettibilità è necessario suddividere il territorio in esame in porzioni caratterizzate da uniformità dei caratteri geologico-ambientali (unità di mappa). Ogni unità di mappa sarà quindi caratterizzata da una combinazione di fattori differente da quelle immediatamente adiacenti.

Esistono differenti criteri di suddivisione in unità di mappa (Guzzetti et al., 1999), tra quelli più in uso: 1) griglia di celle; 2) unità di terreno; 3) unique-condition units (UCU); 4) unità idrologiche; 5) unità politico-amministrative. La scelta del tipo di unità di mappa dipende dal metodo e dalla scala di elaborazione, dalla tipologia di dissesto da investigare e anche dal tipo e dalla qualità dei dati di cui si dispone.

Le “celle” sono il risultato della suddivisione del territorio attraverso una griglia a maglia regolare, solitamente quadrata. Ad ogni cella è assegnato un valore numerico che descrive la variazione nello spazio di una determinata caratteristica. Questo tipo di suddivisione è molto usato quando si dispone di informazioni in formato raster. Il limite della griglia di celle consiste nel non essere in grado di approssimare con precisione il limite continuo di un oggetto (limite geologico, unità geomorfologica, etc.), se la dimensione delle celle è maggiore del grado di definizione dell’oggetto stesso.

Le “unità di terreno” si basano sulla distinzione delle caratteristiche geomorfologiche e geologiche. Sono caratterizzate quindi da uniformità di processi,

di forme o di materiali. Un limite di questa classificazione consiste nella soggettività del distinguere tra i processi o le forme del rilievo. Altro limite può essere rappresentato dalla contemporanea presenza su una stessa area di più processi morfologici.

Le “unique condition unit” (UCU) sono unità che derivano dalla sovrapposizione delle mappe tematiche di ogni fattore geologico-ambientale che ha influenza sui dissesti. Ogni fattore deve essere suddiviso in un numero finito di classi omogenee e l’intersezione dei limiti delle mappe di tutti i fattori disegnerà la mappa delle UCU. Ogni unità è caratterizzata da un’esclusiva combinazione di fattori che descrivono una particolare condizione dal punto di vista geologico-ambientale. Questo tipo di suddivisione è molto usata quando si dispone di rappresentazioni tematiche in formato vettoriale, in quanto la sovrapposizione di queste risulta molto speditiva mediante elaborazione con sistemi GIS.

Il reticolo di drenaggio e le linee di spartiacque possono rappresentare i “limiti di unità idrologiche o idrogeologiche”. In questi casi parametri morfometrici e idrologici possono essere considerati fattori predisponenti nella valutazione della suscettibilità. Questo tipo di suddivisione è molto usata (Guzzetti et al,. 2006a; Coelho-Netto et al., 2007; Rossi et al., 2010) poiché, in generale, i processi morfologici che interessano un versante, e quindi l’unità di mappa, possono essere legittimamente considerati omogenei. Tale criterio di suddivisione può essere migliorato prendendo in considerazione i tipi litologici o le classi di uso del suolo.

Talvolta, per rispondere all’esigenza di effettuare analisi di suscettibilità su aree molto vaste (scala regionale o nazionale) come unità di mappa possono essere presi in considerazione i confini politico-amministrativi. Può esistere una corrispondenza tra questi limiti e quelli geografici e fisiografici di un territorio, ma nella maggior parte dei casi questo tipo di suddivisione rappresenta un limite per l’analisi di suscettibilità.