

**PROGRAMMA PER IL SUPPORTO
AL RAFFORZAMENTO DELLA GOVERNANCE
IN MATERIA DI RIDUZIONE DEL RISCHIO
AI FINI DI PROTEZIONE CIVILE:**

RISCHIO IDROGEOLOGICO E IDRAULICO

A21_TI6

Relazione accompagnatoria della mappa di suscettività da frana

18.05.2020



CIMA
POLIMI
IRPI
CAMI lab
CINiD

Azione

A21

Potenziamento dei sistemi di previsione e di allertamento: mappatura della pericolosità dei fenomeni idrogeologici e idraulici non analizzati nei PAI e/o PGRA

Partner

CNR - IRPI

Autori

P. Reichenbach

M. Rossi

M. Donnini,

L. Pisano,

G. Esposito

O. Petrucci

P. Lollino,

Note / Dettagli

A21_TI6

Relazione accompagnatoria della mappa di suscettività da frana

INDICE

1. Introduzione	4
2. Suscettibilità da frana.....	6
2.1 Unità cartografica di riferimento	7
2.2 Variabili tematiche.....	9
2.3 Metodi e modelli per la zonazione della suscettibilità da frana	11
I modelli statistici.....	12
2.4 Valutazione modelli di suscettibilità da frana	15
2.5 Qualità dei modelli di suscettibilità da frana	16
3. Esempi cartografia delle frane in Italia	18
3.1 Carta Inventario dei Fenomeni Franosi (Progetto IFFI)	18
3.2 Zonazione della suscettibilità da frana	19
Il modello di suscettibilità	20
4. Zonazione della suscettibilità da frana nei CT pilota.....	27
4.1 CT Catanzaro (Regione Calabria).....	29
4.2 CT Lucera (Provincia di Foggia, Regione Puglia).....	33
4.3 CUORE di San Fratello (Provincia di Messina, Regione Siciliana).....	37
5. Conclusioni	42
6. Letteratura di Riferimento.....	44

Lista degli acronimi

SIGLA	DESCRIZIONE
CT	Contesto Territoriale
CFDMI	Centro Funzionale Decentrato Multirischio Integrato
CUORE	Centri Unificati Operativi per l’Emergenza
DPC	Dipartimento di Protezione Civile
IFFI	Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia
ISPRA	Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale
MATTM	Ministero dell’Ambiente, della Tutela del Territorio e del Mare
DG TTRI	Direzione Generale per la Tutela del Territorio e delle Risorse Idriche
PAI	Piano di Assetto Idrogeologico
ReNDiS	Repertorio Nazionale degli interventi per la Difesa del Suolo
UCR	Unità cartografica di riferimento

1. Introduzione

Il rapporto “A21_LG1 Linee guida per la mappatura della pericolosità dei fenomeni idrogeologici e idraulici non analizzati dal PAI e/o dal PGRA e per la relativa integrazione dei Piani di protezione civile” fa parte dei documenti redatti nell’ambito dell’attività A.2.1 – Potenziamento dei sistemi di previsione e allertamento: mappatura della pericolosità dei fenomeni idrogeologici e idraulici non analizzati nei PAI e/o PGRA. Il documento descrive tecniche e metodologie per la realizzazione di carte di suscettibilità da frana sinottiche e a scala di bacino. Vengono descritti in particolare: i) i metodi e i modelli principali per la zonazione della suscettibilità da frana con particolare riferimento all’importanza della validazione dei modelli; ii) alcuni esempi di cartografia delle frane realizzate per l’intero territorio italiano, e iii) alcuni esempi di carte di suscettibilità preparate per tre contesti territoriali pilota.

È importante sottolineare che nel report non verranno analizzate le procedure e le tecniche per la valutazione della pericolosità da frana in termini di evoluzione dei dissesti, realizzata attraverso l’individuazione di possibili scenari evolutivi dei movimenti franosi. Questa tematica è parte del report “A32_LG3 - Linee guida per la redazione di carte della suscettibilità a franare” redatto nell’ambito dell’attività A.3.2 - Miglioramento della pianificazione di emergenza comunale e intercomunale: predisposizione di scenari di evento e di rischio e individuazione delle aree a minore sostenibilità del rischio.

Per poter comprendere il contenuto del rapporto riteniamo utili indicare il significato dei seguenti termini:

Suscettibilità da frana. È una misura della propensione che un territorio ha di produrre dissesti (Brabb, 1984). È la probabilità spaziale (geografica) dei movimenti franosi (Guzzetti et al., 2005). La suscettibilità dipende dalle caratteristiche fisiografiche e climatiche di un territorio, e può essere influenzata dall’azione dell’uomo. La suscettibilità non tiene conto della frequenza e della dimensione (o magnitudo) delle frane (Reichenbach et al. 2018; Guzzetti et al., 2005; Guzzetti, 2006).

Pericolosità da frana. È la probabilità che un dissesto di dimensioni (magnitudo) date si verifichi in un’area ed in un tempo predefiniti (Varnes e IAEG, 1984; Guzzetti et al. 1999; Guzzetti et al., 2005). La stima della pericolosità richiede la valutazione di tre probabilità distinte (ed indipendenti): la probabilità temporale, la probabilità dimensionale, e la probabilità geografica delle frane (la suscettibilità) (Guzzetti et al., 2005, 2006;

Unità cartografica di riferimento (UCR). È l’area geografica minima utilizzata per la mappatura delle suscettibilità e della pericolosità da frana. È caratterizzata da un insieme di caratteri (fisici, ambientali, amministrativi) che differiscono in modo significativo da quelli delle unità adiacenti, attraverso limiti definiti, oggettivi ed identificabili. Le UCR possono essere definite (e delimitate) sulla base di criteri geomorfologici, idrologici, topografici od amministrativi.

Le mappe di suscettibilità da frana sono propedeutiche alla zonazione della pericolosità e del rischio da frana, e possono essere strumenti utili alla pianificazione e alla gestione territoriale. Le mappe di suscettibilità sono anche utili nell’ambito di sistemi d’allerta per la possibile occorrenza di frane.

Nel rapporto vengono descritti i metodi principali per la zonazione della suscettibilità da frana con particolare riferimento all’importanza del training e della validazione dei modelli; le

principali unità cartografiche di riferimento, e le caratteristiche delle variabili esplanatorie e di raggruppamento rilevanti per la stima della reale propensione al dissesto di un territorio (§ 2). Segue la descrizione di alcune carte di suscettibilità realizzate per l’intero territorio nazionale (§ 3). Vengono poi descritte le carte di suscettibilità realizzate per tre Contesti Territoriali di riferimento (§ 4). Il documento si conclude con alcune raccomandazioni e un elenco della letteratura di riferimento.

Per maggiori informazioni e dettagli relativi ai metodi statistici descritti e utilizzati per la realizzazione delle carte di suscettibilità da frana descritte nel rapporto si possono consultare i seguenti articoli scientifici:

Reichenbach P., Rossi M., Malamud B.D., Mihir M., Guzzetti F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 180, 60-91.

Rossi M. and Reichenbach P. (2016). LAND-SE: a software for statistically based landslide susceptibility zonation, version 1.0. *Geoscientific Model Development*, 9(10).

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.

2. Suscettibilità da frana

La grande variabilità dei fenomeni franosi rende difficile stabilire una unica metodologia per la definizione della suscettibilità da frana. Nella pratica, si utilizzano approcci differenti per prevedere il comportamento di una singola frana in un’area ristretta, o di una popolazione di frane in un territorio ampio e diversificato. Di norma i fenomeni franosi singoli sono studiati con tecniche proprie della geologia applicata e della geotecnica, mentre lo studio di popolazioni di frane (da alcune decine a diverse migliaia di frane), avviene utilizzando metodi, tecniche e strumenti propri della geomorfologia. Anche la scala di indagine (locale vs regionale) indirizza gli strumenti e i metodi di indagine da utilizzare per l’analisi della propensione di un territorio alla franosità. Il contesto del problema è stato definito per la prima volta da David Varnes e dai suoi collaboratori dell’International Association of Engineering Geology (IAEG) nel 1984. Da allora, sono numerosissime 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, e (iii) della stima della probabilità spaziale, temporale e dimensionale 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 poche migliaia di chilometri quadrati), ma esistono esempi di zonazione a scala regionale o nazionale.

La suscettibilità da frana è una misura della propensione che un territorio ha di produrre dissesti (Brabb, 1984), è quindi la probabilità spaziale (geografica) di occorrenza di movimenti franosi (Guzzetti et al., 2005). La suscettibilità dipende dalle caratteristiche geomorfologiche, geologiche e climatiche di un territorio, e può essere influenzata dall’azione dell’uomo. La suscettibilità è tempo invariante, ossia non tiene conto di quando o quanto frequentemente potranno avvenire le frane, e neppure quanto grande (dimensione) o distruttivo potrà essere un dissesto (Guzzetti et al., 2005; Guzzetti, 2006a). Una zonazione della suscettibilità da frana suddivide e classifica un territorio sulla base della propensione che lo stesso ha di produrre frane.

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 (la suscettibilità), 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 – ed 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).

La pericolosità da frana è definita come la probabilità che una frana di una certa dimensione (o magnitudo) avvenga in un’area e in un periodo predeterminati (Varnes et al. 1984, Guzzetti et al. 1999, 2005, 2006a). Tale definizione incorpora i concetti di “tempo” (quando o quanto frequentemente potrà accadere una frana), “magnitudo” o dimensione (quanto grande o

distruttiva sarà la frana) e “spazio” (dove avverrà la frana). In termini probabilistici, la pericolosità da frana H è definita dalla probabilità congiunta:

$$H = P(A_L) \times P(N_L) \times S \quad \text{Eq. 1}$$

dove $P(A_L)$ è la probabilità che una frana abbia un’area pari o superiore a un’area minima a_L , $P(N_L)$ è la probabilità che uno o più dissesti accadano in un periodo t , e S è la suscettibilità, ossia la probabilità geografica dell’occorrenza di una frana in una regione. Quindi la stima della pericolosità richiede la valutazione delle tre probabilità distinte e considerate indipendenti.

Per la valutazione della suscettibilità e della pericolosità da frana sono ormai indispensabili tecnologie GIS (*Geographic Information Systems*), per il trattamento e l’elaborazione di informazioni geografiche (territoriali). Le tecnologie GIS sono utili per: (i) acquisire ed organizzare le informazioni tematiche necessarie alla modellazione della suscettibilità da frana; (ii) effettuare modellazioni “semplici” della suscettibilità da frana (ad esempio attraverso la produzione di una carta della densità da frana); (iii) elaborare, le informazioni territoriali (geografiche) necessarie alla modellazione statistica; (iv) esportare le informazioni territoriali in formati compatibili ai SW di modellazione statistica; (v) importare i risultati della modellazione statistica per la visualizzazione geografica; e per (vi) la disseminazione dell’informazione sulla suscettibilità e pericolosità da frana, attraverso la stampa di prodotti cartografici specifici, e lo sviluppo di sistemi Web-GIS.

La letteratura scientifica e tecnica sui temi della suscettibilità, della pericolosità, della vulnerabilità e del rischio da frana è ampia e complessa (Guzzetti, 2006) e la revisione di tale letteratura è al di fuori degli scopi di questo documento. In questo rapporto verranno descritti le principali tematiche e si farà riferimento ad una recente revisione della letteratura finalizzata all’analisi dei metodi statisticamente basati (Reichenbach et al., 2018).

2.1 Unità cartografica di riferimento

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). 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* dipendono 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 recensione relativa ai modelli statistici (Reichenbach et al., 2018) ha rivelato che l’unità di mappatura maggiormente utilizzata è il pixel (86,4%), mentre gli altri tipi, pur essendo valide alternative sono utilizzate meno frequentemente, comprese le unità di versante (5,1%), le unique condition units (4,6%) e altri tipi o combinazioni (3,9%) (Fig. 2.1).

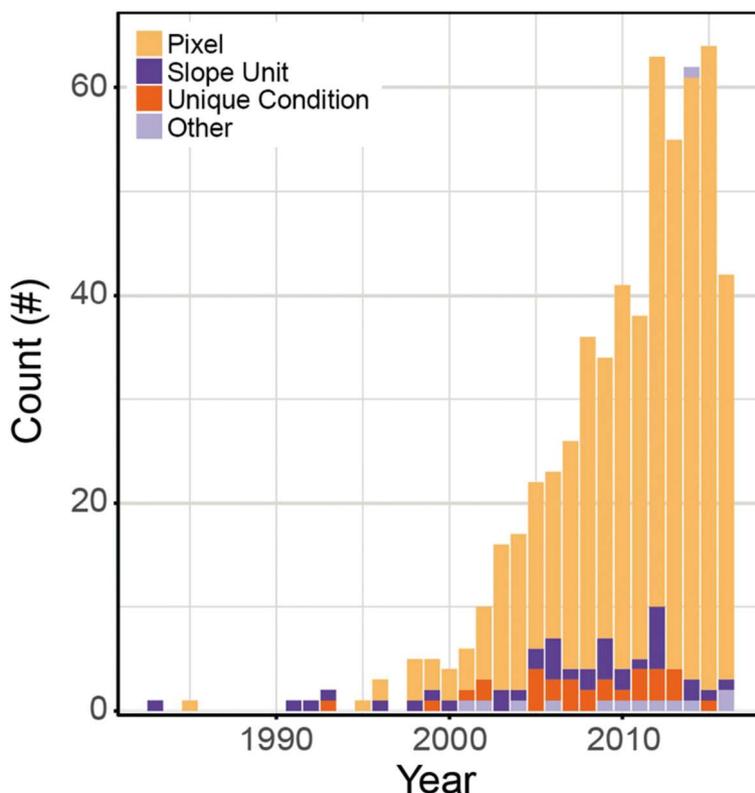


Figura 2.1 Unità cartografica di riferimento. L’istogramma mostra il numero di articoli in 4 classi di unità di riferimento suddivisi per anno. (Reichenbach et al., 2018)

2.2 Variabili tematiche

Per la realizzazione di carte di suscettibilità la scelta dei dati è di fondamentale rilevanza. Possiamo suddividere i dati necessari in due categorie principali: dati relativi alla distribuzione delle frane e quelli relativi alle caratteristiche del territorio (variabili tematiche e ambientali). L’informazione relativa alla distribuzione spaziale e temporale delle frane è principalmente contenuta nella cartografia delle frane che può essere classificata in quattro gruppi fondamentali (Guzzetti et al., 2012) come segue:

- Carte inventario di tipo geomorfologico
- Carte inventario di evento; si riferiscono alle frane associate ad un determinato evento piovoso, un terremoto o ad un rapido scioglimento della neve. Si possono considerare inventari stagionali.
- Carte inventario multitemporali; inventari preparati per la stessa area ma per periodi di tempo diversi.
- Carte inventario storici ottenuti attraverso una ricerca bibliografica o la lettura di quotidiani.

Le tecniche di mappatura utilizzate dipendono dal tipo di cartografia che si vuole ottenere, dall’estensione dell’area di studio, dal tempo e dai fondi disponibili. Nella figura 2.2 è possibile vedere come sono cambiate negli ultimi anni le tecniche di mappatura delle frane.

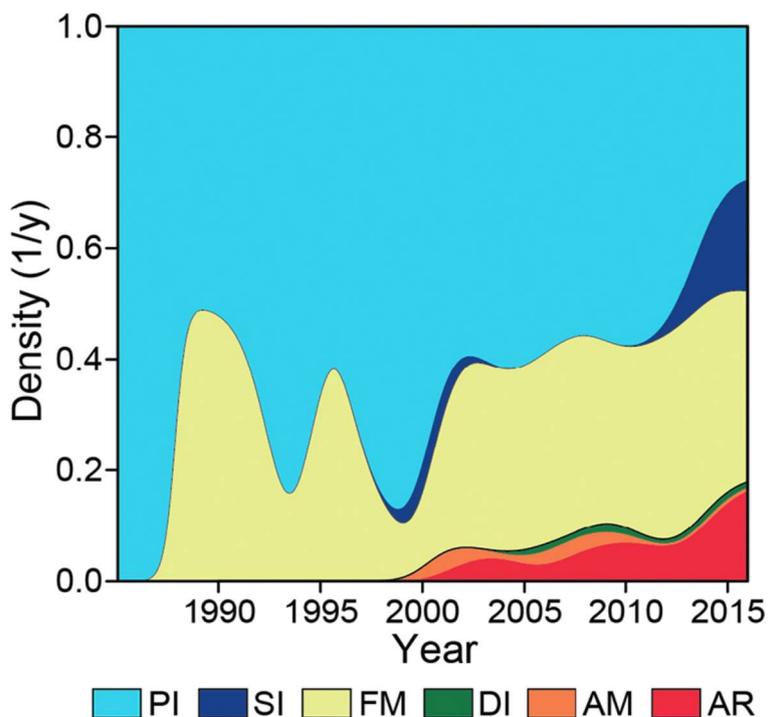


Figura 2.2 Tecniche di mappatura delle frane. Il diagramma mostra la distribuzione delle tecniche di mappatura suddivise per anni. Legenda: PI, interpretazione di fotografie aeree; SI, interpretazione delle immagini satellitari; FM, mappatura in campagna; DI, interpretazione visiva del DEM e derivati; AM, mappatura automatica o semiautomatica di immagini satellitari; AR, analisi di archivio e fonti storiche. (Reichenbach et al., 2018)

Le variabili tematiche utilizzate in letteratura sono molteplici e molto diversificate nei vari lavori tutte riconducibili alle 23 classi riportate in figura 2.3.

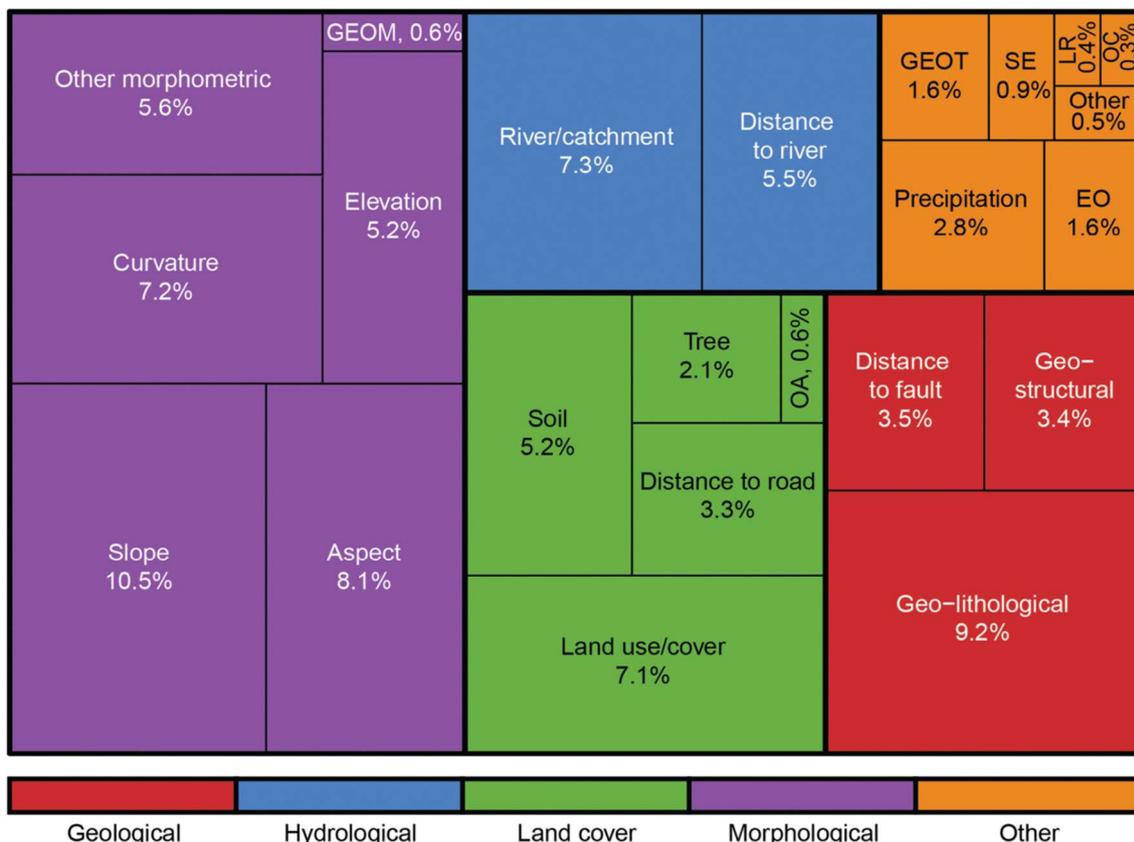


Figura 2.3 Variabili tematiche. Il grafico mostra la distribuzione percentuale delle variabili tematiche raggruppate in 23 classi appartenenti a cinque cluster tematici, presentati con colori diversi. Legenda: EO, osservazione della Terra; GEOM, geomorfologica; GEOT, geotecnica; LR, relativa alle frane; OA, altro antropico; OC, altro climatico; SE, sismico. (Reichenbach et al., 2018)

2.3 Metodi e modelli per la zonazione della suscettibilità 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). Spesso la scelta del metodo da utilizzare è legato alla tipologia del prodotto finale che è strettamente dipendente alla scala di lavoro e alla risoluzione e qualità dei dati disponibili (Cascini, 2008). L’analisi della letteratura (Guzzetti et al. 1999; Guzzetti, 2006) indica inoltre 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, od ad 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 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*.
- 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.

I modelli statistici

In termini statistici la suscettibilità da frana è la probabilità di occorrenza geografica di un dissesto, dato un insieme di condizioni territoriali e ambientali. Se si definisce la proposizione (Chang & Fabbri, 1999):

$$F = \text{"una regione } r \text{ sarà interessata da frane"} \quad \text{Eq. 2}$$

la suscettibilità S è la probabilità che la proposizione F sia vera, date le locali condizioni territoriali e ambientali. In linguaggio formale:

$$S = P[F \text{ è vero} \mid \{\text{morfologia, litologia, struttura, uso del suolo, ...}\}] \quad \text{Eq. 3}$$

o,

$$S = P[F \text{ è vero} \mid \{v_1(r), v_2(r), \dots, v_m(r)\}] \quad \text{Eq. 4}$$

dove $v_1(r), v_2(r), \dots, v_m(r)$ sono le variabili territoriali e ambientali della regione r .

Chung & Fabbri (1999) hanno evidenziato un problema concettuale con l'applicazione della proposizione F per la stima della suscettibilità da frana: la distribuzione futura delle frane non è nota a priori, pertanto risulta impossibile definire la suscettibilità da frana sulla base delle equazioni 3 e 4. Per superare tale limite propongono di definire una diversa proposizione:

$$L = \text{"una regione } r \text{ è stata interessata da frane"} \quad \text{Eq. 5}$$

La distribuzione delle frane passate è un’informazione disponibile “a priori”, per esempio analizzando una carta inventario delle frane, ed è possibile scrivere:

$$D = P[L \text{ è vero} \mid \{v_1(r), v_2(r), \dots, v_m(r)\}] \quad \text{Eq. 6}$$

Se si assume che in futuro le frane saranno prodotte dalle stesse cause che le hanno prodotte in passato, è possibile affermare che la probabilità dell’occorrenza geografica delle frane passate nella regione r ($S \equiv D$), o:

$$P[F \mid \{v_1(r), v_2(r), \dots, v_m(r)\}] = P[L \mid \{v_1(r), v_2(r), \dots, v_m(r)\}] \quad \text{Eq. 7}$$

È quindi possibile prevedere la suscettibilità da frana (nel futuro) a partire dalla distribuzione delle frane nel passato. Per la stima quantitativa della suscettibilità da frana sono stati utilizzati in prevalenza approcci di tipo probabilistico basati su metodi di classificazione multivariata (Guzzetti, 2006). Il territorio oggetto d’analisi è suddiviso in unità territoriali (unità cartografiche, o porzioni di territorio) per le quali è definito un set di variabili territoriali esplanatorie $\{v_1, v_2, \dots, v_m\}$. Tali unità sono poi suddivise in gruppi, a seconda che contengano (o non contengano) frane, per definire una variabile di raggruppamento. Utilizzando metodi e strumenti di classificazione statistica le singole unità territoriali sono attribuite all’insieme delle regioni previste “stabili” (G_0), o all’insieme delle regioni previste “instabili” (G_1). La probabilità d’appartenenza di ciascuna unità territoriale all’insieme delle regioni instabili (o stabili) è assunta come misura della suscettibilità

$$S = P[r \in G_1] = 1 - P[r \in G_0] \quad \text{Eq. 8}$$

In termini pratici ad ogni unità territoriale è assegnato un valore di probabilità, utilizzato per rappresentare le singole regioni sulla base della propensione al dissesto.

L’utilizzo di variabili esplanatorie e di raggruppamento imparziali (non distorte, non soggette ad errori) è fondamentale per la stima della reale propensione al dissesto di un territorio. Solo utilizzando campioni statistici significativi e imparziali è possibile valutare correttamente la suscettibilità da frana. Pertanto una corretta ed esaustiva caratterizzazione del territorio (e.g. morfologia, geologia, uso del suolo, ecc.) e una corretta ed omogenea stima della distribuzione spaziale delle frane nell’area di studio (derivata in genere da carte inventario di frana) sono necessarie prima ancora della scelta del modello predittivo da utilizzare.

In letteratura sono stati utilizzati diversi approcci e metodi di classificazione statistica. In tutti i casi è prevista una fase di training, nella quale il modello viene generato, una fase di applicazione del modello per la stima della suscettibilità su tutta l’area di studio, e una fase di validazione, nella quale i risultati del modello sono confrontati con dataset di frana indipendenti (non utilizzati nella fase di training). Una volta scelto il tipo di approccio da utilizzare ed ottenuta la stima della suscettibilità da frana di un territorio, è fondamentale fornire una misura della reale capacità predittiva del modello e della relativa incertezza, sia in fase di training che di validazione. Gran parte degli autori utilizzano un unico modelli ma esistono numerosi articoli che descrivono e confrontano i risultati di due o tre modelli diversi. Come evidenzia la figura 2.4, i modelli maggiormente utilizzati sono l’analisi logistica (18,5%), l’overlay di dati (10,7%), le reti neurali (8,3%) e modelli basati su indici (8,2%). La figura 2.5 illustra la distribuzione temporale dei modelli raggruppati in 6 classi principali.

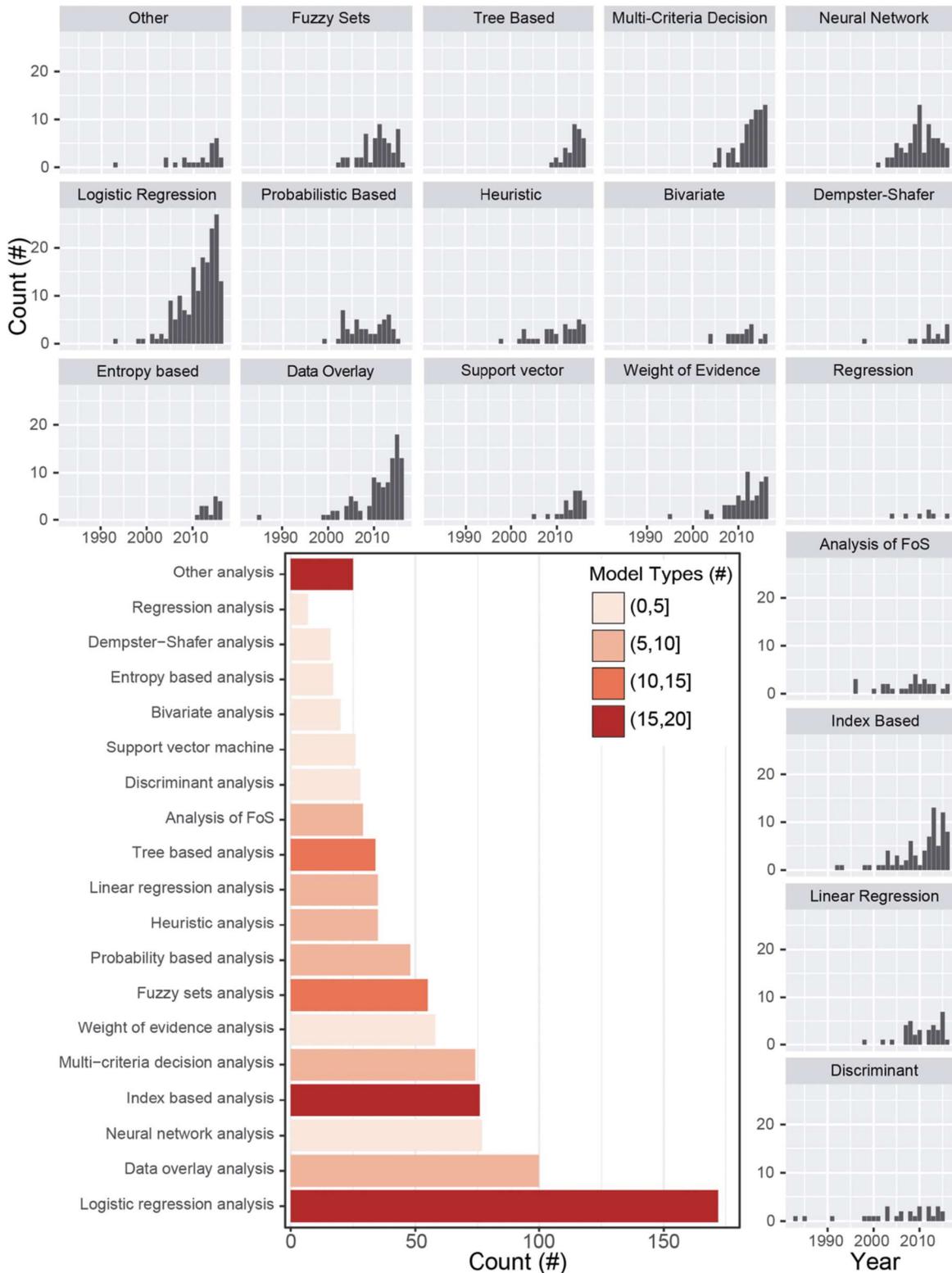


Figura 2.4 Tipi di modello di suscettibilità. Il diagramma mostra il conteggio dei modelli statistici raggruppati in 19 classi. Le parentesi quadre indicano che il limite di classe è incluso, mentre le parentesi tonde indicano che il limite di classe è non incluso. Gli istogrammi in grigio mostrano per anni il numero di articoli suddiviso per il tipo di modello. (Reichenbach et al., 2018)

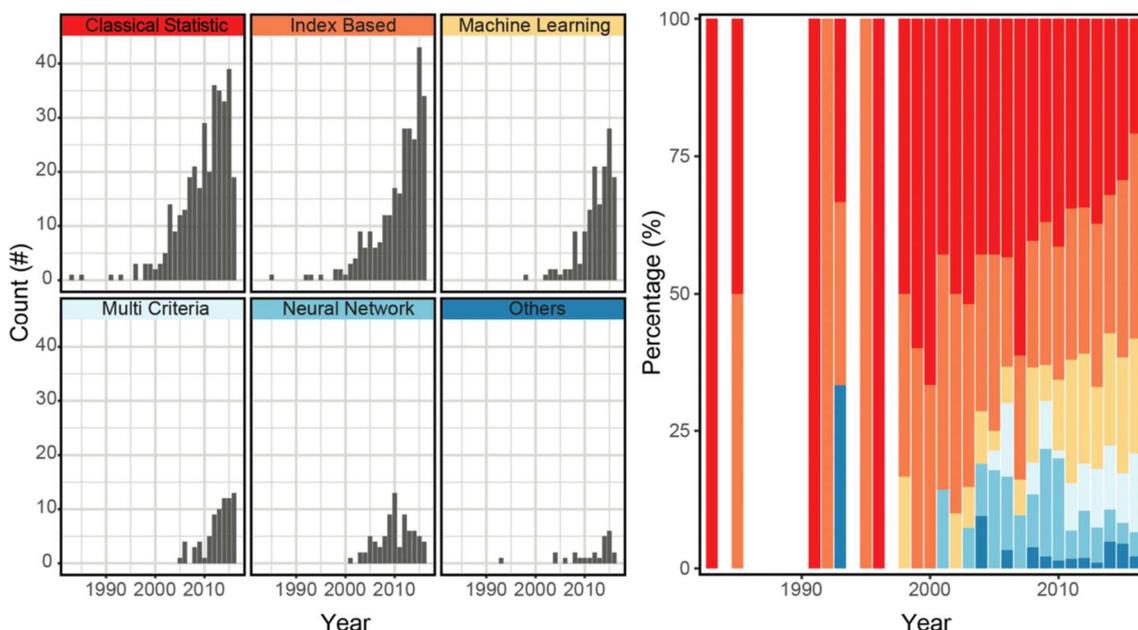


Figura 2.5 Tipi di modello di suscettibilità. Gli istogrammi in grigio mostrano il numero di articoli per i 6 cluster di tipi di modello, per anno. Il grafico a barre mostra la percentuale dei sei cluster di tipi di modello, per anno. (Reichenbach et al., 2018)

2.4 Valutazione modelli di suscettibilità da frana

Per valutare la performance di un modello di suscettibilità e della zonazione associata si possono utilizzare diverse metriche e indici (Guzzetti et al., 2006a, b; Melchiorre et al., 2006; Frattini et al., 2010; Rossi et al., 2010). Indipendentemente dalle metriche o dagli indici utilizzati, una differenza importante sussiste tra la valutazione del modello e la sua capacità predittiva. La prima (valutazione del fit del modello) misura la capacità del modello di classificazione e di descrivere ("match") una distribuzione delle frane conosciuta, e si ottiene valutando i risultati del modello rispetto alle informazioni utilizzate in fase di calibrazione. La valutazione delle capacità predittive del modello misura la capacità di prevedere altre frane e si ottiene confrontando i risultati del modello con informazioni di frana indipendenti non utilizzate per costruire il modello. Quest'ultimo è più difficile da ottenere rispetto alla valutazione del "model fit". (Chung e Fabbri, 1999, 2006; Guzzetti et al., 2006a, b; Frattini et al., 2010; Rossi et al., 2010). La figura 2.6 illustra l'uso in letteratura di diversi indici di valutazione del modello e della sua capacità predittiva.

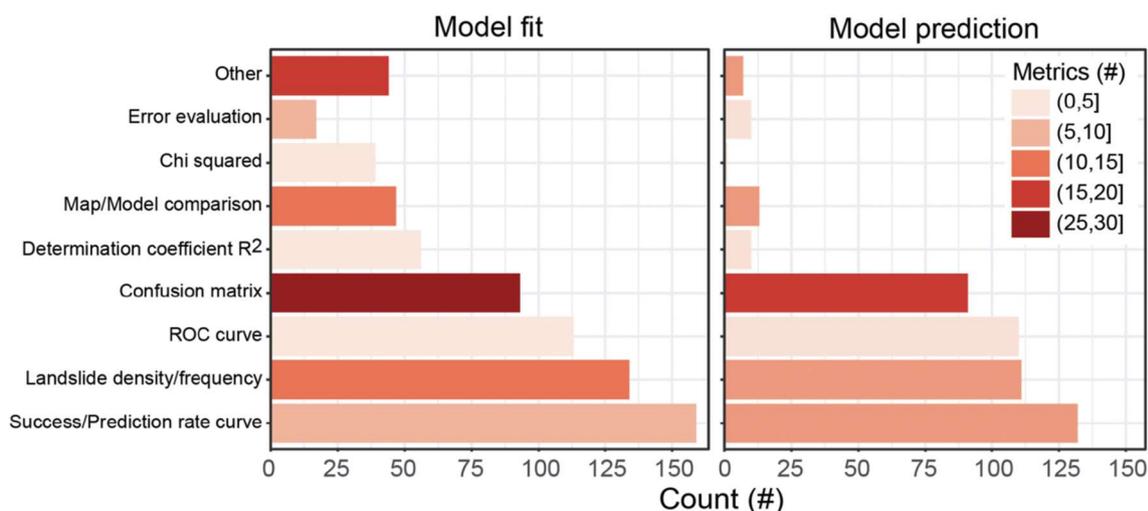


Figura 2.6 Indici di valutazione del modello e della sua capacità predittiva. Conteggio delle metriche utilizzate per la misura del modello (a sinistra) e per la previsione del modello (a destra), raggruppate in nove gruppi. Nella legenda le parentesi quadre indicano il limite di classe incluso e le parentesi tonde che il limite di classe non è incluso. (Reichenbach et al., 2018)

2.5 Qualità dei modelli di suscettibilità da frana

Per valutare la qualità di un modello di suscettibilità da frana, è stato proposto uno schema di classificazione (Tabella 2.1) in funzione delle informazioni fornite congiuntamente alla stima della suscettibilità da frane (Guzzetti et al., 2006b). Sulla base dei criteri elencati in tabella, in assenza di informazioni disponibili sulla qualità del modello, la risultante mappa di zonazione di suscettibilità da frana ha il livello di qualità più basso possibile (livello 0). Questo livello è considerato inaccettabile in particolar modo per modelli statistici o fisicamente basati di recente realizzazione. Quando sono disponibili stime del grado di fitting (o performance in fase di training) del modello, il livello di qualità è il minimo accettabile (livello 1). Quando è fornito l'errore associato alla stima della suscettibilità da frana, il livello di qualità è alto (livello 2). Infine, quando è nota la performance del modello in previsione, il livello di qualità è ancora superiore (livello 4). Il livello di qualità finale del modello è quello risultante dalla somma dei livelli di qualità individuali. Ad esempio, un modello di suscettibilità per il quale siano disponibili la stima del grado di fitting (livello 1) e la stima delle performance del modello in previsione (livello 4) ha un livello finale di qualità 5 (livello 5). Se per lo stesso modello è disponibile anche la stima degli errori associati alla valutazione della suscettibilità per ciascuna unità di mappatura, il livello di qualità finale è 7 (livello 7).

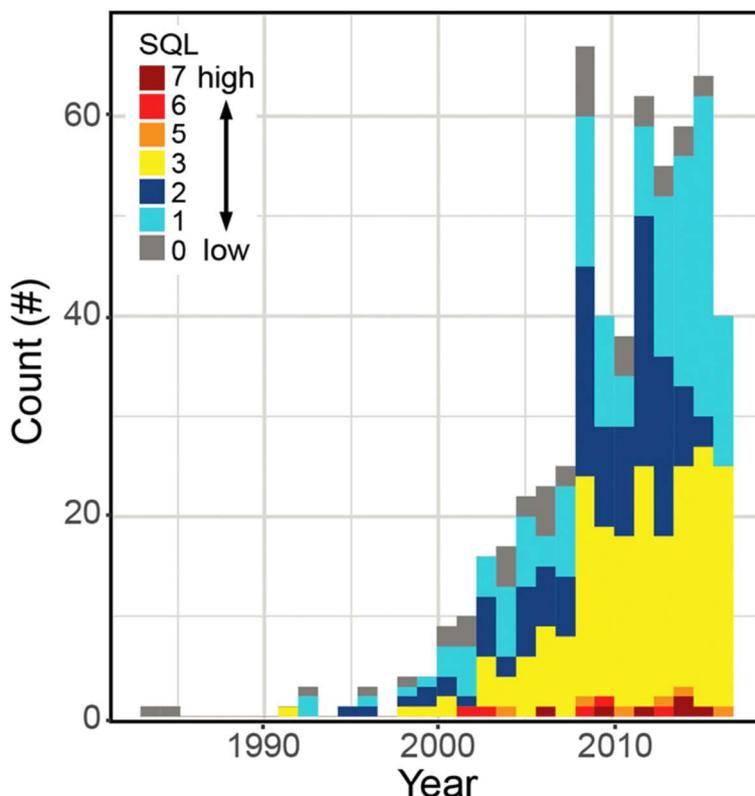


Figura 2.7. Qualità dei modelli di suscettibilità alle frane. L'istogramma mostra la distribuzione temporale dell'indice SQL (Susceptibility Quality Level), in sette classi, calcolate come proposta da Guzzetti et al. (2006a,b). Zero è il più basso e il 7 è l'SQL più alto (vedi Tabella 2.1). (Reichenbach et al., 2018)

Tabella 2.1. Criteri e livelli di qualità per i modelli di suscettibilità da frana e per le mappe associate.

Descrizione	Livello
Nessuna informazione disponibile, o nessun test eseguito per determinare la qualità e le capacità predittive della modello di suscettibilità da frana	0
Sono disponibili le stime del grado di fitting (o performance in fase di training) del modello (test effettuati con le stesse informazioni di frana utilizzate per ottenere la stima della suscettibilità)	1
Sono disponibili le stime degli errori associati ai valori di suscettibilità prevista in ciascuna unità territoriale (test effettuati con le stesse informazioni di frana utilizzate per ottenere la stima della suscettibilità)	2
Sono disponibili le stime delle performance del modello in previsione (test eseguiti con informazioni di frana indipendenti, non utilizzate per ottenere la stima della suscettibilità)	4

3. Esempi cartografia delle frane in Italia

Nella letteratura nazionale ed internazionale, sono numerosi gli articoli scientifici che descrivono modelli e applicazioni finalizzati alla valutazione e alla zonazione della suscettibilità da frana per singoli bacini o intere regioni italiane. Inoltre nell’ambito dei piani regolatori comunali, gli aspetti relativi alle caratteristiche geologiche, geomorfologiche ed idrogeologiche del territorio, sono spesso valutate ed analizzate anche attraverso l’uso di carte di suscettibilità del territorio. La revisione di tale letteratura è al di fuori degli scopi di questo documento e quindi in questo paragrafo vengono descritte solamente le cartografie delle frane (carte inventari e carte di suscettibilità) disponibili per tutto il territorio nazionale.

3.1 Carta Inventario dei Fenomeni Franosi (Progetto IFFI)

Nell’ambito del Progetto IFFI realizzato da ISPRA, è stato prodotto per l’intero territorio nazionale un Inventario dei Fenomeni Franosi, che riporta secondo modalità standardizzate e condivise i dissesti riconosciuti e mappati sul territorio italiano (Trigila et al., 2007; 2018). L’Inventario IFFI è la banca dati sulle frane più completa e di dettaglio esistente in Italia, per la scala della cartografia adottata (1: 10.000) e per il numero di parametri ad esse associati (<http://www.progettoiffi.isprambiente.it>). Le frane censite nell’Inventario sono oltre 620.800 e interessano un’area di 23.700 km², pari al 7,9% del territorio nazionale. La distribuzione delle frane è stata spazializzata per ottenere l’indice di franosità, pari alla percentuale di area in frana per ogni chilometro quadrato (Figura 3.1A). L’Inventario IFFI è un importante strumento conoscitivo di base che è stato utilizzato per la valutazione della pericolosità da frana nei Piani di Assetto Idrogeologico (PAI), la progettazione preliminare di interventi di difesa del suolo e di reti infrastrutturali e la redazione dei Piani di Emergenza di Protezione Civile.

Per aggiornare la mappa della pericolosità da frana sull’intero territorio nazionale, ISPRA ha realizzato una mosaicatura nazionale delle aree a pericolosità riportate nei Piani di Assetto Idrogeologico (PAI). La superficie complessiva, delle aree a pericolosità da frana PAI e delle aree di attenzione è pari a 59.981 km² (19,9% del territorio nazionale). La superficie delle aree a pericolosità da frana molto elevata è pari a 9.153 km² (3%), quella a pericolosità elevata è pari a 16.257 km² (5,4%), a pericolosità media a 13.836 km² (4,6%), a pericolosità moderata a 13.953 km² (4,6%) e quella delle aree di attenzione è pari a 6.782 km² (2,2%). Se prendiamo in considerazione le classi a maggiore pericolosità (elevata P3 e molto elevata P4), assoggettate ai vincoli di utilizzo del territorio più restrittivi, le aree ammontano a 25.410 km², pari all’8,4% del territorio nazionale. L’analisi della mosaicatura (Figura 3.1B), evidenzia significative disomogeneità di mappatura e classificazione, dovute principalmente alle differenti metodologie utilizzate per la valutazione e mappatura della pericolosità. Le maggiori differenze si riscontrano tra le regioni/bacini che hanno considerato solo i poligoni di frana (es. Bacini idrografici dell’Alto Adriatico, Provincia Autonoma di Bolzano) e quelle che hanno classificato l’intero territorio (es. Regione Valle d’Aosta, Provincia Autonoma di Trento, Bacino dell’Arno). Se analizziamo infatti la distribuzione delle frane dell’Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia si riscontra una omogeneità decisamente superiore (Figura 3.1A e B).

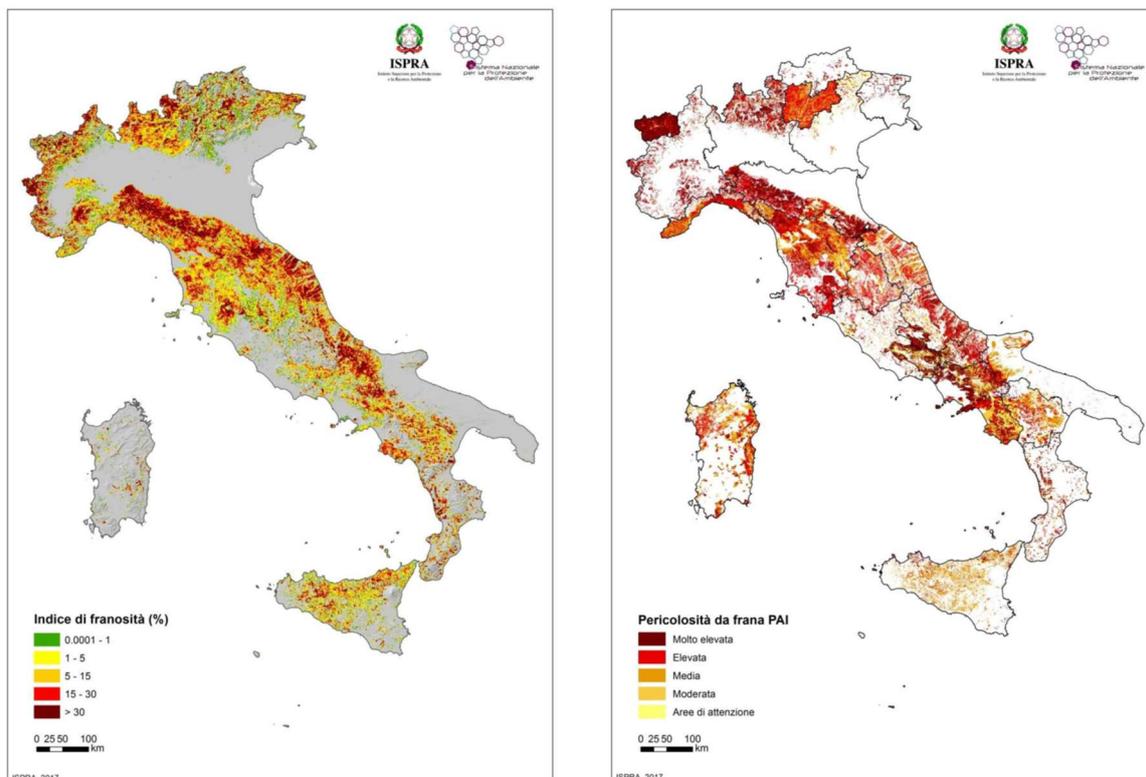


Figura 3.1 – A) Carta della densità di frane (area in frana/area cella) su maglia di lato 1 km. B) Mosaicatura delle aree a pericolosità da frana PAI (2017)

Il rapporto sul dissesto idrogeologico in Italia (Trigila et al., 2018) fornisce un quadro di riferimento aggiornato sulla pericolosità per frane e alluvioni sull’intero territorio nazionale e presenta indicatori di rischio relativi a popolazione, famiglie, edifici, imprese e beni culturali.

3.2 Zonazione della suscettibilità da frana

La zonazione di un territorio sulla base della propensione dello stesso a produrre frane richiede dati tematici ed informazioni geo-ambientali può essere realizzata utilizzando un approccio statistico (Guzzetti et al., 1999). In seguito è illustrata la carta della suscettibilità da frana realizzata per l’intero territorio nazionale attraverso l’analisi statistica. In particolare sono descritti: i) i dati tematici e territoriali utilizzati per la costruzione del modello, ii) il risultato della classificazione multivariata, basata su di un’analisi discriminante lineare di 62 variabili indipendenti, e iii) la procedura impiegata per la validazione del modello.

L’unità cartografica di riferimento per la zonazione della suscettibilità, è il comune i cui limiti derivano dalla Carta dei Comuni d’Italia prodotta dall’ISTAT. Per la costruzione del modello di suscettibilità da frana sono stati utilizzati i dati tematici e geo-ambientali sinottici a piccola scala (Tabella 3.1). Quale variabile dipendente per il modello di classificazione multivariata è stata utilizzata la presenza (o l’assenza) di eventi di frana storica in ciascun comune. Le informazioni storiche sulle frane sono state raccolte nell’ambito del progetto AVI del CNR – GNDCI, ed organizzate nel sistema informativo sulle catastrofi idrogeologiche in Italia (SICI, <http://sici.irpi.cnr.it>). Per la preparazione del modello è stato utilizzato un sottoinsieme del catalogo storico delle frane che comprende gli eventi occorsi nel periodo di 52 anni compreso fra il 1950 ed il 2001. Questo sottoinsieme di informazioni è stato ulteriormente suddiviso in

due *subset*: (i) un *training subset*, che copre il periodo di 41 anni dal 1950 al 1990 e comprende 2751 comuni colpiti da uno o più eventi di frana; e (ii) un *validation subset*, che copre il periodo di 11 anni compreso tra il 1991 ed il 2001, e riporta 3084 comuni colpiti da uno o più eventi di frana.

Tabella 3.1. Dati sui dissesti ed informazioni tematiche utilizzati per la realizzazione della zonazione della suscettibilità da frana in Italia. Legenda: T, formato tabellare (alfanumerico); V, formato vettoriale; R, formato raster.

Tematismo	Formato	Scala	Fonte
Dati storici su eventi di frana	T / V	1:25.000	SICI
Cartografia litologica sinottica	V	1:500.000	Compagnoni et al.
Carta dei suoli sinottica	V	1:1.000.000	Mancini
Parametri climatici sinottici	V	1:100.000	L’Abate e Costantini
Modello Digitale del Terreno	R	(90m × 90m)	SRTM
Suddivisione comunale	V	1:25.000	ISTAT

Le variabili indipendenti (o esplicative) geo-ambientali utilizzate per la costruzione del modello di classificazione sono le seguenti:

- 10 variabili morfometriche (quota, pendenza, e loro statistiche) ricavate da un modello digitale del terreno (DTM) in formato *raster*, con una risoluzione al suolo di 90 m × 90 m circa, acquisito nel febbraio 2000 dalla missione SRTM della NASA, e localmente interpolato. Alle variabili morfometriche si sono aggiunte 3 variabili fisiografiche ottenute attraverso un’analisi *cluster* che ha suddiviso il territorio Italiano in aree di pianura, collina e montagna (Guzzetti e Reichenbach, 1994);
- 10 variabili litologiche, ottenute raggruppando le 145 unità litologiche presenti nella carta geologica sinottica pubblicata da Compagnoni e collaboratori tra il 1976 e il 1983, a scala 1: 500.000;
- 19 variabili pedologiche ottenute raggruppando i 34 tipi di suolo presenti nella carta sinottica dei suoli d’Italia pubblicata da Mancini e collaboratori nel 1966, a scala 1:1.000.000 in base (i) allo spessore del suolo (8 classi) ed (ii) alla litologia di origine (11 classi); e
- 19 variabili climatiche relative alla pioggia annua ed alla temperatura media annua ottenute dalla riclassificazione di informazioni climatiche sinottiche ricavate dall’archivio digitale dei suoli e del clima realizzato da L’Abate e Costantini (2004).

Il modello di suscettibilità

L’analisi discriminante (AD), introdotta da Fisher (1936), è una tecnica di classificazione multivariata utilizzata per classificare dei campioni sulla base di un *set* di misure (Lachenbruch and Goldstein, 1979; Michie et al., 1994; Brown, 1998). Più precisamente, lo scopo dell’analisi discriminante è quello di classificare i campioni (i casi) in due o più gruppi indipendenti ed alternativi, sulla base di un *set* di variabili predittive. La variabile di raggruppamento è di tipo categorico, e le variabili predittive (indipendenti) possono essere continue, categoriche o dicotomiche. Per la valutazione della suscettibilità da frana, sono generalmente definiti due gruppi: (i) UCR prive di frane (gruppo G_0 , comuni privi di frane), e (ii) UCR con frane (gruppo G_1 , comuni con frane). I due gruppi sono considerati distinti, ed una UCR (un comune) r può

appartenere ad un solo gruppo, ovvero se $r \in G_0$, allora $r \notin G_1$. Nel caso della suscettibilità da frana, lo scopo dell'AD è quello di stabilire il gruppo di appartenenza di una UCR (un comune) trovando una combinazione lineare delle variabili geo-ambientali che massimizzi la differenza fra le due popolazioni di comuni (UCR) stabili (G_0 , privi di frane) ed instabili (G_1 , con frane). In altre parole, l'obiettivo dell'AD è quello di definire un modello lineare che classifichi i comuni nel gruppo appropriato, minimizzando gli errori di classificazione. Per fare ciò, si consideri un set di m variabili v_1, v_2, \dots, v_m per ogni UCR (ogni comune) r , attraverso il quale si voglia classificare (discriminare) un comune in uno dei due gruppi di UCR stabili (G_0) ed instabili (G_1), e si definisca Z una combinazione lineare delle variabili, in modo che:

$$Z = \beta_1 v_1(r) + \beta_2 v_2(r) + \dots + \beta_m v_m(r) \quad (\text{eq. 1})$$

Il compito dell'AD è quello di determinare i coefficienti β dell'equazione 1, utilizzando un criterio che permetta al valore Z di operare come un indice che discrimini fra i due gruppi, G_0 e G_1 . Nel caso in cui si analizzi una sola variabile indipendente, v_1 , l'equazione 1 si riduce a $Z = \beta_1 v_1(r)$, che è l'equazione di una retta che discrimina le UCR (i comuni) basandosi solamente sulla variabile v_1 . Se si considerano due variabili indipendenti, v_1 e v_2 , l'equazione 1 diventa $Z = \beta_1 v_1(r) + \beta_2 v_2(r)$, che rappresenta una funzione (un piano) che separa i comuni in base alle variabili v_1 e v_2 . Allo stesso modo, se si considerano m variabili indipendenti, l'equazione 1 diventa un iperpiano, una superficie multi-dimensionale che discrimina le UCR nei due gruppi mutuamente esclusivi di comuni stabili (G_0) ed instabili (G_1).

Le 62 variabili geo-ambientali disponibili sono state utilizzate in un'analisi discriminante di tipo lineare (Michie et al., 1994). La percentuale di ogni variabile dipendente in ciascun comune (UCR) è stata calcolata in un GIS. La presenza di eventi di frana storici in ciascun comune nel periodo 1950 – 1990 è stata utilizzata come variabile di raggruppamento (variabile dipendente). Il numero di eventi di frana in ciascun comune non è stato considerato; comuni con un solo evento storico di frana sono stati trattati dal modello come i comuni colpiti ripetutamente da eventi di frana. L'estensione areale del comune non è stata presa in considerazione del modello; comuni piccoli e comuni vasti sono stati trattati allo stesso modo dal modello discriminante.

Il risultato del modello di classificazione discriminate è riportato nella Figura 3.2. Nella mappa, i comuni sono classificati in cinque classi, in base alla probabilità che ciascuno di essi appartenga al gruppo di comuni senza frane storiche (G_0) od al gruppo di comuni con frane storiche (G_1). La Figura 3.3 mostra la distribuzione di frequenza dei comuni nelle stesse cinque classi di suscettibilità.

È possibile valutare in modo quantitativo la *performance* (qualità) del modello di classificazione. La valutazione stabilisce quanto il modello discriminante sia stato in grado di classificare correttamente i casi (i comuni) utilizzati per la costruzione del modello. In questo senso, si valuta il grado di *matching* fra i dati storici considerati per la costruzione del modello (i comuni con eventi di frana nel periodo 1950 – 1990, *training subset*) ed il modello stesso. La valutazione non fornisce informazioni sulle capacità predittive del modello, che devono essere valutate utilizzando informazioni esterne al modello stesso.

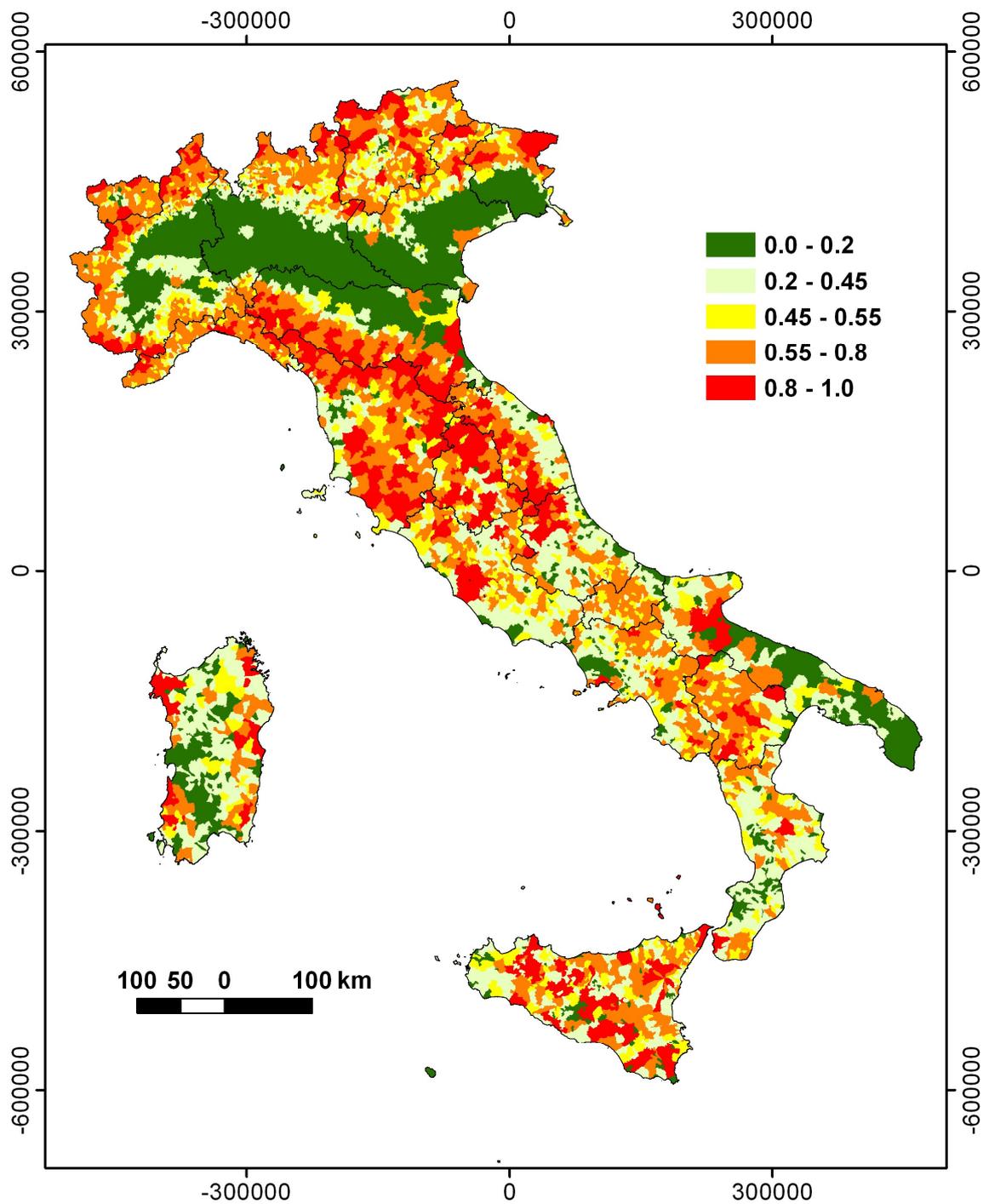


Figura 3.2. Zonazione della suscettibilità da frana in Italia, ottenuta attraverso un'analisi discriminante lineare di variabili geo-ambientali. I valori di probabilità sono suddivisi in cinque classi. In verde sono indicati i comuni con bassi valori di suscettibilità da frana, in rosso i comuni con alti valori di suscettibilità da frana.

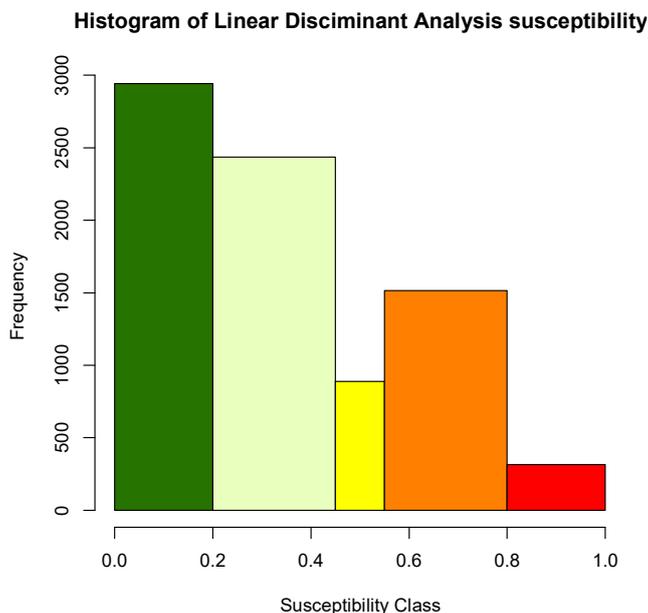


Figura 3.3. Frequenza dei comuni classificati dal modello discriminante in cinque classi di suscettibilità da frana. Per la legenda relativa alle classi di suscettibilità si veda la Figura 3.2.

Il grado di efficienza del modello di classificazione può essere valutato sulla base del numero di comuni classificati correttamente. Il modello discriminante ha classificato correttamente come stabili (senza frane storiche) od instabili (con frane storiche) il 73,5% dei comuni italiani (5953 comuni) (Tabella 3.2 e Figura 3.4). Per il restante 26,5% dei comuni (2149 comuni), il modello ha fornito una previsione di suscettibilità in contrasto con le informazioni storiche disponibili.

Tabella 3.2. Confronto tra i comuni classificati dal modello discriminante come stabili od instabili, ed i comuni privi ed interessati da eventi di frana storici nel periodo 1950 – 1990 (training subset).

VALORI OSSERVATI	VALORI PREDETTI DAL MODELLO		TOTALI
	Comuni senza eventi di frana	Comuni con eventi di frana	
Comuni senza eventi di frana	4511 (55,7%)	841 (10,4%)	5352
Comuni con eventi di frana	1308 (16,1%)	1442 (17,8%)	2750
TOTALI	5819	2283	8102

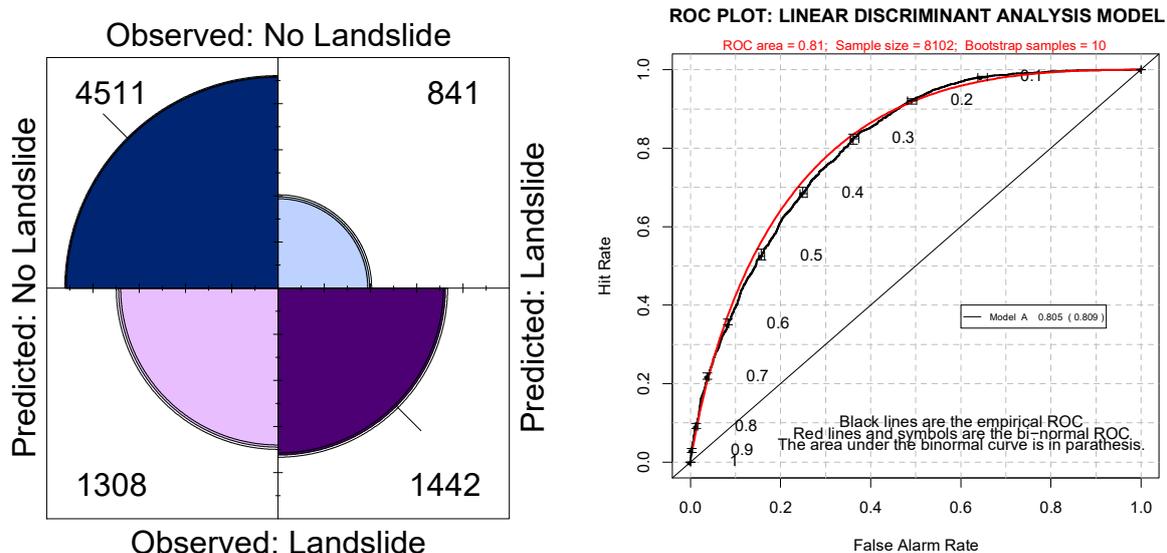


Figura 3.4. A sinistra. Il diagramma fourfold rappresenta in forma grafica i dati riportati nella Tabella 3.2, e relativi al periodo di calibrazione del modello (1950 – 1990, training subset). I colori scuri indicano i comuni classificati correttamente dal modello, come instabili (viola) o stabili (blu). I colori chiari indicano comuni non classificati correttamente dal modello discriminante. A destra. Curva ROC (Receiver Operating Characteristics) relativa al modello di classificazione discriminante mostrato in Figura 3.2 per il periodo di calibrazione 1950-1990, training subset.

La qualità del modello discriminante può essere anche valutata attraverso l’analisi di una ROC (Receiver Operating Characteristics) curve. La Figura 3.5 mostra la ROC curve per il modello di suscettibilità riportato in Figura 3.2. L’analisi del grafico rivela una buona performance del modello discriminante, con un’area sottesa alla curva ROC pari a 0,81.

Il modello di suscettibilità da frana ottenuto attraverso l’analisi discriminante può anche essere valutato dal punto di vista geomorfologico (fenomenologico). L’analisi visiva di Figura 3.2 rivela come la distribuzione dei comuni classificati come suscettibili (colori rosso ed arancione) sia sostanzialmente quella attesa. La maggior parte dei comuni ad elevata suscettibilità da frana si trovano nelle Alpi, lungo gran parte della catena appenninica, in Sicilia e nelle aree collinari e montuose della Sardegna. I comuni classificati come non suscettibili (colori verde scuro e verde chiaro) sono localizzati in Pianura Padana, nella pianura veneta, in Puglia, in aree pianeggianti del Centro Italia e della Sardegna. Un’analisi attenta della mappa riportata in Figura 3.2 evidenzia tuttavia anche alcune incoerenze rispetto alla distribuzione attesa della suscettibilità. Ad esempio, ampi settori della Calabria sono classificati dal modello discriminante come non suscettibili.

Sotto alcune condizioni e vincoli (Guzzetti et al., 2005, 2006), un modello di suscettibilità da frana può essere considerato come un modello predittivo della possibile occorrenza di frane nel futuro. Come ogni altra previsione, un modello di suscettibilità deve essere quindi validato, e la validazione, perché sia significativa, deve essere effettuata utilizzando informazioni non usate per la costruzione e la calibrazione del modello stesso (onde evitare la circolarità).

Per validare il modello di classificazione discriminante mostrato in Figura 3.2 sono state utilizzate le informazioni storiche relative ad eventi di frana in Italia nel periodo di 11 anni compreso fra il 1991 ed il 2001 (*validation subset*). Il confronto ha rivelato che, nel periodo considerato, il modello discriminante è stato in grado di classificare correttamente il 68,7% dei comuni italiani (5567 comuni). Per il restante 32,3% dei comuni (2535 comuni), i risultati del modello sono risultati essere in contrasto con quanto osservato nel periodo di validazione (Tabella 3.3 e Figura 3.5).

L’analisi dei casi di *mismatch* fra la previsione del modello di suscettibilità ed la reale occorrenza (o mancata occorrenza) delle frane rivela che circa un terzo dei casi è relativo a comuni predetti come suscettibili dal modello discriminante, ma che non hanno subito eventi di frana nel periodo di validazione. Per questi comuni il periodo di calibrazione potrebbe essere stato troppo corto, o le informazioni storiche potrebbero essere incomplete. I restanti due terzi di casi si riferisce a comuni predetti come non suscettibili dal modello, e che tuttavia hanno subito frane durante il periodo di validazione. Questi casi di *mismatch* possono essere dovuti a varie cause, fra cui: errori nel modello di classificazione, incompletezza dei dati storici utilizzati per la costruzione del modello, mutate condizioni locali che hanno portato all’innescio dei dissesti.

La capacità predittiva del modello discriminate può essere valutata attraverso l’analisi di una ROC *curve*. La Figura 3.5 mostra la ROC *curve* per il modello di suscettibilità riportato in Figura 3.2, nel periodo di validazione (1991 – 2001). L’analisi del grafico rivela una discreta *performance* del modello discriminante, con un’area sottesa alla curva ROC pari a 0,76.

Tabella 3.3. Confronto tra i comuni classificati dal modello discriminante come stabili o instabili, e i comuni privi ed interessati da eventi di frana nel periodo di validazione compreso fra il 1991 ed il 2001 (*validation subset*).

VALORI OSSERVATI	VALORI PREDETTI DAL MODELLO		TOTALI
	Comuni senza eventi di frana	Comuni con eventi di frana	
Comuni senza eventi di frana	4151 (51,2%)	867 (10,7%)	5018
Comuni con eventi di frana	1668 (20,6%)	1416 (17,5%)	3084
TOTALI	5819	2283	8102

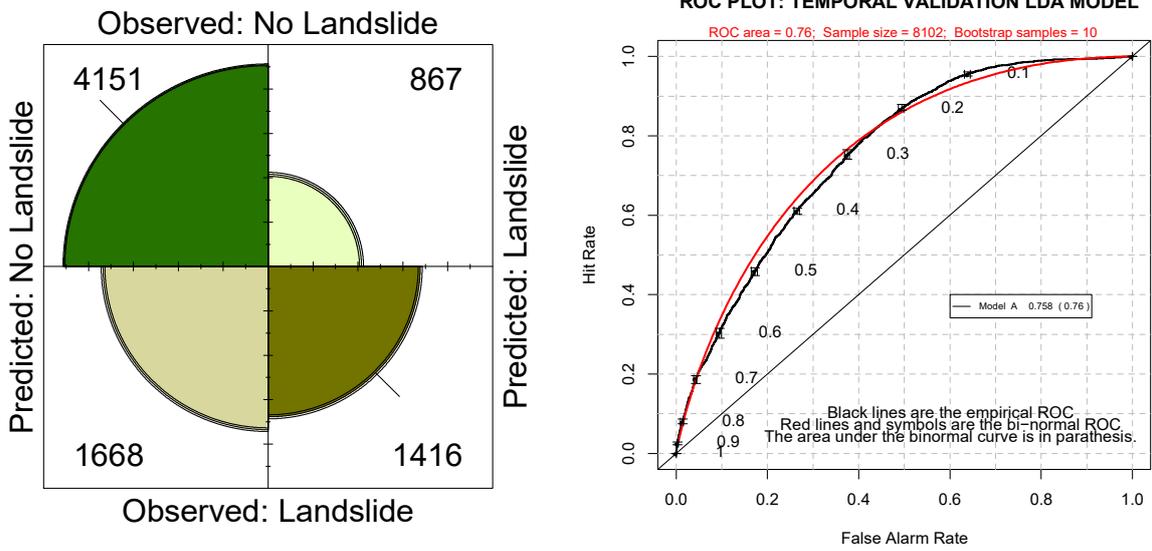


Figura 3.5. A destra: il diagramma fourfold visualizza in forma grafica i dati riportati nella Tabella 3.3, e relativi al periodo di validazione 1991 – 2001 (validation subset). I colori scuri indicano i comuni classificati correttamente dal modello, come instabili (verde) o stabili (oliva). I colori chiari indicano comuni non classificati correttamente dal modello discriminante. A sinistra: Curva ROC relativa al modello di classificazione discriminante mostrato in Figura 3.2 per il periodo di validazione 1991-2001, validation subset.

4. Zonazione della suscettibilità da frana nei CT pilota

Per la valutazione della suscettibilità da frana nei Contesti Territoriali (CT) pilota è stato utilizzato un modello tipo quantitativo che utilizza un approccio metodologico di tipo statistico. (Rossi et al., 2010; Rossi e Reichenbach, 2018). Lo schema concettuale del modello e delle varie fasi seguite nella stima della suscettibilità da frana sono riportati in Figura 4.1.

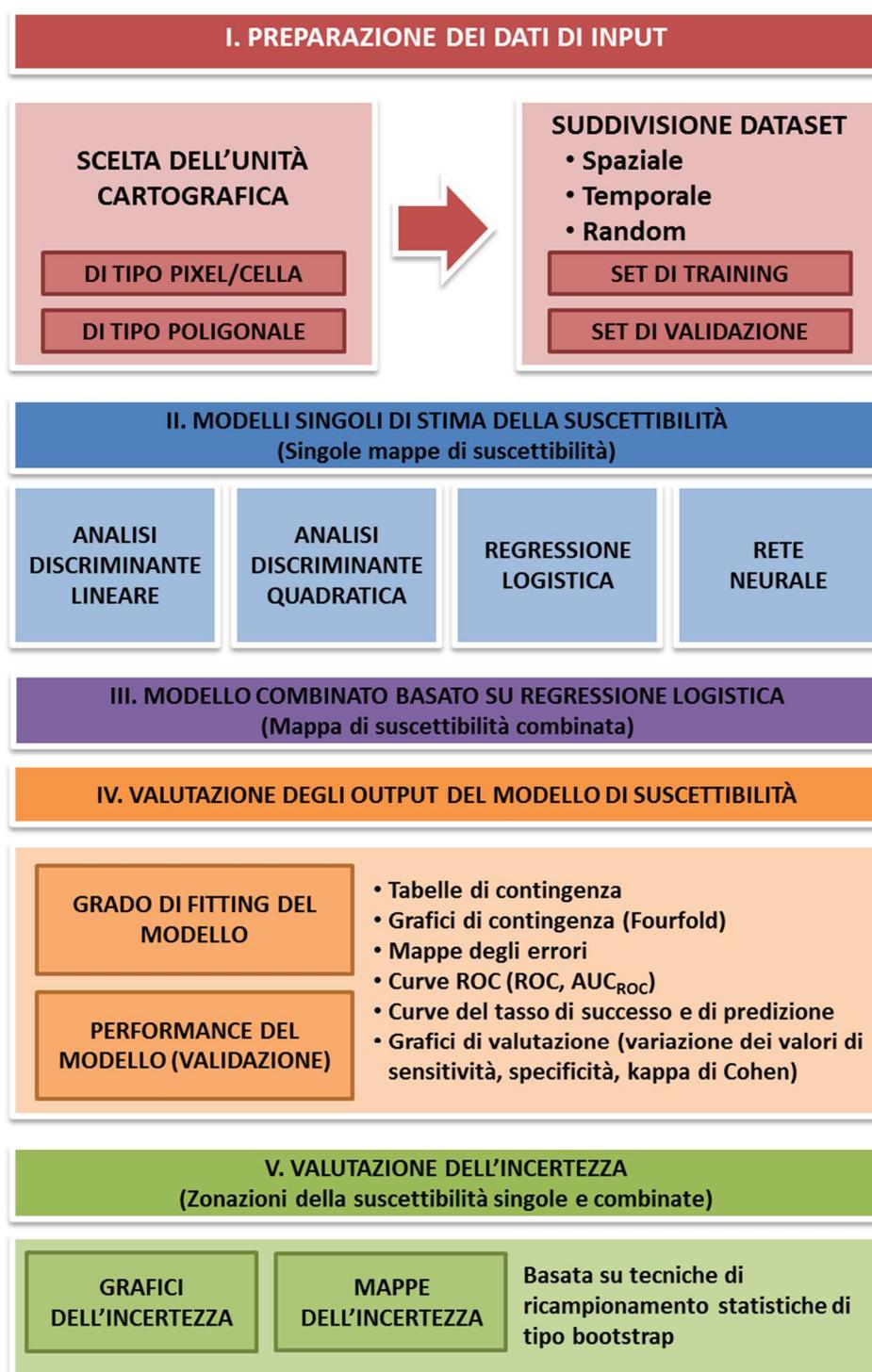


Figura 4.1. Schema logico del modello di suscettibilità da frana.

Il modello sviluppato è basato sull'utilizzo di differenti metodi di classificazione statistica multivariata: (i) analisi discriminante lineare, (ii) analisi discriminante quadratica, (iii) regressione logistica, e (iv) neurale auto ottimizzata. Tale modello prevede la combinazione dei risultati ottenuti dai tali modelli singoli utilizzando un approccio regressivo (i.e. regressione logistica). I singoli modelli da utilizzare nella combinazione possono essere scelti in fase di esecuzione del modello.

Tale modello può essere applicato a varie scale e può utilizzare sia unità territoriali di tipo poligonale che di tipo regolare (celle). Il modello, per ogni unità utilizzata per suddividere il territorio, richiede in input una variabile di raggruppamento (dipendente) binaria (0 o 1) indicante rispettivamente l'assenza o presenza di frana, e una serie di variabili esplanatorie (variabili indipendenti). Le variabili esplanatorie che descrivono le caratteristiche territoriali di ogni unità/suddivisione utilizzata, possono essere di tipo numerico o anche di comodo/fittizie (derivate in genere da variabili categoriche). Il modello include una procedura diagnostica per evidenziare problemi di collinearità tra le variabili esplanatorie, utile ai fini dell'esclusione di variabili tra loro correlate.

L'applicazione del modello (e quindi dei modelli singoli e del modello di combinazione) avviene in due fasi distinte: (i) fasi di training, e (ii) fase di validazione. Nella fase di training il modello ricostruisce le relazioni esistenti tra la variabile dipendente e le variabili indipendenti, mentre nella fase di validazione le relazioni ricostruite sono applicate in diverse condizioni. A tale scopo sono necessari due dataset di frana e di variabili territoriali indipendenti: (a) dataset di training, e (b) dataset di validazione. Tali dataset possono essere derivati dal dataset di partenza seguendo diversi approcci, ma in genere riconducibili a uno dei tre casi seguenti: (1) suddivisione temporale del dataset di partenza, (2) suddivisione spaziale del dataset di partenza in due aree contigue, (3) campionamento randomico del dataset di partenza. Anche se il tipo di suddivisione non comporta differenze ai fini dell'applicazione del modello, i risultati ottenuti in fase di validazione hanno un differente significato geomorfologico. Una validazione realizzata utilizzando una suddivisione temporale, fornisce una valutazione delle reali capacità predittive (i.e. nel futuro) del modello (validazione temporale del modello). Una suddivisione in aree spazialmente contigue è utile invece nella valutazione della reale esportabilità del modello in aree geografiche differenti, rispetto a quelle dove il modello è stato generato, utile in particolare quando si dispone di informazioni territoriali limitate a piccole aree di studio (validazione spaziale del modello). Una suddivisione di tipo randomico, specialmente se associata a metodi ricorsivi che prevedano la ripetizione di tale campionamento, è in genere utile per l'analisi della robustezza statistica del modello (cross-validazione del modello).

Il modello proposto integra diversi criteri per la valutazione delle performance di ogni singolo modello di classificazione statistica e della relativa combinazione. Diversi parametri/misure sono utilizzati per valutare la qualità delle zonazioni di suscettibilità, includendo:

- i. misure del grado di fitting del modello (capacità del modello di "predire" i dati originali),
- ii. misure delle performance del modello in fase di validazione (capacità del modello di "predire" dati indipendenti spazialmente o temporalmente);
- iii. misure dell'incertezza relativa alle stime di suscettibilità.

Per le valutazioni di cui ai punti (i) e (ii) sono utilizzati: tabelle di contingenza (o matrici di confusione), grafici di contingenza (grafici Fourfold), mappe degli errori, curve ROC (Receiver Operating Characteristic) con relativa stima dell'area sottesa da tali curve (AUC_{ROC}), grafici di

variazione dei valori di sensitività (hit rate), specificità (true negative rate) e del coefficiente kappa di Cohen (Facet, 2006), ed infine curve del tasso di successo e del tasso di predizione (success rate e prediction rate curve; Chung & Fabbri, 1999).

La valutazione dell’incertezza (punto iii) dei modelli è invece realizzata utilizzando una tecnica di campionamento statistica (bootstrap), che prevede la stima ripetuta della suscettibilità da frana al variare del dataset di partenza. In pratica ogni stima della suscettibilità da frana viene realizzata utilizzando un diverso set di dati campionato da quello originale. Tale procedura permette la realizzazione di grafici e mappe di incertezza legate alle stime della suscettibilità da frana.

Gli output del modello di suscettibilità sono mappe, grafici, e testi relativi ai risultati delle procedure sopra descritte. In particolare le mappe sono prodotte in formato grafico (.pdf) e geografico (shapefile, .shp), i grafici sono esportati in formato .pdf., mentre i risultati testuali sono resi disponibili in formato .txt.

Per la valutazione della suscettibilità da frana è stato utilizzato LAND-SUITE (LANDslide - SUSceptibility Inferential Tool Evaluator), un software open source implementato in R (R Core Team 2018), sviluppato internamente ad IRPI (Rossi e Reichenbach, 2018). Il tool include tre moduli principali: (i) LAND-SE (LANDslide - Susceptibility Evaluation) che esegue la modellazione e la zonazione della suscettibilità; (ii) LAND-SIP (LANDslide - Susceptibility Input Preparation) dedicato alla preparazione dei dati di input di LAND-SE; and (iii) LAND-SVA (LANDslide - Susceptibility Variable Analysis) dedicato all’analisi esplorativa del dataset di training e di validazione che verrà usato da LAND-SE.

La valutazione della suscettibilità da frana a scala regionale/comunale pone diverse problematiche, sia in termini di scelta del tipo di approccio modellistico, sia relative al tipo di suddivisione del territorio da utilizzare nella modellazione (i.e. unità cartografica di riferimento), ma anche e soprattutto in termini di dati da considerare. In particolare la disponibilità di dati territoriali omogenei risultano fondamentali ai fini di una stima della reale propensione al dissesto priva di errori, ma anche e soprattutto a fini di una corretta confrontabilità della suscettibilità da frana tra diverse zone del territorio.

4.1 CT Catanzaro (Regione Calabria)

Per la zonazione della suscettibilità del CT di Catanzaro è stata scelta come unità cartografica di riferimento il pixel con la risoluzione pari al modello digitale del terreno utilizzato per l’analisi. Il modello digitale del terreno deriva da dati satellitari ALOS ed ha una risoluzione al suolo di 23 m × 23. Quale variabile dipendente è stata utilizzata la presenza (o l’assenza) di eventi di frana. Le informazioni sulle frane sono relative alla mappatura del progetto PAI.

Tabella 4.1. *Dati sui dissesti ed informazioni tematiche utilizzati per la realizzazione della zonazione della suscettibilità da frana nel CT di Catanzaro. Legenda: V, formato vettoriale; R, formato raster.*

<i>Tematismo</i>	<i>Formato</i>	<i>Scala</i>	<i>Fonte</i>
Dati eventi di frana	V	10.000	PAI
Cartografia litologica	V	25.000	Regione Calabria
Carta dei suoli	V	10.000	Regione Calabria
Modello Digitale del Terreno	R	23m x 23 m	ALOS

Le variabili indipendenti (o esplicative) geo-ambientali utilizzate per la costruzione del modello di classificazione sono le seguenti:

- le variabili morfometriche sono ricavate dal modello digitale del terreno (DTM) in formato *raster*, con una risoluzione al suolo di 23 m × 23 m circa, derivato da dati satellitari ALOS.
- le variabili litologiche, ottenute da Carta Geologica della Regione Calabria in scala 1:25,000 (shapefile);
- le variabili di uso del suolo sono derivate da Carta di Uso del Territorio della Regione Calabria in scala 1:10,000 (shapefile); Regione Calabria

I dati necessari alla realizzazione dell’Indice di suscettibilità da frana per il CT di Catanzaro sono stati forniti dal personale della Protezione Civile - Regione Calabria durante le attività di affiancamento (Figura 4.2).

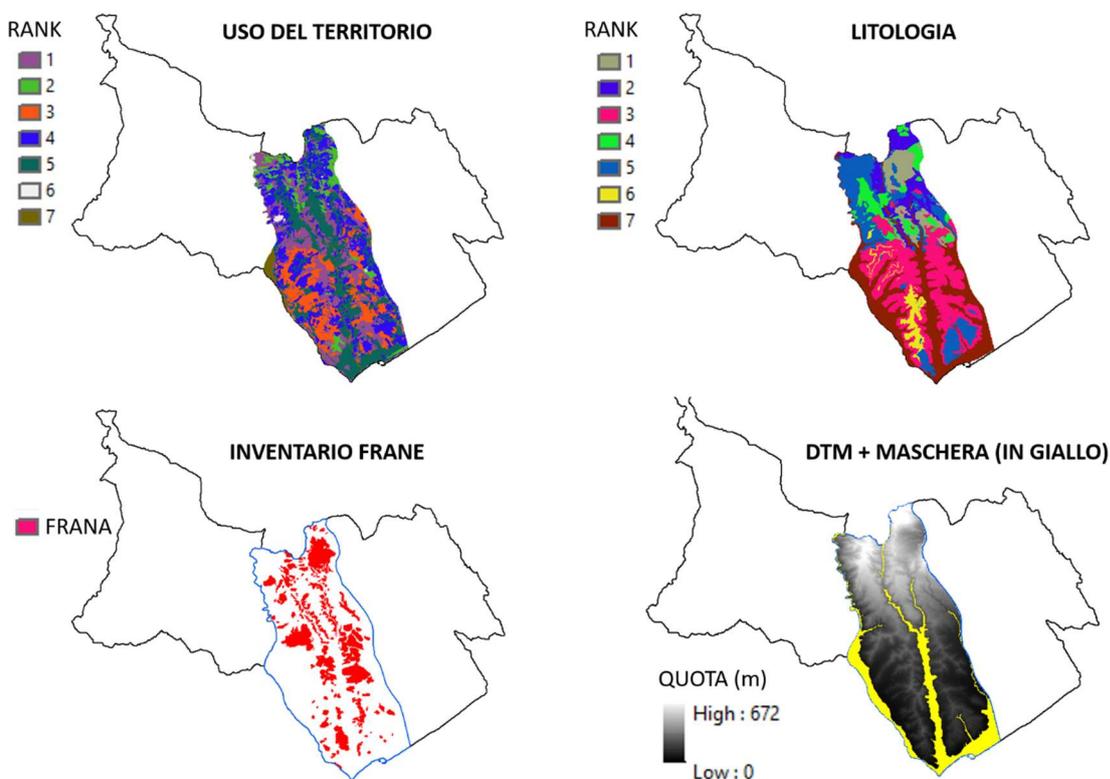


Figura 4.2 Rappresentazione dei dati di input relativi all’area di training.

Per utilizzare “LAND-SE”, nel CT di Catanzaro è stata identificata un’area di “training” (Figura 4.2) entro la quale sono state definite le relazioni statistiche tra le variabili esplanatorie ed i movimenti franosi. La selezione dell’area è stata condizionata dalla rappresentatività dei fenomeni franosi rispetto alle variabili esplanatorie.

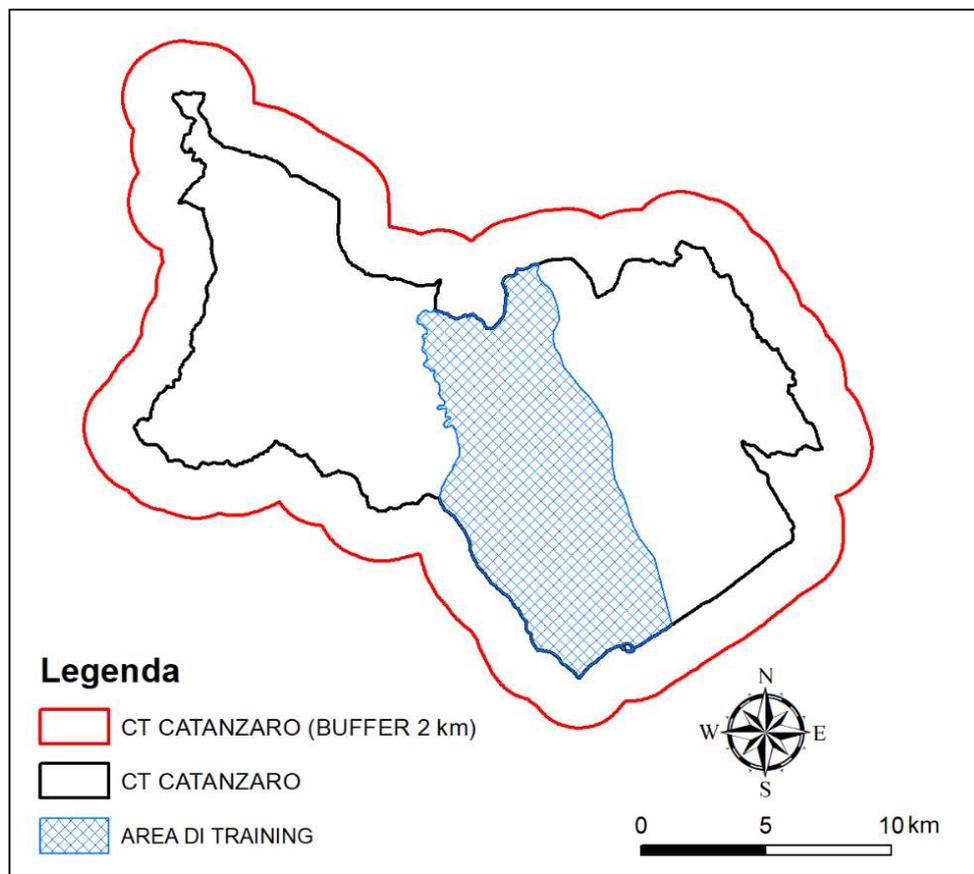


Figura 4.3 Aree considerate per la realizzazione dell’indice di suscettibilità da frana per il CT di Catanzaro.

La carta geologica e la carta dell’Uso del Territorio sono state riclassificate in 7 classi associando ad ogni classe un valore di “rank” (da 1 a 7) in base alla densità dei fenomeni franosi (Tabella 4.2).

Tabella 4.2 Ranking delle variabili “litologia” ed “uso del territorio”

LITOLOGIA	RANK	USO DEL TERRITORIO	RANK
Arenarie	1	Aree a pascolo	1
Scisti	2	Boschi di latifoglie	2
Argille	3	Seminativi	3
Formazioni litoidi	4	Vigneti	4
Conglomerati	5	Aree urbane	5
Sabbie poco cementate	6	Copertura erbacea	6
Depositi alluvionali	7	Corsi d’acqua e bacini	7

La carta di suscettibilità è il risultato combinazione di 3 modelli statistiche: Linear Discriminant Analysis (LDA), Quadratic Discriminant Analysis (QDA) e Logistic Regression Model (LRM). La performance della calibrazione è stata valutata considerando la ROC curve (Ayalew and Yamagishi, 2005), e il “Four-fold plot” che permette di analizzare e le relazioni tra i quattro elementi principali della matrice di confusione (veri positivi; veri negativi; falsi positivi, falsi negativi) (Rossi et al., 2010). Nella figura 4.4 è mostrata la frequenza di pixel per ogni classe di suscettibilità (Istogramma).

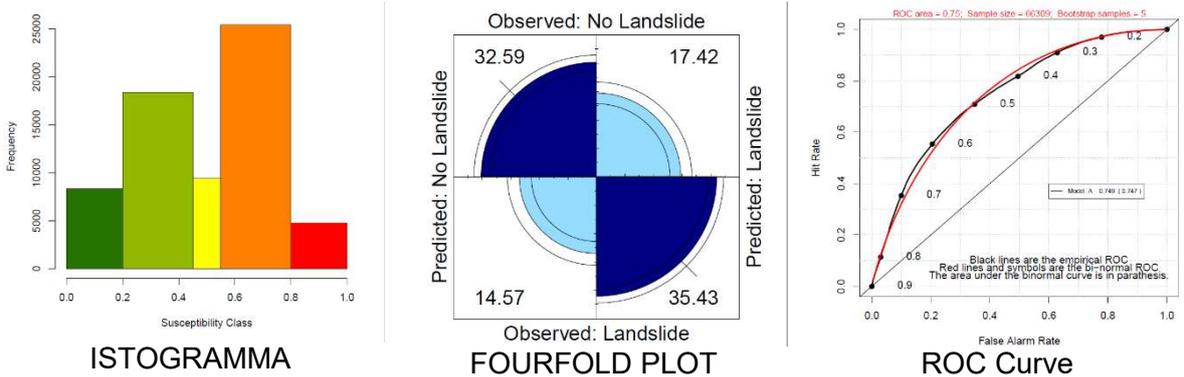


Figura 4.4 Metriche utilizzate per la valutazione della performance del modello.

Il modello statistico ottenuto in fase di calibrazione è stato applicato all’intero Contesto territoriale di Catanzaro. La zonazione della suscettibilità da frana (Figura 4.5) è stato suddiviso in 5 classi la cui distribuzione di frequenza è mostrata nella figura Figura 4.4.

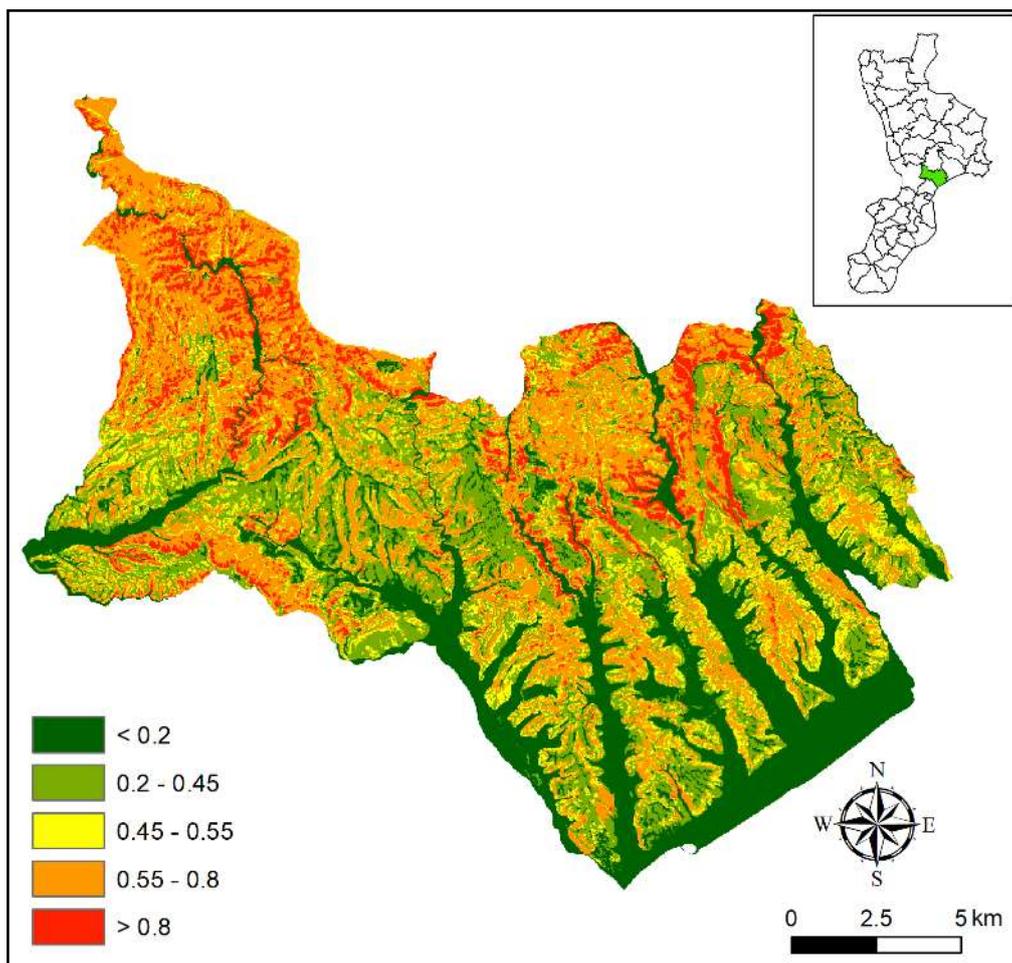


Figura 4.5 Carta della suscettibilità da frana per il CT di Catanzaro, classificata in 5 classi.

4.2 CT Lucera (Provincia di Foggia, Regione Puglia)

Per la zonazione della suscettibilità del CT di Lucera è stata scelta come unità cartografica di riferimento il pixel con risoluzione pari al modello digitale del terreno utilizzato per l’analisi. Il modello digitale del terreno deriva dal European Digital Elevation Model “EU-DEM”, Version 1 con risoluzione 25m x 25m basato sull’elaborazione di dati SRTM (Farr et al., 2007) e ASTER GDEM (Tachikawa et al., 2011). Anche se per l’area oggetto di analisi sono disponibili modelli digitali del terreno a risoluzioni più elevate, si è deciso di utilizzare il modello digitale “EU-DEM”, Version 1 con risoluzione 25m x 25m, poichè coerente con gli obiettivi della zonazione a scala di contesto.

Quale variabile dipendente è stata utilizzata la presenza (o l’assenza) di movimenti franosi. Le informazioni sono derivate dalla mappatura del progetto IFFI e PAI (pericolosità P3), quest’ultime provenienti dalla fotointerpretazione condotta dall’Autorità di Bacino Puglia (1478 frane)

Tabella 4.3. Dati sui dissesti ed informazioni tematiche utilizzati per la realizzazione della zonazione della suscettibilità da frana nel CT di Lucera. Legenda: V, formato vettoriale; R, formato raster.

<i>Tematismo</i>	<i>Formato</i>	<i>Scala</i>	<i>Fonte</i>
Dati eventi di frana	V	10.000	IFFI - PAI (P3)
Cartografia litologica	V	100.000	ISPRA (ArcGIS REST API)
Carta dei suoli	V	100.000	SINANET (http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/download-mais/corine-land-cover/corine-land-cover-2006/view)
Modello Digitale del Terreno	R	25m x 25m	EU-DEM

Le seguenti informazioni geo-ambientali sono state utilizzate come variabili indipendenti (o esplicative) per la costruzione del modello di classificazione:

- variabili morfometriche ricavate dal modello digitale del terreno (DTM) in formato *raster*, con una risoluzione al suolo di 25 m × 25 m circa, derivato dall’European Digital Elevation Model “EU-DEM”.
- variabili litologiche, ottenute dalla carta al 100.000 distribuita da ISPRA (shapefile);
- variabili di uso del suolo, derivate dal Corinne a scala 1:100.000.

I dati tematici necessari alla realizzazione della carta di suscettibilità da frana per il CT di Lucera sono stati forniti dal personale della Protezione Civile - Regione Puglia durante le attività di affiancamento (Figura 4.6).

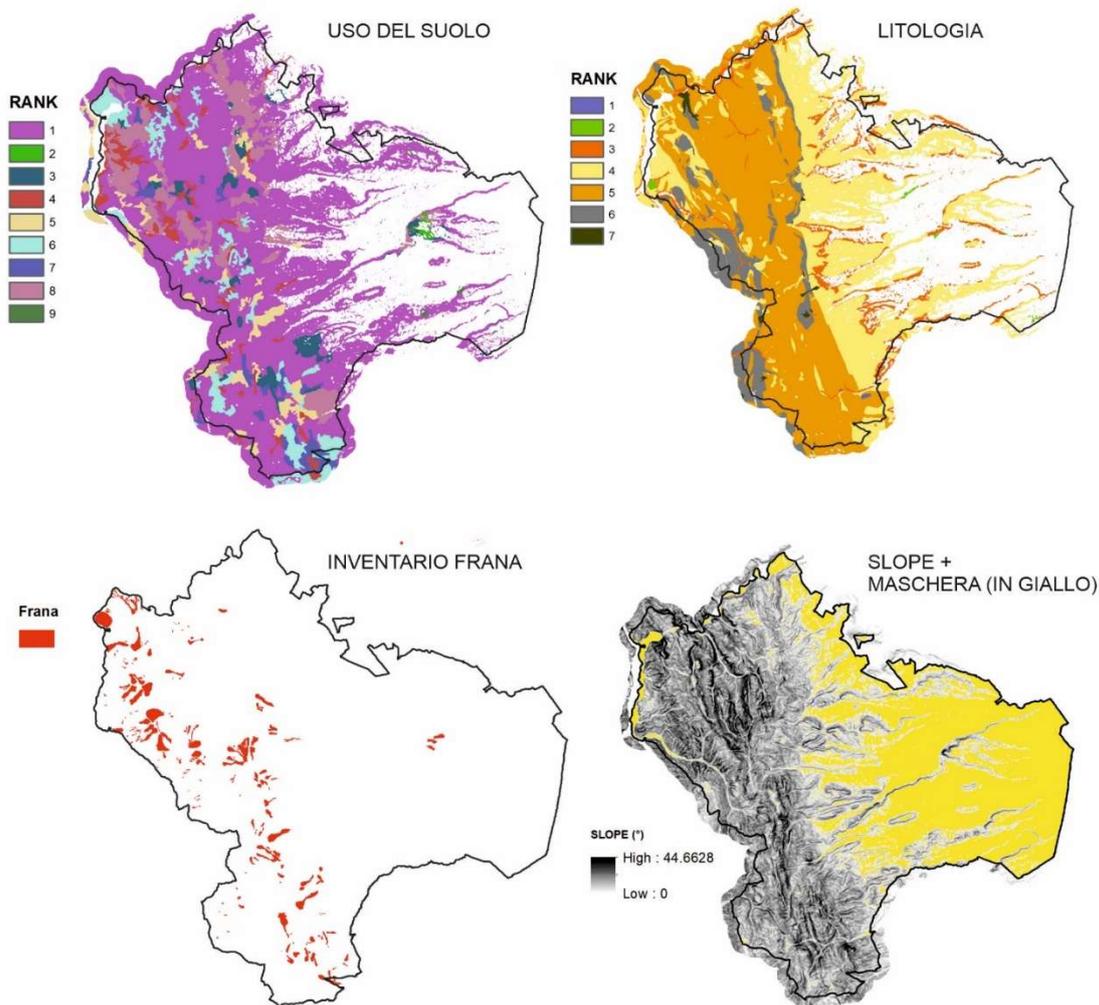


Figura 4.6 Carte tematiche utilizzate come variabili esplicative per la realizzazione della carta di suscettibilità

La carta geologica e la carta dell’Uso del Territorio sono state riclassificate rispettivamente in 7 e 9 classi, associando ad ogni classe un valore di “rank” in base alla densità dei fenomeni franosi (Tabella 4.4).

Tabella 4.4 Ranking delle variabili “litologia” ed “uso del territorio”

LITOLOGIA	RANK	USO DEL TERRITORIO	RANK
Sedimenti clastici cementati	1	Seminativi	1
Rocce carbonatiche	2	Urbano	2
Depositi alluvionali	3	Zone agricole eterogenee	3
Sedimenti clastici sciolti	4	Aree a vegetazione boschiva ed arbustiva in evoluzione	4
Flysch	5	Colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti	5
Caotico melange	6	Boschi misti di conifere e latifoglie	6
Depositi di frana	7	Aree a pascolo naturale e praterie	7
		Colture temporanee	8
		Aree estrattive	9

La carta di suscettibilità è il risultato della combinazione di 3 modelli statistici: Linear Discriminant Analysis (LDA), Quadratic Discriminant Analysis (QDA) e Logistic Regression Model (LRM). La performance della calibrazione è stata valutata considerando la ROC curve (Ayalew and Yamagishi, 2005), e il “Four-fold plot” che permette di analizzare le relazioni tra i quattro elementi principali della matrice di confusione (veri positivi; veri negativi; falsi positivi, falsi negativi) (Rossi et al., 2010). Nella figura 4.7 è mostrata la frequenza di pixel per ogni classe di suscettibilità (Istogramma).

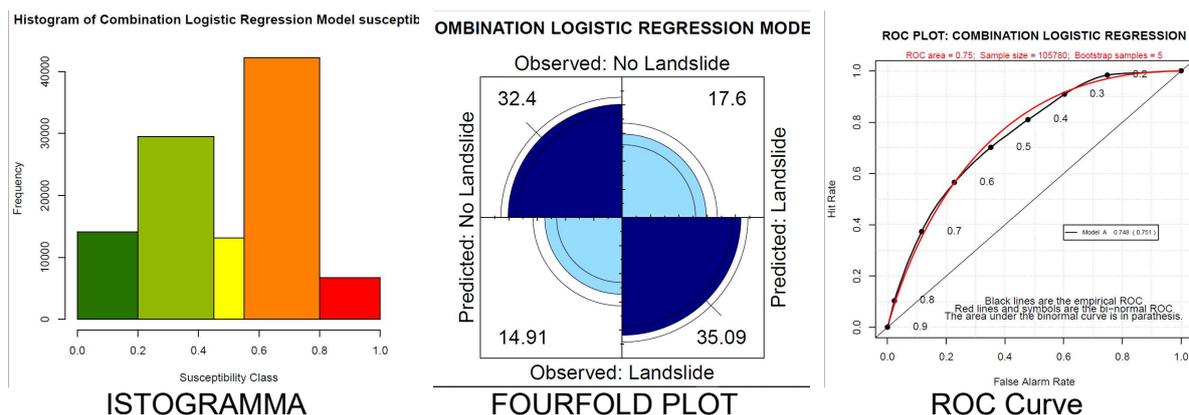


Figura 4.7 Metriche utilizzate per la valutazione della performance del modello.

Il modello statistico ottenuto in fase di calibrazione è stato applicato all’intero Contesto territoriale di Lucera. La zonazione della suscettibilità da frana (Figura 4.8) è stato suddiviso in 5 classi la cui distribuzione di frequenza è mostrata nella figura Figura 4.7.

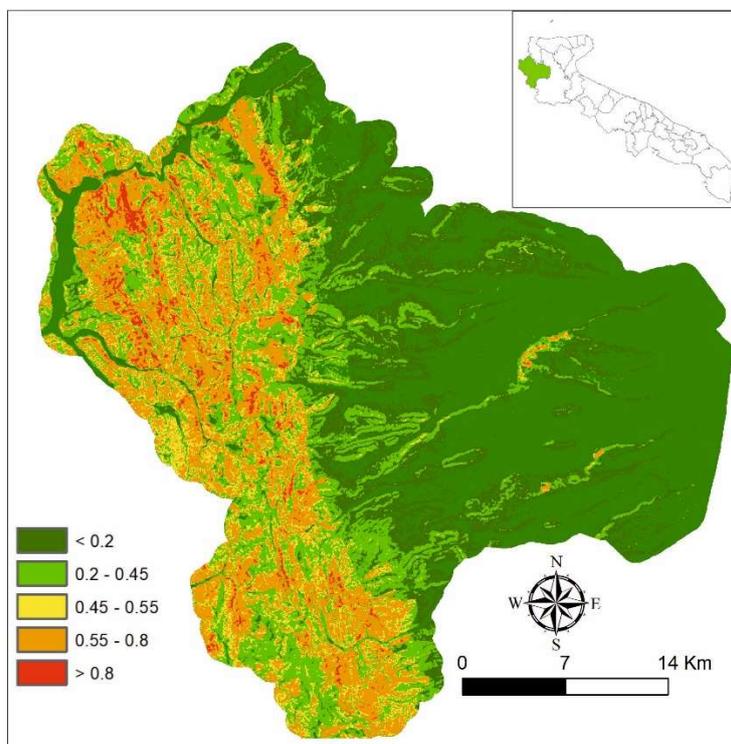


Figura 4.8 Carta della suscettibilità da frana per il CT di Lucera, classificata in 5 classi.

4.3 CUORE di San Fratello (Provincia di Messina, Regione Siciliana)

Per la zonazione della suscettibilità del CUORE di San Fratello è stata scelta come unità cartografica di riferimento il pixel con la risoluzione pari al modello digitale del terreno utilizzato per l’analisi. Il modello digitale del terreno deriva da dati satellitari ALOS ed ha una risoluzione al suolo di 23 m × 23. Quale variabile dipendente è stata utilizzata la presenza (o l’assenza) di eventi di frana. Le informazioni sulle frane sono relative alla mappatura del progetto PAI.

Tabella 4.5. *Dati sui dissesti ed informazioni tematiche utilizzati per la realizzazione della zonazione della suscettibilità da frana nel CUORE di San Fratello.*

Legenda: V, formato vettoriale; R, formato raster.

<i>Tematismo</i>	<i>Formato</i>	<i>Scala</i>	<i>Fonte</i>
Dati eventi di frana	V	10,000	PAI
Cartografia litologica	V	100,000	Regione Siciliana
Carta dei suoli	V	100,000	Corine Land Cover
Modello Digitale del Terreno	R	23m x 23 m	ALOS

Le variabili indipendenti (o esplicative) geo-ambientali utilizzate per la costruzione del modello di classificazione sono le seguenti:

- le variabili morfometriche ricavate dal modello digitale del terreno (DTM) in formato *raster*, con una risoluzione al suolo di 23 m × 23 m circa, derivato da dati satellitari ALOS.
- le variabili litologiche ottenute da Carta Geologica della Regione Siciliana in scala 1:100,000 (shapefile);
- le variabili di uso del suolo derivate dal Corine Land Cover in scala 1:100,000 (shapefile);

In Tabella 4.3 sono riportati i dati usati in input per la determinazione della suscettibilità da frana.

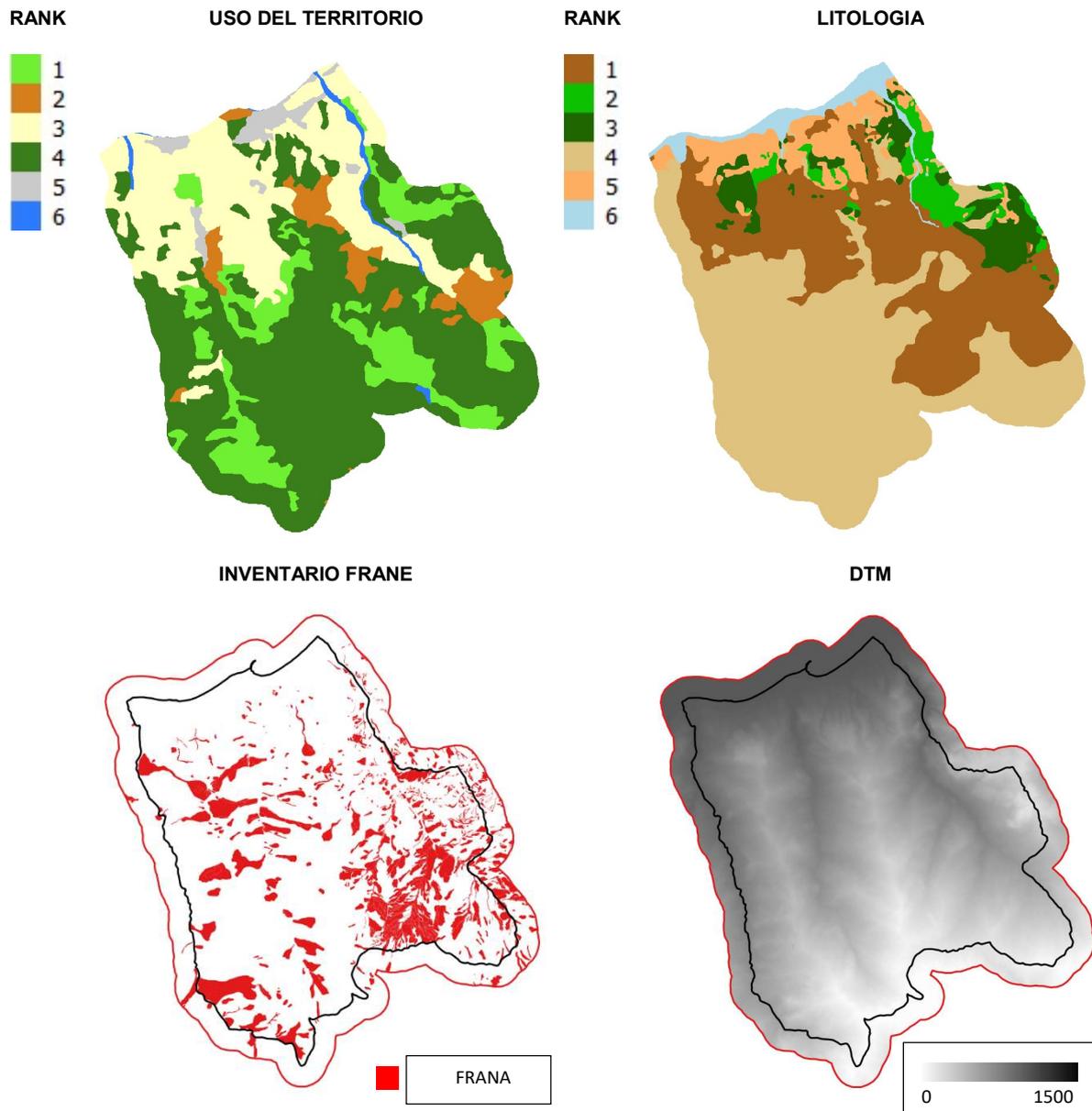


Figura 4.9 Rappresentazione dei dati di input relativi all'area di training.

Per preparare il modello di suscettibilità, tutto il CUORE di San Fratello è stato utilizzato come area di "training" (Figura 4.10).

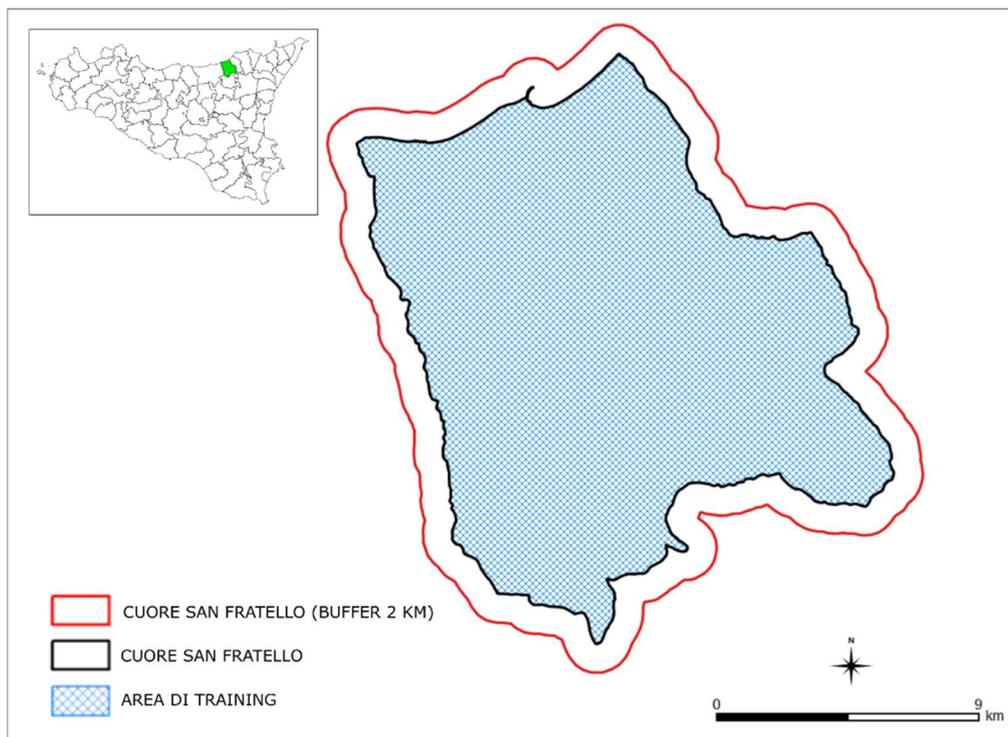


Figura 4.10 CUORE di San Fratello.

La carta geologica e la carta dell’Uso del Territorio sono state riclassificate in 6 classi associando ad ogni classe un valore di “rank” (da 1 a 6) in base alla densità dei fenomeni franosi (Tabella 4.6).

Tabella 4.6 Ranking delle variabili “litologia” ed “uso del territorio”

LITOLOGIA	RANK	USO DEL TERRITORIO	RANK
Argille scagliose, Argille variegata scagliose	1	Prateria naturale	1
Calcere marnoso, Calcari compatti alternanti, Calcari compattissimi	2	Seminativi non irrigati, Suoli principalmente occupati dall’agricoltura, Coltivazione complessa	2
Calcari cristallini, Calcari, Dolomie	3	Frutteti e frutti minori, Oliveti, Transizione suolo bosco/arbusti	3
Arenarie argillose, Arenarie quarzatiche, Arenarie quarzatiche fissili	4	Foreste a conifere, Foreste a latifoglie, Foreste miste, Vegetazione sclerofila	4
Conglomerati e arenarie, Sabbie argillose, Scisti neri e verdastrì	5	Reti di strade a binari e territori associati, Tessuto urbano continuo, Tessuto urbano discontinuo	5
Alluvioni	6	Corpi d’acqua, Corsi d’acqua, Mare	6

La carta di suscettibilità è il risultato della combinazione di 3 modelli statistici: Linear Discriminant Analysis (LDA), Quadratic Discriminant Analysis (QDA) e Logistic Regression Model (LRM). La performance della calibrazione è stata valutata considerando la ROC curve (Ayalew and Yamagishi, 2005), e il “Fourfold plot” che permette di analizzare e le relazioni tra i quattro elementi principali della matrice di confusione (veri positivi; veri negativi; falsi positivi, falsi negativi) (Rossi et al., 2010). Nella figura 4.11 è mostrata la frequenza di pixel per ogni classe di suscettibilità (Istogramma).

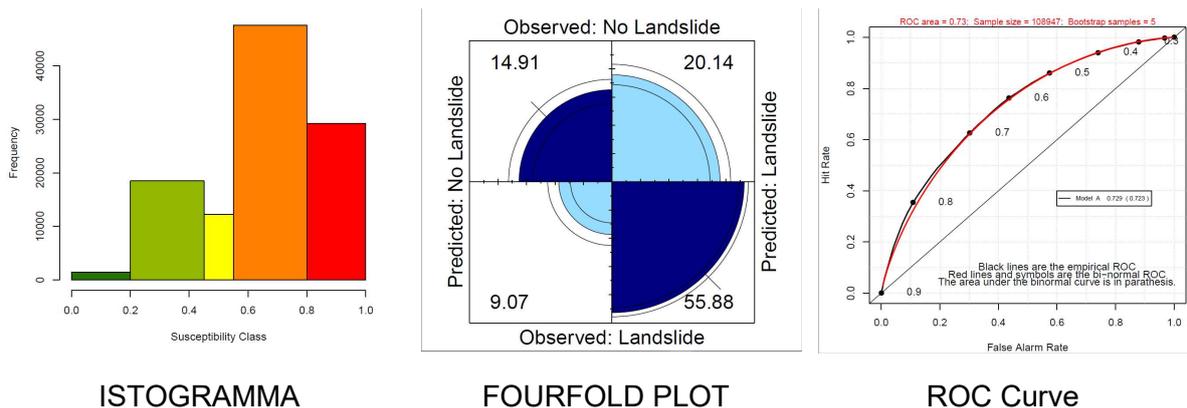


Figura 4.11 Metriche utilizzate per la valutazione della performance del modello.

Il modello statistico ottenuto in fase di calibrazione è stato applicato all’intero CUORE di San Fratello. La zonazione della suscettibilità da frana (Figura 4.12) è stato suddiviso in 5 classi la cui distribuzione di frequenza è mostrata nella figura Figura 4.11.

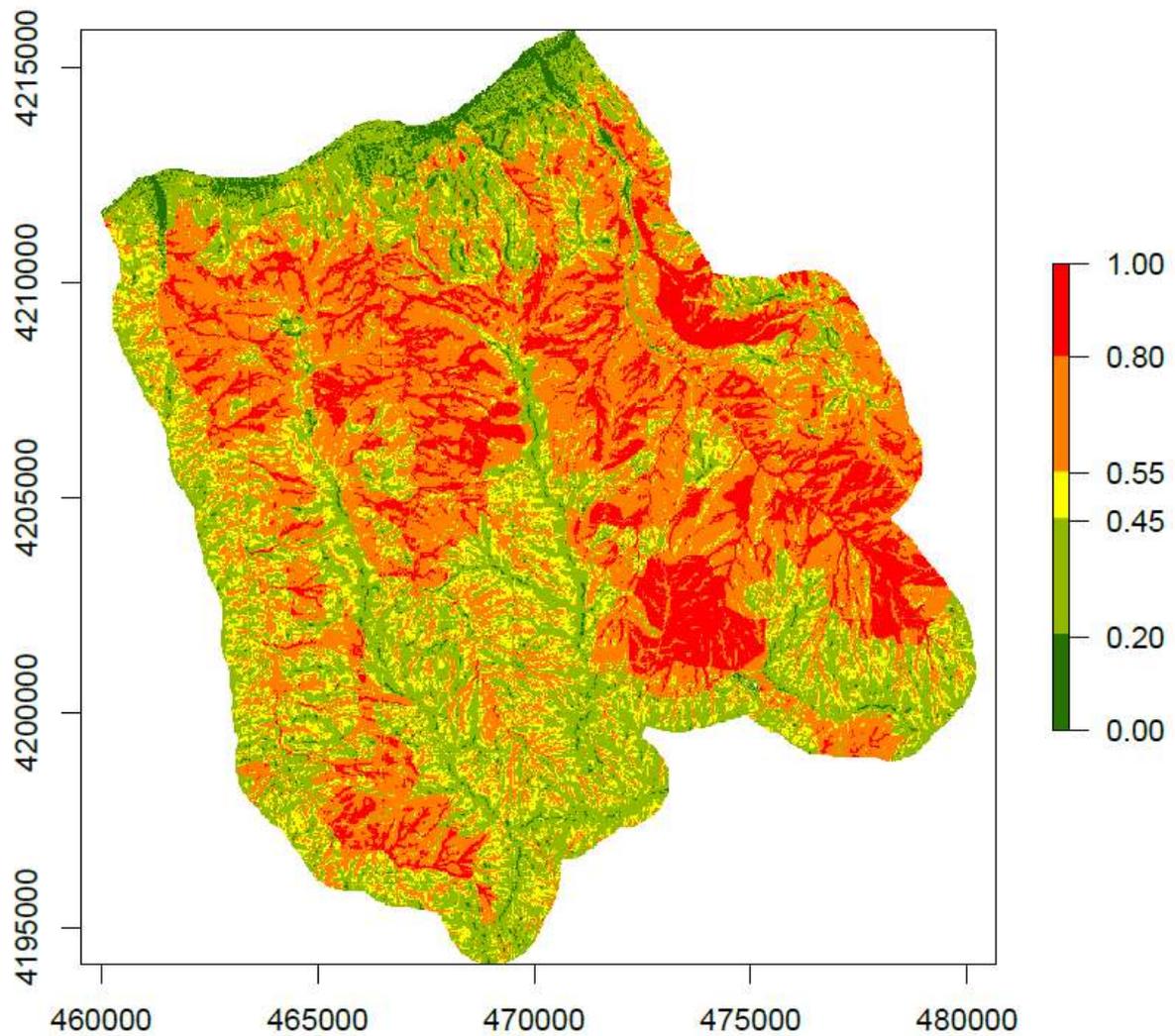


Figura 4.12 Carta della suscettibilità da frana per il CUORE di San Fratello, classificata in 5 classi.

5. Conclusioni

Integrando i risultati dell'analisi di revisione della letteratura (Reichenbach et al., 2018) con la nostra esperienza, è possibile individuare alcuni punti principali che riteniamo importanti per preparare una zonazione affidabile della suscettibilità alla frana. Riteniamo che le varie fasi descritte nella tabella possano essere utilizzate per la zonazione regionale/comunale della suscettibilità da frana componente importante per la conoscenza e la gestione del territorio e dei rischi associati al dissesto.

#	Step	Descrizione
1	Ottenere informazioni rilevanti sulle frane	Controllare le mappe delle frane esistenti, o preparare nuove mappe. Verificare le distribuzioni spaziale, temporale e dimensionale delle frane. Considerare il tipo e la scala dell'inventario, la tecnica di mappatura, il tipo o i tipi di frana e il tipo dell'evento o degli eventi scatenanti.
2	Ottenere rilevanti informazioni tematiche e ambientali	Controllare e selezionare le informazioni geo-ambientali appropriate e pertinente, considerando la scala originale delle informazioni. Modelli digitali di terreno sono necessari e la loro risoluzione condiziona la scala e la risoluzione dell'analisi. Considerare la qualità, l'accuratezza e la rilevanza delle informazioni geo-ambiente e quelle relative alla franosità in funzione della scala e degli obiettivi portata dell'analisi.
3	Selezionare un appropriata unità di mappatura	Selezionare un appropriata unità di mappatura (ad es, pixel, terrain unit o limite amministrativo) considerando: a) la geometria delle informazioni relative alle frane (ad es. poligoni, punti, celle a griglia); b) lo scopo dell'analisi (ad esempio, la comprensione dei processi e dei loro fattori di controllo, la pianificazione del territorio, sistemi di early warning); c) la scala dell'analisi (bacino, regionale, nazionale, ecc.); e d) il tipo di dati disponibili (categorici, numerici, ecc.).
4	Selezionare un appropriato modello statistico	Selezionare un appropriato modello/modelli statistici, considerando: (a) la tipologia di frana e informazioni geoambientali (ad esempio, categoriche, numeriche); b) le conoscenze disponibili e le risorse; e c) l'ambito di applicazione e i risultati attesi della modellazione.
5	Valutare il fitting model in fase di training	Scegliere e applicare tecniche e metriche multiple per valutare il fitting del model in fase di training (<i>model fitting performance</i>). Considerare la distribuzione geografica e il significato geomorfologico degli errori del modello
6	Valutare il fitting model in fase di validazione	Scegliere e applicare tecniche e metriche multiple per valutare il fitting de modello in fase di validazione (<i>model predictive performance</i>). Considerare la distribuzione geografica e il significato geomorfologico degli errori del modello
7	Valutare l'incertezza dei modelli	Scegliere e applicare le tecniche per stimare quantitativamente l'incertezza associata al modello in fase di previsione.
8	Classificare la qualità del modello	Utilizzare l'indice SQL (<i>Susceptibility Quality Level</i>) per misurare e classificare la qualità dei modelli di suscettibilità da frana. Non preparare modelli e zonazione di suscettibilità con SQL = 0

9	Identificare un adeguato protocollo	Progettare un appropriato protocollo per la gestione delle informazioni coinvolgendo gli utenti (stakeholders) e considerando le possibili conseguenze della zonazione del territorio.
---	-------------------------------------	--

6. Letteratura di Riferimento

- Aleotti, P., Chowdhury, R. 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 58, 21-44.
- Alexander, E.D. 1989. Urban landslides. *Progress in Physical Geography* 13, 157-191.
- Alexander, E.D. 2000. *Confronting Catastrophe*. Terra Publishing, Harpenden, 282 pp.
- Alexander, E.D. 2005. Vulnerability to landslides. In: Glade, T., Anderson, M.G., Crozier, M.J. (eds.) *Landslide risk assessment*. John Wiley, 175-198.
- Al-Homoud, A.S., Al-Masri, G.A. 1999. CSEES: an expert system for analysis and design of cut slopes and embankments. *Environmental Geology* 39 (1), 75-89.
- Al-Homoud, A.S., Masanat, Y. 1998. A classification system for the assessment of slope stability of terrains along highway routes in Jordan. *Environmental Geology* 34 (1), 59-69.
- Alvioli, M., Marchesini, I., Reichenbach, P., Rossi, M., Ardizzone, F., Fiorucci, F., & Guzzetti, F. 2016. Automatic delineation of geomorphological slope units with r. slopeunits v1. 0 and their optimization for landslide susceptibility modeling. *Geoscientific Model Development*, 9(11), 3975.
- Ardizzone, F., Cardinali, M., Carrara, A., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 2002. Impact of mapping errors on the reliability of landslide hazard maps. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 2 (1-2), 3-14.
- Arora, M.K., Das Gupta, A.S., Gupta, R.P., 2004. An artificial neural network approach for landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) Valley, Himalayas. *International Journal of Remote Sensing* 25, 559-572.
- Atkinson, P.M., Massari, R. 1998. Generalised linear modelling of susceptibility to landsliding in the Central Apennines, Italy. *Computers & Geosciences* 24 (4), 373-385.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., 2005. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology* 65 (1-2), 15-31.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., Marui, H., Kanno, T., 2005. Landslide in Sabo Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparison of results from two methods and verifications. *Engineering Geology* 81, 432-445.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., Ugawa, N., 2004. Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. *Landslides* 1 (1), 73-81.
- Baeza, C., Corominas, J., 2001. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surface Processes and Landforms* 26 (12), 1251-1263.
- Barredo, J.I., Benavides, A., Hervas, J., van Westen C.J., 2000. Comparing heuristic hazard assessment techniques using GIS in the Titajana basin, Gran Canaria Island, Spain. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 2, 9-23.

- Bayes, T., 1763. An Essay towards solving a Problem in the Doctrine of Chances. By the late Rev. Mr. Bayes, communicated by Mr. Price, in a letter to John Canton, M.A. and F.R.S. Transactions of the Royal Society of London 53, 370–418.
- Belsley, D., Kuh, E., Welsch, R. 1980. Regression Diagnostics. Wiley, 322 pp.
- Binaghi, E., Luzi, L., Madella, P., Pergalani, F., Rampini, A. 1998. Slope instability zonation: a comparison between certainty factor and Fuzzy Dempster–Shafer approaches. Natural Hazards 17, 77-97.
- Bonham-Carter, G.F. 1991. Integration of geoscientific data using GIS. In: Goodchild, M.F., Rhind, D.W., Maguire, D.J. (eds.), Geographic Information Systems: Principle and Applications. Longdom, London, 171-184.
- Brabb, E.E. 1984. Innovative approaches to landslide hazard mapping. Proceedings 4th International Symposium on Landslides, Toronto, 1, 307-324.
- Brown, C.E. 1998. Applied Multiple Statistics in Geohydrology and Related Sciences. Springer-Verlag, 248 pp.
- Calcaterra, D, Parise, M. 2001. The contribution of historical information in the assessment of the landslide hazard. In: Glade, T., Albini, P., Frances, F. (eds.) The Use of Historical Data in Natural Hazard Assessments. Advances in Natural and Technological Hazards Research, vol. 17, Kluwer Academic Publishers, 201-217.
- Calcaterra, D., Parise, M. 2005. Landslide types and their relationships with weathering in a Calabrian basin, southern Italy. Bulletin of the Engineering Geology and the Environment 64 (2), 193-207.
- Caniani, D., Pascale, S., Sdao, F., Sole, A., 2007. Neural networks and landslide susceptibility: a case study of the urban area of Potenza. Natural Hazards 45, 55-72.
- Cardinali, M., Carrara, A., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 2002. Landslide hazard map for the Upper Tiber River basin. CNR Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche Publication n. 2116, scale 1:100,000.
- Cardinali, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., Ardizzone, F., Antonini, G., Galli, M., Cacciano, M., Castellani, M., Salvati, P. 2002. A geomorphological approach to estimate landslide hazard and risk in urban and rural areas in Umbria, central Italy. Natural Hazards and Earth System Sciences 2, 57-72.
- Carrara, A. 1983. A multivariate model for landslide hazard evaluation. Mathematical Geology 15, 403-426.
- Carrara, A. 1988. Drainage and divide networks derived from high-fidelity digital terrain models. In: Chung, C.-J. F., Fabbri, A.G., Sinding-Larsen, R. (eds.), Quantitative analysis of mineral and energy resources. NATO–ASI Series, D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, 581-597.
- Carrara, A. 1989. Landslide hazard mapping by statistical methods: a “black–box” model approach. In: Siccardi, F., Bras, R. (eds.), International Workshop on Natural Disasters in European–Mediterranean Countries, Perugia, 27 June-1 July 1989, CNR–US NFS, 427-445.

- Carrara, A. 1992. Landslide hazard assessment. Proceeding 1st Symposio Internazionale Sensores Remotos y Sistema de Informativo Geografico para el Studio de Resorces Naturales, 10-12 March, Bogotá, 329-355.
- Carrara, A., Bitelli, G., Carlà, R. 1997. Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines. International Journal Geographical Information System 11, 451-473.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., Reichenbach, P. 1991. GIS Techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. Earth Surface Processes and Landform 16 (5), 427-445.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., Reichenbach, P. 1991. Geographical information systems and multivariate models in landslide hazard evaluation. Proceedings ALPS 90 6th International Conference and Field Workshop on Landslides, Milan, 12 September 1990, 17-28.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F. 1992. Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. ITC Journal 2, 172-183.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P. 1995. GIS technology in mapping landslide hazard. In: Carrara, A., Guzzetti, F. (eds.), Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, 135-175.
- Carrara, A., Crosta, G.B., Frattini, P., 2003. Geomorphological and historical data in assessing landslide hazard. Earth Surface Processes and Landforms 28 (10), 1125-1142.
- Carrara, A., Crosta, G.B., Frattini, P., 2008. Comparing models of debris-flow susceptibility in the alpine environment. Geomorphology 94, 353-378.
- 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. 1998. Current limitations in modelling landslide hazard. In: Buccianti, A., Nardi, G., Potenza, R. (eds.), Proceedings of International Association for Mathematical Geology 1998 Annual Meeting (IAMG'98), Ischia, Italy, October 1998, 195-203.
- 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.
- Carrara, A., Pugliese-Carratelli, E., Merenda, L. 1977. Computer based data bank and statistical analysis of slope instability phenomena. Zeischrift für Geomorphologie N.F. 21 (2), 187-222.
- Carrara, A., Sorriso-Valvo, M., Reali, C. 1982. Analysis of landslide form and incidence by statistical technique, Southern Italy. Catena 9, 35-62.
- Carrasco, R.M., Pedraza, J., Martin-Duque, J.F., Mattera, M., Sanz, M.A., Bodoque, J.M., 2003. Hazard Zoning for Landslides Connected to Torrential Floods in the Jerte Valley (Spain) by using GIS Techniques. Natural Hazards 30 (3), 361-381.

- Cascini, L. 2008. Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales. *Engineering Geology*, 102(3-4), 164-177.
- Castellanos Abella, E.A., Van Westen, C.J., 2008. Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: a case study from San Antonio del Sur, Guantanamo, Cuba. *Geomorphology* 94, 453-466.
- Catani, F., Casagli, N., Ermini, L., Righini, G., Menduni, G. 2005. Landslide hazard and risk mapping at catchment scale in the Arno River basin. *Landslides*, 2(4), 329-342.
- Çevik, E., Topal, T., 2003. GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey). *Environmental Geology* 44 (8), 949-962.
- Chau, K.T., Chan, J.E., 2005. Regional bias of landslide data in generating susceptibility maps using logistic regression: case of Hong Kong Island. *Landslides* 2, 280-290.
- Chen, Z., Wang, J., 2007. Landslide hazard mapping using logistic regression model in Mackenzie Valley, Canada. *Natural Hazard* 42, 75-89.
- Chernick, M.R. 1999. *Bootstrap Methods, A practitioner's guide*. Wiley Series in Probability and Statistics, 264 pp.
- Chung, C.-J.F., 2006. Using Likelihood ratio functions for modelling the conditional probability of occurrence of future landslides for risk assessment. *Computer & Geosciences* 32, 1052-1068.
- Chung, C.-J.F., Fabbri, A.G. 1999. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 65 (12), 1389-1399.
- Chung, C.-J.F., Fabbri, A.G., 2003. Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping. *Natural Hazards* 30 (3), 451-472.
- Chung, C.-J.F., Fabbri, A.G., 2005. Spatial prediction of the occurrences of future landslides and their validations. In: Hungr, O., Fell, R., Couture, R., Eberhardt, E. (eds.), *Landslide Risk Management*. A.A. Balkema Publishers, Cd-Rom, 10 pp.
- Chung, C.-J.F., Fabbri, A.G., 2005. Systematic procedures of landslide hazard mapping for risk assessment using spatial prediction models. In: Glade, T., Anderson, M.G., Crozier, M.J. (eds.), *Landslide risk assessment*. John Wiley, 139-174.
- Chung, C.-J.F., Fabbri, A.G., 2008. Predicting landslides for risk analysis – Spatial models tested by a cross validation technique. *Geomorphology* 94, 438-452.
- Clemen, R.T. 1989. Combining forecasts: a review and annotated bibliography. *International Journal of Forecasting* 5, 559-583.
- Committee on the Review of the National Landslide Hazards Mitigation Strategy, 2004. *Partnerships for Reducing Landslide Risk. Assessment of the National Landslide Hazards Mitigation Strategy*. Board on Earth Sciences and Resources, Division on Earth and Life Studies, The National Academic Press, Washington, D.C., 143 pp.
- Compagnoni, B. Damiani, A.V., Valletta, M., Finetti, I., Cirese, E., Pannuti, S., Sorrentino, F., Rigano, C. (eds.) 1976-1983. *Carta Geologica d'Italia*. Servizio Geologico d'Italia, Stabilimento Salomone, Roma, scala 1:500,000, 5 fogli.

- Conoscenti, C., Di Maggio, C., Rotigliano, E., 2008. GIS analysis to assess landslide susceptibility in alluvial basin of NW Sicily (Italy). *Geomorphology* 94, 325-339.
- Cotecchia, V. 1978. Systematic reconnaissance mapping and registration of slope movements. *Bulletin International Association Engineering Geology* 17, 5-37.
- Cox, D.R. 1958. The Regression Analysis of Binary Sequences. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 20, 215-242.
- Crozier, M.J. 1986. *Landslides: causes, consequences & environment*. Croom Helm Pub., London.
- Crozier, M.J., Glade, T., 2005. Landslide hazard and risk: issues, concepts and approach. In: Glade, T., Anderson, M.G., Crozier, M.J. (eds.), *Landslide risk assessment*. John Wiley, 1-40.
- Cruden, D.M., Varnes, D.J. 1996. Landslide types and processes. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (eds) *Landslides, Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board Special Report 247, Washington D.C., 36-75.
- Dai, F.C., Lee, C.F., 2002. Landslide characteristics and slope instability modelling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology* 42, 213-228.
- Dai, F.C., Lee, C.F., 2003. A spatiotemporal probabilistic modelling of storm-induced shallow landsliding using aerial photographs and logistic regression. *Earth Surface Processes and Landforms* 28 (5), 527-545.
- Dai, F.C., Lee, C.F., Xu, Z.W., 2001. Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environmental Geology* 40 (3), 381-391.
- Davis, J.C., Chung, C.-J., Ohlmacher, G.C., 2006. Two models for evaluating landslide hazards. *Computer & Geosciences* 32, 1120-1127.
- Demoulin, A., Chung, C.-J.F., 2007. Mapping landslide susceptibility from small datasets: a case study in the Pays de Herve (E Belgium). *Geomorphology* 89, 391-404.
- Duman, T.Y., Can, T., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H.A., Sonmez, H., 2006. Application of logistic regression for landslide susceptibility zoning of Cekmece Area, Istanbul, Turkey. *Environmental Geology* 51, 241-256.
- Einstein, H.H. 1988. Landslide risk assessment procedure. *Proceeding 5th International Symposium on Landslides, Lausanne*, 2, 1075-1090.
- Ercanoglu, K. 2005. Landslide susceptibility assessment of SE Bartın (West Black Sea region, Turkey) by artificial neural network. *Natural Hazard and Earth system Sciences* 5 (6), 979-992.
- Ercanoglu, M., Gokceoglu, C., 2002. Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. *Environmental Geology* 41 (6), 720-730.
- Ercanoglu, M., Gokceoglu, C., 2004. Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey). *Engineering Geology* 75 (3-4), 229-250.

- Ermini, L., Catani, F., Casagli, N., 2005. Artificial Neural Networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology* 66 (1-4), 327-343.
- Fabbri, A.G., Chung C.-J. F., Cendrero, C., Remondo, J., 2003. Is Prediction of Future Landslides Possible with a GIS? *Natural Hazards* 30 (3), 487-503.
- Fawcett, T. 2006. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters* 27, 861-874.
- Federici, P.R., Puccinelli, A., Cantarelli, E., Casarosa, N., D'Amato Avanzi, G., Falaschi, F., Giannecchini R., Pochini, A., Ribolini, A., Salvati, N., Testi, C., 2007. Multidisciplinary investigations in evaluating landslide susceptibility. An example in the Serchio River valley (Italy). *Quaternary International* 171-172, 52-63.
- Ferentinou, M.D., Sakellariou, M.G., 2005. Assessing landslide hazard on medium and large scales, using self-organizing maps. In: Hungr, O., Fell, R., Couture, R., Eberhardt, E. (eds.), *Landslide Risk Management*. A.A. Balkema Publishers, 639-648.
- Fisher, R.A. 1936. The use of multiple measurements in taxonomic problems. *Annales Eugenics* 7, 179-188.
- Friendly, M. 1994. A fourfold display for 2 by 2 by k tables. Technical Report 217, York University, <http://www.math.yorku.ca/SCS/Papers/4fold/4fold.ps.gz>.
- Galli, M., Ardizzone, F., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach P., 2008. Comparing landslide inventory maps. *Geomorphology* 94, 268-289
- Glade, T., Anderson, M.G., Crozier, M.J. (eds.), 2005. *Landslide risk assessment*. John Wiley, 832 pp.
- Glade, T., Crozier, M.J. 2005. A review of scale dependency in landslide hazard and risk analysis. In: Glade, T., Anderson, M.G., and Crozier, M.J. (eds.) *Landslide risk assessment*. John Wiley, 75-138.
- Glade, T., Crozier, M.J., 2005. The nature of landslide hazard impact. In: Glade, T., Anderson, M.G., Crozier, M.J. (eds.), *Landslide risk assessment*. John Wiley, pp. 43-74.
- Gómez, H., Kavzoglu, T., 2005. Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela. *Engineering Geology* 78 (1-2), 11-27.
- Gorsevski, P.V., Gessler, P.E., Jankowski, P., 2003. Integrating a fuzzy k-means classification and a Bayesian approach for spatial prediction of landslide hazard. *Journal of Geographical Systems* 5 (3), 223-251.
- Guinau, M., Pallàs, R., Vilaplana, J.M, 2005. A feasible methodology for landslide susceptibility assessment in developing countries: a case-study of NW Nicaragua after Hurricane Mitch. *Engineering Geology* 80, 316-327.
- Gupta, R.P., Joshi, B.C. 1990. Landslide hazard zoning using the GIS approach-A case study from the Ramganga catchment, Himalayas. *Engineering Geology* 28, 119-131.
- Guzzetti, F. 2000. Landslide fatalities and evaluation of landslide risk in Italy. *Engineering Geology* 58, 89-107.

- 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., Cardinali, M. 1990. Landslide inventory map of the Umbria region, Central Italy. In: Cancelli, A. (ed.), Proceedings ALPS 90 6th International Conference and Field Workshop on Landslides, Milan, 12 September 1990, pp. 273-284.
- Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P. 1996b. The influence of structural setting and lithology on landslide type and pattern. *Environmental and Engineering Geoscience* 2 (4), 531-555.
- Guzzetti F., Cardinali M., Reichenbach P. 1994. The AVI Project: A bibliographical and archive inventory of landslides and floods in Italy. *Environmental Management* 18, 623-633.
- Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P., Carrara, A., 2000. Comparing landslide maps: A case study in the upper Tiber River Basin, central Italy. *Environmental Management* 25 (3), 247-363.
- Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P., Cipolla, F., Sebastiani, C., Galli, M., Salvati, P., 2004. Landslides triggered by the 23 November 2000 rainfall event in the Imperia Province, Western Liguria, Italy. *Engineering Geology* 73 (2), 229-245.
- 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., Crosta, G.B., Detti, R., Agliardi, F., 2002. STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Computers & Geosciences* 28 (9), 1079-1093.
- 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., Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Reichenbach, P., 2002. Power-law correlations of landslide areas in Central Italy. *Earth and Planetary Science Letters* 195, 169-183.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P. 1994. Toward the definition of topographic divisions of Italy. *Geomorphology* 11, 57-74.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone F., Cardinali, M., Galli, M., 2005. Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology* 81, 166-184.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Ardizzone, F., Galli, M., 2003. Impact of landslides in the Umbria Region, Central Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3 (5), 469-486.
- 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., Reichenbach, P., Ghigi, S. 2004. Rockfall hazard and risk assessment in the Nera River Valley, Umbria Region, central Italy. *Environmental Management* 34 (2), 191-208.
- Guzzetti, F., Salvati, P., Stark C.P. 2005. Evaluation of risk to the population posed by natural hazards in Italy. In: Hungr, O., Fell, R., Couture, R., Eberhardt E. (eds.) *Landslide Risk Management*. Taylor & Francis Group, London, ISBN 041538043X, 381-389.
- Guzzetti, F., Stark, C.P., Salvati, P. 2005. Evaluation of flood and landslide risk to the population of Italy. *Environmental Management* 36 (1), 15-36.
- Guzzetti, F., Tonelli, G. 2004. Information system on hydrological and geomorphological catastrophes in Italy (SICI): a tool for managing landslide and flood hazards. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 4 (2), 213-232.
- Hansen, A., 1984. Landslide hazard analysis. In: Brunsden, D., Prior, D.B. (eds.), *Slope instability*, Wiley & Sons, New York, 523-602.
- Hartlén, J., Viberg, L. 1988. Evaluation of landslide hazard. *Proceedings 5th International Symposium on Landslides*, Lausanne, 2, 1037-1058.
- Havenith, H.-B., Strom, A., Caceres, F., Pirard, E., 2006. Analysis of landslide susceptibility in the Suusamyр region, Tien Shan: statistical and geotechnical approach. *Landslides* 3, 39-50.
- Hendrickx, J. 2008. perturb: Tools for evaluating collinearity. R package version 2.03. [Online] Available from: <http://www.R-project.org> [Accessed 15 September 2008].
- Humam, Io., Radulescu, D. 1978. Automatic production of thematic maps of slope stability. *International Association Engineering Geology Bulletin* 17, 95-99.
- Hutchinson, J.N. 1995. Keynote paper: Landslide hazard assessment. In: Bell (ed.) *Landslides*, A.A. Balkema, Rotterdam, 1805-1841.
- Irigaray, C., Fernandez, T., El Hamdouni, R., Chacon, J., 2007. Evaluation and validation of landslide-susceptibility maps obtained by a GIS matrix method: examples from the Betic Cordillera (southern Spain). *Natural Hazards* 41, 61-79.
- Jolliffe, I.T., Stephenson, D.B. 2003. *Forecast Verification. A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*. John Wiley, 240 pp.
- Juang, C.H., Lee, D.H., Sheu, C. 1992. Mapping slope failure potential using fuzzy sets. *Journal of Geotechnical Engineering* 188 (3), 475-493.
- Kanungo, D.P., Arora, M.K., Sarkar, S., Gupta, R.P., 2006. A comparative study of conventional, ANN black box, fuzzy and combined neural and fuzzy weighting procedures for landslide susceptibility zonation in Darjeeling Himalayas. *Engineering Geology* 85, 347-366.
- King, G., Zeng, L., 2001. Logistic regression in rare events data. *Political Analysis* 9, 137-163.
- Kobashi, S., Suzuki, M. 1988. Hazard index for the judgement of slope stability in the Rokko Mountain region. In: *Proceedings INTERPRAEVENT*, Graz, Austria, 1, 223-233.

- Komac, M., 2006. A landslide susceptibility model using Analytical Hierarchy Process model and multivariate statistics in perialpine Slovenia. *Geomorphology* 74, 17-28.
- L'Abate, G., Costantini, E.A.C. 2004. GeoDataBase pedoclimatico d'Italia. Centro Nazionale di Cartografia Pedologica. Istituto Sperimentale per lo Studio e la Difesa del Suolo, Firenze (<http://www.soilmaps.it/ita/downloads.html>).
- Lachenbruch, P.A., Goldstein, M. 1979. Discriminant analysis. *Biometrics* 35, 69-85.
- Lee, E.M., 2004. *Landslide Risk Assessment*. Thomas Telford Ltd, 256 pp.
- Lee, S., 2004. Application of Likelihood Ratio and Logistic Regression Models to Landslide Susceptibility Mapping Using GIS. *Environmental Management* 34 (2), 223-232.
- Lee, S., Choi, J., Min, K., 2002. Landslide susceptibility analysis and verification using the Bayesian probability model. *Environmental Geology* 43 (1-2), 120-131.
- Lee, S., Chwae, U., Min, K., 2002. Landslide susceptibility mapping by correlation between topography and geological structure: the Janghung area, Korea. *Geomorphology* 46 (3-4), 149-162.
- Lee, S., Evangelista, D.G., 2006. Earthquake-induced landslide-susceptibility mapping using an artificial neural network. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 6, 687-695.
- Lee, S., Lee M.-J., 2006. Detecting landslide location using KOMPSAT 1 and its application to landslide-susceptibility mapping at the Gangneung area, Korea. *Advances in Space Research* 38, 2261-2271.
- Lee, S., Ryu, J.-H., Lee, M.-J., Won, J.-S., 2006. The application of Artificial Neural Networks to landslide susceptibility mapping at Janghung, Korea. *Mathematical Geology* 38 (2), 199-220.
- Lee, S., Ryu, J.-H., Min, K., Won, J.-N., 2003. Use of an artificial neural network for analysis of the susceptibility to landslides at Bou, Korea. *Environmental Geology* 44 (7), 820-833.
- Lee, S., Ryu, J.-H., Min, K., Won, J.-N., 2003. Landslide susceptibility analysis using GIS and artificial neural network. *Mathematical Geology* 38 (2), 199-220.
- Lee, S., Ryu, J.-H., Min, K., Won, J.-N., 2004. Landslide susceptibility analysis using GIS and artificial neural network. *Earth Surface Processes and Landforms* 28 (12), 1361-1376.
- Lee, S., Ryu, J.-H., Won, J.-S., Park, H.-J., 2004. Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network. *Engineering Geology* 71 (3-4), 289-302.
- Lee, S., Sambath, T., 2006. Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models. *Environmental Geology* 50, 847-855.
- Lee, S., Talib, J.A., 2005. Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental Geology* 47, 982-990.
- Lin, M.-L., Tung, C.-C., 2004. A GIS-based potential analysis of the landslides induced by the Chi-Chi earthquake. *Engineering Geology* 71 (1-2), 63-77.

- Lu, P. 2003. Artificial neural networks and grey systems for the prediction of slope stability. *Natural Hazards* 30 (3), 383-398.
- 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.
- Mancini, L. 1966. Soil map of Italy. Società Geografica, A.G.A.F- A. & R. Senatori, scale 1:1.000.000.
- Mark, R.K. 1992. Map of debris flow probability, San Mateo County, California, scale 1:62,500. U.S. Geological Survey Miscellaneous Investigation Map I-1257-M.
- Mark, R.K., Ellen, S.D. 1995. Statistical and simulation models for mapping debris-flow hazard. In: Carrara, A., Guzzetti, F., (eds.), *Geographical Information Systems in assessing Natural Hazards*, Kluwer Publishing co., Dordrecht, The Netherlands, pp. 93-106.
- McCalpin, J. 1984. Preliminary age classification of landslides for inventory mapping. *Proceedings 21st annual Engineering Geology and Soils Engineering Symposium*, Moscow, Idaho, 99-111.
- Melchiorre, C., Matteucci, M, Remondo, J. 2006. Artificial neural network and robustness analysis in landslide susceptibility zonation. *Proceedings International Joint Conference on Neural Networks*, 16-21 July 2006, Vancouver, Canada, 8808-8814.
- Meyer, D., Zeileis, A., Hornik, K. 2008. VCD: Visualizing Categorical Data. R package version 1.1-1. [Online] Available from: <http://www.R-project.org> [Accessed 15 September 2008].
- Michie, D., Spiegelhalter, D.J., Taylor, C.C. (eds.) 1994. *Machine Learning, Neural and Statistical Classification*. Internet version available at <http://www.amsta.leeds.ac.uk/~charles/statlog/>.
- Miska, L., Jan, H. 2005. Evaluation of current statistical approaches for predictive geomorphological mapping. *Geomorphology* 67 (3-4), 299-315.
- Mulder, H.F.H.M. 1991. Assessment of landslide hazard. *Profscript ter Verkrijging van Graad van Doctor an de Rijkuniversiteit Utrecht*, University of Utrecht, 150 pp.
- Nagarajan, R., Roy, A., Vinod Kumar, R., Mukhetjess, A., Khire, M.V., 2000. Landslide hazard susceptibility mapping based on terrain and climatic factors for tropical monsoon regions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 58 (4), 275-287.
- Nandi, A., Shakoor, A., 2008. Application of logistic regression model for stability prediction in Cuyahoga river watershed, Ohio, USA. *Georisk* 2 (1), 16-27.
- Naranjo, J.L., van Westen, C.J., Soeters, R. 1994. Evaluating the use of training areas in bivariate statistical landslide hazard analysis: a case study in Colombia. *ITC Journal* 3, 292-300.
- NCAR - Research Application Program. 2008. verification: Forecast verification utilities. R package version 1.26. [Online] Available from: <http://www.R-project.org> [Accessed 15 September 2008].
- Neaupane, K.M., Piantanakulchai, M., 2006. Analytic network process model for landslide hazard zonation. *Engineering Geology* 85, 281-294.

- Nefeslioglu, H.A., Duman, T.Y., Durmaz S., 2008. Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Vally (Eastern Black Sea region of Turkey). *Geomorphology* 94, 401-418.
- Nieto, A.S. 1989. Mechanical models and geological observations: closing the prediction gap. In: Siccardi, F., Bras, R. (eds.) *International Workshop on Natural Disasters in European-Mediterranean Countries*, Perugia, 27 June - 1 July 1989, CNR – US NFS, 145-164.
- Ohlmacher, G.C., Davis, J.C., 2003. Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA. *Engineering Geology* 69 (3-4), 331-343.
- Pandey, A., Dabral, P.P., Chowdary, V.M., Yadav, N.K., 2008. Landslide hazard zonation using remote sensing and GIS: a case study of Dikrong river basin, Arunachal Pradesh, India. *Environmental Geology* 54, 1517-1529.
- Parise, M. 2001. Landslide mapping techniques and their use in the assessment of the landslide hazard. *Journal of Physics and Chemistry of the Earth, part C*, 26 (9), 697-703.
- Parise, M., Jibson, R.W., 2000. A seismic landslide susceptibility rating of geologic units based on analysis of characteristics of landslides triggered by the 17 January, 1994 Northridge, California earthquake. *Engineering Geology* 58, 251-270.
- Parise, M., Wasowski, J. 1999. Landslide activity maps for the evaluation of landslide hazard: three case studies from Southern Italy. *Natural Hazards* 20 (2-3), 159-183.
- Pavel, M., Fannin, R.J., Nelson, J.D., 2008. Replication of a terrain stability mapping using an artificial neural network. *Geomorphology* 97 (3-4), 356-373.
- Pinter, N., Dean Vestal, W., 2005. El Niño-driven landsliding and postgrazing vegetative recovery, Santa Cruz Island, California. *Journal of Geophysical Research* 110: F02003, doi: 10.1029/2004JF00203.
- Pistocchi, A., Luzi, L., Napolitano, P., 2002. The use of predictive modelling techniques for optimal exploitation of spatial databases: a case study in landslide hazard mapping with expert system-like methods. *Environmental Geology* 41 (7), 765-775.
- Pradhan, B., Lee, S., 2007. Utilization of optical remote sensing data and GIS tools for regional hazard analysis using and Artificial Neural Network model. *Earth Science Frontiers* 14 (6), 143-152.
- R Development Core Team. 2008. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [Online] Available from: <http://www.R-project.org> [Accessed 15 September 2008].
- Rautela, P., Lakhera, R.C., 2000. Landslide risk analysis between Giri and Tons rivers in Himachal Himalaya (India). *International Journal Applied Earth Observation GeolInfo* 2, 153-160.
- Reger, J.P. 1979. Discriminant analysis as a possible tool in landslide investigations. *Earth Surface Processes and Landforms* 4, 267-273.
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B.D., Mihir, M., Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 180, 60-91.

- Reichenbach, P., Busca C., Mondini, A.C., Rossi, M. 2014. The influence of land use change on landslide susceptibility zonation: the Briga catchment test site (Messina, Italy). *Environmental management*, 54(6), 1372-1384.
- Reichenbach, P., Galli, M., Cardinali, M., Guzzetti, F. Ardizzone, F. 2005. Geomorphologic mapping to assess landslide risk: concepts, methods and applications in the Umbria Region of central Italy. In: Glade, T., Anderson, M.G., Crozier, M.J. (eds.) *Landslide risk assessment*. John Wiley, 429-468.
- Rossi, M., Reichenbach, P. 2016. LAND-SE: a software for statistically based landslide susceptibility zonation, version 1.0. *Geoscientific Model Development*, 9(10).
- 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.
- Rowbotham, D., Dudycha, D.N. 1998. GIS modelling of slope stability in Phewa Tal watershed, Nepal. *Geomorphology* 26, 151-170.
- Ruff, M., Czurda, K., 2008. Landslide susceptibility analysis with a heuristic approach in the Eastern Alps (Vorarlberg, Austria). *Geomorphology* 94, 314-324.
- Saboya, F., Pinto, W.D., Gatts, C.E.N., 2005. Assessment of slope failure susceptibility using Fuzzy Logic. In: Hungr, O., Fell, R., Couture, R., Eberhardt, E. (eds.), *Landslide Risk Management*. A.A. Balkema Publishers, 649-655.
- Saha, A.K., Gupta, R.P., Sarkar, I., Arora, K.M., Csaplovics, E., 2005. An approach for GIS-based statistical landslide susceptibility zonation – with a case study in the himalayas. *Landslides* 2 (1), 61-69.
- Salvati, P., Bianchi, C., Guzzetti, F. 2006. *Catalogo delle frane e delle inondazioni storiche in Umbria*. CNR IRPI and Fondazione Cassa di Risparmio di Perugia, ISBN-13 978-88-95172-00-2, 278 pp.
- Salvati, P., Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M. Stark, C.P. 2003. Map of landslides and floods with human consequences in Italy. Pubblicazione CNR GNDCI n. 2822, scala 1:1.200.000.
- Santacana, N., Baeza, B., Corominas, J., De Paz, A., Marturiá, J., 2003. A GIS-Based Multivariate Statistical Analysis for Shallow Landslide Susceptibility Mapping in La Poble de Lillet Area (Eastern Pyrenees, Spain). *Natural Hazards* 30 (3), 281-295.
- Sarkar, S., Kanungo, D.P., Mehrotra, G.S. 1995. Landslide hazard zoning: a case study in Garhwal Himalaya, India. *Mountain Research and Development* 15 (4), 301-309.
- Soeters, R., van Westen, C.J. 1996. Slope instability recognition, analysis and zonation. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (eds.), *Landslide investigation and mitigation*, National Research Council, Transportation Research Board Special Report 247, 129-177.
- Song, R.-H., Hiromu, D., Kazutoki, A., Usio, K., Sumio, M., 2008. Modelling the potential distribution of shallow-seated landslides using the weights of evidence and the logistic regression model: a case study in the Sabae area, Japan. *International Journal of Sediment Research* 23, 106-118.

- Süzen, M.L., Doyuran, V., 2004. A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental Geology* 45 (5), 665-679.
- Süzen, M.L., Doyuran, V., 2004. Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. *Engineering Geology* 71 (3-4), 303-321.
- Swets, J.A. 1996. *Signal Detection Theory and ROC Analysis in Psychology and Diagnostics*, Lawrence Erlbaum Associates, Inc, 314 pp.
- Thiery, Y., Malet, J.-P., Sterlacchini, S., Puissant, A., Maquaire, O., 2007. Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: application to a complex mountainous environment. *Geomorphology* 92, 38-59.
- Trigila, A., Iadanza, C., Bussetini, M., & Lastoria, B. (2018). *Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio-Edizione 2018*. Ispra, Rapporti, 287.
- Trigila, A., Iadanza, C., Guerrieri, L. (2007). The IFFI project (Italian landslide inventory): Methodology and results. *Guidelines for Mapping Areas at Risk of Landslides in Europe*, 23, 15.
- Uromeihy, A., MahdaviFar, M.R., 2000. Landslide hazard zonation of the Khorshrostan area, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 58 (3), 207-213.
- Van den Eeckhaut, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., Rossi, M., Poesen, J. (2009) Combined landslide inventory and susceptibility assessment based on different mapping units: An example from the Flemish Ardennes, Belgium. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 507–521.
- Van den Eeckhaut, M., Vanwalleghem, T., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten, G., Vandekerckhove, L., 2006. Prediction of landslide susceptibility rare events logistic regression: a case in the Flemish Ardennes (Belgium). *Geomorphology* 76, 392-410.
- van Westen, C.J. 1993. *Application of Geographical Information System to landslide hazard zonation*. ITC Publication n. 15, ITC, Enschede, 245 pp.
- van Westen, C.J. 1994. GIS in landslide hazard zonation: a review with examples from the Colombian Andes. In: Price, M.F., Heywood, D.I. (eds.) *Taylor and Francis*, London, pp. 135-165.
- van Westen, C.J., Rengers, N., Terlien, M.T.J., Soeters, R. 1997. Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation. *Geologische Rundschau* 86, 404-414.
- Vandine, D.F., Moore, G., Wise, M., Vanbuskirk, C., Gerath, R., 2004. Chapter 3 - Technical Terms and Methods. In: Wise, M., Moore, G., VanDine, D. (eds.) *Landslide Risk Case Studies in Forest Development Planning and Operations*. B.C., Ministry of Forests, Forest Science Program, *Abstract of Land Management Handbook* 56, 13-26.
- Varnes, D.J., IAEG Commission on Landslides and other Mass-Movements, 1984. *Landslide Hazard Zonation: a Review of Principles and Practice*. The UNESCO Press, Paris, 63 pp.

- Venables, W.N., Ripley, B.D. 2002. *Modern Applied Statistics with S*. Fourth Edition. Springer, New York. ISBN 0-387-95457-0, 495 pp.
- Verstappen, H.T. 1983. *Applied geomorphology: Geomorphological survey for environmental development*. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam.
- Wang, H.B., Sassa, K., 2005, Comparative evaluation of landslide susceptibility in Minamata area, Japan. *Environmental Geology* 47, 956-966.
- Wang, H.B., Sassa, K., 2006. Rainfall-induced landslide hazard assessment using artificial neural networks. *Earth Surface Processes and Landforms* 31, 235-247.
- Wang, H.B., Sassa, K., Fukuoka, K., Wang, G.H., 2005. Hazard assessment of landslides triggered by heavy rainfall using Artificial Neural Network and GIS. In: Hungr, O., Fell, R., Couture, R., Eberhardt, E. (eds.) *Landslide Risk Management*. A.A. Balkema Publishers, 669-674.
- Wieczorek, G.F. 1984. Preparing a detailed landslide-inventory map for hazard evaluation and reduction. *Bulletin Association Engineering Geologists* 21 (3), 337-342.
- Wu, S., Jin, Y., Zhang, Y., Shi, J., Dong, C., Lei, W., Shi, L., Tan, C., Hu, D., 2004. Investigations and assessment of the landslide hazards of Fengdu county in the reservoir region of the Three Gorges project on the Yangtze River. *Environmental Geology* 45 (4), 560-566.
- Yesilnacar, E., Topal, T., 2005. Landslide susceptibility mapping: a comparison of logistic regression and neural network methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey). *Engineering Geology* 79, 251-266.
- Yoshimatsu, H., Abe, S., 2006. A review of landslide hazards in Japan and assessment of their susceptibility using an analytical hierarchic process (AHP) method. *Landslides* 3, 149-158.
- Zadeh, L.A. 1975. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. *Information Science* 8, 199-249.
- Zadeh, L.A. 1978. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems* 1, 3-28.