

**UNIVERSITA' DELLA CALABRIA**

**Dipartimento di Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio e Ingegneria Chimica**

**Scuola di Dottorato**

**"ARCHIMEDE" IN SCIENZE, COMUNICAZIONE E TECNOLOGIE**

**Indirizzo**

**Scienze e Tecnologie dei Sistemi Complessi**

**CICLO**

**XXVIII**

**VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITA' E DEGLI SCENARI DI PERICOLOSITA' E  
DI RISCHIO DA FRANA IN AREE DI INTERESSE SOCIO-ECONOMICO  
(CALABRIA SETTENTRIONALE)**

**Settore Scientifico Disciplinare GEO/04 Geografia Fisica e Geomorfologia**

**Direttore:**

Ch.mo Prof. Pietro Pantano



**Supervisore:**

Ch.mo Prof. Piero Gagliardo



**Co-Tutor:**

Dott. Francesco Muto



**Dottoranda:** Dott.ssa Valeria Rago



Abstract.....	4
CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE.....	5
1.1 Inquadramento del problema .....	6
CAPITOLO 2 - BACKGROUND TEORICO.....	11
2.1 Frane .....	12
2.2 Inventario delle frane .....	15
2.3 Definizione di pericolosità.....	18
2.3.1 La valutazione della pericolosità da frana .....	20
2.3.2 Probabilità spaziale o suscettibilità da frana.....	20
2.3.2.1 Fattori predisponenti .....	24
2.3.3 Probabilità temporale.....	33
2.3.4 Probabilità di dimensioni (magnitudo o intensità).....	35
2.4 Vulnerabilità .....	36
2.5 Rischio da frana .....	38
CAPITOLO 3 - OVERVIEW SUGLI STUDI SUL RISCHIO DA FRANA.....	42
3.1 Studi sul rischio da frana in Europa.....	43
3.2 Studi sul rischio da frana in Italia .....	44
3.3 Il rischio da frana in Calabria .....	46
CAPITOLO 4 - CASO DI STUDIO: AUTOSTRADA A3, TRATTO COSENZA SUD – ALTILIA.....	49
4.1 Inquadramento dell'area di studio .....	50
4.1.1 Inquadramento geografico ed orografico.....	50
4.1.2 Inquadramento geologico .....	52
4.1.2.1 Geologia regionale.....	52
4.1.2.1.1 Caratterizzazione geologica della Calabria centro-settentrionale.....	54
4.1.2.1.2 Caratterizzazione strutturale della Calabria centro-settentrionale.....	56
4.1.2.2 Geologia dell'area di studio.....	58

4.1.3 Inquadramento geomorfologico della Calabria settentrionale.....	65
4.1.4 Inquadramento geomorfologico dell'area di studio.....	68
4.1.5 Aspetti climatici.....	74
4.1.5.1 Aspetti climatici della Calabria.....	74
4.1.5.2 Aspetti climatici dell'area di studio.....	75
4.2 Valutazione del rischio.....	78
4.2.1 Raccolta e preparazione dei dati.....	78
4.2.1.1 Carta inventario dei fenomeni franosi e analisi dell'inventario.....	80
4.2.2 Valutazione della pericolosità spaziale o suscettibilità da frana.....	87
4.2.2.1 Fattori predisponenti.....	90
4.2.2.2 Metodo " <i>Hazard Index</i> ".....	92
4.2.2.3 Analisi condizionale.....	98
4.2.2.4 Metodo " <i>Weight of Evidence</i> ".....	103
4.2.2.5 Validazione delle mappe di suscettibilità.....	108
4.2.3 Valutazione del rischio spaziale da frana.....	114
<b>CAPITOLO 5 - CASO DI STUDIO: AMENDOLARA.....</b>	<b>119</b>
5.1 Inquadramento dell'area di studio.....	120
5.1.1 Inquadramento geografico ed orografico.....	120
5.1.2 Inquadramento geologico.....	122
5.1.2.1 Geologia regionale.....	122
5.1.2.1.1 Caratterizzazione geologica dell'Appennino calabro-lucano.....	125
5.1.2.1.2 Caratterizzazione strutturale dell'Appennino calabro-lucano.....	128
5.1.2.2 Geologia dell'area di studio.....	131
5.1.3 Inquadramento geomorfologico del settore nord-orientale della Calabria.....	136
5.1.3.1 Inquadramento geomorfologico dell'area di studio.....	139
5.1.4 Aspetti climatici dell'area di studio.....	146
5.2 Valutazione del rischio.....	151

5.2.1 Raccolta e preparazione dei dati .....	151
5.2.1.1 Carta inventario dei fenomeni franosi e analisi dell'inventario.....	153
5.2.2 Valutazione della pericolosità da frana.....	156
5.2.2.1 Valutazione della pericolosità spaziale o suscettibilità da frana.....	158
5.2.2.1.1 Fattori predisponenti .....	159
5.2.2.1.2 Metodo di valutazione spaziale multi-criteriale.....	159
5.2.2.1.3 Metodo “ <i>Hazard Index</i> ” .....	167
5.2.2.1.4 Metodo “ <i>Weight of Evidence</i> ” .....	173
5.2.2.1.5 Validazione delle mappe di suscettibilità .....	181
5.2.2.2 Valutazione della pericolosità temporale da frana.....	184
5.2.2.3 Valutazione della magnitudo .....	187
5.2.2.4 Mappe di pericolosità da frana.....	190
5.2.3 Valutazione della vulnerabilità .....	192
5.2.4 Valutazione del rischio da frana .....	199
CAPITOLO 6 DISCUSSIONI E CONCLUSIONI .....	205
BIBLIOGRAFIA .....	218
SITOGRAFIA.....	250
Elenco delle figure .....	251
Elenco delle tabelle.....	254
PUBBLICAZIONI.....	255

## **Abstract**

Landslides are natural geologic processes that play a key role in landscape evolution, but represent also one of the most widespread natural hazard in Italian territory. In particular, many areas of the Calabria region (southern Italy) have been affected historically by mass movements, due to the combination of its peculiar geological, morphological, seismic and climatic features and frequently to regionally unsustainable land management. Landslides are responsible for direct and indirect damages, may cause loss of life and property, damages to natural resources and hamper infrastructure projects, by generating strong social and economic impacts. This resulting in millions of Euro per year in damages and restoration as well. Therefore, spatial identification of potentially unstable slopes and landslide risk evaluation are very important in order to get mitigation measures and for land planning. The aim of this study is landslide susceptibility and risk assessment in areas of socio-economic interest in Northern Calabria. Study areas were a section of the A3 highway and a part of Amendolara town. The identification and selection of study areas took into account topography, geology and urban development conditions for which the landsliding is potentially a problem. Landslide risk assessment in the section of A3 highway was performed in a qualitative way by overlapping the highway on the landslide susceptibility map; this had lead to the zonation of spatial risk which allowed an evaluation of the involvement of the highway in the different susceptibility areas. In the Amendolara territory risk assessment was carried out in a quantitative way according to the formula:  $Risk = Hazard \times Vulnerability \times Economic\ value\ of\ elements\ at\ risk$  (buildings and roads). Hazard was computed in a probabilistic way by means the product between spatial probability (probability that any given region will be affected by landslides), temporal probability (probability of occurrence of landslide events during time  $t$ ) and probability of landslide size (probability that a landslide will have a certain size). Physical vulnerability was evaluated considering elements at risk features and landslide size. Finally, landslide risk was computed on the basis of economic value of elements at risk, pointing to the probability of money that can be lost at the occurrence of a landslide in a given area, in a certain interval of time and with a certain area. This study provides two case example for the qualitative and quantitative risk assessment which can be useful to planners and decision makers to identify areas where more damages are expected and that should receive priority in the use of limited resources directed to preventive plans to reduce the impact of the landslides.

*Keywords:* Landslides; Hazard assessment; Risk analysis; GIS; Calabria

## **CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE**

Questo capitolo fornisce una introduzione generale riguardo il problema dei fenomeni franosi e delle loro cause. L'attenzione è posta su come questa problematica influenza l'assetto geomorfologico e socio-economico in Italia, ed in particolare in Calabria. Questi aspetti costituiscono la motivazione della realizzazione di questa ricerca, volta alla quantificazione del rischio da frana. Questa tematica rappresenta una delle maggiori sfide in questo campo a causa delle incertezze relative al loro innesco. Nel capitolo sono specificati gli obiettivi e le attività di ricerca svolte nel corso di questi tre anni.

## **1.1 Inquadramento del problema**

Il rischio idrogeologico può modificare il territorio in tempi relativamente rapidi, con effetti spesso distruttivi sulle opere, le attività e la stessa vita dell'uomo. Questo è stato, ed è soprattutto oggi, fortemente condizionato dall'azione dell'uomo, dai continui cambiamenti del territorio e dall'aumento della presenza di beni e di persone nelle zone dove eventi di dissesto sono probabili e si manifestano con effetti a volte catastrofici. Il dissesto idrogeologico quindi è fra le cause di rischio principali per l'assetto sociale ed economico. Nell'ambito del rischio idrogeologico il diverso combinarsi di fattori geologici, morfologici e climatici dà luogo a un'ampia varietà di fenomeni di dissesto che differiscono per tipologia, cinematismo, caratteri evolutivi e dimensioni delle aree coinvolte. Sebbene in generale la maggior parte delle frane che si attivano sono eventi di riattivazione di movimenti gravitativi pregressi, che coinvolgono dunque aree già precedentemente identificate come "instabili" sulla base di semplici considerazioni "storiche", gli eventi di neo-attivazione assumono un'importanza centrale nella valutazione della pericolosità e del rischio associato. Questi, infatti, risultano particolarmente pericolosi, proprio a causa dell'impossibilità di ricorrere a semplici considerazioni storiche per la previsione del "dove", del "quando" e del "quanto grande".

L'elevato numero di frane che sono avvenute negli ultimi decenni in Italia e nel resto d'Europa (EEA, 2010; EM-DAT, 2003), ha incentivato gli studi che hanno arricchito le conoscenze su questi fenomeni naturali, stimolando la nascita di una nuova cultura di previsione e prevenzione, basata sia sull'individuazione delle aree più suscettibili al rischio da frana che sulle tecniche di monitoraggio e di risanamento.

L'Italia è un paese caratterizzato da un alto rischio idrogeologico. Le caratteristiche intrinseche del nostro territorio, indotte dall'evoluzione geologica che ha reso possibile lo sviluppo di assetti spesso complessi, sono alla base dell'evoluzione per frana, che costituisce, da una parte, un elemento fondamentale nello sviluppo delle forme morfologiche e, dall'altra, un elemento di pericolosità e, quindi, di rischio. Della pericolosità e del rischio si deve tener conto quando si procede alla risoluzione di problematiche di pianificazione territoriale e all'attuazione di piani di prevenzione dei rischi. La valutazione di questi ultimi risulta particolarmente significativa in quanto determina le scelte prioritarie nel caso si proceda ad azioni di mitigazione.

Nel periodo compreso fra il 1963 e il 2012 circa 3.209 località sono state colpite da frana o inondazione provocando 3.994 morti e 421.295 fra evacuati e senzatetto (Istituto

di Ricerca per la Protezione Idrogeologica, 2014). Esaminando la serie storica dei principali dissesti idrogeologici in Gisotti (2012) risulta che nel periodo 1981-1991 si sono verificati in media 5,1 eventi calamitosi all'anno, mentre nel periodo 1991-2011 si sono verificati 6,6 eventi calamitosi all'anno, spesso con vittime, e comunque con danni ingenti che in vari casi hanno richiesto la dichiarazione dello stato di emergenza. Per quanto riguarda, invece, la quantificazione monetaria dei danni economici, con riferimento all'Annuario dei dati ambientali 2009 dell'Ispra (2009), il costo complessivo dei danni provocati dagli eventi franosi e alluvionali dal 1951 al 2008, rivalutato in base agli indici Istat, risulta superiore a 52 miliardi di euro. Tutti questi dati sottolineano l'importanza di mettere in atto attività destinate alla salvaguardia del territorio, attraverso mezzi tecnici, scientifici e soprattutto finanziari (con l'ausilio dell'Unione Europea) in modo adeguato e continuativo.

In questo contesto si pone la Calabria, dove l'analisi degli eventi franosi storici e recenti (siti web AVI,IFFI,PAI), mostra che questi costituiscono un evento ricorrente, nel tempo e nello spazio, determinando anche qui situazioni di significativo rischio per centri abitati ed infrastrutture. La vulnerabilità del territorio regionale è storicamente nota. Basti ricordare solo qualcuno dei gravi eventi verificatisi negli ultimi 60 anni: le alluvioni del 1951, del 1972-73, le alluvioni degli anni '80, i fenomeni alluvionali di Crotona nel 1996, di Soverato nel 2000, la frana di Cavallerizzo di Cerzeto nel 2005, la frana sull'autostrada A3 nel gennaio del 2009, la frana di Maierato nel 2010, la recente alluvione degli scavi di Sibari nel 2012, fino agli ultimi eventi dell'agosto 2015.

L'elevata propensione al dissesto del territorio calabrese risulta favorita dalle scadenti caratteristiche geo-meccaniche legate ai caratteri primari dei litotipi affioranti e/o alla loro degradazione per processi di alterazione fisica e/o chimica, dalle elevate energie del rilievo dovute all'intensa attività tettonica ed alle conseguenti fasi di approfondimento della rete idrografica e dalla presenza di cause innescanti molto incisive.

Gran parte del territorio è occupato da corpi di frana di cui circa un terzo attivi o riattivatisi negli ultimi 20 anni. Tale caratteristica condiziona inevitabilmente lo sviluppo urbano e infrastrutturale delle comunità locali, causando molti danni, ma fortunatamente poche vittime. Nonostante il carattere non catastrofico delle frane di questa regione, i danni economici sono invece elevati. Molti sono infatti gli abitati minacciati dal dissesto dei versanti, ma soprattutto le frane interessano la rete stradale con un costo di manutenzione straordinaria molto alto.



Alla luce di questo, studi sul rischio da frana a scala locale, basati su una profonda conoscenza del territorio e delle sue caratteristiche, sull'individuazione delle aree maggiormente esposte ai fenomeni franosi, sulla previsione dell'attivazione dei dissesti e sulla valutazione dei possibili danni, sono fondamentali per poter intervenire in maniera efficace nella pianificazione territoriale e nella progettazione degli interventi di mitigazione sia strutturali che non strutturali.

## **1.2 Obiettivi della ricerca**

Questo progetto di ricerca si inserisce nel filone degli studi intesi al controllo del rischio idrogeologico legato ai movimenti franosi. Esso si prefigge di sviluppare e testare, in due aree di interesse socio-economico della Calabria settentrionale, procedure per valutare la suscettibilità, la pericolosità e il rischio da frana. Lo scopo è essenzialmente quello di individuare aree sottoposte a rischio da frana più elevato rispetto ad altre, anche a parità di pericolosità, sulla base degli elementi esposti che vi si trovano ubicati. Tramite la determinazione del rischio si individuano, infatti, le zone in cui ad elevate criticità idrogeologiche è associata una maggiore presenza di elementi esposti al rischio e, di conseguenza, si determinano le zone da mettere in sicurezza prioritariamente.

L'individuazione e la selezione delle aree di studio ha tenuto conto delle condizioni topografiche, geologiche e di sviluppo urbano per le quali la franosità rappresenta potenzialmente un problema. La prima area di studio include il tratto di autostrada A3 tra gli svincoli di Cosenza sud ed Altilia, dove le caratteristiche litologiche, strutturali, topografiche ed idrologiche rendono l'area particolarmente vulnerabile ai fenomeni franosi, che causano spesso problemi alla viabilità. La seconda area di studio è coincide con una parte del territorio del comune di Amendolara, dove l'assetto geomorfologico è tale che annualmente si verifica un evento pluviale sufficiente a mobilitare frane, ed in particolare la parte più esterna dell'abitato è stata coinvolta più volte in fenomeni di dissesto che hanno danneggiato le abitazioni (Crescenzi et al., 1996).

## **1.3 Attività della ricerca**

Le attività di ricerca nel corso dei tre anni sono state organizzate nelle seguenti fasi:

- I. studio bibliografico incentrato sulla ricostruzione del *background* scientifico relativo all'assetto geologico e geomorfologico delle aree di studio e relativo alle più recenti tecniche di valutazione della suscettibilità, della pericolosità e del

rischio da frana presenti nella letteratura scientifica più recente, che rappresentano le tematiche principali della ricerca;

- II. acquisizione delle carte topografiche, geologiche ed inventario dei fenomeni franosi disponibili per le due aree di studio;
- III. rilevamento geomorfologico dei movimenti gravitativi di versante, eseguito attraverso l'osservazione di foto aeree e rilievi sul campo (effettuati dal 2012 al 2014). Durante il rilevamento sono stati aggiornati i dati (limiti, stato di attività) relativi a frane pregresse, e sono state rilevate frane di neo-formazione;
- IV. individuazione degli elementi esposti al rischio da frana e acquisizione dei dati relativi ad essi;
- V. implementazione di un *geo-database* delle informazioni relative ai movimenti gravitativi e agli elementi esposti al rischio;
- VI. attività di ricerca svolta presso il Dipartimento di Geomorfologia della Facoltà di Geografia dell'Università di Bucarest (Romania) dal 1 Novembre 2014 al 30 Aprile 2015, sotto la supervisione della prof.ssa Iuliana Armaş, direttore del “*Center for Risk Studies, Spatial Modelling, Terrestrial and Coastal System Dynamics*”, con lo scopo di apprendere e applicare metodi qualitativi e quantitativi per la valutazione del rischio da frana.

In particolare, le tematiche affrontate sono state:

- uso dei *software* GIS Ilwis e QGIS;
- *remote sensing*: principi e introduzione all'uso del *software* ENVI Classic;
- sessione di *participatory* GIS (PGIS) nel comune di Gostinu (distretto di Giurgiu, regione della Muntenia, Romania), 4-5 Dicembre 2014 per comprendere l'approccio partecipativo alla pianificazione territoriale attraverso la fusione del *Participatory Learning* e dell'uso di tecniche GIS.
- *Decision Making Processes (DMP)* - *Decision Support Systems (DSS)* – *Spatial Decision Support System (SDSS)* - *Multi-criteria analysis (MCA)* - *Spatial multi-criteria evaluation (SMCE)*;
- valutazione della suscettibilità da frana:
  - metodo euristico: *Spatial Multi-Criteria Evaluation*;
  - metodi statistici bivariati: *Hazard Index* e *Weight of Evidence*;
  - metodo deterministico statico: *Infinite Slope model*;
- valutazione del rischio da frana:

- qualitativa
  - ✓ *Spatial Multi Criteria Evaluation* per la valutazione della vulnerabilità e del rischio;
  - ✓ matrice tra la vulnerabilità qualitativa e le classi di suscettibilità;
- quantitativa
  - ✓ calcolo del rischio annuale e stima delle perdite.

VII. manipolazione ed elaborazione dei dati in ambiente GIS allo scopo di valutare la suscettibilità, la pericolosità e il rischio da frana nelle aree di studio scelte mediante metodi qualitativi e quantitativi.

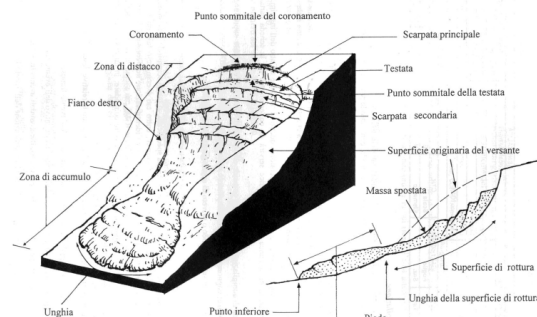
La metodologia applicata si prefigge di soddisfare al tempo stesso criteri di scientificità, applicabilità, ripetibilità e aggiornabilità. Il modello sviluppato dovrà rappresentare uno strumento di facile comprensione e applicabilità utile allo studio del rischio da frana in aree con caratteristiche simili a quelle delle aree di studio considerate.

## **CAPITOLO 2 - BACKGROUND TEORICO**

In questo capitolo sono forniti i concetti teorici e le terminologie alla base di questa ricerca. Il primo paragrafo, relativo alle frane, consente di comprenderne le tipologie, le cause e i meccanismi capaci di innescarle. I paragrafi successivi mostrano le nozioni teoriche dello studio del rischio da frana, attraverso la comprensione delle terminologie e dei metodi proposti in letteratura relativi alla realizzazione dell'inventario dei fenomeni franosi, della valutazione della pericolosità (spaziale, temporale e dimensionale) e del rischio qualitativo e quantitativo da frana.

## 2.1 Frane

La prima definizione di frana appartiene a Lyell (Cruden, 1991), che nel 1833 descrisse questo fenomeno naturale come “una porzione di terra che scivola giù come effetto di un terremoto o dell’acqua che porta via gli strati più bassi che la supportano”. Nel tempo, la definizione ha subito diversi cambiamenti grazie ai progressi scientifici e tecnologici avuti. La definizione più nota (Cruden, 1991; Amanti et al., 1996) descrive una frana come “movimento di una massa rocciosa, di detrito o di terra lungo un versante”, cioè movimento di versante che si realizza verso il basso o verso l'esterno del pendio sotto l'azione della gravità, escludendo dalla classificazione la subsidenza e gli sprofondamenti e non considerando le valanghe di neve e i crolli di ghiaccio. Oggi, secondo la definizione dell’*United States Geological Survey* (USGS, 2004), una frana descrive una estesa varietà di processi dovuti al movimento di un versante costituito da roccia, suolo, riempimento artificiale, o da una combinazione di questi. Quindi si può affermare che il termine frana sia da riferire al processo piuttosto che all’oggetto, al fine di non limitare l’utilizzo della definizione agli aspetti descrittivi, ma di ampliarlo a contesti applicativi ed interpretativi. Le figure 2.1 e 2.2 mostrano gli elementi geomorfologici di un movimento franoso:



**Figura 2.1 Nomenclatura delle parti di un movimento franoso (da Carrara et al., 1985).**



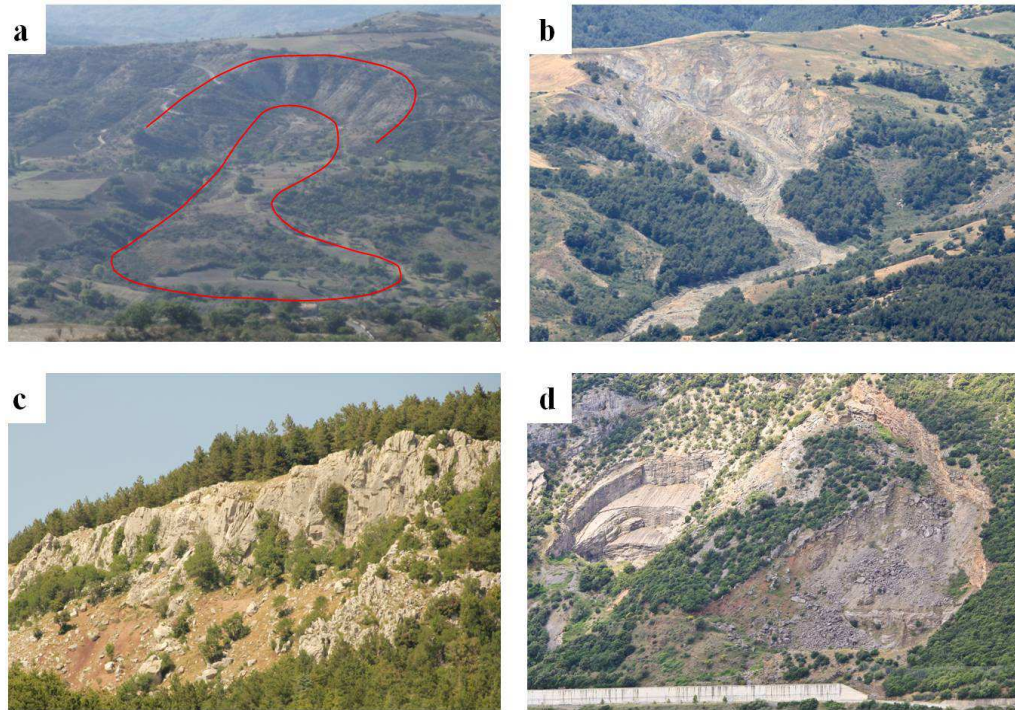
**Figura 2.2 Nomenclatura su un movimento franoso nel comune di Amendolara (CS).**

In letteratura sono presenti diversi criteri di classificazione (Varnes, 1978; Hutchinson, 1988; Cruden e Varnes, 1996; Hungr et al., 2001) ed ogni metodologia classificativa proposta è strettamente connessa all'impostazione scientifica dell'autore, all'ambiente geologico in cui prevalentemente opera, ma soprattutto alle esigenze e alle finalità per cui la classificazione si propone. La maggior parte delle suddivisioni prende in considerazione come aspetti distintivi le modalità di sviluppo della frana e i materiali coinvolti; altre sono basate sulla morfologia, sul meccanismo di frana, sulla velocità di deformazione, sulle cause del movimento, sulla geometria della zona di distacco e dei depositi, sull'età, ecc (Panizza, 2005). Per quanto riguarda la letteratura italiana, sono da ricordare le prime descrizioni di fenomeni franosi da parte di Almagià (1910), Desio (1959,1971) e Penta (1959), che ha tentato una prima classificazione sistemica, partendo da considerazioni che riguardano la preesistenza della superficie di distacco. Tra le classificazioni disponibili, quella più esauriente perché adattabile sia alla realtà geomorfologica italiana (essa è stata difatti adottata in gran parte degli studi dei fenomeni franosi) e sia agli scopi di questa tesi, è quella di Cruden & Varnes (1996), che costituisce un aggiornamento di quelle precedenti di Varnes (1958, 1978). In questa classificazione i criteri distintivi di una frana sono il tipo di movimento e il tipo di materiale coinvolto (considerato nelle sue condizioni prima del movimento franoso) (Fig. 2.3 e 2.4).

Tipologia di movimento		Tipo di materiale		
		Roccia ( <i>Rock</i> )	Detrito ( <i>Debris</i> )	Terra ( <i>Earth</i> )
Crolli ( <i>falls</i> )		Crolli di roccia	Crolli di detrito	Crolli di terra
Ribaltamenti ( <i>topples</i> )		Ribaltamenti di roccia	Ribaltamenti di detrito	Ribaltamenti di terra
Scorrimenti ( <i>slides</i> )	rotazionali ( <i>rotational</i> )	Scorrimenti rotazionali di roccia	Scorrimenti rotazionali di detrito	Scorrimenti rotazionali di terra
	traslazionali ( <i>translational</i> )	Scorrimenti traslativi di roccia	Scorrimenti traslativi di detrito	Scorrimenti traslativi di terra
Espansioni laterali ( <i>spreads</i> )		Espansioni laterali di roccia	Espansioni laterali di detrito	Espansioni laterali di terra
Colate ( <i>flows</i> )		Colate di roccia Valanghe di roccia	Soliflusso e reptazione Colate di detrito	Soliflusso e reptazione Colate di terra

**Figura 2.3** Classificazione dei movimenti franosi (da Cruden e Varnes, 1996, mod.).

Inoltre, le frane vengono descritte attraverso una serie di attributi posti in sequenza, che forniscono informazioni sullo stato di attività (Fig. 2.4), sullo stile di attività e sul tipo di distribuzione (Fig. 2.5).



**Figura 2.4 a: frana complessa quiescente (C.le Careto); b: colata attiva (T.te Ferro); c: crolli ripetuti (versante nord-ovest M.te Sellaro); d: scorrimento traslativo (Cerchiara di Calabria).**

I processi che costituiscono i movimenti di versante comprendono una serie continua di eventi, dalle “cause” agli “effetti” (Varnes, 1978). Per quanto riguarda le cause, in generale si può affermare che il movimento che si innesca è controllato da fattori geologici senso lato, topografici e climatici, in un quadro in cui l’attività antropica può costituire l’evento decisivo, quello che mette in movimento quei materiali che si trovano già in condizioni fisiche e strutturali di precarietà (Gisotti, 2012). Le cause dei movimenti di versante, a seconda dell’approccio di indagine, possono essere suddivise in interne ed esterne (Varnes, 1978) oppure in predisponenti e innescanti (Popescu, 1996):

- cause interne determinano una riduzione della resistenza al taglio del materiale (es. weathering, erosione per infiltrazione, rottura progressiva, ecc);
- cause esterne determinano un aumento delle forze di taglio sul versante (es, sovraccarichi, scalzamento al piede, esplosioni o vibrazioni, ecc.);

- cause predisponenti rendono un versante suscettibile di collasso, senza tuttavia causarne la destabilizzazione, e ponendo il versante stesso in condizioni di stabilità marginale (es. elevata fratturazione, presenza di intercalazioni argillose, incoerenza del materiale, ecc);
- cause innescanti attivano il movimento, spostando il versante da una condizione di stabilità marginale ad una di attiva instabilità (es. precipitazioni meteoriche particolari, scalzamento al piede, attività sismica, ecc).

<b>Stato di attività</b>	Attiva	Attiva s.s. ( <i>active</i> )	
		Sospesa ( <i>suspended</i> )	
		Riattivata ( <i>reactivated</i> )	
	Inattiva	Quiescente ( <i>dormant</i> )	
		Stabilizzata ( <i>stabilized</i> )	Naturalmente ( <i>abandoned</i> )
			Artificialmente ( <i>artificially stabilized</i> )
Relitta ( <i>relict</i> )			
<b>Stile di attività</b>	Complessa ( <i>complex</i> )		
	Composita ( <i>composite</i> )		
	Successiva ( <i>successive</i> )		
	Singola ( <i>single</i> )		
	Multipla ( <i>multiple</i> )		
<b>Tipo di distribuzione</b>	In avanzamento ( <i>advancing</i> )		
	Retrogressiva ( <i>retrogressing</i> )		
	In allargamento ( <i>widening</i> )		
	Multi-direzionale ( <i>enlarging</i> )		
	Confinata ( <i>confined</i> )		
	In diminuzione ( <i>diminishing</i> )		
	Costante ( <i>moving</i> )		

Figura 2.5 Stato di attività, stile di attività e tipo di distribuzione delle frane (da Cruden e Varnes, 1996).

## 2.2 Inventario delle frane

Il primo passo in un'analisi del rischio da frana è rappresentato dalla raccolta di informazioni su dove sono localizzate le frane esistenti; l'analisi infatti dipende totalmente dall'accuratezza di queste informazioni.

Il metodo tradizionale per la cartografazione delle frane è la realizzazione di una carta inventario, che riporta la localizzazione, la tipologia, lo stato di attività, e, dove possibile, la data di innesco di fenomeni franosi che hanno lasciato tracce visibili in un'area (Pašek, 1975; Hansen, 1984; McCalpin, 1984; Wiczorek, 1984; Guzzetti,



2006). Gli inventari dei movimenti franosi sono strumenti fondamentali negli studi sulle frane, ma richiedono molto tempo per la raccolta dei dati sul campo e dalle diverse fonti che possono fornire informazioni utili sugli eventi. La loro realizzazione si basa su delle precise assunzioni presenti in diversi lavori di letteratura (Radbruch-Hall e Varnes, 1976; Varnes et al., 1984; Carrara et al., 1991; Hutchinson e Chandler, 1991; Hutchinson, 1995; Dikau et al., 1996; Turner e Schuster, 1996; Guzzetti et al., 1999a) e raccolte in Guzzetti, 2006; esse sono:

a) le frane lasciano caratteri morfologici evidenti, molti dei quali possono essere riconosciuti, classificati e cartografati sia in campo sia attraverso l'osservazione stereoscopica di foto aeree o attraverso immagini satellitari. Questi caratteri morfologici si riferiscono prima di tutto a cambiamenti morfologici della superficie topografica, ma anche a cambiamenti dell'uso del suolo, della litologia, ecc.;

b) i segni morfologici di una frana (Pike, 1988) dipendono dalla tipologia (es. crollo, colata, scorriemnto, complessa, ecc.), e dalla velocità della frana (Cruden e Varnes, 1996; Dikau et al., 1996). In generale, la stessa tipologia di frana lascerà segni simili sulla superficie topografica;

c) le frane non si innescano per caso, ma sono il risultato di processi fisici che possono essere determinati empiricamente, statisticamente o in modo deterministico;

d) l'innescò delle frane segue il principio secondo il quale "il passato ed il presente sono la chiave del futuro" (Lyell, 1833). Il principio implica che le frane in futuro si verificheranno più probabilmente sotto le stesse condizioni che hanno portato a condizioni di instabilità in passato e nel presente.

L'identificazione e la cartografazione delle frane dovrebbe derivare da queste assunzioni. Le assunzioni hanno anche dei limiti, infatti ad esempio il principio di Lyell può non essere applicabile in aree che hanno subito notevoli cambiamenti climatici o di uso del suolo. Tuttavia, molti rilevatori non considerano queste assunzioni ed i loro limiti, ed in molti casi diventa difficile confrontare le carte inventario prodotte.

Le carte inventario possono essere redatte utilizzando diverse tecniche, applicate singolarmente o optando per l'utilizzo di più di una (Guzzetti, 2006). La scelta dipende dallo scopo della realizzazione della mappa inventario, dall'estensione dell'area di studio, dalla risoluzione e dalle caratteristiche delle immagini disponibili (es. foto aeree, immagini satellitari, ecc.), dall'esperienza dei rilevatori e dalle fonti disponibili per completare il lavoro (Guzzetti et al., 2012). Si possono utilizzare metodi convenzionali e metodi innovativi. I primi includono il rilevamento geomorfologico in campo

(Brunsden, 1985) e l'osservazione stereoscopica di foto aeree (Rib e Liang, 1978; Brunsden, 1993; Turner e Schuster, 1996). I secondi si riferiscono a tecnologie innovative di *remote sensing*, come l'analisi della morfologia della superficie attraverso lo studio di un DEM ad alta risoluzione ottenuto da sensori LiDAR (*Light Detection And Ranging*) (Kääb, 2002; McKean e Roering, 2003; Catani et al., 2005), l'interpretazione e l'analisi di immagini SAR (*Synthetic Aperture Radar*) (Czuchlewski et al., 2003; Hilley et al., 2004; Catani et al., 2005; Singhroy, 2005), di immagini multi-spettrali ad alta risoluzione (Zinck et al., 2001; Cheng et al., 2004).

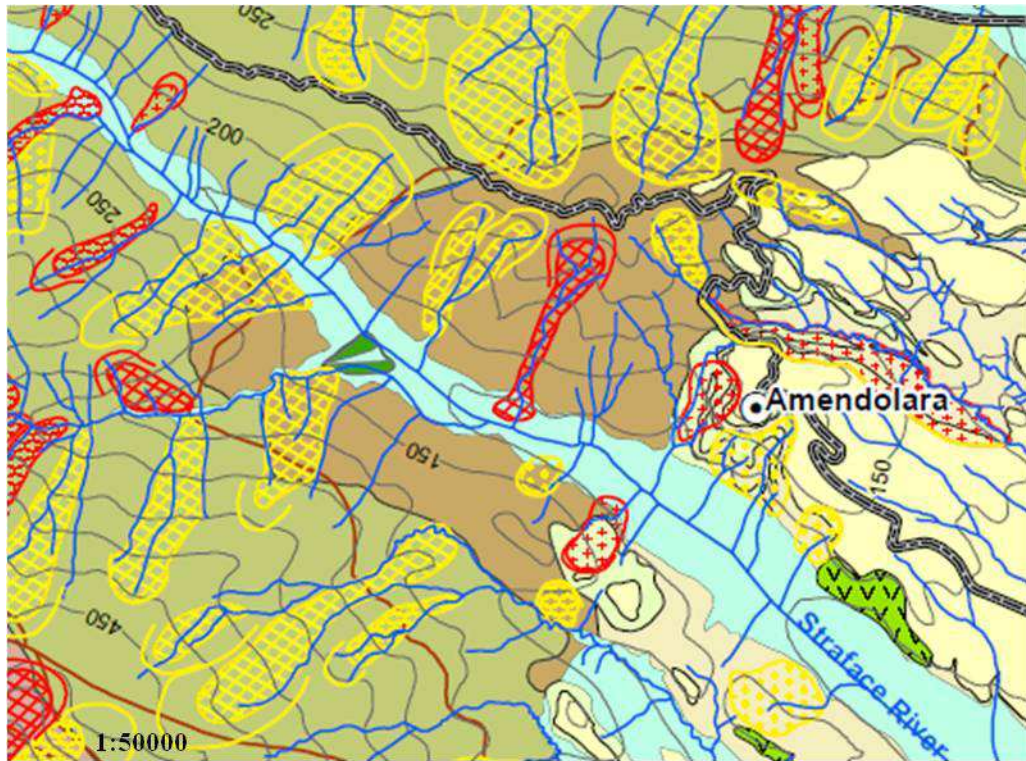
Un ulteriore metodo è l'analisi storica di archivi, cronache e giornali che permette sia la compilazione di cataloghi di frane e sia la realizzazione di mappe inventario (Reichenbach et al., 1998; Salvati et al., 2003).

Le carte inventario vengono classificate in base alla loro scala o in base al tipo di cartografazione (Guzzetti et al., 2000; Galli et al., 2008). In base alla scala esse sono classificate in:

- inventari a piccola scala ( $< 1:200000$ ), sono realizzati principalmente da dati ottenuti dalla letteratura, dalla ricerca su giornali, reports scientifici, dalla consultazione di organizzazioni pubbliche e private, e di esperti di frane;
- inventari a media scala (da  $1:25000$  a  $1:200000$ ) (Fig. 2.6), sono preparati attraverso l'interpretazione di foto aeree, controlli sul campo e raccolta di dati storici;
- inventari a grande scala ( $> 1:25000$ ), di solito sono realizzati per aeree limitate attraverso l'interpretazione di foto aeree, di immagini satellitari o DTM ad alta risoluzione e di approfondite indagini in campo.

In base al tipo di cartografazione invece si distinguono:

- inventari archivi, mostrano le informazioni sulle frane ottenute dalla letteratura o da altri archivi;
- inventari geomorfologici (Fig. 2.6), mostrano gli effetti di molti eventi franosi verificatisi in periodi di dieci, cento o migliaia di anni;
- inventari di un evento specifico, mostrano le frane che si sono attivate in seguito al verificarsi di un evento innescante, come un terremoto o un evento piovoso;
- inventari multi-temporali, mostrano frane innescate da più eventi in periodo lungo, da anni a decenni.



**Figura 2.6** Esempio di carta inventario delle frane: geomorfologica e a media scala. Dettaglio dell'area nord-orientale della Calabria, in scala 1:50000 (da Conforti et al., 2014, mod.).

### 2.3 Definizione di pericolosità

Il concetto di pericolosità è stato codificato per la prima volta da Varnes e IAEG (1984) e ha subito negli anni successivi lievi modifiche ad opera di altri autori (Einstein, 1988; Fell, 1994), fino alla definizione scientificamente accettata dell'UN-ISDR (*United Nations International Strategy for Disaster Reduction*, 2004), secondo la quale “un evento pericoloso (*hazard*) è un evento potenzialmente pericoloso, un fenomeno o un'attività antropica che potrebbe causare perdite di vite o feriti, danni alle proprietà, distruzione sociale ed economica o degradazione ambientale. Questo evento ha una certa probabilità di verificarsi in uno specifico periodo di tempo, in una data area e con una certa intensità”. La definizione contiene quattro aspetti fondamentali della pericolosità (van Westen et al., 2011):

- 1 – la pericolosità è espressa come probabilità che un evento possa verificarsi in futuro;
- 2 – la probabilità dell'evento pericoloso è ristretta ad uno specifico periodo di tempo. La probabilità annuale è la probabilità che un evento accadrà nel prossimo anno.
- 3 – è valida per un'area specifica, le caratteristiche specifiche del sito co-definiscono le condizioni di pericolosità;

4 – per causare perdite di vita o danni, l’evento deve essere di una certa intensità o magnitudo. E’ chiaro che più energia rilascia l’evento e più è potenzialmente dannoso.

Inoltre, l’evento potenzialmente pericoloso si caratterizza per i seguenti aspetti:

- i fattori innescanti: possono essere divisi in esogeni ed endogeni; i primi racchiudono tutti i processi innescanti che avvengono sulla superficie terrestre (essi sono principalmente collegati alle condizioni atmosferiche), mentre i secondi si riferiscono a fattori che agiscono al di sotto della superficie terrestre. Accanto a questi fattori innescanti naturali si pongono attività antropiche che possono concorrere all’innescamento;
- localizzazione e dimensioni dell’area colpita dall’evento;
- durata dell’evento;
- tempo di inizio: arco di tempo tra il primo segnale precursore e il picco di intensità del fenomeno;
- magnitudo/intensità: la magnitudo è legata alla quantità di energia rilasciata durante l’evento o si riferisce alle sue dimensioni, essa si indica con una scala costituita da classi riferite all’incremento (logaritmico) dell’energia; l’intensità è usata per riferirsi al danno causato dall’evento, anch’essa è normalmente indicata da una scala costituita da classi, che arbitrariamente definiscono soglie in base alla quantità di danno osservato;
- frequenza: probabilità temporale che un evento pericoloso con una data magnitudo si verifichi in una certa area in un dato periodo di tempo (anni, decenni, secoli, ecc.).
- eventi secondari causati dal verificarsi dell’evento pericoloso.

Nel caso delle fenomeni franosi queste caratteristiche sono riportate nella figura 2.7:

<b>FRANE</b>	
<b>Fattori innescanti</b>	Esogeni: piogge intense, degradazione del suolo, weathering. Endogeni: terremoti. Attività antropiche: deforestazione, uso sbagliato del suolo.
<b>Localizzazione</b>	Versanti con frane pre-esistenti e/o sotto l’effetto di piogge intense e/o con suolo alterato.
<b>Durata dell’evento</b>	Rapido: da secondi a minuti.
<b>Tempo di inizio</b>	Da secondi a mesi.
<b>Frequenza/Magnitudo</b>	Dipende dal luogo, ma essi seguono una relazione inversa: più è alta la magnitudo e più è bassa la frequenza.
<b>Eventi secondari</b>	Esse possono innescare alluvioni se il corpo arriva in un corso d’acqua, incendi nelle città.

**Figura 2.7** Aspetti caratterizzanti di un evento franoso potenzialmente pericoloso (da van Westen, 2011; mod.).

### **2.3.1 La valutazione della pericolosità da frana**

Tutte le definizioni di “pericolosità da frana” riportate in letteratura (Varnes, 1984; Einstein, 1988; Fell, 1994; Canuti e Casagli, 1996; Crescenti, 1998; Panizza, 2001) incorporano tre concetti fondamentali: il concetto di localizzazione spaziale, cioè il "dove", il concetto di intensità o magnitudo, cioè il "quanto grande" ed infine il concetto di frequenza o ricorrenza, cioè "quando" ovvero "quanto spesso" (Cardinali et al., 2002). Uno studio di pericolosità da frana per una certa area deve essere in grado di prevedere dove una frana avverrà, quanto sarà grande (e veloce) e quale sarà la sua ricorrenza temporale (tempo di ritorno).

Dunque una valutazione quantitativa completa della pericolosità da frana include:

- probabilità spaziale: probabilità che una certa area sia colpita da una frana;
- probabilità temporale: probabilità che un evento innescante causerà fenomeni franosi;
- probabilità di dimensioni/volume: probabilità che una frana abbia determinate dimensioni/volume;
- probabilità di propagazione: probabilità che una frana raggiunga una certa distanza lungo il versante.

### **2.3.2 Probabilità spaziale o suscettibilità da frana**

La suscettibilità da frana (Brabb, 1984; Guzzetti, 1999) descrive, in termini qualitativi o quantitativi, la distribuzione spaziale delle frane che insistono e/o possono verificarsi in un'area (Fell et al., 2008), senza considerare la probabilità temporale del fenomeno (Dai et al., 2002). Nel determinare la suscettibilità da frana si indica l'attitudine di un'area all'innescamento di frane in relazione alle sue caratteristiche fisiche (geologiche, morfologiche, climatiche, ecc.) o antropiche (convogliamento delle acque, uso del suolo, presenza di interventi e loro grado di manutenzione, ecc.).

La valutazione della suscettibilità da frana può essere considerato il passo iniziale verso la valutazione della pericolosità e del rischio da frana, ma può anche rappresentare il prodotto finale da utilizzare nella pianificazione territoriale e nella valutazione dell'impatto ambientale. Questo può avvenire in analisi a piccola scala o in situazioni dove le informazioni sulle frane del passato sono insufficienti (Corominas et al, 2014).

Le mappe di suscettibilità da frana contengono informazioni sul tipo di frana che potrebbe innescarsi e sulla probabilità spaziale di innescamento in termini di identificazione

delle aree di innesco più probabili (sulla base di una combinazione di condizioni geologiche, topografiche e di coperture) e di possibilità di estensione (in retrogressione e/o in avanzamento). La probabilità può essere indicata quantitativamente come densità, cioè numero per kilometro quadro, o area interessata per kilometro quadro (Corominas et al, 2014).

Secondo la *Joint Technical Committee – 1 (JTI – 1)* (Fell et al., 2008) la zonazione della suscettibilità da frana dovrebbe essere fatta sulla base delle frane verificatesi in passato, escludendo le aree interessate da frane antiche, l’analisi dovrebbe essere fatta su ogni tipologia di frana presente perché ogni tipologia possiede differenti combinazioni di fattori predisponenti e dovrebbero essere considerate anche le aree che, anche se non presentano frane del passato, topograficamente indicano gli stessi fattori ambientali di aree in cui sono presenti frane.

Sintesi dei metodi utilizzati per la valutazione della suscettibilità da frana (Fig. 2.8 e 2.9) possono essere trovate in Soeters e Van Westen (1996), Carrara et al. (1999), Guzzetti et al. (1999), Aleotti e Chowdhury (1999), Dai et al. (2002), Chacón et al. (2006), e Fell et al. (2008).

<p><b>Metodi basati sull’inventario delle frane</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Carte inventario delle frane e carte inventario delle frane innescate in un evento</li> <li>- Carte di densità delle frane</li> <li>- Carte dell’attività delle frane</li> </ul> <p><b>Metodi basati sulla conoscenza/euristici</b></p> <p>Cartografazione diretta</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mappe di pericolosità geomorfologiche</li> </ul> <p>Cartografazione indiretta</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Logica booleana</li> <li>- Logica fuzzy</li> <li>- Sovrapposizione di multi-classi</li> <li>- Valutazione spaziale multi-criteriale</li> </ul>	<p><b>Metodi data-driven</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Statistica bivariata</li> <li>- <i>Weights of evidence</i></li> <li>- <i>Information value</i></li> <li>- <i>Frequency ratio</i>, ecc.</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Statistica multi-variata</li> <li>- Regressione logistica</li> <li>- Analisi discriminante</li> <li>- <i>Cluster analysis</i>, ecc.</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reti neurali artificiali</li> </ul>	<p><b>Metodi fisici</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Metodi statici</li> <li>- Basati sul pendio indefinito</li> <li>- Basati sul profilo</li> <li>- Modelli 3D</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Metodi dinamici</li> <li>- Analisi pioggia/versante</li> <li>- Accelerazione sismica</li> </ul>
<p><b>Metodi qualitativi</b></p>	<p><b>Metodi quantitativi</b></p>	

**Figura 2.8 Metodi per la valutazione della suscettibilità da frana (da Corominas et al., 2014; mod.).**

Il primo livello di suddivisione dei metodi utilizzabili nell’analisi della suscettibilità da frana è quello tra approcci qualitativi e approcci quantitativi (Soeters e Van Westen, 1996; Aleotti e Chowdhury, 1999).

I metodi basati sulle carte inventario delle frane (Reid e Page, 2003; Crozier, 2005; Jaiswal e van Westen, 2009) rappresentano la fase iniziale di tutti gli altri metodi, in quanto forniscono l'elemento essenziale per l'analisi, ossia le frane, e sono usati per validare le mappe di suscettibilità ottenute.

I metodi euristici (Hearn, 1995; Gupta e Anbalagan, 1997; Polloni et al., 1998) si basano su un ragionamento per analogia, cioè sull'area di studio si fanno delle considerazioni che scaturiscono dall'esame di aree geograficamente distinte, ma analoghe per assetto geologico, geomorfologico e climatico. Questo aspetto costituisce simultaneamente il maggior pregio e il principale limite di queste tecniche: da una parte è infatti possibile eseguire un'analisi accurata prendendo in considerazione un gran numero di fattori, dall'altra l'applicazione di una "filosofia" di fondo non esplicitamente dichiarata ne rende difficile la ripetibilità e il controllo (Aleotti e Polloni, 2005).

Per valutare la suscettibilità da frana utilizzando il metodo euristico ci sono due approcci: diretto e indiretto. Nel primo caso si effettua una valutazione diretta per interpretare la suscettibilità sul campo sulla base di mappe dettagliate (per esempio mappe geomorfologiche). Nell'approccio indiretto, invece, non si effettua una valutazione sul campo, ma attraverso tecniche di integrazione di dati in un qualsiasi software. Le tecniche che utilizzano la sovrapposizione meccanica di carte tematiche indicizzate, pur rientrando tra gli approcci qualitativi, rappresentano l'anello di congiunzione con le tecniche di tipo quantitativo (Amadesi e Vianello, 1978; Stevenson, 1977). Rimane la soggettività nell'attribuire i pesi alle varie classi dei fattori predisponenti, ma il risultato finale è di tipo numerico, quindi ricostruibile e ben definito in ogni sua componente, cioè standardizzabile (Aleotti e Polloni, 2005).

Negli approcci quantitativi infatti l'analisi statistica dei fattori predisponenti consente di superare l'ostacolo connesso all'attribuzione "personale" dei pesi. Quindi tale gruppo di analisi risulta notevolmente più oggettivo anche se ciò non riflette, necessariamente, maggiore precisione.

Nei metodi *data-driven* (Yin e Yan, 1988; van Westen, 1993; Kanungo et al., 2006; Armaş, 2012) le combinazioni di fattori che hanno innescato frane in passato sono valutati statisticamente, e si effettua una predizione in aree attualmente non interessate da frane con caratteristiche geologiche, topografiche e di copertura simili. Il risultato di questa analisi può essere espresso come probabilità. Questi metodi sono chiamati "*data-driven*" poiché i dati sull'insacco di frane nel passato sono usati per ottenere informazioni sulla relativa importanza delle mappe e delle classi dei fattori

predisponenti. Comunemente sono utilizzati tre approcci: bivariato, multi-variato e analisi statistica “*active learning*”. Nei metodi statistici bivariati ogni mappa dei fattori predisponenti è combinata con la mappa delle frane, e i valori dei pesi, basati sulle densità di frana, sono calcolati per ogni classe dei fattori predisponenti. Attraverso questa analisi si può determinare quali fattori o combinazione di fattori influisce nell’innescò delle frane; inoltre, essa non considera l’interdipendenza delle variabili. I metodi statistici multi-variati valutano la relazione tra la variabile dipendente (innescò di frane) e una serie di variabili indipendenti (fattori predisponenti). In questa analisi, tutti i fattori sono presentati come *grid* o come unità morfometriche di versante, così per ogni unità è determinata la presenza o l’assenza di frane. La matrice che ne risulta è poi analizzata utilizzando la regressione multipla, la regressione logistica, l’analisi discriminante o *l’active learning*. I risultati possono essere espressi in termini di probabilità. Queste tecniche sono divenute standard nella valutazione della suscettibilità da frana a scala regionale (Corominas et al., 2014).

I metodi fisici (Pack et al., 1998; Simoni et al., 2008; Wang e Lin, 2010; Formetta et al., 2014) si basano sulla modellazione dei processi che producono l’innescò di una frana e sono applicabili solo su aree vaste dove le condizioni geologiche e geomorfologiche sono omogenee e le tipologie di frane sono semplici. La maggior parte dei modelli applicati a scala locale usano il modello del pendio infinito e sono quindi applicabili solo per l’analisi delle frane superficiali (meno di pochi metri di profondità). I modelli dinamici consentono di fare previsioni temporali applicando regole di causa-effetto per simulare cambiamenti del paesaggio nel tempo e sono applicabili ad aree con inventari delle frane anche incompleti. I parametri usati in tali modelli sono spesso misurabili e sono considerati variabili che hanno un unico valore in un dato punto nel tempo e nello spazio. I risultati di tali modelli hanno una maggiore capacità predittiva e sono i più adatti a valutare quantitativamente le influenze dei singoli parametri nell’innescò di frane superficiali. Tuttavia, la parametrizzazione di questi modelli può essere complicata per le difficoltà ad ottenere i parametri critici come le profondità del suolo o i cambiamenti dei parametri idrologici nel tempo. Il vantaggio di questi modelli è che essi si basano su modelli di stabilità del pendio e ciò permette il calcolo quantitativo dei valori di stabilità (fattore di sicurezza o probabilità di innescò). Lo svantaggio di questi metodi è il grado di semplificazione utilizzato e la necessità di una grande quantità di dati di input.



Metodo	Vantaggi	Svantaggi	Scala		
			P	M	D
<b>Analisi geomorfologiche di campagna</b>	Valutazione rapida Tengono conto di molti parametri	Soggettività Uso di regole implicite poco verificabili	R	S	S
<b>Mappe pesate</b>	Risolvono il problema delle regole implicite Automazione dei vari stadi e ripetibilità	Soggettività nella scelta dei pesi	R	S	S
<b>Analisi statistiche</b>	Oggettive Totale automazione dei vari step	Lunghezza della fase di preparazione	S	S	R
<b>Metodi deterministici</b>	Oggettivi Quantitativi Incoraggiano la raccolta di dati geotecnici	Conoscenza approfondita del dominio applicazione	S/R	S	S
<b>Reti neurali</b>	Oggettive Non richiedono una conoscenza profonda dell'area di studio	Difficoltà nella verifica dei risultati ottenuti	R	S	S

Figura 2.9 Schema delle metodologie per la valutazione della suscettibilità da frana: vantaggi e svantaggi, scala di applicabilità (P= piccola; M= media; D= dettaglio; R= ridotta; S= soddisfacente) (da Aleotti e Polloni, 2005; mod.).

### 2.3.2.1 Fattori predisponenti

La distribuzione spaziale dei fattori predisponenti la franosità e la loro parametrizzazione sono alla base della valutazione e distribuzione spaziale della suscettibilità da frana. La suscettibilità da frana quindi deriva dalla somma e dalle relazioni che intercorrono tra i vari fattori predisponenti che controllano la stabilità dei versanti. La scelta dei fattori predisponenti è considerata uno dei passi più importanti nello studio della suscettibilità da frana (Guzzetti et al., 2000; Ercanoglu e Gokceoglu, 2004), in quanto l'affidabilità e la precisione dei dati raccolti influisce sul successo del metodo applicato. Inoltre, quando si applica un metodo di valutazione della suscettibilità è molto importante definire quali fattori controllano i diversi livelli di suscettibilità, infatti un fattore predisponente può influire maggiormente sull'innescio di frane in un'area ed essere poco significativo in un'altra area (Ercanoglu e Gokceoglu, 2004). Questo spiega perché, per la costruzione della carta della suscettibilità da frana, possono essere utilizzati differenti fattori in base alle diverse caratteristiche geo-ambientali dell'area di studio ma anche a seconda delle tipologie di frana.

Di seguito sono descritti i fattori predisponenti utilizzati in questa ricerca, scelti tenendo presenti i principali lavori a livello internazionale (Van Westen, 1997; Aleotti e Chowdhury, 1999; Rautela e Lakhera, 2000; Cevik e Topal, 2003; Suzen e Doyuran, 2004; Saha et al., 2005; Guzzetti, 2006; Lee, 2005; Ermini et al., 2005; Yalcin, 2007).

### Litologia

La litologia è uno dei parametri fondamentali tra i fattori predisponenti la franosità, in quanto la natura del materiale e la sua struttura influenzano notevolmente il suo comportamento in relazione agli sforzi applicati dalla gravità lungo i versanti. Quindi, sulla stabilità di un pendio, sono condizionanti, prima di tutto, le caratteristiche geomeccaniche, come permeabilità e resistenza al taglio delle rocce e dei terreni sui quali i fenomeni gravitativi si innescano.

Nella realizzazione della carta litologica si individuano settori litologicamente omogenei in funzione del loro comportamento geomeccanico, prendendo in considerazione, non solo la natura litologica dei terreni affioranti, ma anche tutta una serie di caratteristiche fisico-chimiche che vanno dal grado di alterazione (*weathering*), dalla compattezza o grado di cementazione alla porosità, dall'angolo di attrito interno alla coesione, alla presenza di strutture sedimentarie e tettoniche; in tal senso le litologie con analoghe caratteristiche geomeccaniche vengono accorpate pur avendo età differenti. La carta litologica viene realizzata percorrendo quattro fasi: ricerca bibliografica (esame della cartografia e della documentazione esistente, dando preferenza ai lavori di maggior dettaglio, es. a scala 1:25000 e 1:10000), foto-interpretazione, rilievo in campo e definizione dei domini litologicamente omogenei.

### Strutture tettoniche

Le relazioni tra frane e strutture tettoniche sono state ampiamente studiate (Sorriso-Valvo e Tansi, 1996; Parise et al., 1997; Gupta, 2005) e, pertanto, può essere considerato uno dei principali fattori che predispongono un versante a franare sia per la forte energia del rilievo, che in molti casi creano, sia per lo stato di fratturazione e successiva alterazione che producono sulle rocce coinvolte, che ne condizionano le caratteristiche meccaniche. Infatti, le fasce di fratturazione d'origine tettonica, spesso, rappresentano la sede preferenziale d'infiltrazione delle acque meteoriche in profondità che, favorendo i processi d'alterazione, predispongono i litotipi al dissesto per diminuzione della resistenza al taglio degli stessi.

I principali lineamenti tettonici di un'area (sovrascorrimenti, faglie dirette, inverse e trascorrenti) vengono ricavati dalla cartografia geologica esistente ed integrati dal lavoro sul terreno e dall'analisi di foto aeree e immagini satellitari. Successivamente, creato un *geodatabase* in ambiente GIS, per valutare l'influenza della tettonica sulla distribuzione dei movimenti in massa all'interno di un'area, vengono creati dei

*buffering* (zone di rispetto) per ogni faglia, con distanze crescenti rispetto ad ogni struttura tettonica, ed all'interno di ogni zona di rispetto viene valutata l'area interessata da frana e di conseguenza il peso delle faglie nel predisporre un versante a franare (Conforti et al., 2011; Conforti et al., 2012).

### Uso e copertura del suolo

L'uso del suolo e la copertura vegetale hanno una notevole influenza sulla stabilità di un versante, contrastando l'azione disgregatrice degli agenti atmosferici di tipo meccanico ed idrologico. In generale la presenza di una folta copertura arborea è favorevole alla sua stabilità perché attenua l'azione erosiva delle acque dilavanti sul suolo, se si considerano frane la cui superficie di scivolamento non è più profonda degli apparati radicali; può, invece, causare instabilità se la superficie di scorrimento è più profonda rispetto alle radici degli alberi (Anbalagan, 1992; Pachauri e Pant, 1992; Nagarajan et al., 2000). Infatti, se l'infiltrazione d'acqua è talmente elevata tanto da causare un cospicuo aumento dei livelli di falda, si ha l'incremento delle pressioni neutre e una diminuzione delle resistenze al taglio, dunque si verifica un'instabilità di un versante. Soprattutto in zone ad elevate pendenze, se le radici degli alberi non si ancorano al substrato, il loro peso aumenta le forze che sollecitano il dissesto. Un terreno denudato e/o con scarsa vegetazione, al contrario, è più soggetto alla degradazione e all'erosione da parte degli agenti atmosferici e pertanto più suscettibile all'insacco di frane.

I diversi tipi di utilizzo del suolo comportano un diverso grado di impedimento nei confronti dell'erosione e/o degradazione dei suoli e sui fenomeni di instabilità geomorfologica in genere. In particolare l'efficacia della vegetazione nella protezione idrogeologica dipende dalla composizione, dalla struttura, dalla densità e dalle forme di gestione e diminuisce significativamente quando intervenga una degradazione del bosco per cause naturali, di cattiva gestione o indotta dagli incendi. Il passaggio del fuoco, oltre ai danni alla vegetazione con riduzione della funzione protettiva, determina fenomeni di alterazione chimico-fisica del suolo, diminuzione della capacità di infiltrazione, riduzione dei tempi di corrivazione e processi di erosione idrica accelerata. Le aree acclivi percorse da incendio presentano un'elevata propensione al dissesto, che si manifesta con insacco di frane superficiali soprattutto in concomitanza di precipitazioni particolarmente intense.

### Pendenza

L'acclività è un fattore di primaria importanza nella dinamica dei processi che regolano l'evoluzione dei versanti; infatti essa condiziona il deflusso superficiale, la densità di drenaggio, l'erosione del suolo, ecc. (Dramis e Gentili, 1977). Per questa ragione la pendenza dei versanti gioca un ruolo determinante nella preparazione della carta della suscettibilità da frana (Anbalagan 1992; Pachauri et al., 1998; Clerici et al., 2002; Lee e Min, 2001; Saha et al., 2002; Cevik e Topal 2003; Lee, 2005; Yalcin, 2007). In linea di massima, i valori delle pendenze di una certa area, si possono relazionare ai diversi litotipi. Infatti, valori bassi di pendenze possono suggerire litologie abbastanza erodibili, mentre valori alti, implicano litologie poco erodibili. Inoltre, la pendenza condiziona, a parità di altri fattori geologici - strutturali, il ruscellamento e/o l'infiltrazione delle acque. Pendenze dolci facilitano l'infiltrazione delle acque e quindi contribuiscono ad un aumento delle pressioni neutre e diminuzioni della resistenza al taglio dei versanti, con la possibilità di innescare di frane. Mentre, alti valori di pendenza, implicano un maggior ruscellamento delle acque meteoriche, dunque contribuiscono all'erosione. Attraverso l'analisi morfologica del modello digitale di elevazione è possibile effettuare una parametrizzazione della superficie, il cui scopo è la descrizione numerica della forma continua della superficie stessa (Wood, 1996). In formato *raster*, se si considera un piano tangente al modello digitale in ogni suo punto, è possibile individuare un vettore composto da un gradiente nella direzione di massima pendenza (*slope gradient*) e da un azimut o esposizione nella direzione in cui si ha il gradiente massimo (*slope aspect*) (Evans, 1980). Considerando la pendenza come *slope gradient*, essa rappresenta pertanto il gradiente del piano tangente alla superficie nel punto desiderato nella direzione di massima pendenza, mentre dal punto di vista analitico equivale alla derivata prima della funzione che esprime la variazione di quota lungo la stessa direzione. Questa derivata è generalmente ottenuta per ogni cella in base al valore di esse e all'interno di una finestra di nove elementi, che viene fatta scorrere sul modello digitale.

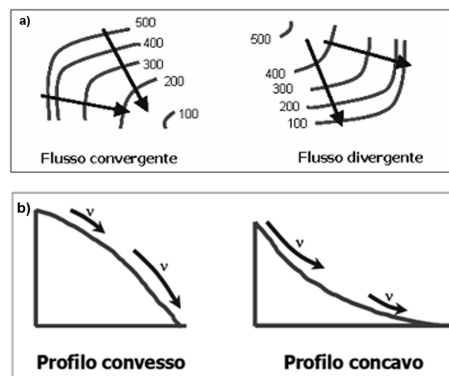
### Esposizione dei versanti

L'esposizione dei versanti è considerata un fattore morfometrico molto importante per il controllo dei processi di erosione e dell'innescare di frane. Essa indica la direzione verso cui è esposto ciascun versante, rispetto al nord geografico.

L'esposizione dei versanti, influenzando il microclima attraverso l'angolo e la durata di incidenza dei raggi solari sulla superficie di un versante, può determinare condizioni chimiche e/o meccaniche particolari, favorendo l'alterazione delle rocce e la formazione di coperture e suoli e, pertanto, predisporre a fenomeni di instabilità i versanti. Ad esempio, nelle aree dove affiorano sedimenti argillosi i versanti esposti a sud risentono dell'alternanza stagionale dei periodi secchi ed umidi che svolgono un'azione combinata di degradazione e, in molti casi favoriscono i processi di erosione idrica; questo avviene perché un ipotetico versante esposto a sud e/o sud-est, è soggetto a più radiazione solare rispetto ad uno esposto a nord, dove prevale invece la zona d'ombra e l'umidità, che possono favorire l'innescò di frane. La carta dell'esposizione dei versanti viene estrapolata dal DTM.

### Curvatura dei versanti

La curvatura rappresenta la variazione della pendenza nello spazio e si esprime come gradiente della pendenza. Questo parametro è importante per determinare la divergenza o la convergenza del deflusso idrico. Si distinguono la curvatura planare e la curvatura di profilo. La curvatura planare dei versanti è data dalla derivata seconda della curva generata dall'intersezione della superficie topografica con il piano verticale tangente alle curve di livello (Fig. 2.10); essa esprime la curvatura convessa o concava dei versanti con valori, rispettivamente, positivi e negativi. Per valori intorno allo zero la curvatura del versante si considera piana (Wilson e Gallant, 2000). L'analisi della curvatura planare permette di identificare e caratterizzare le aree di flusso: le curve di livello che in pianta si presentano convesse indicano un flusso convergente, mentre la presenza di isoipse concave allude ad un flusso di tipo divergente.



**Figura 2.10 a) Curvatura planare: divergenza e convergenza del flusso in base alla disposizione delle isoipse; b) Curvatura di profilo (da Linee Guida Progetto PON 01\_01503).**

L'analisi della curvatura di profilo indica se un qualsiasi punto lungo il profilo appartiene ad un'area concava o convessa: la curvatura di profilo è convessa quando in pianta le curve di livello si avvicinano, ed è concava quando le curve di livello si allontanano, oppure, in sezione longitudinale, convessa se la pendenza aumenta verso valle è concava nel caso opposto.

Valori positivi di curvatura esprimono una convessità del versante, mentre valori negativi implicano una concavità; valori prossimi allo zero indicano la presenza di un flesso, cioè di una superficie né concava né convessa.

Nello studio della stabilità dei versanti non è importante il valore assoluto della curvatura, ma la sua variazione nello spazio. Ad esempio, negli scivolamenti rotazionali la curvatura di profilo è prima convessa lungo il coronamento, poi concava nella zona di distacco, per tornare di nuovo convessa nella zona di accumulo; negli scivolamenti traslativi, si ha la transizione da una superficie convessa lungo il coronamento ad una superficie planare di scivolamento. Nel caso dei crolli si passa da una curvatura convessa ad una curvatura concava, lungo la parete di distacco, quindi ad una superficie planare in corrispondenza dell'accumulo al piede della scarpata.

#### Distanza dai corsi d'acqua

Le linee di deflusso idrico superficiale possono avere un importante controllo sia sulla stabilità di un versante che sul grado di saturazione del terreno lungo il pendio (Saha et al., 2002; Cevik e Topal, 2003; Yalcin, 2008). In corrispondenza degli impluvi si manifestano processi di erosione, trasporto di acqua e/o detrito e sedimentazione in funzione della velocità della corrente idrica, che a sua volta è incrementata soprattutto dalla pendenza. Generalmente ad un aumento della velocità del flusso idrico, corrisponde un incremento del potere erosivo dello stesso flusso, proprio per questo molti eventi franosi avvengono in prossimità dei corsi d'acqua, in quanto essi possono comportare fenomeni di scalzamento al piede dei versanti e/o di corpi di frana relitti o incrementare la presenza di acqua nel terreno, causando situazioni destabilizzanti che innescano movimenti franosi.

Per valutare l'influenza del reticolo idrografico sulla distribuzione dei movimenti in massa vengono digitalizzate in ambiente GIS, in forma vettoriale, tutte le aste fluviali riportate sia sulle carte topografiche che riconosciute da foto aeree; per ogni asta fluviale, vengono creati dei *buffering* (zone di rispetto), con distanze crescenti a partire dai corsi d'acqua, ed all'interno di ogni zona di rispetto viene valutata l'area in frana.

### Distanza dalle strade

La distanza dalle strade è considerato uno dei più important fattori antropici che influenzano l'innescò di frane perché i tagli stradali sono di solito siti che inducono instabilità. L'escavazione di parti di versante, l'applicazione di carichi e la rimozione della vegetazione sono alcune delle più comuni azioni che avvengono durante la costruzione di una strada e possono essere responsabili dell'innescò di frane.

Una strada costruita su un versante causa un decremento del carico sia sulla topografia che al piede del versante, e di conseguenza causa delle tensioni nella parte superiore del versante che possono creare fratture. Queste provocano un elevato assorbimento dell'acqua da parte del suolo e la saturazione che può crearsi in queste condizioni può innescare frane. Sebbene un versante viene bilanciato prima della costruzione di una strada, delle instabilità possono verificarsi a causa degli effetti negativi dello scavo o dell'ingresso di acqua. Una strada costruita su un versante causa cambiamenti topografici sotto un carico statico. Una strada può rappresentare una barriera o una via preferenziale per il flusso dell'acqua, in base alla sua localizzazione in un'area, e di solito questo può influire sul verificarsi di frane.

Per determinare l'effetto delle strade sulla stabilità dei versanti, per ogni asta strada, vengono creati dei *buffering* (zone di rispetto), con distanze crescenti.

### Stream Power Index (SPI)

Il fattore SPI indica il potere erosivo del flusso idrico in ogni cella del *grid*, ed è definito utilizzando l'espressione proposta da Moore et al., (1991):

$$SPI = A_s \times \tan \sigma$$

dove  $A_s$  (area specifica contribuente) è pari all'area della porzione di versante drenata e  $\sigma$  rappresenta la pendenza espressa in gradi. Il parametro SPI, in generale, risulta fortemente correlato con le linee di imprevio dove raggiunge i valore più elevati.

### Topographic wetness index (TWI)

Il parametro TWI indica la capacità di infiltrazione delle acque di ruscellamento di un'area in base alle differenti condizioni topografiche (Moore et al., 1991); indica la quantità d'acqua che può infiltrarsi, differenziando dunque le celle nelle quali è suddiviso il versante, in funzione del grado di umidità o saturazione potenziale. La presenza di acqua influenza direttamente la stabilità dei versanti, poiché da una parte ne aumenta il peso di volume, e dall'altra, decresce significativamente le resistenze di

terreni a comportamento pseudo-coerente. TWI è utilizzato in soprattutto per le analisi riguardo la suscettibilità da frane superficiali (Gokceoglu et al., 2005; Yilmaz, 2009).

Esso è definito dalla seguente espressione:

$$TWI = \ln (As/\tan\sigma)$$

dove As (area specifica contribuente) è pari all'area della porzione di versante drenata e  $\sigma$  rappresenta la pendenza espressa in gradi. I due parametri appena descritti sono calcolati dal DTM, utilizzando un *software* GIS (O'Callaghan e Mark, 1984).

### Length-slope factor (LS)

Il fattore LS, definito anche come indice della capacità di trasporto (Moore et al., 1991), è un termine adimensionale relativo alle caratteristiche topografiche dell'area esaminata che tiene conto della lunghezza (L) e della pendenza del versante (S), ed è uno fra i parametri che più influenzano l'entità della perdita di suolo (Mendicino e Sole, 1998). La lunghezza del versante è la distanza orizzontale media dal punto di origine del deflusso al punto in cui la pendenza diminuisce in modo tale da consentire l'inizio dell'attività deposizionale o il punto in cui le acque vengono canalizzate (Foster e Wischmeier, 1974; Wischmeier e Smith, 1978; Renard et al., 1997). Elevati valori del fattore L comportano delle perdite di suolo più consistenti a causa di un aumento del volume del deflusso idrico lungo un versante di maggiore lunghezza. Pertanto il fattore LS si può considerare un indice della capacità di trasporto di sedimento da parte delle acque di scorrimento superficiale. Il *grid* relativo al fattore LS viene realizzato, sulla base del modello digitale del terreno (DEM), applicando la relazione sviluppata da Moore e Wilson (1992):

$$LS = (As/22.13) \cdot 1.4 \cdot (\sin\sigma/0.0896)^{1.3}$$

dove As (area specifica contribuente) è pari all'area della porzione di versante drenata e  $\sigma$  rappresenta la pendenza. Questi due parametri sono stati calcolati utilizzando l'algoritmo di direzione di deflusso di tipo "D8" in Arcview 3.2 (O'Callaghan e Mark, 1984).

### Energia del rilievo

L'analisi dell'energia del rilievo, introdotta da Partsch nel 1911 porta all'identificazione di un parametro geomorfologico definito come la differenza tra la quota massima e la quota minima in un'area specifica (Lupia Palmieri et al., 1995) e fornisce una stima numerica del grado di risposta morfologica dei processi esogeni alla creazione di rilievo



da parte dei processi endogeni. L'energia di rilievo può consentire l'individuazione di zone caratterizzate da differente azione erosiva (Ciccacci et al., 1992) e da approfondimento fluviale più o meno marcato (Lupia Palmieri et al., 1995). Questa diversa intensità di erosione può essere indicativa di sollevamenti o abbassamenti differenziali tettonici recenti o ancora in atto (Ciccacci et al., 1988).

### Tessitura del suolo

La tessitura del suolo (o granulometria, termine usato quando si parla dei valori analitici corrispondenti) si riferisce alla ripartizione dimensionale delle particelle solide che compongono il terreno e alla consistenza che assume un terreno in virtù degli elementi minerali presenti; essa influenza la circolazione dell'acqua nei suoli (Conforti et al., 2015). Il suolo è formato dallo scheletro (ciottoli e pietre), sabbia (da 2 mm a 50 micron) limo (da 2 micron a 50 micron) e argilla (particelle inferiori a 2 micron) in percentuali diverse.

Le classi di tessitura si dividono in:

1. gruppo delle classi sabbiose, in questo gruppo ci sono i suoli in cui la frazione sabbiosa è superiore al 70% del totale e l'argilla inferiore al 15%, ed essi favoriscono l'infiltrazione dell'acqua; esso comprende due specifiche classi: "sabbioso franco" e "sabbioso";
2. gruppo delle classi argillose, per essere definito "argilloso" un suolo deve contenere più del 40% di argilla; ostacolano l'infiltrazione dell'acqua e delle radici. I nomi delle tre classi sono: "argilloso", "limoso argilloso" e "sabbioso argilloso", le ultime due classi possono contenere rispettivamente più limo o sabbia che argilla, ma quest'ultima condiziona tuttavia in modo determinante le proprietà tessiturali;
3. gruppo delle classi franche, è il gruppo che contiene il maggior numero di suddivisioni. Idealmente un suolo franco è dato dalla mescolanza, equilibrata, di sabbia, limo e argilla. C'è una classe tessiturale denominata "franca", che sta in una posizione intermedia fra le tre componenti granulometriche sabbia, limo ed argilla. Tuttavia una debole prevalenza di una delle tre frazioni richiede l'uso di aggettivi che meglio completano e definiscono la classificazione tessiturale. Così, un suolo franco dove domina la sabbia viene chiamato "franco sabbioso"; allo stesso modo possiamo avere un suolo "franco limoso", "franco limoso argilloso", "franco sabbioso argilloso", "franco argilloso". Anche la classe "limosa", dominata dal limo, viene convenzionalmente inserita fra il gruppo delle classi franche.

### 2.3.3 Probabilità temporale

La previsione temporale degli eventi franosi consiste nella loro probabilità di accadimento e fornisce una pericolosità assoluta, intesa secondo l'accezione rigorosa del termine. Per effettuare questo tipo di previsione è necessario riferire la probabilità  $P$  a un dato lasso di temporale che solitamente viene posto in un anno.

La probabilità di occorrenza può essere espressa in termini di frequenza, di periodo di ritorno o di *exceedance probability*. La frequenza rappresenta il numero di eventi in un certo intervallo di tempo (es. frequenza annuale), e può essere valutata attraverso dati empirici. Il periodo di ritorno (in anni) è l'inverso della probabilità annuale, e si riferisce all'intervallo medio di tempo nel quale un evento di una certa magnitudo può verificarsi. La *exceedance probability* può essere considerata la probabilità che uno o più eventi si verificheranno in un certo periodo, senza considerare la magnitudo degli eventi (Croveli, 2000). Se, invece, si considera la magnitudo degli eventi la *exceedance probability* può essere considerata come la probabilità che un evento con una magnitudo uguale o più grande di un certo valore si verificherà in un certo periodo. E' preferibile usare la *exceedance probability* come misura dell'occorrenza temporale delle frane nell'analisi quantitativa della pericolosità, e può essere derivata dalla frequenza (o periodo di ritorno) usando un appropriato modello probabilistico, come quello binomiale o di Poisson (Croveli, 2000) o una distribuzione *power-law* (Dussauge-Peisser et al., 2002).

La frequenza può essere data in termini assoluti, relativi o in modo indiretto (Corominas e Moya, 2008). La frequenza assoluta esprime il numero di eventi osservati in una unità territoriale (es. versante, bacino, ecc.). Essa può riferirsi sia all'attivazione di primi movimenti, sia alla riattivazione di frane quiescenti e sia all'accelerazione di frane attive. La frequenza relativa è una frequenza normalizzata. Di solito è espressa come rapporto del numero di eventi di frana osservati diviso l'unità di area o lunghezza (es. frane/km<sup>2</sup>/anno). La frequenza relativa delle frane è appropriata quando si lavora in aree vaste e/o a piccole scale, e in particolare quando si trattano eventi ripetuti regionali. Infine, la frequenza può essere descritta dalle conseguenze di un evento come misura indiretta del loro verificarsi. Ad esempio, l'arretramento medio di una parete può essere usato per misurare l'attività delle frane in aree costiere (Lee et al., 2000).

Gli approcci seguiti per valutare la probabilità di occorrenza delle frane sono i seguenti (Corominas et al., 2014):

- metodi euristici, basati sulle conoscenze di esperti, le cui opinioni possono essere quantificate assegnando delle probabilità. Uno dei modi per effettuare una valutazione euristica è attraverso l'*event trees*, che è una rappresentazione grafica di tutti gli eventi che possono verificarsi in un sistema. Utilizzando un modello logico, le probabilità dei possibili risultati che seguono l'inizio di un evento possono essere identificati e quantificati;

- metodi razionali (approccio geomeccanico), in cui la probabilità di innesco di una frana può essere determinata attraverso l'analisi di stabilità e/o la modellazione numerica. Con questo approccio l'innesco di una frana dipende dallo spazio, dal tempo e dalle condizioni del suolo; questo permette il calcolo del fattore di sicurezza, o probabilità di innesco. Questa è considerata come la probabilità che il fattore di sicurezza sia meno dell'unità;

- probabilità empirica, che può essere stimata dall'osservazione della frequenza degli eventi di frana del passato (Brabb, 1984). Questo approccio è implementato in modo simile alle analisi idrologiche, e permette di ottenere la probabilità annuale di occorrenza. In questo caso, si assume che le frane sono eventi ricorrenti che si verificano in modo random e indipendente. L'analisi degli eventi di frana del passato può essere effettuata direttamente sulle frane identificate o indirettamente analizzando la ricorrenza dei fattori di innesco.

L'analisi delle serie temporali degli eventi è basata sull'analisi storica degli eventi pregressi finalizzata alla ricostruzione della ricorrenza dei movimenti di una frana (riattivazione di frane lente a cinematisimo intermittente) o, nel caso di crolli e colate rapide, alla determinazione della frequenza con cui si sono attivati nel passato. L'assunto di base è che la distribuzione nel tempo dei processi non sia casuale. Questa metodologia è utilizzata per fenomeni come le piene fluviali e i terremoti per i quali si dispone di serie storiche più documentate, mentre nel caso delle frane si applica più difficilmente perché esse hanno una frequenza minore e una volta avvenute raggiungono una stabilizzazione naturale (Polloni e Aleotti, 2005).

L'analisi delle serie temporali dei fattori di innesco è la più utilizzata e consiste nello studio dei fattori innescanti, per i quali si dispone di misure sistematiche nel tempo (la disponibilità di un numero sufficiente di dati di innesco di frane è essenziale). Tali fattori sono le precipitazioni e le accelerazioni sismiche. La probabilità temporale deriva dalla relazione tra il fattore di innesco e l'occorrenza della frana nel passato. Nel caso delle piogge questo viene fatto sulla base delle precipitazioni antecedenti, della durata

delle piogge, dell'intensità delle piogge o delle piogge cumulate che definiscono dei valori di soglia minima e massima necessari ad innescare una frana e sulla base di queste soglie si calcola il periodo di ritorno delle frane. In generale, una "soglia" è definita come il livello minimo o massimo di una quantità necessaria affinché un processo avvenga o uno stato cambi (White et al., 1996). La soglia minima definisce il livello più basso sotto il quale il processo non avviene, mentre la soglia massima rappresenta il livello al di sopra del quale il processo avviene sempre (Crozier, 1996).

#### **2.3.4 Probabilità di dimensioni (magnitudo o intensità)**

La magnitudo di una frana è la componente più importante nella valutazione del rischio in quanto influenza il danno di ogni elemento a rischio provocato da una frana in un dato tempo.

La probabilità di dimensioni è la probabilità che una frana avrà delle precise dimensioni minime. Queste si determinano plottando in un grafico la magnitudo e la frequenza, che esprime la probabilità di occorrenza di una frana in termini di frequenza annuale attesa di eventi franosi di una data magnitudo o di superamento di una soglia di magnitudo.

La costruzione e l'interpretazione della relazione tra magnitudo e frequenza è stata discussa in molti lavori (Guzzetti et al., 2002; Brardinoni e Church, 2004; Malamud et al., 2004; Guthrie et al., 2008; Brunetti et al., 2009). Possono essere utilizzati differenti approcci, la scelta dipende dalla scala di lavoro regionale o locale. Esistono comunque dei limiti alla validità e applicabilità delle curve M-F. L'affidabilità statistica è condizionata dal fatto che *databases* storici e inventari di frane di un evento (fonte preferibile nella relazione M-F) sono raramente disponibili, e i dati possono essere incompleti nello spazio (es. dati campionati solo in aree specifiche) e nel tempo (es. dati registrati solo in particolari periodi di tempo) (Corominas et al., 2014).

Le curve M-F non dovrebbero essere desunte da inventari di frane realizzati da singoli fotogrammi aerei o immagini, o da una singola campagna di indagini. Questi tipi di inventari non riflettono le reali frequenze delle diverse magnitudo delle frane, poiché molte piccole frane possono essere non più visibili per l'erosione, e non considerano adeguatamente le riattivazioni che interessano grandi frane (Corominas e Moya, 2008).

## 2.4 Vulnerabilità

Riguardo la vulnerabilità esistono diverse definizioni date da gruppi di ricerca di differenti discipline (agenzie di gestione dei disastri, cooperazioni per lo sviluppo, organizzazioni sui cambiamenti climatici, ecc.). Una sintesi soddisfacente si può trovare sul sito del “Provention Consortium” e nel libro sulla vulnerabilità di Birkmann (2006).

La definizione di Varnes e IAEG, 1984; Fell, 1994 e Wong, 1997 ne considera solo la sfera fisica definendo la vulnerabilità nel campo delle scienze naturali come il danno potenziale o il grado di perdita (espressa in una scala da 0, nessun danno, a 1, distruzione totale) per un elemento o un insieme di elementi a rischio determinato dall'occorrenza di un fenomeno naturale di una certa magnitudo. Per i beni materiali, la perdita sarà il valore del danno relativo al valore del bene in questione. Per le persone, sarà la probabilità di vittime. La vulnerabilità può anche riferirsi alla propensione alla perdita (o probabilità di perdita) e non al grado di perdita.

Le tipologie di vulnerabilità riconosciute in letteratura (van Westen et al., 2011) possono essere sintetizzate in:

- vulnerabilità fisica: si riferisce al danno diretto ad edifici e infrastrutture, è analizzata per gruppi di costruzione (es. tipi di strutture) che possono avere danni simili, è una qualità intrinseca di una struttura e non dipende dal luogo;
- vulnerabilità economica: si riferisce ai potenziali impatti di un evento pericoloso sui beni e processi economici (es. interruzione di affari, effetti secondari come incremento della povertà e perdita di lavoro);
- vulnerabilità sociale: si riferisce ai potenziali impatti di un evento pericoloso su gruppi di persone come poveri, persone che vivono sole, donne incinte, persone disabili, bambini e anziani, considera l'attenzione pubblica verso il rischio, l'abilità delle persone di far fronte alle catastrofi, e lo stato delle strutture istituzionali designate nell'affrontare le emergenze. Vista la natura complessa e dinamica della popolazione, questa vulnerabilità cambia nel tempo;
- vulnerabilità ambientale: si riferisce ai potenziali impatti di un evento pericoloso sull'ambiente.

Ci sono molti tipi di perdite che possono essere valutate. Esse possono essere sia dirette che indirette, e possono essere umane-sociali, fisiche, economiche e culturali/ambientali (van Westen, 2011). La figura 2.11 ne fornisce una sintesi.

	Umane - sociali	Fisiche	Economiche	Culturali Ambientali
<b>Perdite dirette</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vittime</li> <li>- Feriti</li> <li>- Perdite di reddito o lavoro</li> <li>- Senzatetto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Danni strutturali o collasso degli edifici</li> <li>- Danni non – strutturali e danni al contenuto</li> <li>- Danni strutturali alle infrastrutture</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interruzione degli affari dovuta ai danni agli edifici e infrastrutture</li> <li>- Perdita di forza lavoro a causa di morti, feriti e soccorsi</li> <li>- Costi dei soccorsi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sedimentazione</li> <li>- Inquinamento</li> <li>- Specie in pericolo</li> <li>- Distruzione di aree ecologiche</li> <li>- Distruzione di beni culturali</li> </ul>
<b>Perdite indirette</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Malattie</li> <li>- Disabilità permanenti</li> <li>- Impatto psicologico</li> <li>- Perdita di coesione sociale dovuta alla distruzione della comunità</li> <li>- Agitazione politica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Progressivo deterioramento degli edifici e delle infrastrutture danneggiate le quali non sono riparabili</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perdite economiche dovute alla distruzione a breve termine delle attività</li> <li>- Perdite economiche a lungo termine</li> <li>- Perdite delle assicurazioni</li> <li>- Meno investimenti</li> <li>- Costi della ricostruzione</li> <li>- Riduzione del turismo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perdita di biodiversità</li> <li>- Perdita di diversità culturale</li> </ul>

**Figura 2.11 Sintesi dei tipi di perdite (da van Westen, 2011; mod.).**

Gli indicatori dei fenomeni franosi che possono essere usati nella valutazione della vulnerabilità sono:

- spostamenti del terreno
- velocità degli spostamenti
- distanza di run-out
- forze di impatto dei crolli di roccia.

La vulnerabilità di un elemento esposto al rischio può essere quantificata attraverso gli indici di vulnerabilità, le curve di vulnerabilità, le curve di fragilità e le tabelle di vulnerabilità (van Westen, 2011).

Gli indici di vulnerabilità si basano sugli indicatori di vulnerabilità e non hanno una relazione diretta con l'intensità dell'evento pericoloso. Questi sono usati principalmente per esprimere la vulnerabilità sociale, economica e ambientale.

Le curve di vulnerabilità sono costruite sulla base della relazione tra le intensità dell'*hazard* e i dati sui danni: il danno aumenta all'aumentare dell'intensità. Questo metodo è applicato principalmente per la vulnerabilità fisica. Le curve di vulnerabilità sono anche dette funzioni di danno o curve dello stadio del danno, e possono essere divise in due tipi:

- curve relative, che mostrano la percentuale del valore del bene come la parte danneggiata del valore totale
- curve assolute, che mostrano la quantità assoluta di danno che dipende dall'intensità dell'*hazard*.

Le curve di fragilità esprimono la probabilità condizionale di raggiungere o eccedere un certo stato di danno (es. lieve, moderato, esteso, completo) dovuto ad una frana di un dato tipo e di una data intensità. Queste sono spesso usate per stimare le perdite di un terremoto, principalmente per la stima delle perdite fisiche.

Le tabelle di vulnerabilità forniscono la relazione tra l'intensità dell'hazard e il grado di danno. In questo caso la curva di vulnerabilità è divisa in un numero di classi di intensità dell'hazard e per ogni classe è fornito il corrispondente grado di danno. Anche questo è di solito fatto per la vulnerabilità in caso di terremoti quando l'intensità dell'hazard è espressa in una scala che non ha valori intermedi tra due intensità (scala dell'Intensità Mercalli Modificata).

Le metodologie usate per la quantificazione della vulnerabilità possono essere classificate secondo il tipo di dati input e la valutazione dei parametri di risposta (Corominas et al., 2014) in

- euristici (Bell e Glade, 2004; Finlay e Fell, 1996), forniscono valori discreti per un *range* di valori di intensità della frana;
- *data-driven* (Agliardi et al., 2009 a,b; Jacob et al., 2012; Uzielli et al., 2008; Papathoma-Köhle et al., 2012), la vulnerabilità è calcolata come una funzione dell'intensità della frana;
- analitici (Mavrouli e Corominas, 2010 a,b; Fotopoulou e Pitilakis, 2013 a,b), utilizzano modelli fisici e sono meno utilizzati per la loro complessità e la mancanza di dettagliati dati di input.

## **2.5 Rischio da frana**

Il rischio da frana è definito da Varnes e IAEG, 1984 (citato in van Westen et al., 2005) come “il numero atteso di vite perse, persone ferite, beni danneggiati, e attività economiche distrutte dovuto ad un particolare fenomeno dannoso in una data area e in preciso periodo”. Secondo L'UN-ISDR (2005) è “la probabilità di avere perdite”. Negli ultimi anni il maggiore campo di ricerca nella valutazione del rischio da frana si è incentrato sugli aspetti spazio-temporali delle frane e sulle variazioni della vulnerabilità degli elementi esposti al rischio.

La formula teorica considera il rischio come (van Westen, 2011):

$$R = P \times \frac{V}{C}$$

dove C = “capacità” degli individui e delle comunità di far fronte alla minaccia di un evento disastroso (ad esempio attraverso sistemi di *early warning* o piani di emergenza). Questa equazione è solo concettuale, ma permette di integrare gli aspetti multi-dimensionali della vulnerabilità e della capacità con gli indicatori della pericolosità nella valutazione spaziale multi-criteriale (SMCE). Si tratta di una valutazione del rischio qualitativa, che mostra il rischio come classi qualitative relative.

La formula che invece permette la valutazione quantitativa del rischio è rappresentata dal prodotto tra la pericolosità P, la vulnerabilità V e gli elementi esposti al rischio E (Varnes e IAEG, 1984; Fell, 1994; UN-ISDR, 2005).

$$R = P \times V \times E$$

Questa equazione può essere calcolata con dati spaziali in un GIS, con attenzione alle perdite (dirette) fisiche, della popolazione ed economiche. Il modo nel quale gli elementi a rischio sono caratterizzati (es. numero di edifici, numero di persone, valore economico) definisce il modo con il quale il rischio è presentato. La componente della pericolosità nell’equazione si riferisce alla probabilità di occorrenza di un fenomeno potenzialmente pericoloso con una certa intensità in uno specifico periodo di tempo (es. probabilità annuale). Per calcolare il rischio quantitativamente la vulnerabilità è limitata alla vulnerabilità fisica degli elementi a rischio considerati, determinata dall’intensità dell’evento pericoloso e dalle caratteristiche degli elementi a rischio. Allo scopo di calcolare il rischio specifico l’equazione può essere modificata nel seguente modo:

$$R_s = P_T \times P_s \times V \times A$$

dove:

$P_T$  è la probabilità temporale (es. annuale) di occorrenza di uno specifico scenario di pericolosità con un dato periodo di ritorno in un’area;

$P_s$  è la probabilità spaziale di occorrenza di uno specifico scenario di pericolosità con un dato periodo di ritorno in un’area con elementi a rischio;

V è la vulnerabilità fisica, data come il grado di danno di uno specifico elemento a rischio dovuto al verificarsi di uno scenario di pericolosità con una certa intensità;

A (*Amount*) è la quantificazione di uno specifico tipo di elemento a rischio; il modo in cui la quantità è espressa sarà lo stesso del rischio. Per esempio la quantità può essere data in numeri (numero di edifici, di persone, ecc.) o in termini economici.

Allo scopo di valutare queste componenti, sono necessarie informazioni spaziali su tutte le componenti dell’equazione in quanto tutte variano spazialmente, e anche temporalmente. In alcuni approcci il termine “esposizione degli elementi a rischio” è



inclusa nell'equazione del rischio. Ma usando un metodo che prevede l'uso del GIS, questa risulta essere una informazione ridondante, poiché una sovrapposizione GIS della mappa di pericolosità con gli elementi a rischio includerà automaticamente solo gli elementi esposti a rischio nell'equazione.

Lo studio del rischio (*risk assessment*) consiste nel processo di comprensione di quanto un rischio esistente è tollerabile, se le misure di mitigazione sono adeguate e, in caso negativo, se misure di mitigazione alternative sono giustificate. Lo studio del rischio incorpora la fase di analisi del rischio e la fase di valutazione del rischio.

L'analisi del rischio utilizza le informazioni disponibili per stimare il rischio sulla popolazione, sui beni o sull'ambiente dovuto ad un evento pericoloso. Generalmente è caratterizzata dai seguenti steps: identificazione dell'evento potenzialmente pericoloso, valutazione della pericolosità, inventario degli elementi a rischio ed esposizione, valutazione della vulnerabilità e stima del rischio. La valutazione del rischio è la fase nella quale valori e giudizi entrano nel processo decisionale, esplicitamente o implicitamente, includendo considerazioni sull'importanza dei rischi stimati e sulle conseguenze sociali, ambientali ed economiche, allo scopo di identificare un *range* di alternative per la gestione dei rischi.

I metodi per lo studio del rischio possono essere così classificati (van Westen, 2011):

- qualitativi, il rischio è descritto in termini di alto, moderato e basso. Questi metodi sono usati quando le informazioni sull'evento pericoloso non possono essere espresse in termini quantitativi (non permettono di esprimere la probabilità di occorrenza, o non è possibile stimare la magnitudo), e /o quando la vulnerabilità non può essere espressa quantitativamente;
- semi-quantitativi, il rischio è espresso in termini di indici di rischio. Questi sono valori numerici, spesso tra 0 e 1, ma non hanno un legame diretto con le perdite attese, ma sono solo indicatori del rischio. Anche in questo caso il rischio è espresso in senso relativo;
- quantitativi, il rischio è espresso in termini quantitativi come probabilità o perdite attese. Essi possono essere deterministici (riferiti ad un particolare scenario) o probabilistici (considerando l'effetto di tutti i possibili scenari).

### Tipi di rischio

Il rischio è il prodotto della probabilità e delle perdite attese. Le perdite attese possono essere suddivise in diversi modi. Il più importante è la suddivisione tra perdite dirette e indirette:

- rischio per perdite dirette: valutazione del rischio che include le perdite che risultano direttamente dall'impatto dell'evento pericoloso.
- rischio per perdite indirette: valutazione del rischio che include le perdite che risultano dal verificarsi di un evento, ma non dall'impatto diretto, piuttosto da una perdita di funzionalità.

In entrambe le categorie delle perdite, è possibile un'ulteriore suddivisione:

- perdite tangibili, perdita di cose che hanno un valore montario (edifici, infrastrutture, ecc.);
- perdite intangibili, perdita di cose che non possono essere comprate o vendute (vite, feriti, beni culturali, biodiversità, qualità dell'ambiente, ecc).

Un'ulteriore suddivisione delle perdite può essere:

- perdite private, perdite che interessano elementi esposti al rischio privati. Queste perdite riguardano la popolazione o compagnie, e dovrebbero essere coperte da un'assicurazione o provvedere in modo autonomo in caso di perdite;
- perdite pubbliche, perdite che interessano elementi a rischio pubblici, come il settore della scuola, istituzioni, infrastrutture, ecc.

La parte dell'equazione del rischio che riguarda la quantità degli elementi esposti può essere espressa come:

- rischio dei beni, indica il numero di edifici che potrebbero essere parzialmente/severamente/totalmente danneggiati;
- rischio economico, indica la quantità di soldi che è probabile che vada persa come conseguenza del verificarsi di un evento pericoloso;
- rischio della popolazione, indica il rischio di morte o feriti di individui (rischio individuale) o gruppi di individui (rischio collettivo).

## **CAPITOLO 3 - OVERVIEW SUGLI STUDI SUL RISCHIO DA FRANA**

In questo capitolo sono sintetizzati i principali studi sul rischio da frana in Europa, in Italia ed in Calabria. In ogni paragrafo, dopo aver citato gli eventi franosi più catastrofici della storia recente, l'attenzione è stata posta sulla descrizione delle metodologie ufficialmente applicate dalle autorità predisposte all'inviduazione, al monitoraggio e alla mitigazione del rischio da frana.

### 3.1 Studi sul rischio da frana in Europa

Le frane sono tra i fenomeni naturali più pericolosi per la popolazione e per le infrastrutture in molte parti d'Europa. L'attenzione nei confronti del rischio e della pericolosità da frana è cresciuta enormemente in Europa dopo grandi catastrofi, come quelle in Svizzera e Austria nel 2005, in Italia nel 2009 e nel 2010, o a Madeira nel 2010 (Jaedicke et al., 2014). Ma oltre gli eventi più catastrofici, numerose frane si innescano in Europa ogni anno (EEA, 2010; EM-DAT, 2003), e gli esperti conoscono le aree del continente più esposte al pericolo da frana. Tuttavia, né la localizzazione geografica di eventi franosi del passato né la conoscenza delle aree con alta pericolosità da frana necessariamente individuano le aree con il più alto rischio da frana, poiché questo implica la presenza di elementi esposti al rischio.

Per quanto riguarda la pericolosità e/o la suscettibilità da frana studi a scala globale sono stati effettuati da Nadim et al. (2006), NASA (Hong et al., 2007; Kirschbaum et al., 2009) e dalla Banca Mondiale (Dilley et al., 2005). A scala nazionale o regionale studi simili sono stati condotti per Cuba (Castellanos Abella e Van Westen, 2007), Pakistan (Peduzzi, 2010), Serbia (Marjanovic et al., 2011) e Turchia (Nefeslioglu et al., 2011). In Europa, Van Den Eeckhaut e Hervas (2012) hanno, invece, presentato una revisione dei *databases* nazionali di frane disponibili, e hanno utilizzato i dati per la valutazione della suscettibilità attraverso la regressione logistica in Van Den Eeckhaut et al., 2012. Mentre in Jaedicke et al., 2014 si è effettuato un primo passo verso l'analisi di pericolosità a scala europea per identificare gli "hotspots" della pericolosità e del rischio da frana in Europa, cioè le aree dove pericolosità e rischio sono maggiori. Alcune metodologie sulla valutazione della pericolosità sono ufficialmente applicate dalle autorità nazionali (Andorra, Austria, Francia, Regno Unito e Svizzera), regionali (Autorità di bacino in Italia e Catalogna in Spagna) o locali per la pianificazione territoriale, anche se, in alcuni casi, non sono regolamentate da leggi (Corominas et al., 2010).

Per quanto riguarda il rischio, invece, nel contesto europeo sono poche le procedure applicate ufficialmente da amministratori o istituti. Questo è dovuto alle poche informazioni riguardo la problematica della vulnerabilità (Corominas et al., 2010). Metodologie adottate dalle autorità a livello nazionale sono presenti in Francia, in Norvegia, in Svizzera e in Italia.

In Francia, ad esempio, i PPRN ("Plans de Prévention des Risques Naturels" o piani di prevenzione sul rischio), oltre le mappe di pericolosità, includono l'elaborazione di una

mappa dei beni più importanti, che permette la valutazione del rischio da frana. L'inventario dei beni consiste nell'analisi delle caratteristiche dell'uso del suolo considerando anche gli sviluppi futuri. Quest'analisi permette l'identificazione dei beni più importanti, come ospedali, scuole, acquedotti, industrie, ferrovie, strade, che possono aggravare il rischio durante eventi naturali più pericolosi. La sovrapposizione della mappa di pericolosità con la mappa dei beni permette di identificare qualitativamente le principali aree a rischio da proteggere. La zonazione del rischio consiste in tre classi (rosso, blu e bianco) e delinea le zone nelle quali devono essere prese misure di prevenzione. Così, le aree rosse possono riguardare zone dove le misure di prevenzione sono impossibili o troppo costose, e quindi nessuna costruzione sarà autorizzata (Corominas et al., 2010).

### **3.2 Studi sul rischio da frana in Italia**

In Italia, la storia del dissesto causato da frane può essere ripercorsa attraverso un lungo elenco di eventi disastrosi: tra i più recenti si possono ricordare Vajont del 9 ottobre 1963 (1910 vittime), Val di Pola del 28 luglio 1987 (40 vittime, 19500 senzatetto), Piemonte del 2-6 novembre 1994 (70 morti, 2226 senzatetto), Versilia del 19 giugno 1996 (13 vittime, oltre 1500 senzatetto), Sarno del 5 maggio 1998 (153 vittime, centinaia di senzatetto) e gli eventi del 2000 di Soverato, Piemonte – Val d'Aosta e della Toscana – Liguria (61 fra vittime e dispersi e circa 40000 evacuati) (Panizza, 2005).

Un censimento delle frane è stato svolto nell'ambito del progetto Aree Vulnerate Italiane (AVI) del Gruppo Nazionale Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI) del Consiglio Nazionale Ricerche (CNR). Il *database* contiene oltre 18000 schede di eventi franosi, che nell'ultimo secolo hanno prodotto danni a persone o cose (Cardinali et al., 1998). Il Progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia), finanziato con fondi del Comitato dei Ministri per la Difesa del Suolo, ai sensi della L.183/89, e realizzato da un gruppo di lavoro tecnico, composto da funzionari dell'ex Servizio Geologico Nazionale, del CNR, delle Regioni e degli Enti locali, ha avuto lo scopo di supplire la scarsità di dati omogenei e condivisi sulla distribuzione dei fenomeni franosi sul territorio nazionale. Nel *database* a metà 2004 erano stati catalogati circa 383000 fenomeni franosi (Panizza, 2005). Le conseguenze socio-economiche sono rilevanti:

una stima attendibile del costo complessivo dei danni causati dalle frane potrebbe essere dell'ordine del 3-4 per mille del PIL (Canuti et al., 2001).

In Italia, la zonazione del rischio da frana è compito delle Autorità di Bacino, nell'ambito del progetto del Piano Assetto Idrogeologico – Rischio da Frana (L. 183/1989; L. 365/2000). La legge prevede che il rischio sia il risultato del prodotto della pericolosità, dell'esposizione e della vulnerabilità. In conformità con le direttive del governo (D.P.C.M. 29/09/98), devono essere identificate quattro classi di rischio secondo le conseguenze attese in seguito alle frane. In particolare, il livello di rischio è considerato:

- molto alto (R4), dove possono verificarsi perdita di vite umane, distruzione di edifici, infrastrutture e ambiente interruzione di attività economiche;
- alto (R3), dove sono possibili vittime, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture e interruzione delle attività economiche;
- medio (R2), dove potrebbero verificarsi Danni limitati agli edifici, alle infrastrutture e all'ambiente;
- basso (R1), dove i danni sociali, economici e ambientali sono di rilevanza marginale.

In riferimento all'Italia meridionale di seguito si descrivono le metodologie dell'Autorità di Bacino dei Fiumi Liri-Garigliano e Volturno e dell'Autorità di Bacino dell'area nord-occidentale della Regione Campania.

L'Autorità di Bacino dei Fiumi Liri-Garigliano e Volturno, oltre a considerare i 450 comuni dell'area, ha effettuato una zonazione del rischio (in scala 1:25000) anche nelle aree non urbanizzate, ma considerate aree in espansione nei piani strutturali comunali. Il rischio è stato valutato secondo la formula di Varnes e IAEG (1984), stimando separatamente la pericolosità, gli elementi a rischio e la vulnerabilità. Una volta stimata la pericolosità e la vulnerabilità, i livelli di rischio sono definiti usando una matrice (Corominas et al., 2010).

L'Autorità di Bacino dell'area nord-occidentale della Regione Campania (AA.VV., 2002) ha redatto la carta del rischio attraverso la sovrapposizione della mappa della pericolosità relativa da frana e la mappa degli elementi esposti. In particolare, essa deriva da una matrice costituita da tre gradi suscettibilità e quattro livelli di danno potenziale, definito come la perdita attesa di proprietà e/o vite umane e calcolato come il prodotto del valore degli elementi esposti e la vulnerabilità. Per garantire maggiore sicurezza, considerando la più alta intensità degli eventi franosi, la vulnerabilità è stata considerata sempre uguale a 1 (valore massimo).

Per quanto riguarda, invece, l'Italia centrale si descrive la zonazione effettuata dall'Autorità di Bacino dell'Arno (<http://www.adbarno.it>). Anche in quest'area il rischio da frana è stato calcolato sulla base della combinazione di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione come suggerito da Varnes e IAEG (1984). Poiché i fenomeni franosi sono riattivazioni profonde di scorrimenti, che in alcuni casi evolvono a colate, l'analisi ristretta a questa unica tipologia ha introdotto una notevole semplificazione, in quanto un *range* limitato di velocità può essere adottato per il calcolo dell'intensità e il volume mobilizzato atteso può essere ragionevolmente considerato uguale al volume attuale stimato (Catani et al., 2005; DRM, 1990; Cruden e Varnes, 1996). Per quanto riguarda la vulnerabilità e l'esposizione, un valore è stato assegnato ad ogni singolo elemento esposto in base alla tipologia e al principale uso. Il rischio, in scala 1:10000, è stato valutato in modo qualitativo, attraverso matrici di contingenza, e in modo quantitativo, attraverso il prodotto dei valori della pericolosità, della vulnerabilità e dell'esposizione. La procedura porta alla definizione del rischio espresso come perdita economica per ogni unità territoriale per differenti periodi di tempo del futuro (2, 5, 10, 20 e 30 anni).

Infine, come esempio dell'Italia settentrionale, si riporta la procedura dell'Autorità di Bacino del Po (<http://www.adbpo.it>). Data la scarsa disponibilità e significato statistico dei dati sulla frequenza e l'intensità delle frane, della vulnerabilità e valore degli elementi esposti a scala di bacino, la formula del rischio di Varnes e IAEG, 1984 è stata espressa in una forma più semplificata per essere utilizzata con un approccio euristico (matrice):  $R = S * V * E$ , dove:

- S: indicatore euristico di suscettibilità;
- V: classe relativa di vulnerabilità (euristica);
- E: classe relative del valore (euristica).

I valori di suscettibilità sono stati combinati con la vulnerabilità e il valore degli elementi esposti in una matrice ottenendo una classificazione del rischio secondo il D.P.C.M. 29/09/1998.

### **3.3 Il rischio da frana in Calabria**

Il territorio della Calabria è particolarmente soggetto a processi di instabilità dei versante. Le relazioni tra i fenomeni franosi e l'assetto territoriale ed ambientale sono dominati da quattro fattori principali (Critelli e Gabriele, 1991):

- la litologia e i caratteri strutturali, terreni argillitici e arenaceo-pelitici sono quelli con la più alta incidenza delle frane; fra i terreni cristallini, invece, gli gneiss sono le litologie con più alta frequenza di frane a causa dell' stato di alterazione dell'ammasso roccioso;
- la neotettonica, che ha prodotto un'accelerazione della dinamica dei versanti, includendo il forte sollevamento che la regione ha subito e la concentrazione distribuita di terremoti prodotta dal differenziato sollevamento verificatosi da una zona all'altra della Calabria;
- la morfologia dei versanti, molti di essi si trovano ormai al limite di stabilità;
- il clima, tipicamente mediterraneo con zone aride alternate a zone con piovosità intensa, è caratterizzato dalla ricorrenza di eventi meteorologici estremi, responsabili dell'innescò di molte frane.

Data la forte influenza di questi fattori, la Calabria risulta caratterizzata da un'alta frequenza di frane sia superficiali che profonde (Sorriso-Valvo, 1985). Sono presenti quasi tutte le tipologie di frana:

- crolli in roccia, concentrati in scarpate rocciose molto acclivi o sub-verticali, soprattutto in gneiss e arenarie;
- scorrimenti sia traslativi che rotazionali, si innescano al contatto tra litologie rigide su litologie a comportamento duttile, come ad esempio negli gneiss, geometricamente sovrapposti a rocce filladi che e scistose, o in rocce sedimentarie arenacee e conglomeratiche su rocce pelitiche. Generalmente hanno un innescò complesso, combinato da scorrimenti su roccia e debris-flow su rocce rigide, come ad esempio negli gneiss;
- colate e sackung;
- espansioni laterali, innescate soprattutto su rocce molte fratturate. Essi sono particolarmente frequenti nelle zone dell'Aspromonte e dell'Alto Jonio, ma in generale sono meno diffusi dei precedenti tipi di frana.

L'esposizione al rischio da frana è aumentata notevolmente dal dopoguerra ad oggi a causa della crescente antropizzazione del territorio, con un'espansione del tessuto urbano spesso in aree instabili. Le principali cause di dissesto dovute ad effetti antropici sono da ricercarsi nell'abbandono delle sistemazioni idraulico-forestali, nel disboscamento, nell'eccessiva e scorretta urbanizzazione, negli incendi boschivi e nelle tecniche agronomiche inadeguate (Rago, 2012).



Molti studi sono stati compiuti per analizzare il rischio da frana in Calabria. In alcuni casi l'attenzione è stata posta su casi specifici o aree estese, altre volte si è cercato di avviare una analisi più sistematica riguardante l'intera regione, come nel progetto SCAI (Studio Centri Abitati Instabili, <http://www.gndci.cnr.it/it/scai/>) del CNR, che ha già prodotto in tante regioni risultati apprezzabili.

Come per le altre regioni d'Italia, anche in Calabria le condizioni di rischio da frana sono valutate ufficialmente dal Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (PAI) previsto dal DL 180/'98 (Decreto Sarno). Il Piano, come sancito dalla legge 11/12/00 n. 365, art. 1bis comma 5, ha valore sovraordinatorio sulla strumentazione urbanistica locale. Il programma regionale sulla difesa del suolo che ha avviato l'iter del PAI, è stato approvato con delibera della Giunta Regionale n. 2984 del 7 luglio 1999. Il lavoro di creazione di una banca dati sul territorio, nonché quello normativo e di previsione, è stato finalizzato ad elaborare un quadro di sintesi regionale sulle diverse problematiche della difesa del suolo, oltre che di creare le competenze necessarie a gestire il Piano ed aggiornarlo nelle dinamiche future (QTRP, 2009).

I parametri e i metodi di valutazione sono riferiti a Varnes e IAEG (1984). La procedura di valutazione è stata articolata in due fasi:

- fase 1: individuazione delle aree in frana, attraverso le informazioni disponibili, relative ai centri abitati capoluogo di Comune, alle frazioni e ai nuclei abitati (di norma > 200 abitanti), nonché alle vie di accesso alle suddette aree e, successivamente, alle infrastrutture (strade, ferrovie e reti di servizio) ed aree sottoposte a vincolo archeologico;
- fase 2: perimetrazione delle aree in frana e valutazione dei livelli di rischio.

Tenuto conto dello stato e del tipo di attività (o tempi di ricorrenza) e dell'intensità (classi di velocità) dei fenomeni analizzati, si è giunti ad una valutazione qualitativa dei livelli di pericolosità (matrice intensità-pericolosità). Nell'elaborazione si è considerata come pericolosa non solo l'area in frana ma anche una fascia di territorio esterna alla stessa, di ampiezza generalmente pari a 20 m, considerata come area potenzialmente interessata dall'evoluzione del fenomeno franoso. Tale criterio ha rappresentato una misura cautelativa, in mancanza di sufficienti elementi di conoscenza e dei tempi necessari per effettuare un'analisi più approfondita. La procedura semplificata utilizzata ha previsto che, definita la pericolosità, i valori ottenuti sono stati combinati attraverso una matrice con le classi degli elementi vulnerabili, per ottenere i quattro livelli di rischio.

## **CAPITOLO 4 - CASO DI STUDIO: AUTOSTRADA A3, TRATTO COSENZA SUD – ALTILIA**

In questo capitolo, il primo paragrafo descrive le caratteristiche geologiche, geomorfologiche e degli aspetti climatici della Calabria centro-settentrionale, in cui è localizzata l'area che si è scelto di analizzare, e focalizza la descrizione di questi aspetti nell'ambito dell'area di studio. Nel secondo paragrafo si espone la valutazione qualitativa del rischio da frane profonde e da frane superficiali realizzata per questo caso di studio. La metodologia applicata si basa sulla sovrapposizione dell'elemento a rischio considerato (il tratto di autostrada) sulla carta di pericolosità spaziale o suscettibilità da frana. Sono riportati i dati utilizzati, le fonti e la loro preparazione per l'analisi, ponendo maggiore attenzione ai dati relativi ai fenomeni franosi. In seguito, sono descritte le metodologie applicate (*"Hazard Index"*, *"Analisi condizionale"* e *"Weight of Evidence"*) e i risultati ottenuti nella valutazione della suscettibilità da frana. Questi risultati sono stati validati e confrontati tra loro allo scopo di utilizzare nell'analisi del rischio la mappa di suscettibilità che meglio predice i movimenti gravitativi nell'area di studio. La parte finale descrive i risultati ottenuti relativi al rischio da frane profonde e da frane superficiali in riferimento al tratto di autostrada studiato.

## 4.1 Inquadramento dell'area di studio

### 4.1.1 Inquadramento geografico ed orografico

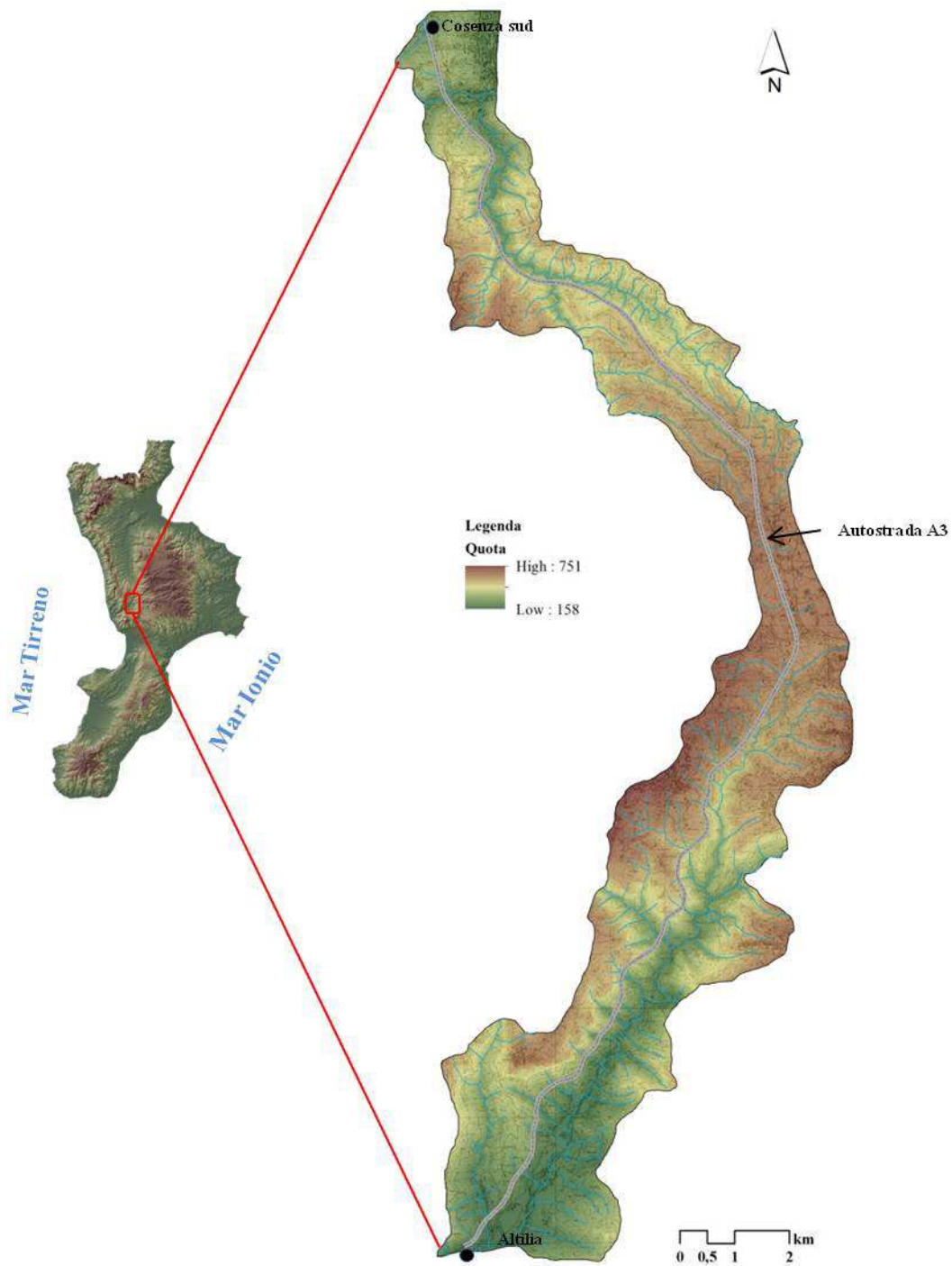
L'area di studio è ubicata nel settore centro-settentrionale della Calabria (Fig. 4.1), ed è geograficamente posizionata tra le coordinate 604510 E 4327507 N e 615504 E 4351494 N, del sistema di proiezione UTM, datum WGS84. Essa è localizzata tra i bacini idrografici del Fiume Crati e del Fiume Savuto, con lo spartiacque sull'altopiano di Piano Lago, che hanno origine dall'altopiano della Sila e si estendono, rispettivamente, in direzione S-ONO, sfociando nel mar Ionio, e in direzione ENE - OSO, sfociando nel Mar Tirreno. Il bacino del Fiume Crati presenta un'estensione areale di circa 2447 km<sup>2</sup>, compreso tra le quote 0 e 2253 m s.l.m., con un valore medio di pendenza pari all'1,56%. Mentre il bacino del Fiume Savuto occupa un'area di circa 411 km<sup>2</sup>, tra le quote 0 e 1646 m s.l.m., e presenta un valore medio di pendenza d'alveo del 4,24 %.

L'area di studio ricade nei comuni di Cosenza, Mendicino, Dipignano, Piane Crati, Figline Vegliaturo, Paterno Calabro, Mangone, Santo Stefano di Rogliano, Rogliano, Marzi, Belsito, Malito, Altilia, Scigliano, Pedevigliano e Grimaldi in provincia di Cosenza, e Motta Santa Lucia in provincia di Catanzaro (Fig. 4.2); essa è attraversata, approssimativamente in direzione S-N, da un tratto lungo circa 26.5 km dell'autostrada A3, dallo svincolo di Cosenza Sud ad Altilia.

La tabella 4.1 mostra i parametri relativi all'altimetria dell'area di studio e del tratto di autostrada studiato. L'andamento del tratto di autostrada prevede l'attraversamento in galleria e su viadotti. In particolare, attraversa tredici gallerie e supera trenta viadotti. Queste infrastrutture, in alcuni casi, sono state concausa dei fenomeni di instabilità rilevati nell'area di studio.

	<b>TRATTO A3</b>	<b>AREA DI STUDIO</b>
<b>minima</b>	172	158
<b>massima</b>	639	751
<b>media</b>	512	561

**Tabella 4.1 Quote caratteristiche dell'area di studio (m s.l.m.).**



**Fig. 4.1** Ubicazione dell'area di studio.

Per quanto riguarda l'aspetto orografico, l'area di studio è caratterizzata da tre unità fisiografiche:

- area montana: al di sopra dei 500 m. s.l.m., a causa della profonda dissezione operata dai corsi d'acqua, essa presenta una morfologia alquanto accidentata e, di conseguenza, una forte energia del rilievo;
- area collinare: tra 200 e i 500 m. s.l.m., che si presenta in larga misura con una morfologia collinare, controllata principalmente dalla litologia affiorante. Locali inasprimenti delle forme si incontrano lungo le valli e/o lungo i versanti interessati da morfoselezione;
- area di fondovalle, bordato da crinali che rappresentano i resti di vecchie superfici di erosione/deposizione.

Con riferimento alla cartografia I.G.M. (Istituto Geografico Militare) del 1954, l'area di studio ricade nelle seguenti sezioni del Foglio 236, in scala 1:10.000:

- II NO sez. A "Carpanzano", sez. B "Motta S.Lucia", sez. C "Cozzo Manzirri", sez. D "Malito"
- I SO sez. A "Piane Crati", sez. B "Rogliano"
- I NO sez. B "Trenta", sez. C "Cosenza Sud", sez. D "Cosenza Nord".

Mentre, in riferimento alla Carta Geologica d'Italia redatta dall'ISPRA in scala 1:50000, l'area ricade nei fogli:

- Foglio N° 559, "Cosenza";
- Foglio N° 568, "Amantea".

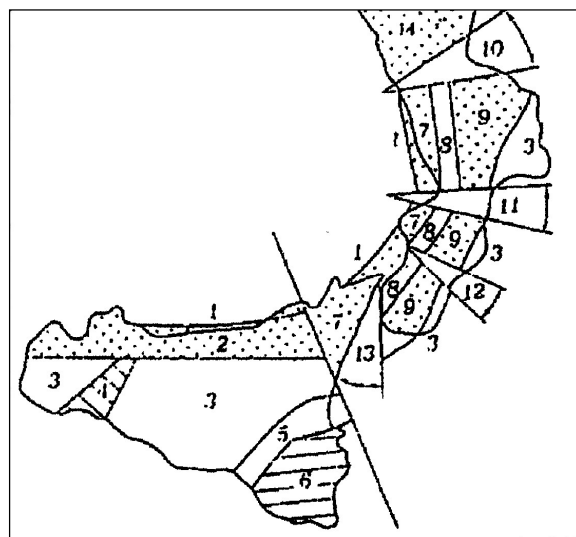
#### **4.1.2 Inquadramento geologico**

##### **4.1.2.1 Geologia regionale**

La struttura geologica della Calabria è costituita essenzialmente da una serie di falde cristalline sovrapposte, derivanti dalla deformazione di crosta oceanica e continentale che nell'insieme costituiscono l'Arco Calabro Peloritano (ACP). Esso rappresenta un elemento di congiunzione tra la catena appenninica e la catena siciliano-maghrebide (Amodio Morelli et al., 1976; Bonardi et al., 1982; Tortorici, 1982). Due importanti sistemi di faglie trascorrenti delimitano l'ACP dalla catena sud-appenninica e maghrebide; la linea di Sanginetto a nord e la linea di Taormina a sud (Amodio Morelli et al., 1976).

L'ACP viene interpretato come un frammento di catena alpina Europa-vergente, le cui falde sono sovrascorse nel Miocene inferiore sulla catena appennino-maghrebide. L'ossatura della catena è formata da rocce metamorfiche di basso grado costituite, in parte, da scaglie di basamento già deformato e di età ercinica, in parte da metagranitoidi tardo ercinici ed in minor misura da una copertura sedimentaria mesozoica costituita da depositi terrigeni e carbonatici e da frammenti di crosta oceanica sia metamorfica sia non metamorfica laminata e tettonizzata.

Durante il Neogene, la catena subisce una serie di fasi tettoniche distensive e trascorrenti legate all'inizio del *rifting* del Tirreno. A seguito di tali deformazioni l'ACP risulta segmentato da importanti lineamenti tettonici, organizzati secondo sistemi longitudinali e trasversali rispetto alle due direttrici strutturali che lo separano dalla catena appenninica e dalla catena maghrebide (Fig. 4.2).



**Figura 4.2** Schema neotettonico dell'Arco Calabro Peloritano (da Ghisetti, 1979). **Legenda:** 1) Bacini peri-tirrenici di Paola, Gioia Tauro e Cefalù; 2) Monti Nebrodi, Madonie e Madonne; 3) Bacini di Crotona, Capo Castelvetro; 4) Monti Sicani; 5) Fossa Catania-Gela; 6) Monti Iblei; 7) Catena Costiera Capo Vaticano, Monti Peloritani; 8) Fosse dell'alto Crati, di Messina e di Gioia Tauro; 9) Sila, Serre, Aspromonte; 10) Fosse del basso Crati-Sibari; 11) Fossa di Catanzaro; 12) Fossa di Siderno; 13) Fossa di Messina; 14) Pollino.

Questi sistemi di faglia concorrono all'apertura di importanti bacini sedimentari continentali e marini, sia longitudinali (bacino del Crati, del Mesima, di Paola e di Crotona-Capo Spartivento), sia trasversali (fossa del basso Crati-Sibari, fossa di Catanzaro e fossa di Siderno) (Ghisetti, 1979).

Durante il Quaternario la Calabria è stata caratterizzata prevalentemente da tettonica estensionale, durante la quale sono stati prodotti movimenti normali sui sistemi di faglia preesistenti.

L'ACP è stato differenziato in due distinti settori che vengono a contatto lungo un allineamento strutturale, poco a sud di Catanzaro che, da Capo Vaticano, attraverso la Valle del Mesima, si estende fino a Soverato (Bonardi et al., 1982; Tortorici, 1982). I

due settori sono caratterizzati da un assetto tettono-stratigrafico e da una storia evolutiva differente che si traduce, per il settore meridionale, rispetto a quello settentrionale, nell'assenza di unità ofiolitiche e di un metamorfismo alpino nelle unità cristalline, nella mancanza delle unità carbonatiche appenniniche sottostanti le unità cristalline ed, infine, nella vergenza meridionale nell'accavallamento delle falde.

#### **4.1.2.1.1 Caratterizzazione geologica della Calabria centro-settentrionale**

Il settore settentrionale dell'Arco Calabro (Figura 4.3), in cui ricade l'area di studio, è costituito dalla sovrapposizione di tre unità tettono-stratigrafiche. Le unità geometricamente più basse sono rappresentate da rocce carbonatiche mesozoiche che originariamente formavano il margine continentale africano, scollatesi dal loro basamento durante il Cenozoico, assumendo una vergenza orientale. L'unità intermedia è composta da rocce ofiolitiche, metasedimentarie e sedimentarie del Mesozoico-Cenozoico (Complesso Liguride), considerati come i resti di un cuneo di accrezione oceanico Paleogenico (Ogniben, 1969; Knott, 1987; Bonardi et al., 1988; Monaco et al., 1991; Critelli, 1993). L'unità strutturalmente più elevata comprende rocce ignee e metamorfiche di età paleozoica, localmente comprendenti coperture sedimentarie meso-cenozoiche (Complesso Calabride, Ogniben, 1969), interpretata come un frammento del margine europeo della neo-Tetide (Bouillin et al., 1986; Knott, 1987, Dewey et al., 1989).

Questo settore, che si estende a nord dell'allineamento Capo Vaticano – Soverato, è costituito da una serie di unità tettoniche, di cui le due più profonde, escludendo i carbonati basali, sono rappresentate da unità ofiolitifere mentre le rimanenti sono rappresentate da porzione di crosta continentale (Tortorici, 1982). L'autore distingue dal basso verso l'alto:

- Unità di Verbicaro e Unità di San Donato: costituiscono i domini della catena appenninica (Amodio Morelli et al., 1976). Affiorano in finestre tettoniche (Cetraro, Capo Bonifati, etc.) al di sotto delle unità cristalline. L'unità basale è costituita dalla Unità di San Donato mentre quella superiore da quella di Verbicaro. Queste unità sono costituite essenzialmente da successioni calcareo-dolomitiche.

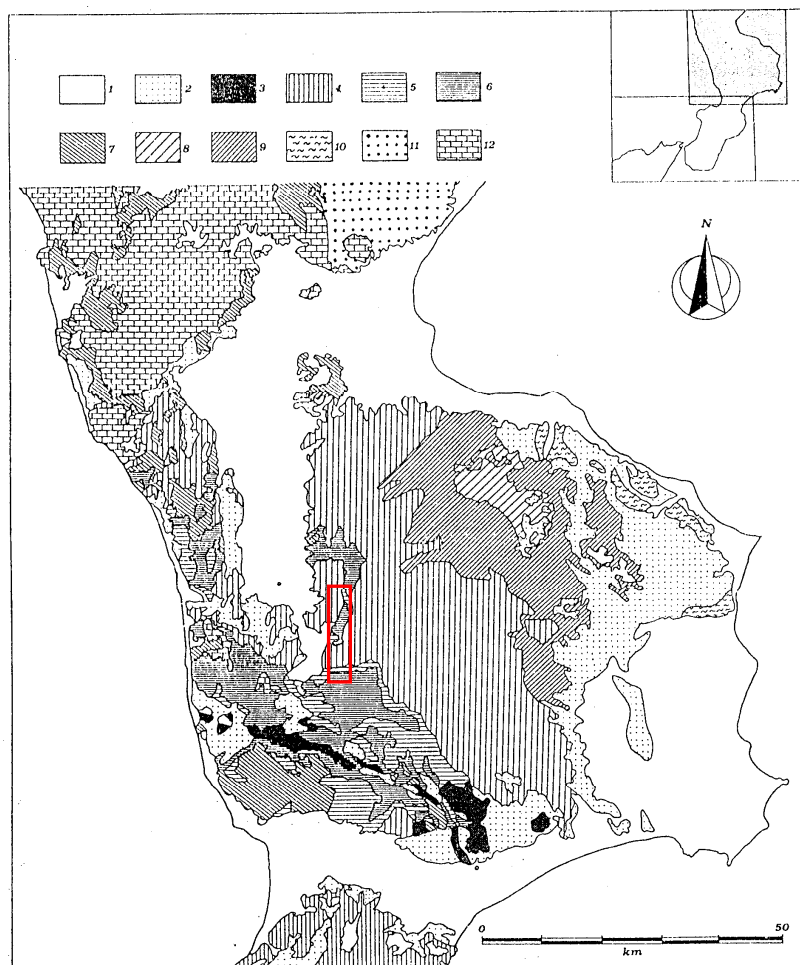


Figura 4.3 Carta geologico-strutturale del settore settentrionale dell'Arco Calabro. 1) sedimenti plio-pleistocenici; 2) sedimenti del Tortoniano-Pliocene inf.; 3) Unità di Stilo; 4) Unità di Polia-Copanello; 5) Unità di Castagna; 6) Unità di Bagni; 7) Unità ofiolitiche, Unità di Longobucco; 8) Basamento cristallino; 9) Copertura sedimentaria Meso-Cenozoica; 10) Unità Sifilidi; 11) Gruppo del Cilento e Formazione del saraceno; 12) Unità carbonatiche del Complesso Panormide. Da Tortorici (1982).

- Unità del Frido: affiora in tutto il settore settentrionale ed in Lucania; è costituita da una successione di metapeliti e quarziti a cui sono associate ofioliti rappresentate da prevalenti metabasalti, serpentiniti ed eccezionalmente da gabbri come metabrecce. Quest'unità di età cretacea, è caratterizzata da un metamorfismo di alta pressione e bassa temperatura (Spadea et al., 1976).
- Unità Ofiolitiche: comprende le unità di Malvito e Gimigliano (Dietrich et al., 1976). L'unità di Malvito affiora lungo la "linea di Sangineto" ed è costituita da lave a pillows e da breccie di pillow su cui poggiano coperture sedimentarie terrigene e carbonatiche. Presenta un metamorfismo alpino polifasico di basso grado. L'unità di Gimigliano è costituita da metabasiti e serpentiniti con copertura costituita da



un'alternanza di filladi verdastre, metareniti e metacalcari di origine torbiditica. Anche questa unità presenta metamorfismo di tipo alpino.

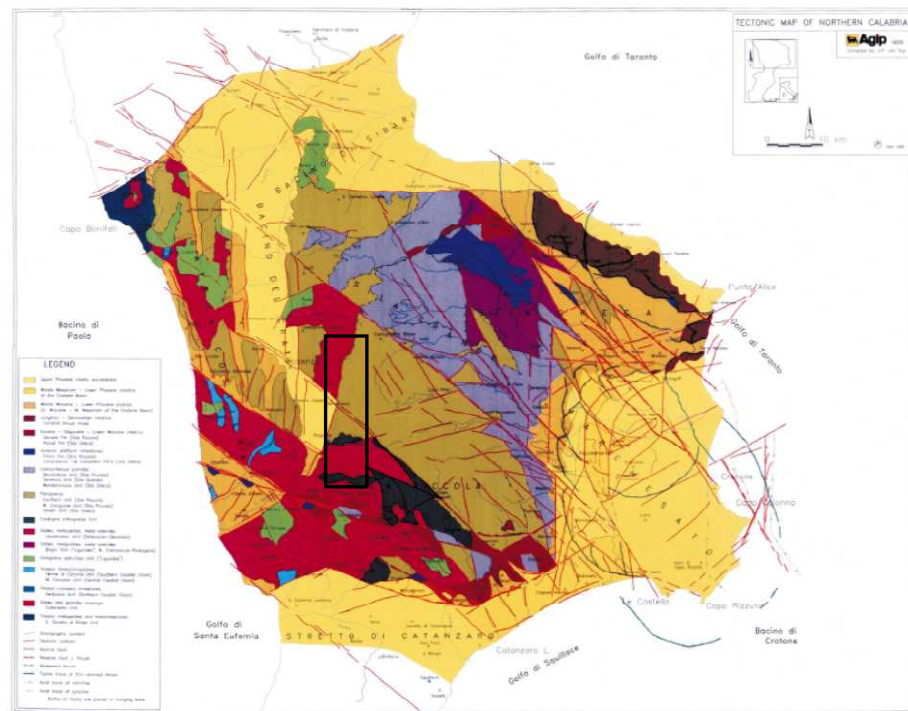
- Unità di Bagni: rappresenta un'unità di derivazione continentale, affiorante principalmente in Sila Piccola, Catena Costiera e nell'alta valle del Fiume Crati; essa presenta un basamento filladico caratterizzato da un metamorfismo alpino di basso grado, che sopporta una copertura sedimentaria Mesozoica.
- Unità di Castagna: affiora prevalentemente in Sila Piccola e lungo il bordo orientale della valle del F. Crati lungo la parte settentrionale del massiccio delle Serre (Paglionico e Piccareta, 1977). Quest'unità è costituita da micascisti, paragneiss e gneiss occhiadini con presenza di masse pegmatitiche e granitoidi. L'età di questa unità è paleozoica ed è caratterizzata da un metamorfismo prealpino in facies da scisti verdi profonda ad anfibolitica (Colonna e Piccareta, 1978).
- Unità di Polia-Copanello: affiora diffusamente in tutto il settore e rappresenta porzioni profonde di crosta continentale. È costituita da gneiss kinzigitici con intercalazioni di masse anfibolitiche e di metaperoditite ed è affetta da metamorfismo in facies granulitica (Paglionico & Piccarreta, 1978).
- Unità di Longobucco: affiora lungo la parte orientale della Sila e ricopre le unità sopra descritte; è costituita da basamento filladico con intercalazioni di quarziti e porfiroidi contenenti intrusioni granitiche, su cui trasgrediscono due successioni sedimentarie di età meso-cenozoica (Lanzafame & Tortorici, 1980).

#### **4.1.2.1.2 Caratterizzazione strutturale della Calabria centro-settentrionale**

Per quanto riguarda questo settore sono stati condotti degli studi di dettaglio (Tortorici, 1981) che evidenziano tre sistemi principali di faglie. Il primo presenta piani di faglia orientati NE-SO, il secondo sistema è caratterizzato da piani orientati in direzione NO-SE e il terzo sistema ha un andamento dei piani N-S (Figura 4.4). Nel bacino Crotonese, precisamente nel settore nord- occidentale, è inoltre stato individuato un quarto sistema caratterizzato da faglie con andamento NNE-SSW (Tortorici, 1981).

*Sistema NE-SO:* questo sistema è rappresentato da due allineamenti principali; uno settentrionale che si identifica con la "linea di Sanginetto", che taglia trasversalmente la regione ed è caratterizzato da una serie di faglie normali che ribassano questo sistema, la "linea San Marco Argentano-Doria" e la dorsale di Tarsia-San Lorenzo del Vallo (Lanzafame e Tortorici, 1980).

Il lineamento meridionale è costituito da faglie normali con piani quasi verticali ed è identificato morfologicamente lungo il corso del fiume Savuto il cui elemento principale è rappresentato appunto dalla “linea del Savuto” (van Dijk et al., 2000), che ribassa i vari blocchi verso NO fino alla zona più a sud di Amantea, dove vengono a contatto i termini del substrato con i sedimenti tortoniano-messiniani.



**Figura 4.4** Principali strutture tettoniche della Calabria settentrionale (Van Dijk et al., 2000).

*Sistema NO-SE:* questo sistema di faglie è il più sviluppato della regione ed è costituito da una serie di faglie normali che presentano piani da verticali a subverticali. Suddivide la Calabria settentrionale in una serie di *horst* e *graben* (Tortorici, 1981).

Elementi facenti parte del sistema NO-SE sono individuati nella linea del Pollino e nella faglia che da San Sosti si estende verso sud-est fino al bordo Silano del bacino del Crati (Lanzafame e Tortorici, 1980).

*Sistema N-S:* appartengono a questo sistema una serie di faglie normali che delimitano le strutture della Catena Costiera e della Valle del Crati. Si distinguono la faglia “San Marco Argentano-San Fili” e la faglia “Torano Castello-Marano Marchesato”, ad est della stessa si ha l’allineamento “Zumpano-Bisignano” (Tansi et al., 2005).

Nella Valle del Crati, le faglie delimitano una struttura a gradinata che degrada da ovest verso est e divergono leggermente procedendo verso nord dalla zona adiacente a sud di Cosenza (Tortorici, 1981; Lanzafame e Tortorici, 1980).

Nella parte orientale della Calabria Settentrionale le faglie dirette con questo andamento, verso nord, limitano il bacino Crotonese rispetto alla Sila e si estendono da Cropani Marina fino all'altezza di Savelli troncando tutte le strutture del sistema NO-SE (Moretti et al., 1990).

#### **4.1.2.2 Geologia dell'area di studio**

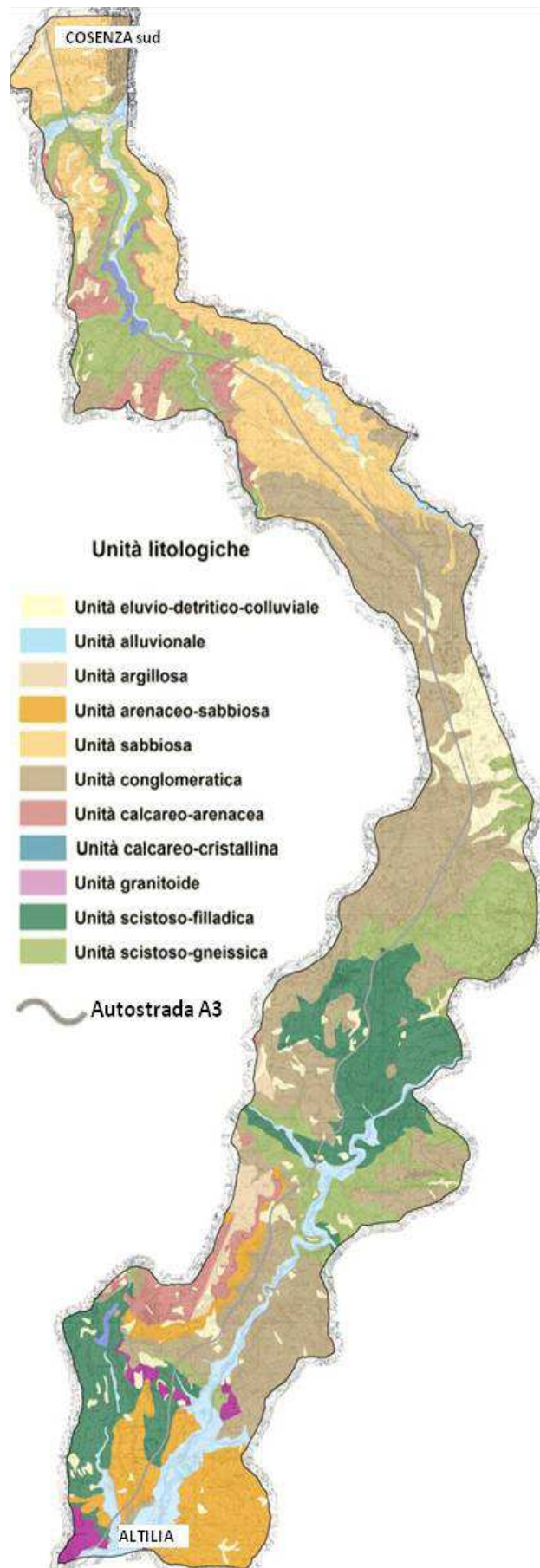
Nell'area studiata affiorano essenzialmente rocce cristallino metamorfiche di età paleozoica, appartenenti al Complesso Calabride e consistenti principalmente in rocce gneissiche (con intercalazioni di calcari cristallini), granitoidi e filladi, depositi sedimentari del Tortoniano superiore riconducibile alle successioni di riempimento dei bacini sedimentari alto-miocenici presenti in tutto il settore occidentale della Calabria settentrionale e rocce sedimentarie che vanno dal Miocene al Pleistocene, tra cui conglomerati, calcari, arenarie, argille e sabbie.

Si riporta una breve descrizione delle unità litologiche presenti (Fig. 4.5):

- unità scistoso - gneissica: gneiss e scisti (scisti quarzosi e scisti biotitici) costituenti ammassi rocciosi, da moderatamente a estremamente fratturati, dotati di elevata durezza e di buona resistenza all'erosione (elevata per gli gneiss e medio - elevata per gli scisti), che diminuisce in corrispondenza delle fasce di alterazione, molto sviluppate verso la sommità dei rilievi ed in corrispondenza dei pendii a gradiente più basso. La permeabilità è, in genere, medio - bassa, ma aumenta con il grado di fratturazione. Tale unità litologica comprende la formazione Sbg e Sm (Fig. 4.6; 4.12) ed è molto diffusa nel settore settentrionale dell'area di studio.



**Figura 4.6** Unità scistoso-gneissica.



**Figura 4.5** Unità litologiche dell'area di studio.

- Unità scistoso – filladica: comprende metamorfiti caratterizzate da un’accentuata anisotropia strutturale (scistosità). Le rocce contengono generalmente vene, o segregazioni, di quarzo parallele alla scistosità. Presenta giaciture variabili e strutture plicative; inoltre, l’unità è caratterizzata da diffuse fasce di intensa fratturazione, in corrispondenza delle quali i litotipi si presentano spesso diffusamente “argillificati”. La permeabilità è, nel complesso, bassa, ma aumenta in corrispondenza delle fasce più fratturate e poco argillificate. Questo complesso presenta una discreta resistenza all’erosione, localmente ridotta nelle zone di fratturazione ove si possono sviluppare frane, in particolar modo quando la scistosità si presenta a franapoggio. Tale unità litologica comprende la formazione Sf (Fig. 4.7; 4.12) ed è diffusa nel settore meridionale dell’area di studio.

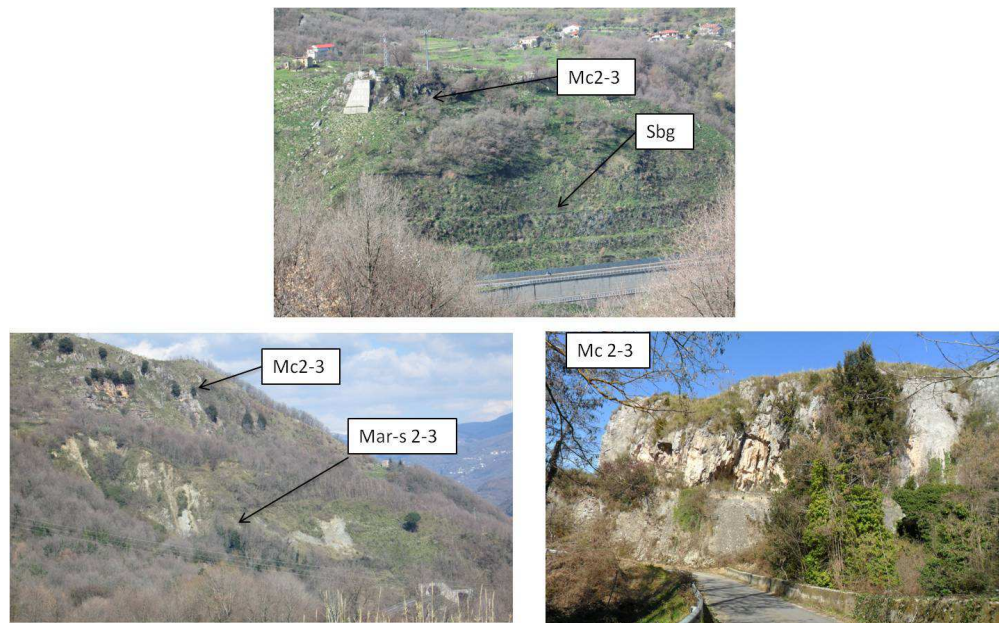


**Figura 4.7 Unità scistoso-filladica.**

- Unità calcareo – arenacea: calcari, calcareniti e arenarie a cemento calcareo, i quali costituiscono ammassi rocciosi massicci o grossolanamente stratificati, da moderatamente ad altamente fratturati. I litotipi presentano un’elevata resistenza all’erosione (testimoniata da ripide scarpate, spesso soggette a fenomeni di crollo) e permeabilità da media a elevata, a seconda del grado di fratturazione. L’unità, che comprende la formazione Mc2-3 (Fig. 4.8), è mediamente diffusa nei settori settentrionale e meridionale.

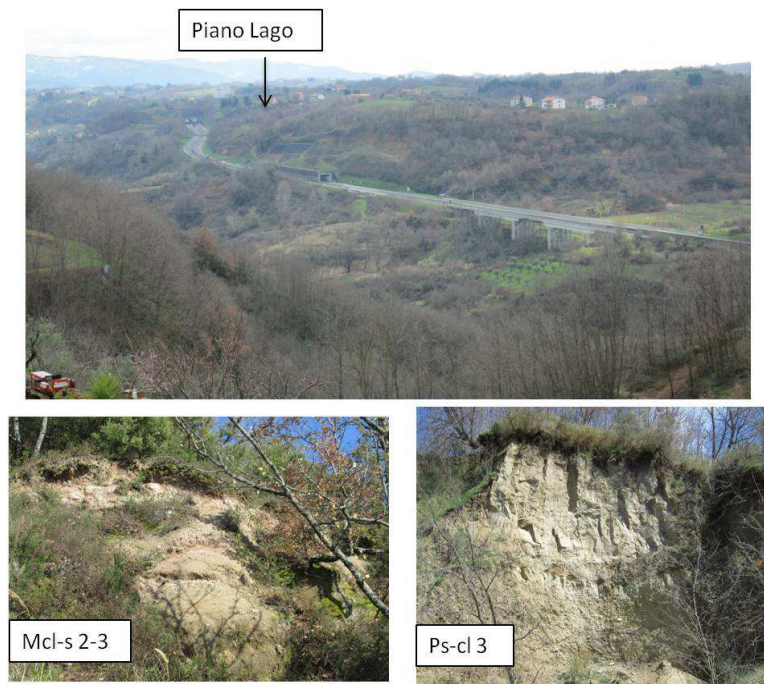
- Unità arenaceo - sabbiosa: arenarie e sabbie debolmente cementate, con locali intercalazioni microconglomeratiche e siltoso - argilloso - sabbiose (spesso, queste ultime corrispondono a superfici di debolezza che possono dare origine a frane di scivolamento). La resistenza all’erosione è da discreta a elevata (testimoniata da pendii ripidi), a seconda del grado di cementazione; la permeabilità è da media a medio - elevata, a seconda del grado di cementazione e di fratturazione. L’unità comprende la

formazione  $M^{ar-s}_{2-3}$  (Fig. 4.8; 4.12) e affiora esclusivamente nel settore meridionale dell'area di studio.



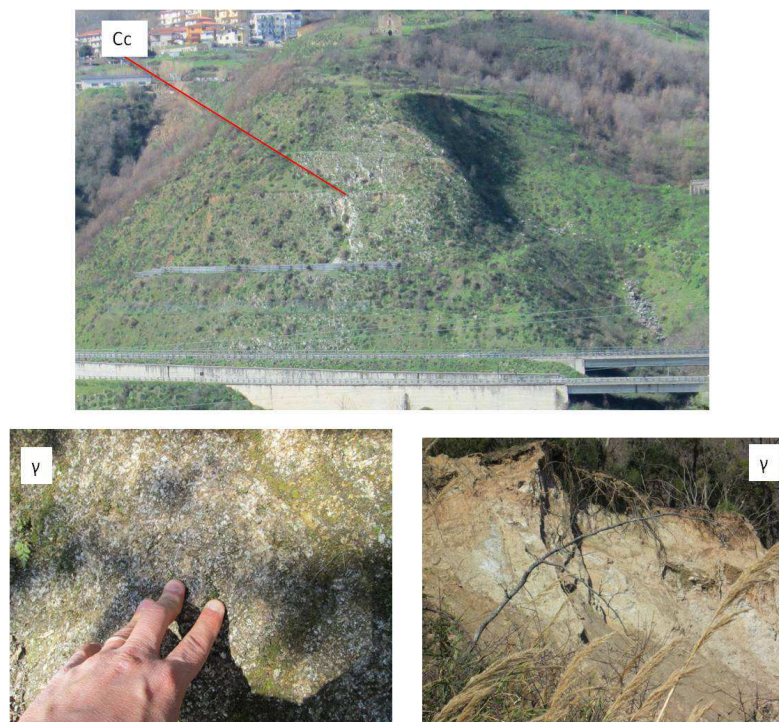
**Figura 4.8 Unità calcareo-arenacea e unità arenaceo-sabbiosa.**

- **Unità conglomeratica:** depositi conglomeratici, con locali intercalazioni sabbiose e sabbioso-ghiaiose, i quali si presentano da massivi a grossolanamente stratificati; nel complesso, sono ben costipati, presentano una discreta resistenza all'erosione e permeabilità elevata. L'unità, la quale comprende le formazioni Pcl3, Mcl2-3 e Qcl-s (Fig. 4.9; 4.12), affiora lungo l'intero tratto, ma prevalentemente nel settore centrale (Piano Lago) e secondariamente in quello meridionale, mentre è scarsa nel settore settentrionale.
- **Unità sabbiosa:** depositi sabbiosi e sabbioso-ghiaiosi, in genere, ben stratificati, con diffuse intercalazioni da conglomeratiche a conglomeratico - sabbiose e locali intercalazioni siltose e arenacee. Sono discretamente costipati, presentano una moderata resistenza all'erosione (mediamente più elevata, in presenza di intercalazioni ghiaiose e arenacee) e permeabilità da medio - elevata ad elevata. L'unità, la quale comprende le formazioni Ps-cl 3 e  $P^s_{2-3}$  (Fig. 4.9; 4.12), affiora nei settori settentrionale e centrale.
- **Unità argillosa:** depositi argillosi (argille siltose, argille-marnose e silts), caratterizzati da scarsa resistenza all'erosione e permeabilità molto bassa. A parte limitati lembi nel settore settentrionale, l'unità, la quale comprende le formazioni Pa3 e Ma3 (Fig. 4.9; 4.12), affiora in maniera localizzata, per lo più nel settore meridionale, nella parte alta dei versanti e lungo i crinali.



**Figura 4.9** Unità conglomeratica, unità sabbiosa e unità argillosa.

- Unità granitoide: ammassi rocciosi granitoidi (in genere biotico - muscovitici), a grana da media a grossolana, in genere, intensamente fratturati e degradati in superficie, fino ad essere ridotti ad un sabbione dal *wheating*; la permeabilità è complessivamente moderata. Tale unità, che comprende la formazione  $\gamma$  (Fig. 4.10; 4.12), si ritrova in ammassi considerevoli (cartografabili) solo nel tratto più meridionale dell'area di studio.
- Unità calcareo - marmorea: dolomie, calcari dolomitici, calcari cristallini e marmi, i quali si presentano massicci o stratificati; sono dotati elevata resistenza all'erosione e di permeabilità da media a medio – elevata, a seconda del grado di fratturazione. Tale unità, la quale comprende le formazioni Cc (Sbg) e Tdl (Fig. 4.10; 4.12), si ritrova in ammassi considerevoli (cartografabili) solo nel tratto più meridionale dell'area di studio.
- Unità alluvionale: depositi fluviali attuali e di bassi terrazzi alluvionali (al), a granulometria variabile da ghiaiosa a sabbiosa; presentano permeabilità elevata e sono facilmente disgregabili (Fig. 4.11; 4.12).
- Unità eluvio – detritico - colluviale: depositi eterogenei a tessitura notevolmente variabile, a seconda dei litotipi che li hanno originati; nel complesso, sono poco consolidati, facilmente erodibili e presentano permeabilità variabile a seconda della tessitura. Tale unità comprende le formazioni ec e df (Fig. 4.11; 4.12).



**Figura 4.10 Unità granitoidi e unità calcareo – marmorea.**



**Figura 4.11 Unità alluvionale e unità eluvio – detritico – colluviale.**



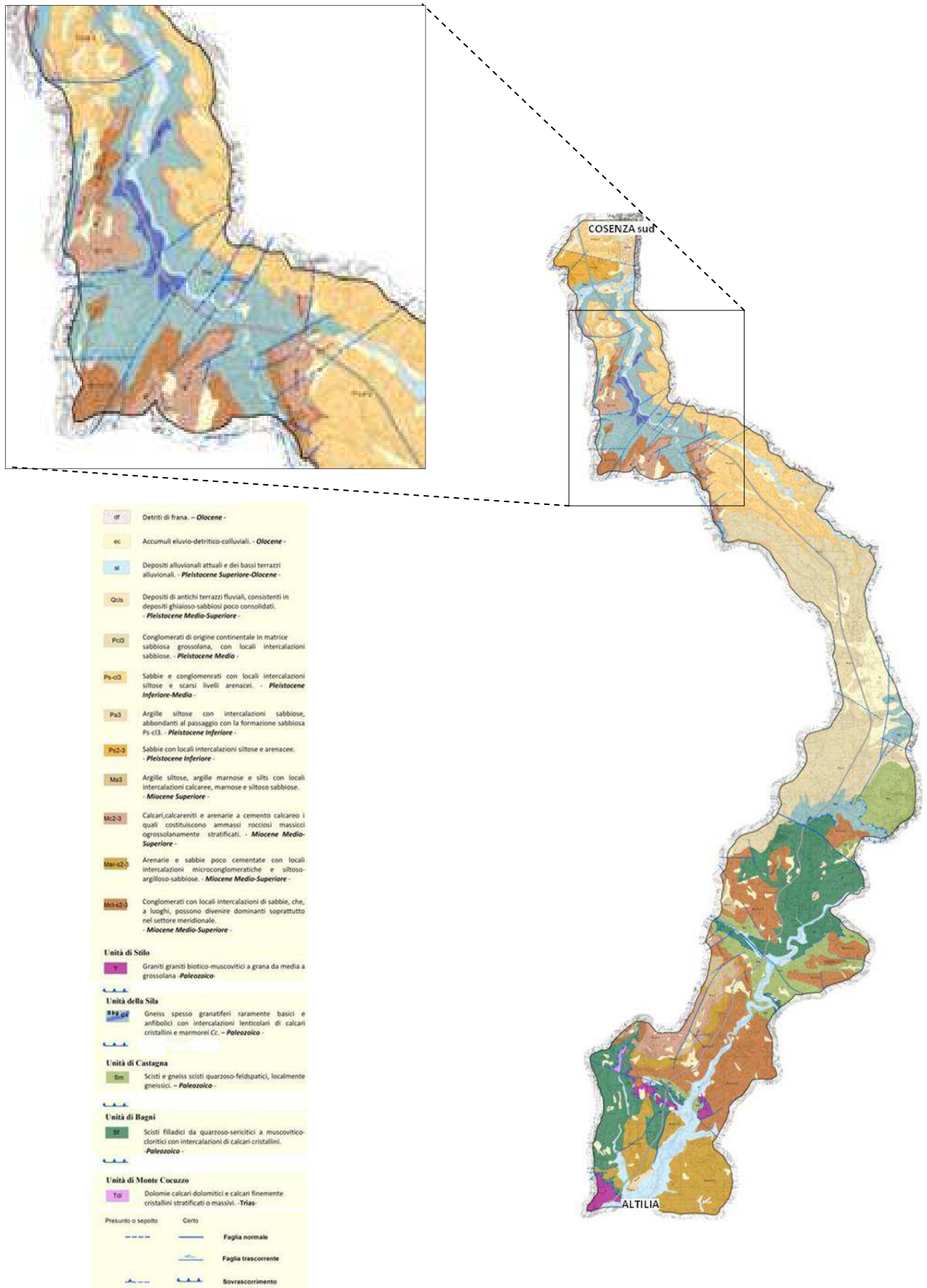


Figura 4.12 Carta geologica dell'area di studio.

### **4.1.3 Inquadramento geomorfologico della Calabria settentrionale**

La Calabria presenta caratteri morfologici molto complessi; infatti alle “forme nuove”, dovute a processi geomorfici ancora in atto, si affiancano “forme antiche” pre-oloceniche. Alcune di queste ultime sono state modificate dalla dinamica recente che, pertanto, ne rende più complessa ed articolata la loro interpretazione (Sorriso-Valvo, 1993).

Il sollevamento della regione, spazialmente e temporalmente discontinuo, ha creato una gerarchizzazione dei caratteri geomorfologici, con sistemi morfologici denominati di primo ordine, o morfostrutture (ad es. Catena Costiera, Sila, Valle del Crati, ecc.) e di secondo ordine rappresentate da forme e depositi inclusi nelle morfostrutture (ad es. le forme peneplanate dell’altopiano silano, le conoidi alluvionali della Catena Costiera tirrenica, ecc.) (Sorriso-Valvo, 1993).

In Calabria settentrionale, nella quale ricade l’area di studio, si distinguono principalmente i seguenti sistemi morfologici: il gruppo montuoso del Pollino, nella porzione più a nord; verso sud si individuano, da ovest verso est, rispettivamente la Catena Costiera, la valle del Crati ed il Massiccio della Sila (Critelli et al., 1990; Sorriso-Valvo, 1993).

Il gruppo montuoso del Pollino si estende dallo Ionio al Tirreno e, presenta una morfologia articolata con versanti piuttosto acclivi e profonde incisioni fluviali. Il massiccio è costituito in prevalenza da rocce calcaree e dolomitiche, appartenenti alle Unità del Pollino, di San Donato e di Verbicaro (Amodio-Morelli et al., 1976).

La Catena Costiera si estende, in direzione N-S, per circa 100 km, dalla faglia del Pollino al fiume Savuto. Essa rappresenta un alto morfostrutturale limitato ad est dalla valle del Crati e ad ovest dal bacino di Paola. Le sue cime sono superiori ai 1500m s.l.m.

La Catena Costiera è caratterizzata da un paesaggio fortemente controllato dalla tettonica; infatti è dominato dalla presenza di versanti e scarpate di faglia, valli e falesie a controllo strutturale. In particolare la Catena Costiera è limitata, sui due lati, da versanti di faglia modellatisi a partire da strutture tettoniche di tipo normale (Sorriso-Valvo, 1993; Westaway, 1993) che presentano una direzione variabile da N-S a NNO-SSE. Queste faglie sono ritenute responsabili del sollevamento della dorsale a partire da Pliocene superiore (Sorriso-Valvo e Silvester, 1993).

La Catena Costiera nella zona di spartiacque è caratterizzata dalla presenza di lembi residuali di paleosuperfici osservabili, principalmente, a quote variabili tra 1000 m e

1200 m s.l.m. che insistono sia su litotipi cristallino-metamorfici che su rocce sedimentarie altomiocenici.

In questa zona si rilevano, anche, versanti di faglia regolarizzati ed addolciti, con pendenze dell'ordine dei 25 gradi, oltre alla presenza di valli sospese e decapitate a basso gradiente topografico e, quindi, non correlabili all'attuale sistema di drenaggio (Muto, 2005).

I versanti orientali della dorsale sono caratterizzati da versanti di faglia, generalmente, molto acclivi nella parte alta, cedono il passo a morfologie più dolci e collinari nelle parti basse. Ad occidente, sono invece tipiche le morfologie terrazzate sia di origine marina che alluvionale.

Il massiccio della Sila, orientato circa N-S, presenta una forma sub-rettangolare e si estende a nord della stretta di Catanzaro fino alla pianura di Sibari. L'intenso sollevamento tettonico che ha interessato l'*horst* del massiccio Silano, ha esercitato un imponente controllo sulla sua genesi e sulla sua evoluzione morfologica.

Nella porzione centrale il paesaggio è caratterizzato da superfici sommitali a debole pendenza, queste rappresentano ciò che rimane di antiche superfici morfologiche "paleosuperfici", i cui bordi sono stati ampiamente modellati da processi erosionali e gravitativi, innescati dall'aumento dell'energia di rilievo, conseguentemente al sollevamento tettonico quaternario (Parise e Calcaterra, 1999). Un carattere morfoevolutivo di questo settore è dato dagli elevati processi di alterazione fisico-chimica (*weathering*) che hanno subito le rocce cristalline e metamorfiche, in particolare graniti e gneiss. Questi ammassi rocciosi hanno sviluppato un intenso e profondo profilo di alterazione (Carrara e Merenda, 1974; Guzzetta, 1974; Lanzafame e Zuffa, 1976; Critelli e Matano, 1993), contenenti nuclei di roccia non alterata (*boulders*) che possono trovarsi come singoli blocchi isolati o raggruppati, in seguito all'allontanamento della matrice in cui si trovano immersi. (Critelli e Matano, 1993; Le Pera e Sorriso-Valvo, 2000; Scarciglia et al., 2005). Il *boulders* marcano il fatto che la morfologia attuale della Sila rappresenta ciò che rimane di un'antica superficie morfologica (Le Pera e Sorriso-Valvo, 2000).

I versanti, che degradano dalle spianate sommitali fino ai 600 m s.l.m. circa sono acclivi e, spesso rappresentano dei versanti di faglia. I processi denudazionali hanno prodotto valli strette e profonde, specie in corrispondenza delle zone di testata dei bacini di drenaggio.

A quote inferiori ai 600 m, dove affiorano depositi postorogeni, la morfologia è generalmente dolce. Nella fascia pedemontana, in destra orografica rispetto al F. Crati, vi sono numerose conoidi alluvionali. Questi grandi corpi sedimentari, con forma a ventaglio e pendenze blande, sono localizzati alla foce dei fiumi e dei torrenti affluenti del F. Crati e rappresentano, perciò, una delle più importanti ed interessanti forme del paesaggio che caratterizzano quest'area.

La valle del Fiume Crati è una depressione tettonica fortemente asimmetrica, bordata da numerose faglie, si estende da poco più a Sud di Cosenza fino alla piana di Sibari (Lanzafame e Zuffa, 1976; Lanzafame e Tortorici, 1981). La sua disposizione è tale da poter riconoscere un settore più meridionale orientato in posizione assiale rispetto alla catena appenninica, ed uno settentrionale, orientato NE-SO, rappresentato dal bacino di Sibari - Corigliano.

La morfologia fluviale è uno dei caratteri dominanti del bacino del Crati, presenta un corso variabile caratterizzato da un'alta valle, compresa tra Serra Vaccaro (1558 m) e Castiglione Cosentino di forma stretta e con una pendenza del corso d'acqua di 2,63%; una bassa valle con un letto a tratti abbastanza ampio e con una pendenza di 0,29%. (Critelli et al., 1993). Nella bassa valle del fiume Crati la morfologia si addolcisce e le aspre forme dell'alta valle vengono sostituite da forme collinari.

Il riempimento del bacino del Crati raggiunge uno spessore di circa 1500-1600 metri, ed è costituito da sedimenti ghiaiosi, sabbiosi ed argillosi, depositi dal Pliocene all'Olocene. L'attiva incisione ed erosione operata dai corsi d'acqua che drenano i fianchi della Catena Costiera e della Sila, ha creato, una morfologia caratterizzata da valli strette e profonde ad andamento rettilineo. Un altro aspetto, osservabile soprattutto sul fianco sinistro del Crati, è rappresentato dalla struttura a gradinata che si è venuta a creare a causa dei movimenti tettonici, che hanno interessato in vari stadi l'area. Inoltre oltre alla tettonica, hanno contribuito in modo determinante alla conformazione attuale della valle, le oscillazioni climatiche, nonché i movimenti eustatici.

Lungo la valle del Crati sovente si osservano terrazzamenti sia di origine marina che continentale, conoidi alluvionali ed alluvionali/deltizie (Lanzafame e Zuffa, 1976; Carobene e Damiani, 1985; Colella et al., 1987; Sorriso-Valvo et al., 1996).

L'intensa attività tettonica che hanno subito le rocce e i terreni affioranti nella Valle del Crati, associata ad un carattere impulsivo degli agenti atmosferici, ha dato vita alla formazione di coltri regolitiche che hanno favorito lo sviluppo di una forte instabilità dei versanti.

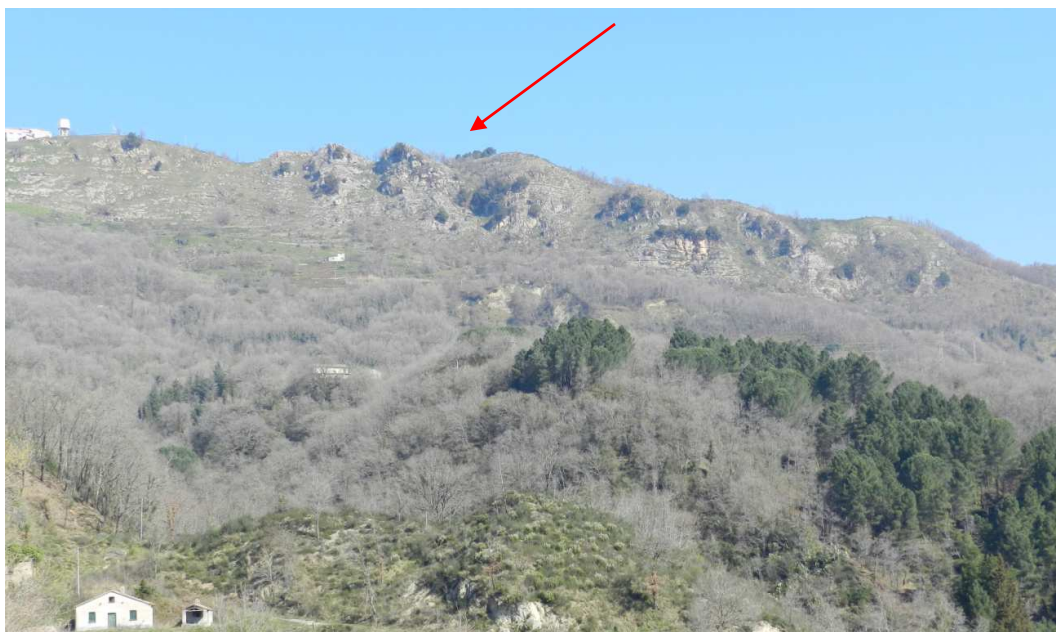
#### **4.1.4 Inquadramento geomorfologico dell'area di studio**

La geomorfologia dell'area di studio è condizionata, essenzialmente, dall'effetto combinato dell'assetto geo-strutturale, dai caratteri litologici e dai processi di erosione e gravitativi di versante. Il ruolo passivo operato dalle discontinuità strutturali e dalle variazioni di erodibilità dei litotipi affioranti condiziona in maniera evidente sia la rete idrografica sia la topografia del rilievo. Essa è caratterizzata principalmente da rilievi di tipo collinare e in alcune zone la morfologia è contraddistinta da forme irregolari, con versanti che presentano evidente variabilità di pendenza, legata sia a fenomeni di morfoselezione che all'attività tettonica (Fig. 4.13).

Nelle aree, laddove affiorano rocce più o meno litoidi i versanti sono caratterizzati da pendenze elevate con profilo prevalentemente rettilineo-convesso e incisi da valli strette e profonde. Un'imponente controllo tettonico dell'area è testimoniato dalla presenza di versanti e scarpate di faglia e valli a controllo strutturale, pertanto non è raro osservare valli asimmetriche che seguono i principali sistemi di faglia. I versanti di faglia sono resi, in molti casi, discontinui dallo sviluppo di fenomeni gravitativi. Inoltre l'attività tettonica che ha interessato l'area ha creato un notevole incremento dell'energia del rilievo ed un approfondimento del reticolo idrografico. Altre forme che possono essere attribuite ai movimenti tettonici, sono discontinuità altimetriche e planimetriche di crinale osservabili nelle zone limitrofe alle strutture tettoniche (Fig. 4.14).



**Figura 4.13** Panoramica dell'area di studio.



**Figura 4.14** Discontinuità altimetriche e planimetriche di crinale.

Inoltre, la tettonica in combinazione con i processi di erosione lineare, in molte zone dell'area di studio, creano una forte energia del rilievo, come mostrato in figura 4.15. L'analisi dell' energia del rilievo porta all'identificazione di un parametro geomorfologico di fondamentale importanza definito come la differenza tra la quota massima e la quota minima in un' area specifica. L'energia di rilievo calcolata su aree di piccole dimensioni può consentire l'individuazione di zone caratterizzate da differente azione erosiva e da approfondimento fluviale più o meno marcato. Questa diversa intensità di erosione può essere indicativa di sollevamenti o abbassamenti differenziali recenti o ancora in atto.

In corrispondenza delle formazioni arenacee e conglomeratiche si osservano versanti con forme aspre caratterizzate da strette creste, crinali e da impluvi con profonde incisioni e dalla tipica forma a “V” (Fig. 4.16).

Nelle aree dove affiorano litologie argillose, poco competenti e più soggette ad instabilità geomorfologica, la morfologia è caratterizzata da frequenti pianori e forme con pendenze blande e le valli sono ampie. I profili di questi versanti, in generale, si presentano molto articolati, indicativi di fenomeni denudazionali di varia natura, infatti si osservano fenomeni erosivi dovuti sia alla gravità che alle acque dilavanti e/o incanalate (Fig. 4.17).

La zona centrale dell'area di studio (Piano del Lago) è risultata dominata da paleosuperfici subpianeggianti (pendenze  $<5^\circ$ ) di origine deposizionale, profondamente dissecate dal locale reticolo idrografico.

Le valli principali sono colmate da depositi alluvionali, talvolta anche terrazzati; lungo alcuni tratti di tali valli si verificano fenomeni di erosione spondale che provocano l'innescò di modesti movimenti in massa lungo i fianchi vallivi. Inoltre, conoidi alluvionali si osservano allo sbocco delle principali valli, le quali in molti casi sono dissecate a causa di diversi cambiamenti del livello di base (Fig. 4.18).

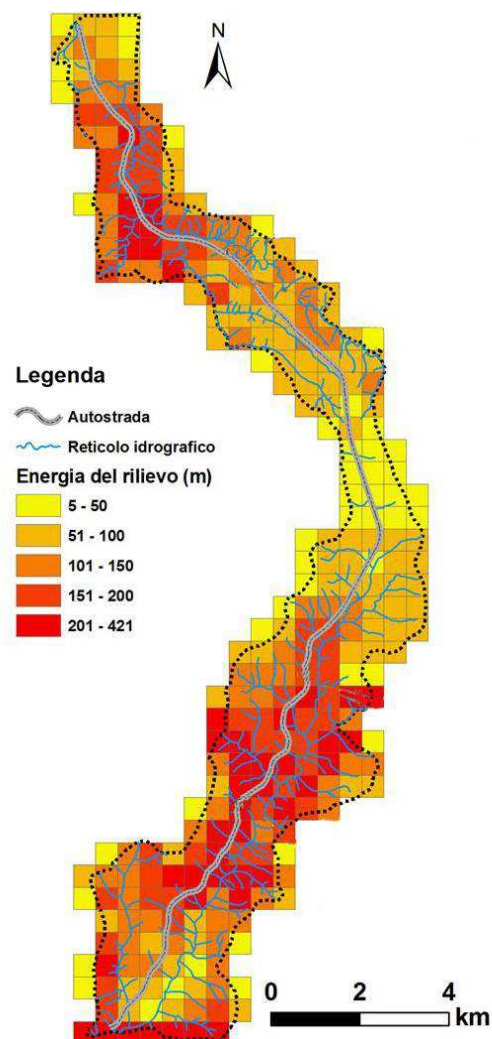


Figura 4.15 Carta dell'energia del rilievo dell'area di studio.



**Figura 4.16** Valle dalla tipica forma a “V”.



**Figura 4.17** Erosione idrica lineare.



**Figura 4.18** Conoide alluvionale allo sbocco di una valle.



Il deflusso delle acque superficiali avviene attraverso una rete idrografica il cui sviluppo è stato influenzato dalle litologie affioranti e dai loro rapporti stratigrafici. Il reticolo idrografico dell'area è rappresentato per gran parte dal sistema del fiume Savuto e, nella parte posta più a nord, da porzioni del sistema drenante del torrente Iassa, affluente del fiume Crati. In generale il reticolo idrografico si presenta con un pattern sub-dendritico, tuttavia in alcuni tratti esso assume un andamento rettilineo e/o ortoclinale a causa del controllo esercitato dalle strutture tettoniche (Fig. 4.19). Singoli tratti dei corsi d'acqua principali e dei loro affluenti assumono orientamenti coincidenti con i più importanti sistemi di faglie dell'area di studio.

Le informazioni riguardanti i caratteri geomorfologici dell'area di studio sono stati sintetizzati in una carta geomorfologica (Fig. 4.20).

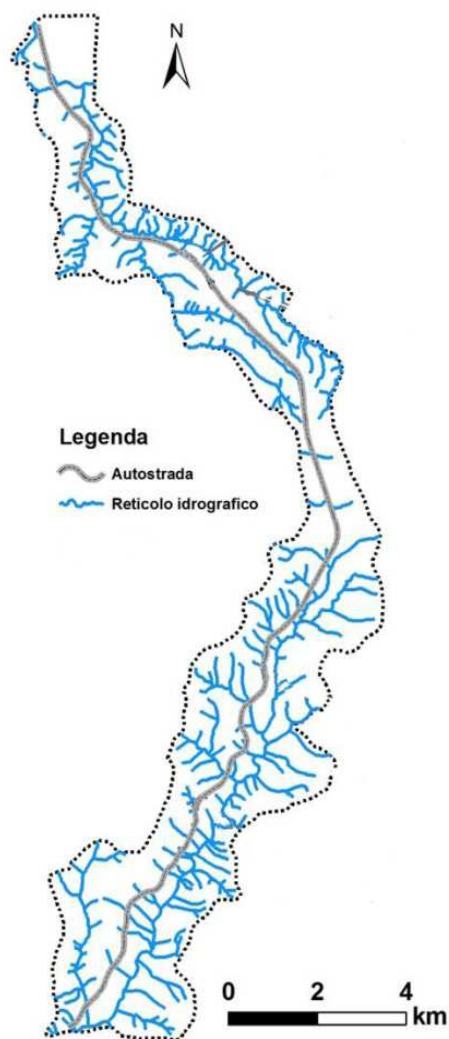


Figura 4.19 Reticolo idrografico dell'area di studio.

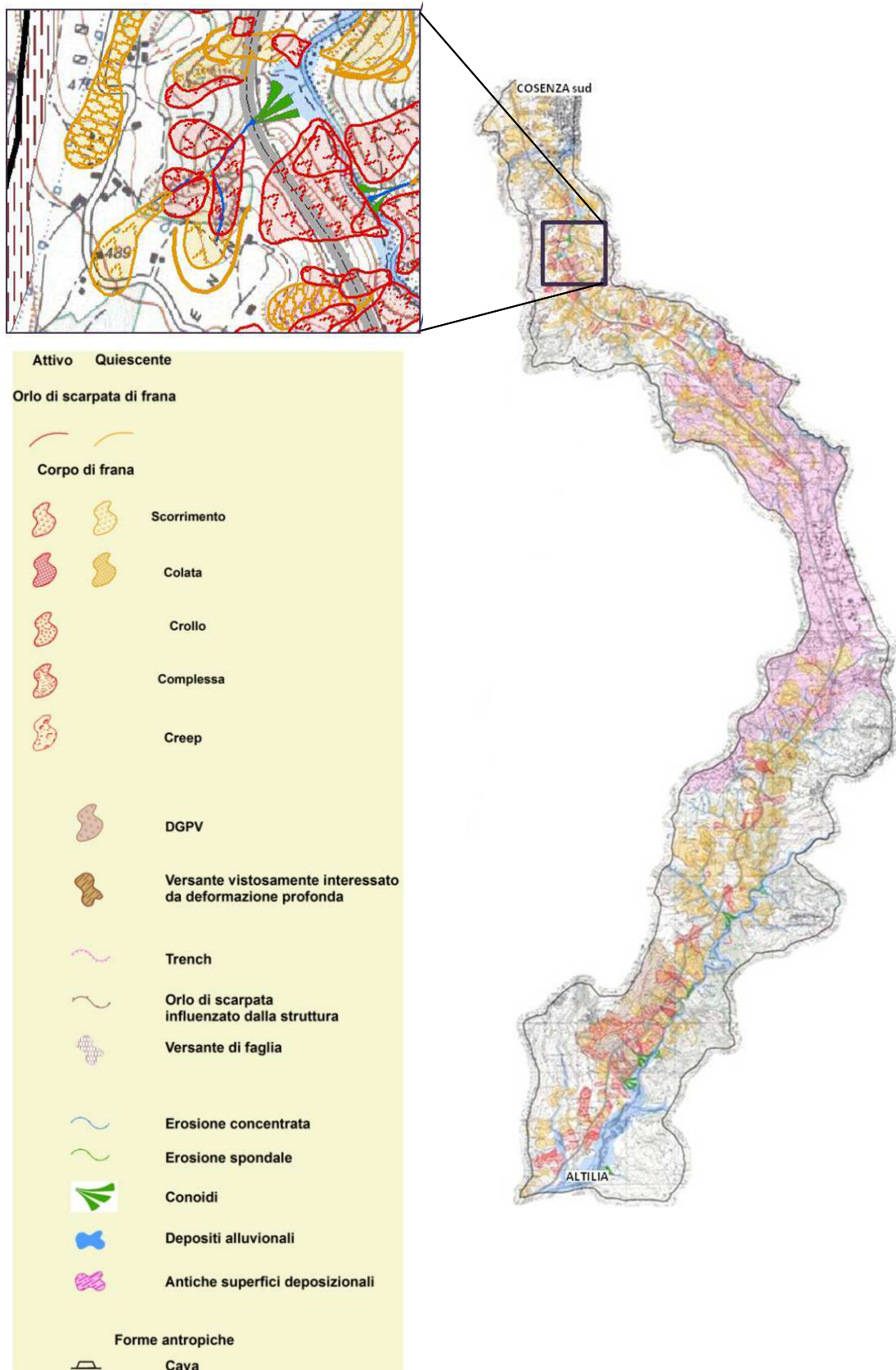


Figura 4.20 Carta geomorfologica dell'area di studio.

## **4.1.5 Aspetti climatici**

### **4.1.5.1 Aspetti climatici della Calabria**

Il clima della Calabria, secondo la classificazione di Kooppen, è di tipo “mediterraneo”(temperato umido), con inverni piovosi ed estati calde e secche (Versace et al., 1989). In particolare, il clima di questa regione presenta delle peculiarità e delle anomalie rispetto al generale contesto dell’Italia meridionale; i fenomeni metereologici osservati alla mesoscala sono, infatti, profondamente influenzati dalla particolare struttura fisica del territorio che favorisce la presenza di marcati contrasti climatici.

Nelle fasce litoranee e sui versanti che si affacciano sul mare si riscontrano estati calde e secche e piovosità concentrata in inverni solitamente miti, tipici del clima “mediterraneo”. Con l’aumentare dell’altitudine e nelle zone più interne il clima può invece essere definito “montano mediterraneo”, con inverni più freddi e piovosi ed estati meno calde.

Per quanto concerne gli elementi climatici, la piovosità media annua in Calabria, pari a 1176 mm/a (valore massimo per l’Italia meridionale), è più alta rispetto alla media annua in Italia (970 mm/a). Nel trimestre Novembre/Gennaio cade, in genere, la metà della precipitazione media annua. Il mese più piovoso risulta essere Dicembre con i suoi 185 mm, pari al 16% dei giorni piovosi, mentre il meno piovoso è Luglio con i suoi 18mm di pioggia, pari al 2% dei giorni piovosi (Caloiero, 1975, Caloiero et al., 1990). La temperatura media mensile oscilla tra -1 (Gennaio) e 18°C (Agosto) secondo i dati relativi alla stazione termopluviometrica di Camigliatello Silano (1260m s.l.m.) in un periodo compreso tra il 1959 ed il 1970 (Caloiero et al., 1990). La massima assoluta (47°) e la minima assoluta (-21°) sono state rispettivamente registrate a Cosenza e Trepidò. Le temperature medie annue della regione variano tra i 18,5° di Melito Porto Salvo e gli 8,7° di Trepidò (bacino del Neto).

In generale la Calabria è stata suddivisa in due principali zone climatiche definite rispettivamente “tirrenica” e “ionica” (Critelli e Gabriele, 1991); la zona tirrenica presenta una piovosità abbastanza alta ed un numero elevato di giorni piovosi, mentre quella ionica è caratterizzata da pochi eventi piovosi che possono essere però molto intensi. Versace et al. (1989), sulla base di analisi statistiche effettuate su alcuni parametri idrologici legati agli eventi massimi annuali di precipitazioni brevi o giornaliere, hanno individuato tre sottozone climatiche omogenee, che si sviluppano

secondo fasce più o meno parallele ai due versanti marini: tirrenica, ionica e centrale. Il versante tirrenico mostra un elevato numero medio di eventi “normali”, mentre il versante ionico è di gran lunga meno piovoso, mentre la zona centrale si identifica per caratteri climatici intermedi, e copre gran parte della valle del Crati, la zona centrale delle Serre e fino alla Piana di Gioia (Critelli e Gabriele, 1991).

#### 4.1.5.2 Aspetti climatici dell’area di studio

L’area di studio, ricadendo all’interno dei bacini del Fiume Crati e del Fiume Savuto, ne presenta i caratteristici aspetti climatici.

Il clima del bacino del Fiume Crati può essere definito continentale, infatti, essendo incastonato tra catene montuose con altezze che oscillano tra i 1500 ed i 2000 metri, non risente dell’influenza del mare. Questo determina elevate escursioni termiche, sia giornaliere che annuali, ed una scarsa ventilazione. Il bacino presenta valori di piovosità e temperatura che rispecchiano la sua disomogeneità morfologica. I valori medi annui di precipitazione si aggirano intorno ai 500 mm alla foce del fiume, fino a superare i 2000 mm a ridosso della Catena Costiera, quindi la media annua di tutto il bacino è di circa 1000 mm. Il bacino del Savuto mostra una precipitazione media annua alta, con valori di precipitazione compresi tra 600 e 1000 mm alle altitudini più basse fino a superare i 1800 mm alle altitudini maggiori (Tabella 4.2). La temperatura media annua oscilla tra 12°C e oltre i 16°C. La Catena Costiera “blocca” le precipitazioni che si spostano dal Mar Tirreno verso l’entroterra, e il clima varia da mediterraneo semi-arido e moderatamente stagionale termico nell’area pedemontana a mediterraneo umido o sub-umido e moderatamente stagionale mesico nella zona montana sotto i 1000-1200 m. Oltre questa altitudine, sia il Massiccio della Sila che la Catena Costiera sono zone umide e mesiche, e la stagione invernale è caratterizzata dall’alternanza di nevicate e forti acquazzoni (Le Pera e Sorriso-Valvo, 2000).

	Temperatura media annua (°C)	Precipitazioni medie annue (mm)
Alta valle	12 - 14	1400 - 1800
Media valle	14 - 16	1000 - 1400
Bassa valle	> 16	600 - 1000

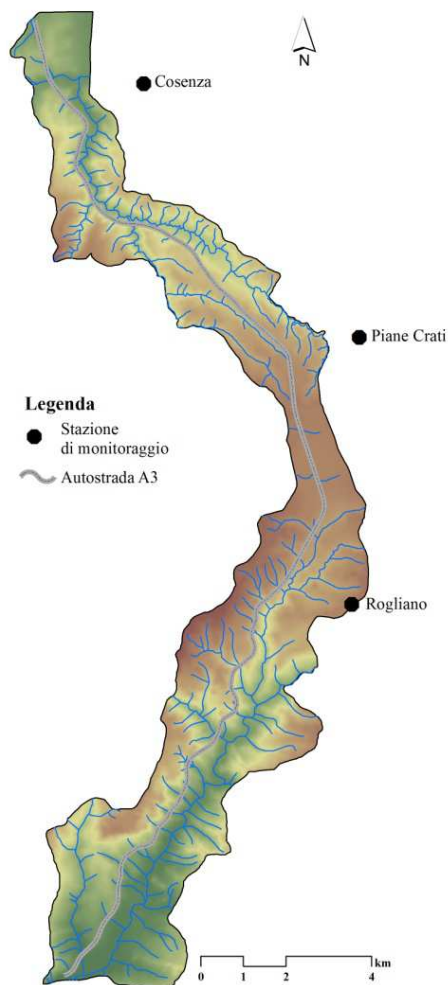
**Tabella 4.2** Caratteristiche climatiche del bacino del Fiume Savuto.

(da Le Pera e Sorriso Valvo, 2000; mod.).

Per l'analisi degli aspetti climatici dell'area di studio sono state utilizzate le registrazioni di temperatura e precipitazione provenienti da tre stazioni di rilevamento (Fig. 4.21). In tabella 4.3 si riportano le stazioni analizzate, specificandone le coordinate nel sistema UTM WGS84 e i tempi di rilevamento per ogni tipologia di dato. Nell'area di studio ricade la stazione di misura di Rogliano. Le informazioni riportate evidenziano scarsa continuità delle serie di dati a disposizione. In particolare, i dati termometrici sono quelli che presentano il maggior numero di dati mancanti.

STAZIONE	QUOTA (m s.l.m.)	N	E	PERIODO RILEVAMENTO	
				Precipitazioni	Temperatura
Cosenza	242	4349372	609126	1916-2015	1925-2015
Piane Crati	583	434341	614177	1951-2001	-
Rogliano	650	4337157	614004	1920-2015	1984-2015

**Tabella 4.3** Caratteristiche delle stazioni di misura.



**Figura 4.21** Stazioni di monitoraggio considerate per l'area di studio.

Dall'elaborazione dei dati pluviometrici relativi alle stazioni precedentemente descritte le precipitazioni sono concentrate (>60%) nel semestre Ottobre-Marzo, e le precipitazioni medie di questi mesi superano ovunque i 95mm. Il mese più piovoso risulta essere dicembre per tutte le stazioni, mentre i mesi meno piovosi sono Giugno per la stazione di Piane Crati e Luglio per Cosenza e Rogliano (Fig. 4.22). Il numero medio mensile di giorni piovosi oscilla tra 11 e 14 nei mesi invernali, mentre varia tra 2 e 4 nei mesi estivi (Fig. 4.23). Le temperature medie annue variano poco nella zona considerata, attestandosi intorno ai 15°C (Fig. 4.24).

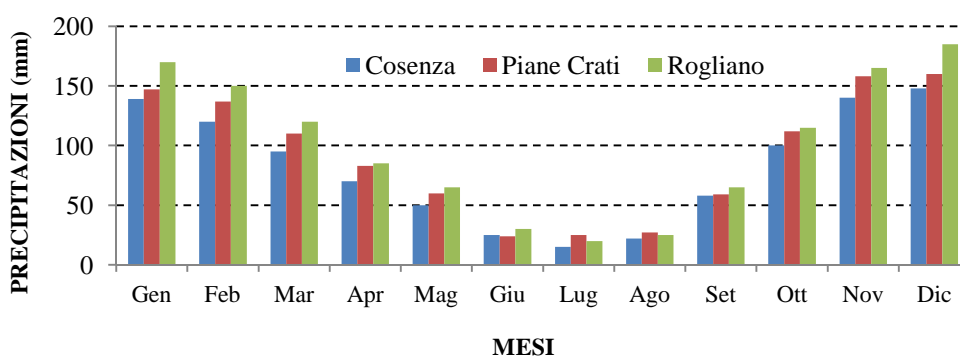


Figura 4.22 Precipitazioni medie mensili delle stazioni analizzate.

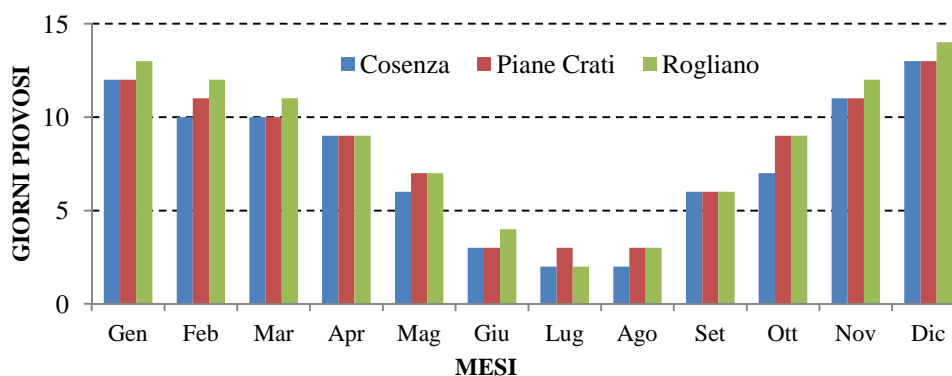


Figura 4.23 Distribuzione media mensile dei giorni piovosi delle stazioni analizzate.

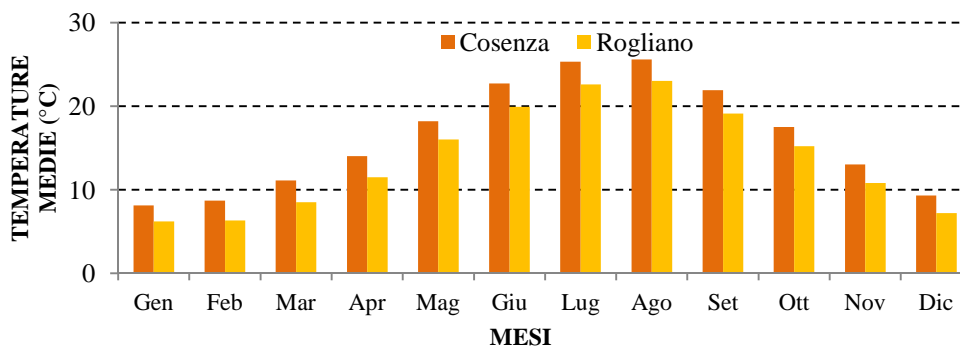


Figura 4.24 Temperature medie mensili delle stazioni termometriche considerate.

## 4.2 Valutazione del rischio

La valutazione del rischio in questa area di studio è stata effettuata mediante l'applicazione di un approccio qualitativo basato sulla sovrapposizione degli elementi esposti al rischio sulla carta della pericolosità spaziale da frana, o suscettibilità da frana (Fig. 4.25).

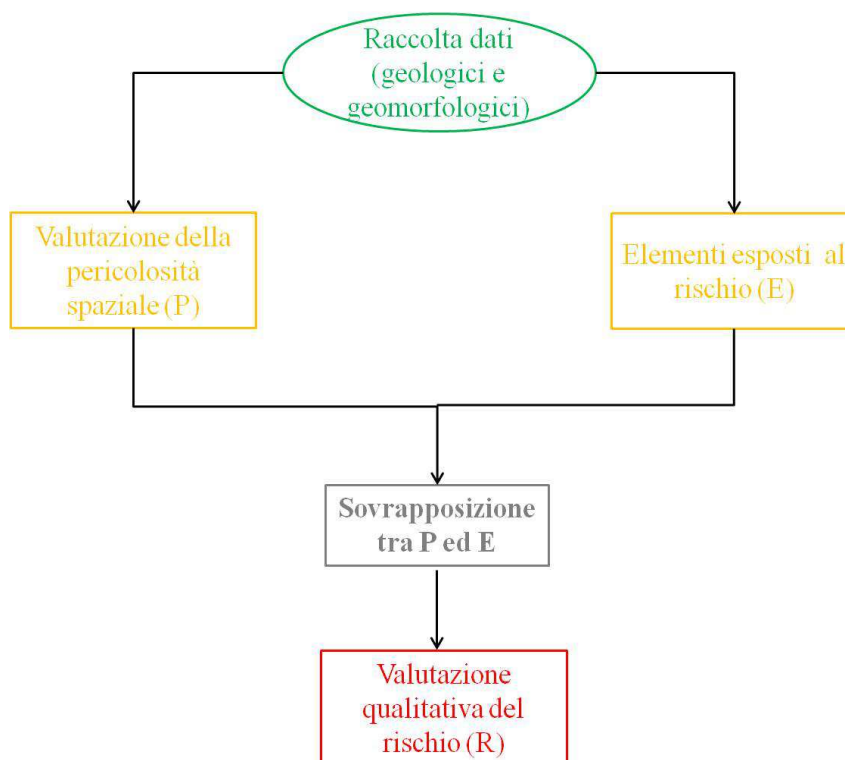


Figura 4.25 Schema metodologico dell'approccio applicato.

### 4.2.1 Raccolta e preparazione dei dati

Questo paragrafo descrive i dati raccolti e la loro preparazione per le analisi effettuate. Le fonti dei dati sono riportati nella tabella 4.4.

DATI	FONTE
Litologie	Carta geologica della Calabria 1:25000 - Rilievi sul campo
Uso del suolo	Corine Land Cover 2012 - Google Earth - Rilievi sul campo
Idrografia	Geoportale della Regione Calabria
Strada	
<i>Digital Elevation Model</i>	Carta topografica I.G.M. 1:25000
Frane	Foto aeree I.G.M. – P.A.I. – I.F.F.I. - Google Earth – Ortofoto - Rilievi sul campo
Autostrada	Ortofoto

Tabella 4.4 Dati utilizzati e loro fonti.

La prima fase del lavoro ha previsto l'acquisizione di tutti i dati pregressi attraverso un'indagine bibliografica sulle caratteristiche geologiche e geomorfologiche dell'area e una ricerca del materiale cartografico ed aero-fotografico disponibile. Per quanto riguarda il materiale aero-fotografico sono stati utilizzati i voli IGM degli anni 1954 e 1990, alla scala approssimativa di 1:33000, e le ortofoto del 2006 della Regione Calabria, alla scala approssimativa di 1:5000.

Il passo successivo ha riguardato il rilevamento geomorfologico, con particolare riferimento ai fenomeni franosi, alle zone di intensa erosione e a tutti quegli elementi geomorfologici che possono rappresentare indizi precursori di fenomeni di instabilità, come orli di scarpata di degradazione o di frana, trincee, contropendenze, scarpate di terrazzo fluviale, coni detritici, coni di *debris-flow*, presenza di fratture di tensione, grandi coltri detritiche e aree interessate da *creep* e/o soliflusso. Il lavoro di rilevamento è stato svolto per i fenomeni gravitativi presenti nell'anno 1955, attraverso analisi foto interpretative, e per quelli presenti allo stato attuale, per mezzo di analisi foto interpretative e successive verifiche di campagna. La scelta di confrontare gli eventi dell'anno 1955 e quelli attuali è stata effettuata per meglio ricostruire l'evoluzione spazio temporale dei processi morfogravitativi nell'area di studio. Nelle due carte inventario dei fenomeni franosi, le frane sono state classificate in base al tipo di movimento e allo stato di attività (Cruden & Varnes, 1996).

Lo scopo della fotointerpretazione è stato quello di identificare e cartografare i movimenti gravitativi, definendone i limiti areali, la tipologia e lo stato di attività (stimato in base al grado di freschezza morfologica). I successivi sopralluoghi sono stati funzionali alla validazione di quanto interpretato da foto aerea, con particolare riferimento alla determinazione della tipologia e dello stato di attività dei dissesti. La campagna di rilevamento è stata integrata da analisi di ortofoto e immagini di Google Earth, e dal confronto con i dati P.A.I. e I.F.F.I.. Il grado di dettaglio del rilevamento ha consentito di restituire i fenomeni franosi in scala 1:10000.

L'attività di campagna ha permesso, inoltre, di individuare e analizzare le caratteristiche geo-ambientali del territorio che rappresentano fattori predisponenti dei fenomeni franosi, quali caratteri litologici, tettonici e morfometrici (pendenze, esposizione, curvature, ecc.), nonché i caratteri relativi all'uso e copertura del suolo. Durante il lavoro di campagna sono state raccolte informazioni sulla presenza di danneggiamenti alla rete autostradale, causate dai fenomeni franosi, valutando anche lo stato di efficienza delle opere di mitigazione presenti (muri di contenimento, gabbionate, briglie



ecc.). I dati reperiti riguardanti le litologie, l'uso del suolo, l'idrografia e le frane sono stati archiviati, gestiti ed elaborati in ambiente GIS, tramite la georeferenziazione e digitalizzazione dei dati. Al fine di ricostruire le caratteristiche topografiche dell'area di studio, sempre in ambiente GIS, è stato prodotto un modello digitale del terreno (DTM) con celle di 20 metri di lato. Il DTM è stato realizzato a partire dalla georeferenziazione e successiva digitalizzazione delle curve di livello e dei punti quotati della cartografia topografica a scala 1:25000. Il DTM ha permesso di ricavare in maniera automatica pendenza, esposizione dei versanti, curvature dei versanti, SPI (*Stream Power Index*) e TWI (*Topographic Wetness Index*).

#### **4.2.1.1 Carta inventario dei fenomeni franosi e analisi dell'inventario**

L'inventario multi-temporale realizzato contiene frane innescate da più eventi in un periodo lungo 60 anni, dal 1954 al 2014, mostrando così la loro evoluzione spazio-temporale (Fig. 4.26).

L'inventario dei fenomeni franosi in quest'area di studio raccoglie i seguenti dati: localizzazione, tipologia e lo stato di attività dei fenomeni franosi. Le analisi per la valutazione della pericolosità spaziale sono state eseguite su due *database* distinti: uno delle frane profonde (con profondità maggiore di 2 m) e uno delle frane superficiali (con profondità minore di 2 m) presenti nell'area di studio. Questa distinzione è stata effettuata in seguito a valutazioni geologiche e geomorfologiche durante i rilievi sul campo, in particolare attraverso una stima della profondità, basata sul tipo di frana e sulla morfologia e geometria dell'area di distacco e dell'area di deposito.

La localizzazione delle frane profonde riporta l'ubicazione, in scala 1:10000 ("inventario a grande scala >1:25000", Guzzetti et al., 2000), della corona di frana (concavità sulla superficie topografica) e della zona di accumulo (convessità sulla superficie topografica). I limiti delle frane verificatesi non molto tempo prima del rilevamento ed in aree non coperte da vegetazione sono stati facilmente riconosciuti dalle foto aeree e durante i rilievi sul campo. Mentre il riconoscimento dei limiti delle frane meno recenti non è stato altrettanto immediato, a causa dell'erosione, della presenza di nuove frane e di locali adattamenti delle frane al nuovo assetto morfologico, che hanno reso il limite tra l'area in frana e il terreno in posto non più netto.

Dallo studio è emerso che l'area di studio è interessata da una diffusa franosità, che condiziona, oltre all'aspetto generale dei versanti, anche la morfologia e la dinamica

della rete idrografica. L'azione morfogenetica generata dai movimenti in massa si registra su gran parte del territorio analizzato; molte frane hanno coinvolto nel tempo insediamenti urbani e/o infrastrutture, provocando ingenti danni e situazioni di rischio elevato (Fig. 4.26).

Sulla base del rilevamento geomorfologico le frane cartografate si manifestano con intensità, meccanismi ed effetti diversi a seconda delle caratteristiche geologiche, litotecniche, geomorfologiche e idrologiche delle formazioni interessate e delle relative coltri pedo-regolitiche. Inoltre, tra le principali cause predisponenti i versanti all'innescò di movimenti in massa c'è da annoverare l'assetto strutturale. Infatti, i terreni sono interessati da una fitta rete di discontinuità causata dalle diverse fasi tettoniche che hanno interessato l'area, scompaginando l'originario assetto geologico e favorendo i processi di alterazione delle rocce, nonché rappresentando vie preferenziali per l'infiltrazione delle acque meteoriche favorendo, pertanto l'instabilità geomorfologica.

Dal rilevamento svolto sono state cartografate 496 frane nel 1954 e 838 frane nel 2014 (Tab. 4.5). Le frane presenti si sviluppano prevalentemente in lunghezze comprese tra poche decine di metri fino a oltre i 650 metri. La superficie media delle frane è di circa 16658 m<sup>2</sup> nell'inventario del 1954, mentre nell'inventario del 2014 la superficie media è di 14.131 m<sup>2</sup> (Tab. 4.6).

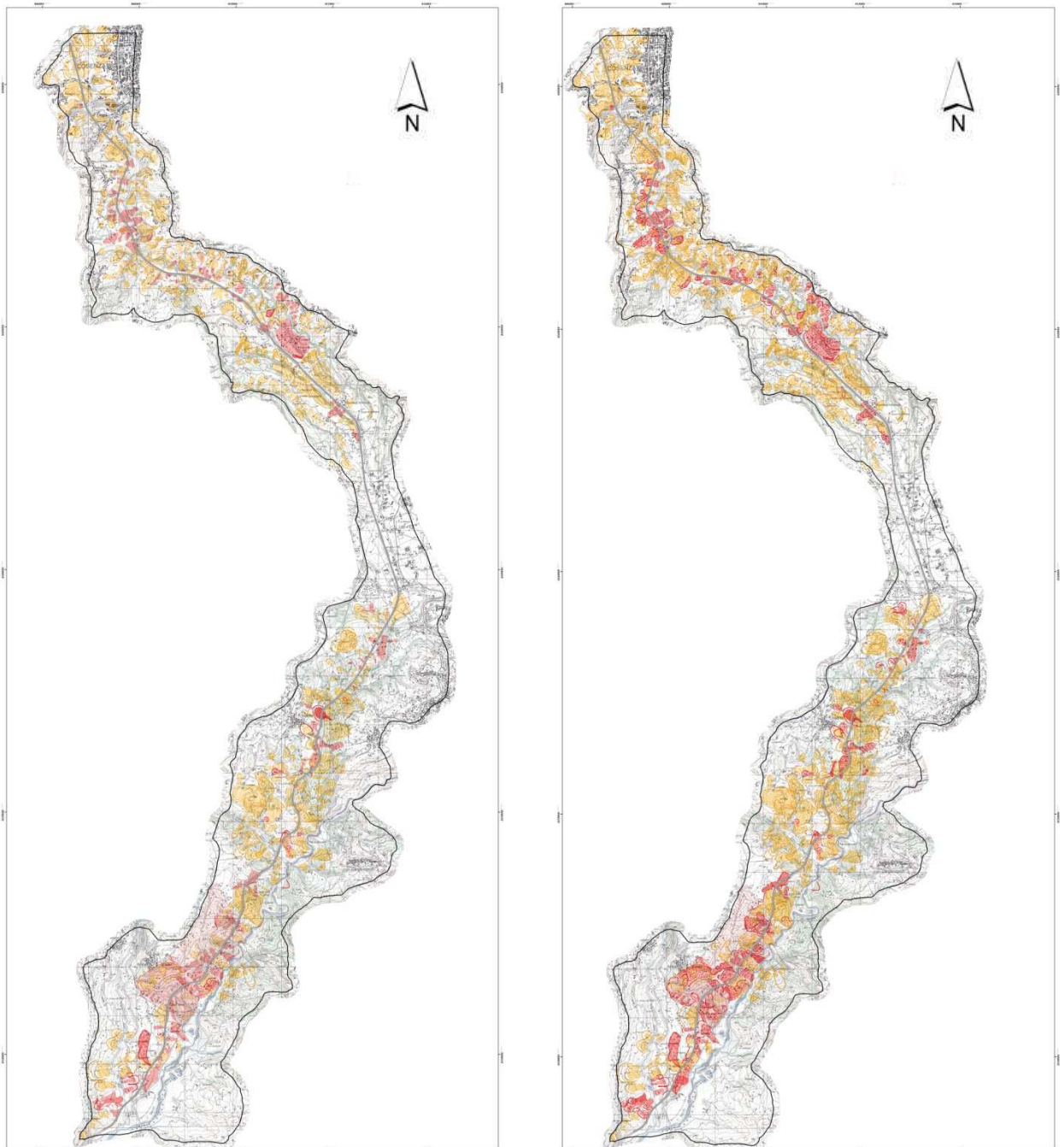
Nella figura 4.27 viene rappresentata la probabilità della frequenza delle frane cartografate in funzione della superficie. Dal grafico si evince che la frequenza delle frane che hanno un'estensione areale modesta e/o piccola è maggiore rispetto a quelle di frane di grandi dimensioni.

	1954	2014	Incremento franosità	
Area (km <sup>2</sup> )	8,3	11,8	3,5	42%
N. frane	496	838	342	69%

**Tabella 4.5 Incremento della franosità tra il 1954 e il 2014.**

	Area in frana (m <sup>2</sup> )		
	min	max	media
1954	1201	631298	16658
2014	886	631298	14131

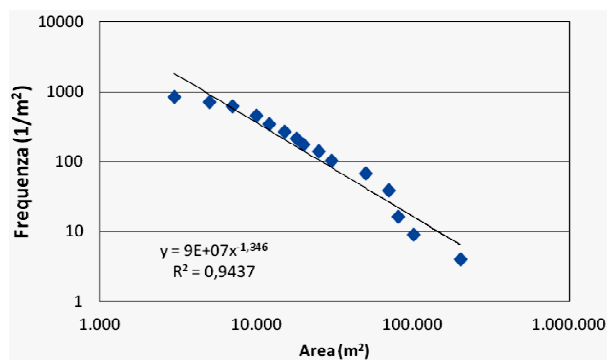
**Tabella 4.6 Area in frana nel 1954 e nel 2014.**



**Legenda**

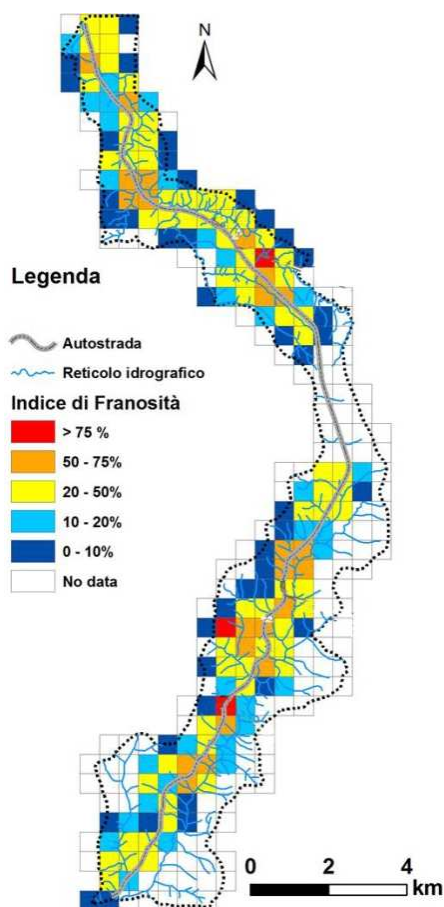
Corona di frana			
Attiva	Quiescente	Inattiva	
Corpo di frana			
			Crollo
			Scorrimento
			Colata
			Frana complessa, scorrimento-colata
			Frana superficiale

**Figura 4.26 Carte inventario dei fenomeni franosi, relative al 1954 e al 2014.**



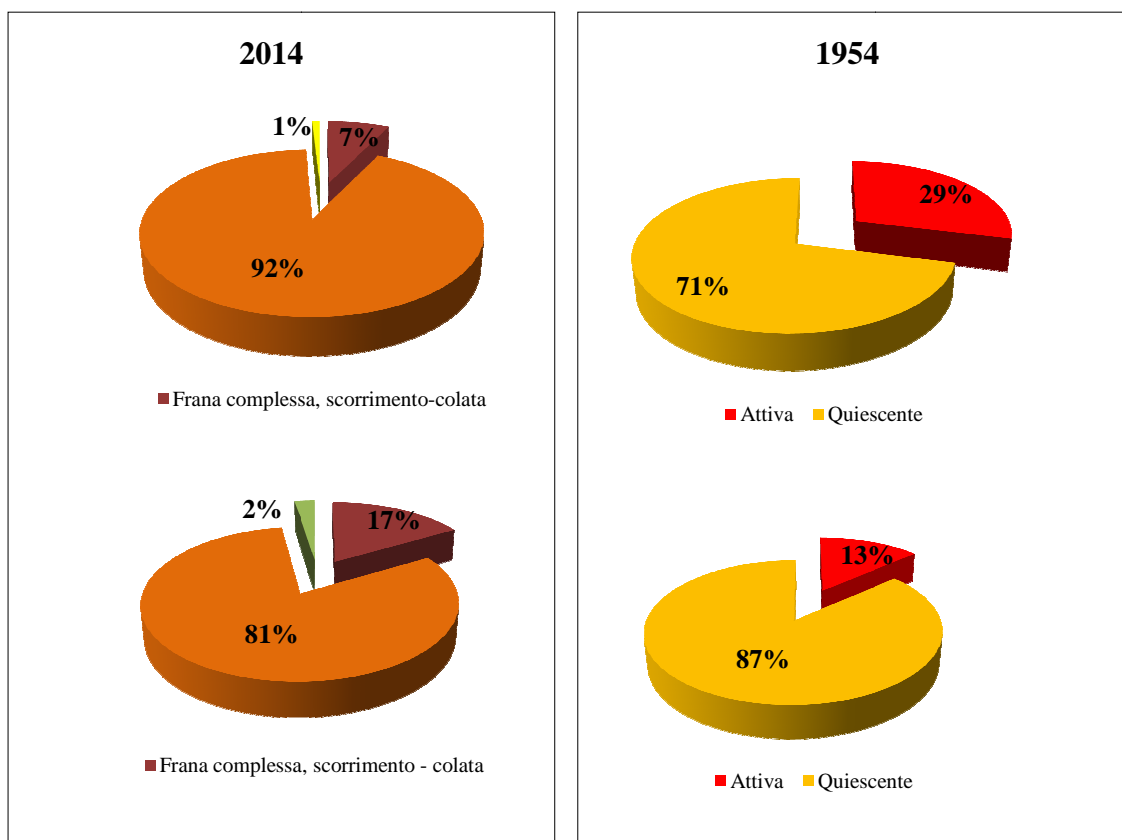
**Figura 4.27** Distribuzione area-frequenza delle frane profonde cartografate nell'area di studio.

Al fine di fornire un quadro spaziale della distribuzione della franosità e di individuare le maggiori concentrazioni di fenomeni franosi all'interno dell'area di studio è stato determinato l'indice di franosità (Fig. 4.28), stimato suddividendo il territorio analizzato secondo una griglia a maglie quadrate di 500 metri di lato; per ogni cella è stato calcolato il rapporto tra superficie in frana e superficie totale. L'elaborato cartografico mette in evidenza che lungo il tratto autostradale, molte aree, sono contraddistinte da un elevato indice di franosità (> 50%) (Fig. 4.28).



**Figura 4.28** Carta dell'indice di franosità nell'area di studio.

La tipologia e lo stato di attività sono stati attribuiti secondo le classificazioni di Cruden e Varnes (1996) e WP/WLI, 1993 (Fig. 4.29). Le tipologie di movimento più frequenti sono risultate essere, in maniera prevalente, le frane di tipo scorrimento per lo più rotazionali e frane complesse, del tipo scorrimento-colata. In subordine sono stati rilevati fenomeni di crollo, principalmente in roccia, e frane di tipo colata. Lo stato di attività è stato definito come quiescente o attivo. Lo stato “attivo” è stato attribuito ai fenomeni franosi in corrispondenza dei quali sono stati osservati durante i rilievi in campagna lesioni al manto autostradale, scarsa vegetazione o terreno smosso (Fig. 4.30, 4.31). Al contrario, ai fenomeni franosi che, al momento dell’indagine in campagna, non hanno mostrato segni di movimenti in atto o recenti, quindi con assenza di terreno smosso, profili regolari, vegetazione con grado di sviluppo analogo a quello delle aree circostanti non in frana è stato attribuito lo stato “quiescente”. Il grafico in figura 4.29 mostra che sono presenti per lo più movimenti gravitativi quiescenti, anche se non sono rare le forme riconducibili a parziali riattivazioni avvenute in tempi recenti.



**Figura 4.29 Percentuali delle tipologie e dello stato di attività dei fenomeni franosi per le carte inventario relative agli anni 1954 e 2014.**



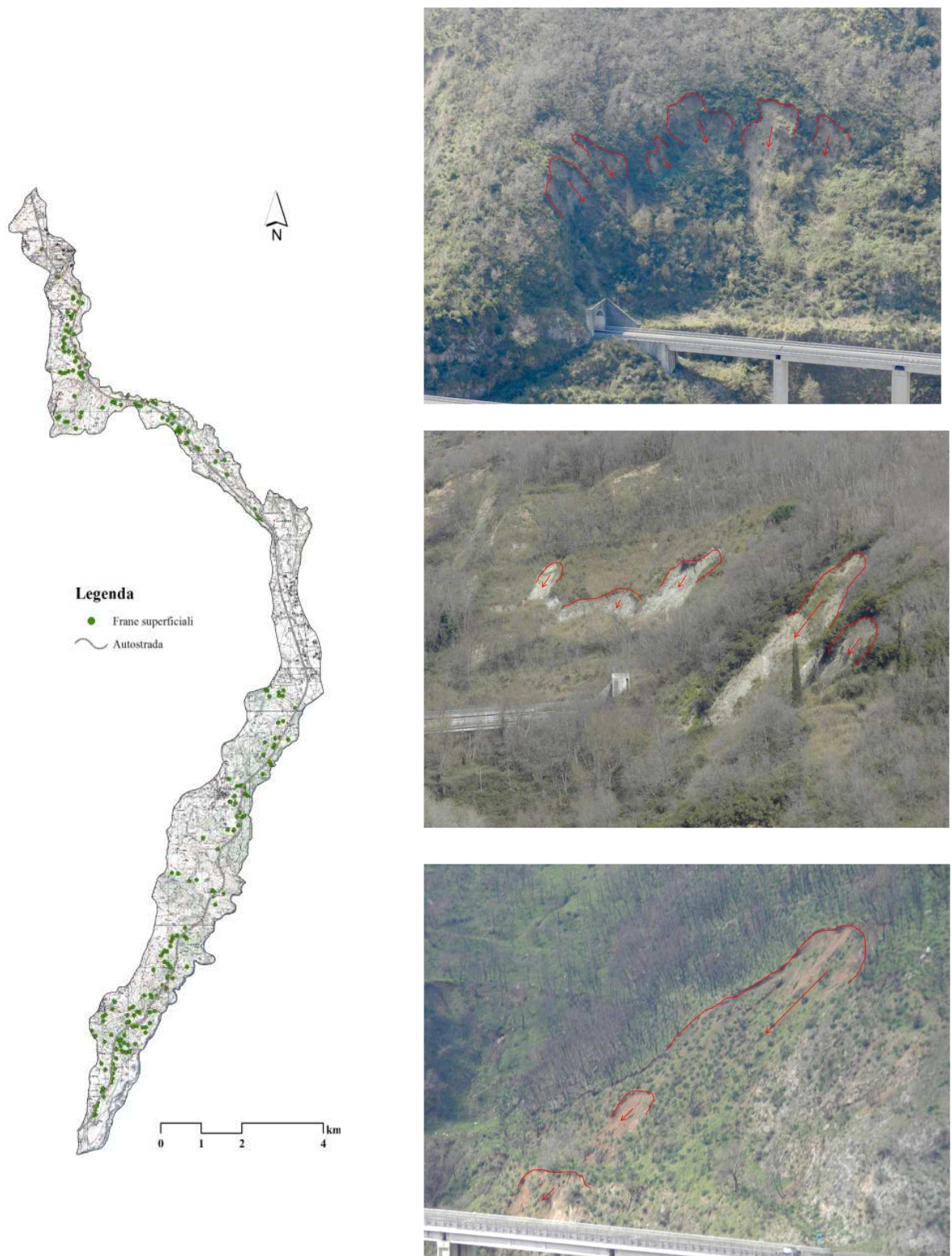
**Figura 4.30 Frana attiva sul lato a monte dell'autostrada.**



**Figura 4.31 Estese fratture longitudinali e trasversali all'interno di una frana attiva localizzata a monte del tracciato autostradale.**

La localizzazione delle frane superficiali riporta la loro ubicazione tramite un punto, poiché non è stato possibile cartografarle alla scala di lavoro utilizzata. Le frane superficiali rilevate sono 214 (Fig. 4.32). Queste frane si innescano per lo più nella zona di contatto con il substrato o tra gli orizzonti pedogenetici. Si attivano in concomitanza di intense precipitazioni meteoriche, in maniera diffusa su tutto il territorio analizzato, con tipologie di movimento che vanno dagli scorrimenti rotazionali e traslativi alle colate di terra/fango e crolli di terra. L'attivazione di questi fenomeni è spesso favorita da processi di erosione torrentizia che causa lo scalzamento al piede del versante e di conseguenza innesca il movimento di versante. Nelle aree caratterizzate da spessa copertura eluvio-colluviale e con pendenze elevate, frequentemente in relazione ad opere antropiche quali scarpate stradali, gradonature dei versanti, ecc., non è raro osservare dissesti di limitata profondità ed estensione. Inoltre, è stato constatato che in

molti casi le frane superficiali si innescano all'interno dei corpi franosi di maggiore entità e rappresentano l'effetto della riattivazione parziale delle stesse.



**Figura 4.32** Carta inventario delle frane superficiali.

#### 4.2.2 Valutazione della pericolosità spaziale o suscettibilità da frana

In questa area di studio, la pericolosità spaziale o suscettibilità da frana è stata valutata attraverso l'applicazione e il confronto di metodologie quantitative, utilizzando i software GIS Ilwis 3.4 (*Integrated Land and Water Information System*) e ArcMap 10. In particolare, per la previsione spaziale delle frane profonde (profondità > 2m) sono stati applicati il metodo di statistica bivariata *Hazard Index* (Rago et al., 2014) e il metodo di statistica multivariata "Analisi Condizionale", mentre per la previsione spaziale delle frane superficiali (profondità < 2m) il metodo di statistica bivariata *Weights of evidence*.

Per le analisi riguardo le frane profonde, in accordo con (Suzen e Doyuran, 2004; Conoscenti et al., 2008; Magliulo et al., 2008), sono state utilizzate le sole scarpate di frana, perchè rappresentative delle zone di innesco dei fenomeni gravitativi. Mentre per le frane superficiali sono stati utilizzati i punti di localizzazione (come spiegato nel paragrafo 4.2.1.1).

Le scarpate di frana e i punti di localizzazione delle frane superficiali sono stati divisi in due gruppi adottando una suddivisione *random* (Chung e Fabbri, 2003). Un gruppo (*training set*, 70%) è stato utilizzato per costruire il modello di stima della suscettibilità, mentre l'altro (*validation set*, 30%) è stato impiegato per valutare la capacità previsionale del modello.

Le analisi statistiche applicate, adottando un approccio oggettivo, hanno confrontato direttamente la distribuzione spaziale delle frane con i fattori predisponenti e/o innescanti, al fine di estendere i risultati alle aree non interessate da fenomeni franosi, ma suscettibili a futura instabilità. Le carte di suscettibilità ottenute mostrano la stima numerica della probabilità che un fenomeno franoso possa verificarsi in una data area; ai valori numerici è stata associata una descrizione qualitativa, che indica un diverso livello di suscettibilità (bassa, bassa, moderata, alta e molto alta).

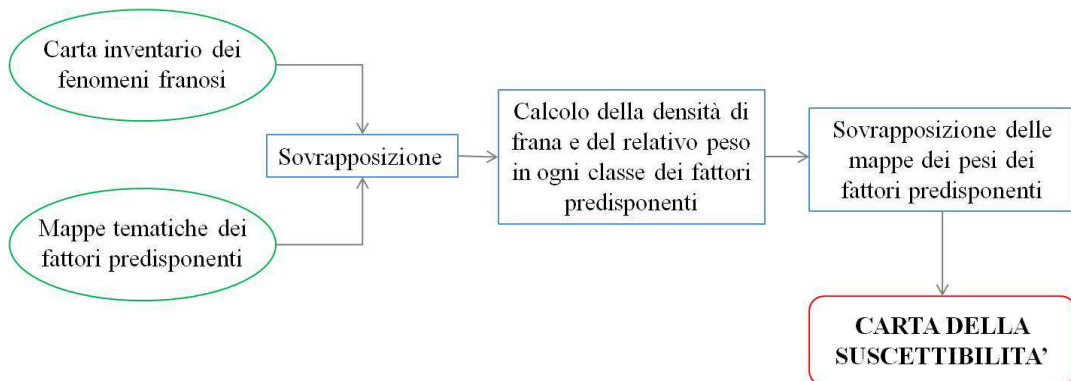
Infine, i metodi applicati sono stati validati e confrontati allo scopo di utilizzare nella valutazione del rischio spaziale la metodologia che meglio predice l'innesco di frane nell'area di studio.

I metodi statistici bivariati confrontano il *dataset* di frane con ognuno dei fattori predisponenti selezionati, trascurando la possibilità che i fattori di franosità possano avere una correlazione reciproca significativa. La procedura standard dell'analisi bivariata può essere sintetizzata nel modo seguente (Fig. 4.33):

- 1) realizzazione della carta inventario dei fenomeni franosi;



- 2) selezione dei fattori predisponenti e realizzazione delle relative mappe tematiche, in cui ogni fattore è suddiviso in un certo numero di classi;
- 3) sovrapposizione della carta inventario dei fenomeni franosi con ogni mappa tematica;
- 4) calcolo della densità delle frane in ogni classe di ogni fattore e dei relativi pesi;
- 5) sovrapposizione delle mappe tematiche pesate e stima della suscettibilità.



**Figura 4.33 Schema logico di sintesi dell'analisi statistica bivariata.**

I metodi statistici multivariati calcolano la pericolosità spaziale considerando l'influenza reciproca tra i diversi fattori predisponenti, ossia tutti i fattori intervengono contemporaneamente ad influenzare la suscettibilità.

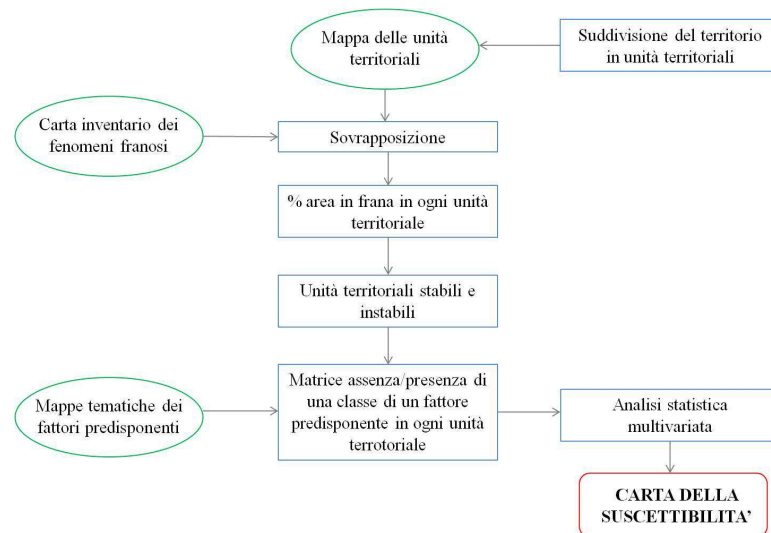
La procedura standard può essere sintetizzata nel modo seguente (Fig. 4.34):

- 1) realizzazione della carta inventario dei fenomeni franosi;
- 2) selezione dei fattori predisponenti e realizzazione delle relative mappe tematiche, in cui ogni fattore è suddiviso in un certo numero di classi;
- 3) suddivisione dell'area analizzata in unità territoriali. Nella bibliografia più recente queste unità sono ricavate in base alle caratteristiche morfometriche dell'area analizzata (Carrara et al., 1991, 1992). Si tratta di porzioni di territorio caratterizzate da un set di condizioni che differiscono dalle unità adiacenti in confini ben definibili. Le unità territoriali possono essere raggruppate in cinque gruppi:
  - *grid-cells*. Il territorio è suddiviso in celle rettangolari di dimensione predefinita che corrispondono all'unità di mappa di riferimento. Ad ogni cella è attribuito un valore per ogni fattore predisponente considerato;
  - *terrain-units*. Il territorio è suddiviso in elementi territoriali che differiscono per materiali, forme e processi e che riflettono le differenze geologiche e geomorfologiche;

- *unique-condition units*. Implica la suddivisione dei fattori predisponenti in un numero significativo di classi. Dalla sovrapposizione degli elementi si ottengono dei domini caratterizzati da una serie di combinazioni dei parametri predisponenti tali da differire dai domini limitrofi attraverso limiti ben definiti;
- *slope-units*. Sono ricavate direttamente dal DTM sulla base degli elementi morfologici che caratterizzano un versante, in particolare il reticolo idrografico e le linee spartiacque;
- *topographic units*. Sono derivabili dalla ulteriore suddivisione delle *slope-units* considerando le linee di flusso.

La scelta del tipo di unità territoriale è legata al numero di fattori considerati nell'analisi, al tipo di frana, alla disponibilità e qualità dei dati, ecc;

- 4) sovrapposizione della carta inventario delle frane con quella delle unità territoriali;
- 5) classificazione delle unità territoriali in elementi stabili o instabili sulla base della percentuale di area in frana. Il valore soglia di questa percentuale dovrebbe essere stabilito tenendo conto della densità dell'area in frana. In aree in cui la densità delle frane è alta, si dovrebbe assumere come valore soglia una percentuale relativamente alta in modo da stabilire due gruppi statisticamente significativi. Tuttavia, bisogna anche considerare delle densità relativamente basse quando queste rappresentano un rischio per le attività umane (Carrara, 1983);
- 6) creazione di una matrice assenza/presenza di una determinata classe di un dato fattore predisponente in ogni unità territoriale mediante combinazione delle mappe tematiche con ogni unità territoriale;
- 7) analisi statistica multivariata. Le analisi statistiche più utilizzate sono le analisi discriminanti (Baeza e Corominas, 1996; Carrara, 1983; Carrara et al. 1990) e le regressioni multiple (Bernknopf et al., 1988; Jade e Sarkar, 1993; Wieczorek et al., 1996), spesso utilizzate in parallelo nello stesso progetto. In generale è preferibile utilizzare le analisi discriminanti con variabili continue, mentre l'analisi regressiva con variabili nominali (Clerici e Dall'Olio, 1995);
- 8) riclassificazione delle unità territoriali sulla base dei risultati ottenuti e suddivisione del territorio in classi di suscettibilità.



**Figura 4.34** Schema logico di sintesi dell'analisi statistica multivariata.

#### 4.2.2.1 Fattori predisponenti

Per la valutazione della pericolosità spaziale in questa area di studio sono stati scelti e utilizzati nelle analisi 11 fattori predisponenti; la tabella 4.7 elenca i parametri scelti e il loro significato.

FATTORI	SIGNIFICATO
Litologia	Variazione dei materiali affioranti
Uso del suolo	Influenza degli aspetti antropici
Distanza dalle faglie	Variazione dell'energia del rilievo e delle caratteristiche geomeccaniche
Pendenza	Velocità del flusso sub-superficiale
Esposizione dei versanti	Evapo-traspirazione
Curvatura	Direzione del flusso dell'acqua
SPI	Potere erosivo del flusso idrico
TWI	Contenuto di acqua del suolo
LS	Deflusso idrico lungo i versanti
Energia del rilievo	Azione erosiva delle acque
Tessitura dei suoli	Infiltrazione dell'acqua

**Tabella 4.7** Fattori predisponenti la franosità.

Per l'analisi della suscettibilità per le frane profonde sono stati impiegati i parametri: litologia, uso del suolo, distanza dalle faglie, pendenza, esposizione dei versanti, *Stream Power Index* (SPI) e curvatura dei versanti (Fig. 4.35). I fattori predisponenti sono stati utilizzati nelle analisi di suscettibilità come *raster*, con cella 20x20 m. Mentre nell'analisi della suscettibilità per le frane superficiali sono stati utilizzati i parametri: litologia, uso del suolo, pendenza, esposizione dei versanti, *Stream Power Index* (SPI), *Topographic Wetness Index* (TWI), *Length slope* (LS), curvatura dei versanti, energia del rilievo e tessitura del suolo (Fig. 4.36). I fattori predisponenti sono stati utilizzati nell'analisi di suscettibilità come *raster*, con cella 5x5 m.

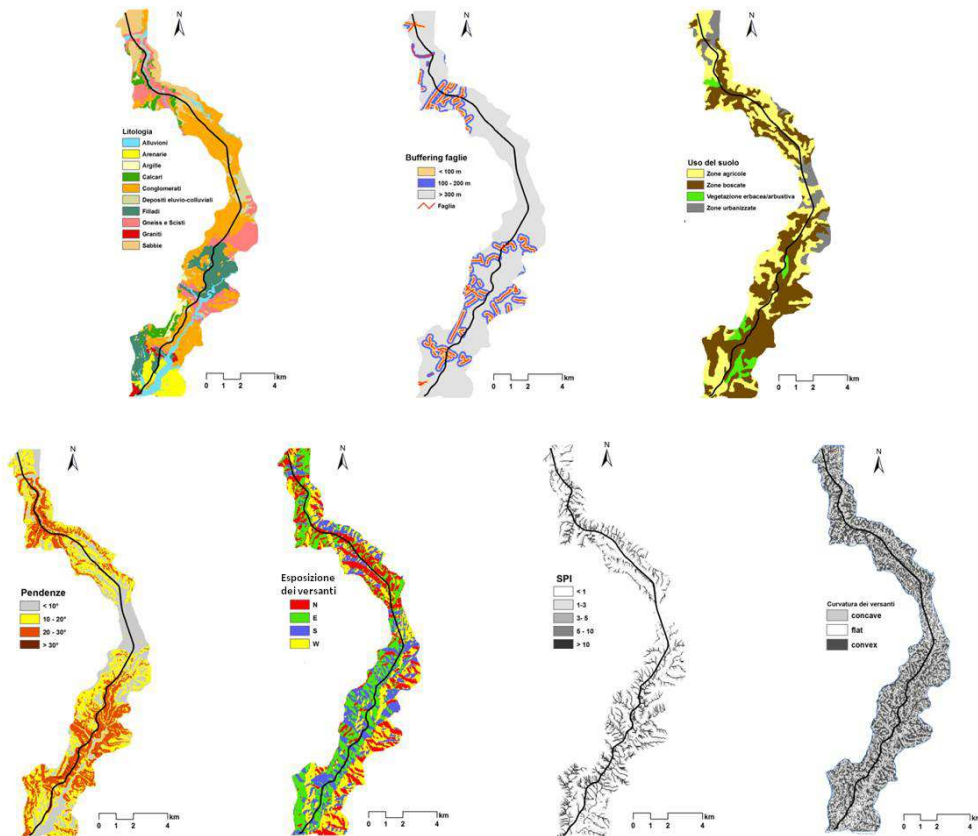


Figura 4.35 Fattori predisponenti utilizzati nell'analisi di suscettibilità delle frane profonde.

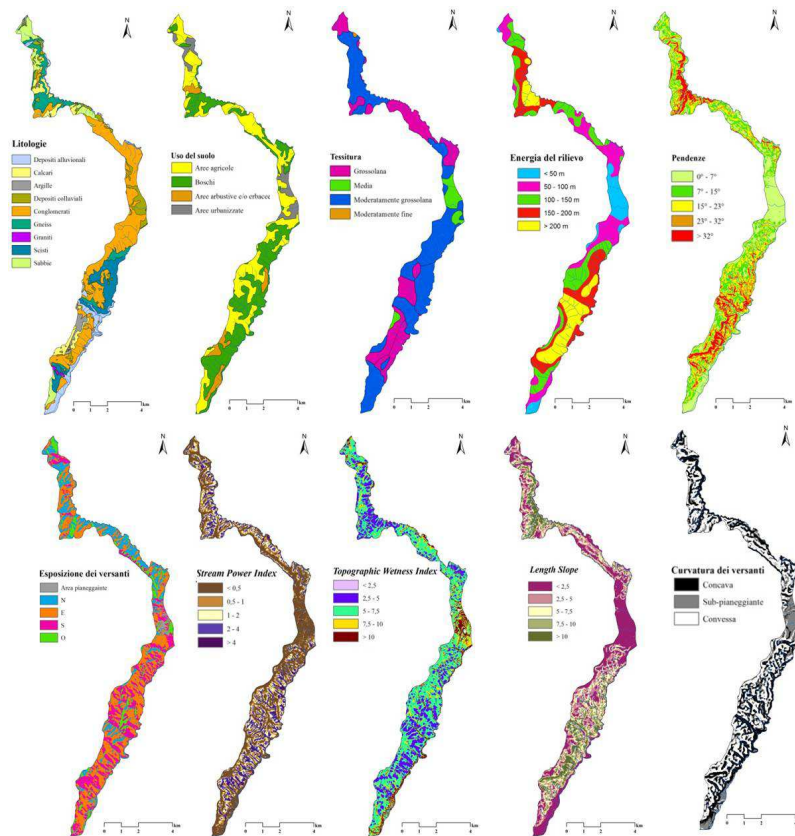


Figura 4.36 Fattori predisponenti utilizzati nell'analisi di suscettibilità delle frane superficiali.

#### 4.2.2.2 Metodo “*Hazard Index*”

Il metodo quantitativo di statistica bivariata “*Hazard index*” (Van Westen, 1993, 1997) consiste nell’assegnare un “peso” a ciascun parametro segnalato come fattore predisponente (Amanti et al., 1992) e si basa sul teorema di *Bayes* (Morgan, 1968), secondo il quale ciascuna “frequenza” può essere utilizzata per calcolare le probabilità del verificarsi di un evento franoso futuro (Carrara et al., 1995). Per “frequenza” (o densità) si intende, ad esempio, il rapporto tra le aree realmente in frana per una data classe (es. pendenze comprese tra 10 - 15°) e l’area della classe stessa.

Quindi l’aspetto fondamentale è costituito dal raffronto tra le varie mappe tematiche e la carta della distribuzione delle frane.

Van Westen (1993), ha proposto che il “peso” per ogni classe dei fattori predisponenti (esempio: litologia, pendenze, uso del suolo ecc.) sia definito dal logaritmo naturale della densità delle frane nella classe in esame, diviso la densità di tutte le frane nell’intera area di studio. Il metodo, dunque, è basato sull’applicazione della seguente formula:

$$W_i = \ln \left( \frac{DensClass}{DensMap} \right) = \ln \left( \frac{\frac{Area (S_i)}{Area (N_i)}}{\frac{\sum Area (S_i)}{\sum Area (N_i)}} \right)$$

Dove  $W_i$  è il peso di una classe di un fattore predisponente,  $Densclas$  è la densità di frana nella classe esaminata,  $Densmap$  è la densità di frana nell’intera area di studio,  $Area (S_i)$  è l’area contenente frane in una classe,  $Area (N_i)$  è l’area totale di una classe,  $\sum Area (S_i)$  è l’area totale in frana nell’area di studio,  $\sum Area$  è l’area totale dell’area di studio.

Ciascuno dei fattori predisponenti viene considerato una variabile spaziale indipendente nel determinare la distribuzione dei dissesti, mentre le frane rappresentano le variabili dipendenti. I metodi bivariati asseriscono che le variabili indipendenti non siano correlate tra loro, e che abbiano la stessa influenza sul verificarsi dei dissesti.

La correlazione statistica della carta inventario delle frane con la carta di un fattore predisponente produce una tabella che viene utilizzata per calcolare la densità delle frane per ogni classe. Una standardizzazione dei valori di densità è ottenuta mettendoli in relazione con la densità di frana dell’intera area. La relazione può essere ottenuta per divisione o sottrazione. Nell’applicazione eseguita, la densità di frana delle classi è stata divisa per la densità di frana dell’intera mappa. Successivamente si calcola il peso di ogni parametro  $W_i$ . Il logaritmo naturale è usato per dare un peso negativo quando la

densità di frana è più bassa del normale, e positivo quando è più alta del normale. La carta di suscettibilità è ottenuta combinando le carte dei pesi di ogni fattore predisponente. Il metodo è sintetizzato nella figura 4.37.

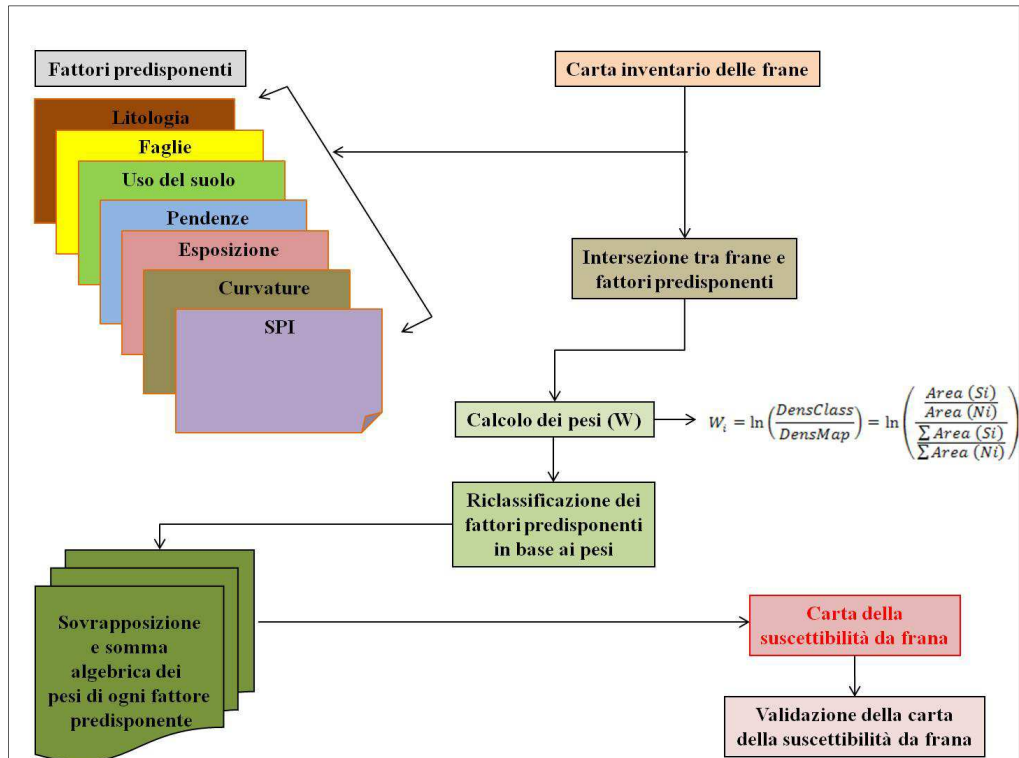


Figura 4.37 Schema del metodo *Hazard Index* per la valutazione della suscettibilità da frana.

La previsione spaziale mediante questo metodo è stata effettuata per gli scorrimenti, le frane complesse (del tipo scorrimento-colata) e sul totale delle frane, mediante l'utilizzo del *software* GIS Ilwis 3.4. I *database* delle scarpate di frana, sono stati suddivisi in due *dataset* in modo random (Chung e Fabbri, 2003), uno per costruire il modello (*training set*), costituito dal 70% delle scarpate, e uno per validare il metodo (*testing set*), costituito dal restante 30% delle scarpate.

I fattori predisponenti scelti per l'analisi, sono stati organizzati ciascuno in un livello informativo a se stante, suddivisi in classi e convertiti in formato *grid* con celle quadrate di 40 m di lato.

Per ogni fattore predisponente, è stata calcolata l'area totale di ciascuna classe (Area (Ni)) e l'area in frana in ogni classe (Area (Si)), utilizzando le scarpate del *training set*. Il parametro "*DensClass*", che indica la densità delle scarpate di frana nella classe in esame, è stato ottenuto dividendo, per ogni classe, i rispettivi valori di Area (Si) su Area (Ni). Il parametro "*DensMap*" è stato, invece, ottenuto dal rapporto fra l'area totale

delle scarpate di frana del *training set* e l'area totale dell'area di studio. Infine, come indicato nella formula, dal logaritmo naturale del rapporto tra *DensClass* e *DensMap* è stato calcolato il "peso" ( $W_i$ ) delle classi di ciascun fattore predisponente. La tabella 4.8 riporta i fattori predisponenti prescelti, la loro suddivisione in classi e tutti i termini necessari alla determinazione del valore dei pesi  $W$  per ogni classe.

Il logaritmo naturale impone che siano assegnati valori negativi dove la densità di frane è bassa e valori positivi dove la densità è alta (Zêzere et al., 2004).

Per meglio evidenziare l'andamento dei pesi  $W$ , ottenuti dall'incrocio fra la distribuzione dei processi franosi e le classi di ogni fattore predisponente nella figura 4.38, si riportano gli istogrammi di distribuzione dei pesi  $W$  per ogni fattore predisponente nell'analisi di suscettibilità degli scorrimenti, delle frane complesse e delle frane totali. Analizzando dettagliatamente i grafici si può constatare quali sono i parametri che maggiormente incidono sull'instabilità geomorfologica dei versanti dell'area studiata.

Determinati i pesi  $W$  per ciascuna classe di ogni fattore predisponente, le carte tematiche dei fattori predisponenti sono state sommate ottenendo così la relativa carta di suscettibilità da frana (Fig. 4.39).

Il campo di variabilità del peso  $W$  è stato suddiviso in quattro classi a cui corrisponde un diverso livello di suscettibilità (molto bassa, bassa, media, alta e molto alta) (Fig. 4.40). Al fine di rendere più oggettiva possibile l'individuazione dei valori soglia delle classi, è stato utilizzato un algoritmo di calcolo computerizzato nel *software* GIS, l'algoritmo di *Jenks* (Jenks, 1989). Il criterio dei *natural breaks* di Jenks fissa i limiti tra due classi in corrispondenza di discontinuità o "salti" nella distribuzione di frequenza.

FATTORE PREDISPOSIZIONE	CLASSI	AREA CLASSE	AREA IN FRANA NELLA CLASSE			DensClass			DensMap			W		
			Scorr.	Compl.	Tot.	Scorr.	Compl.	Tot.	Scorr.	Compl.	Tot.	Scorr.	Compl.	Tot.
Litologie	Dep. eluvio-colluviali	10640000	699200	240000	939200	0,0657	0,0226	0,0883	0,07	0,02	0,09	-0,0632	0,1203	-0,0194
	Alluvioni	7278400	260800	75200	336000	0,0358	0,0103	0,0462	0,07	0,02	0,09	-0,6697	-0,6605	-0,6676
	Graniti	2416000	27200	35200	62400	0,0113	0,0146	0,0258	0,07	0,02	0,09	-1,8274	-0,3168	-1,2484
	Calcari	8216000	297600	110400	408000	0,0362	0,0134	0,0497	0,07	0,02	0,09	-0,6588	-0,3977	-0,5946
	Gneiss e scisti	21472000	1638400	321600	1960000	0,0763	0,0150	0,0913	0,07	0,02	0,09	0,0862	-0,2892	0,0141
	Conglomerati	45348800	3432000	801600	4233600	0,0757	0,0177	0,0934	0,07	0,02	0,09	0,0780	-0,1235	0,0366
	Argille	4968000	41600	3200	44800	0,0084	0,0006	0,0090	0,07	0,02	0,09	-2,1234	-3,4356	-2,3006
	Sabbie	14476800	1256000	336000	1592000	0,0868	0,0232	0,1100	0,07	0,02	0,09	0,2146	0,1488	0,2004
Uso del suolo	Filladi	14395200	1684800	344000	2028800	0,1170	0,0239	0,1409	0,07	0,02	0,09	0,5140	0,1780	0,4485
	Arenarie	5040000	284800	123200	408000	0,0565	0,0244	0,0810	0,07	0,02	0,09	-0,2141	<b>0,2007</b>	-0,1059
	Zone agricole	60025600	3523200	1259200	4782400	0,0587	0,0210	0,0797	0,07	0,02	0,09	-0,1761	0,0477	-0,1219
	Veg. erbacea/arbustiva	5819200	376000	75200	451200	0,0646	0,0129	0,0775	0,07	0,02	0,09	-0,0801	-0,4367	-0,1491
Distanza dalle faglie	Bosco	58505600	5472000	1035200	6507200	0,0935	0,0177	0,1112	0,07	0,02	0,09	0,2898	-0,1225	0,2117
	Zone urbanizzate	9910400	252800	20800	273600	0,0255	0,0021	0,0276	0,07	0,02	0,09	-1,0095	-3,7584	-1,1817
	< 100 m	19419200	1251200	345600	1596800	0,0644	0,0178	0,0822	0,07	0,02	0,09	-0,8029	-0,1167	-0,0903
Pendenze	100 – 200 m	17640000	1075200	356800	1432000	0,0610	0,0202	0,0812	0,07	0,02	0,09	-0,1384	0,0113	-0,1032
	> 200 m	97203200	7297600	1688000	8985600	0,0751	0,0174	0,0924	0,07	0,02	0,09	0,0700	-0,1412	0,0268
	< 10°	42286400	1299200	475200	1774400	0,0307	0,0112	0,0420	0,07	0,02	0,09	-0,8235	-0,5765	-0,7631
Esposizione	10° - 20°	53624000	3500800	1046400	4547200	0,0653	0,0195	0,0848	0,07	0,02	0,09	-0,0697	-0,0246	-0,0595
	20° - 30°	37859200	4652800	857600	5510400	0,1229	0,0227	0,1455	0,07	0,02	0,09	0,5629	0,1245	0,4807
	> 30°	491200	171200	11200	182400	0,3485	0,0228	0,3713	0,07	0,02	0,09	<b>1,6052</b>	0,1311	<b>1,4173</b>
Curvatura dei versanti	N	33257600	1569600	526400	2096000	0,0472	0,0158	0,0630	0,07	0,02	0,09	-0,3942	-0,2340	-0,3563
	E	39475200	3817600	816000	4633600	0,0967	0,0207	0,1174	0,07	0,02	0,09	0,3232	0,0330	0,2656
	S	29588800	2601600	681600	3283200	0,0879	0,0230	0,1110	0,07	0,02	0,09	0,2280	0,1413	0,2094
	O	31939200	1635200	366400	2001600	0,0512	0,0115	0,0627	0,07	0,02	0,09	-0,3128	-0,5558	-0,3619
SPI	Concava	58220800	4867200	1147200	6014400	0,0836	0,0197	0,1033	0,07	0,02	0,09	0,1775	-0,0149	0,1379
	Sub-pianeggiante	16932800	1064000	307200	1371200	0,0628	0,0181	0,0810	0,07	0,02	0,09	-0,1080	-0,0975	-0,1056
	Convessa	59107200	3692800	936000	4628800	0,0625	0,0158	0,0783	0,07	0,02	0,09	-0,1137	-0,2335	-0,1391
SPI	<1	93652800	5254400	1481600	6736000	0,0561	0,0158	0,0719	0,07	0,02	0,09	-0,2213	-0,2344	-0,2242
	1 - 3	15604800	1686400	326400	2012800	0,1081	0,0209	0,1290	0,07	0,02	0,09	0,4343	0,0448	0,3599
	3 - 5	6683200	816000	172800	988800	0,1221	0,0259	0,1480	0,07	0,02	0,09	0,5563	<b>0,2568</b>	<b>0,4971</b>
	5 - 10	3467200	427200	72000	499200	0,1232	0,0208	0,1440	0,07	0,02	0,09	<b>0,5654</b>	0,0376	0,4698
	> 10	14851200	1440000	337600	1777600	0,0970	0,0227	0,1197	0,07	0,02	0,09	0,3258	0,1280	0,2851

**Tabella 4.8 Valori dei pesi calcolati per i fattori predisponenti utilizzati nell'analisi di suscettibilità per gli scorrimenti ("scorr."), per le frane complesse ("compl") e per la totalità delle frane (tot.). In grassetto i pesi delle classi maggiormente influenti, in corsivo quelli che influiscono meno.**



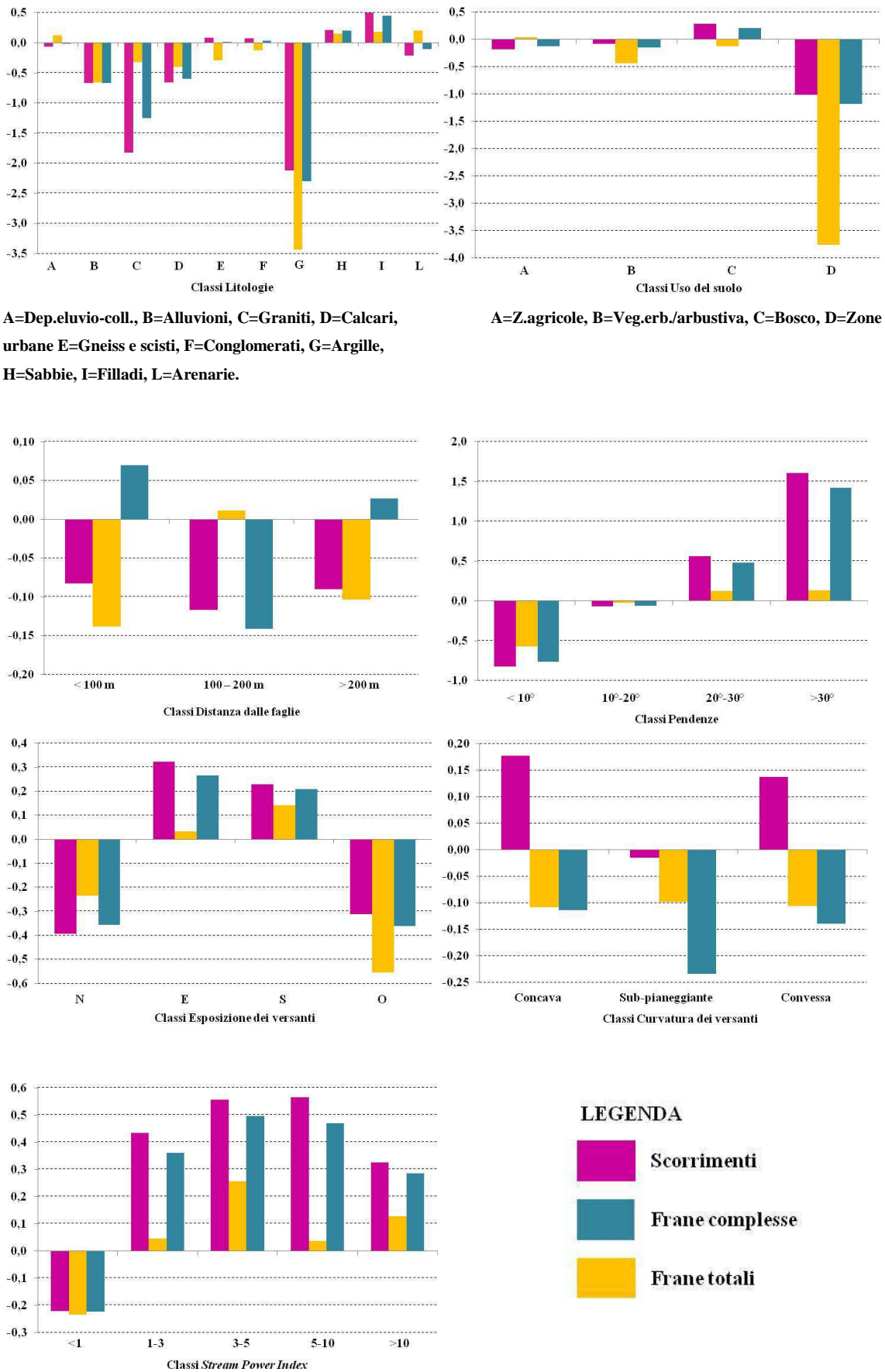


Figura 4.38 Istogrammi della distribuzione dei pesi relativi agli scorrimenti, alle frane complesse e alle frane totali per ogni classe dei fattori predisponenti.

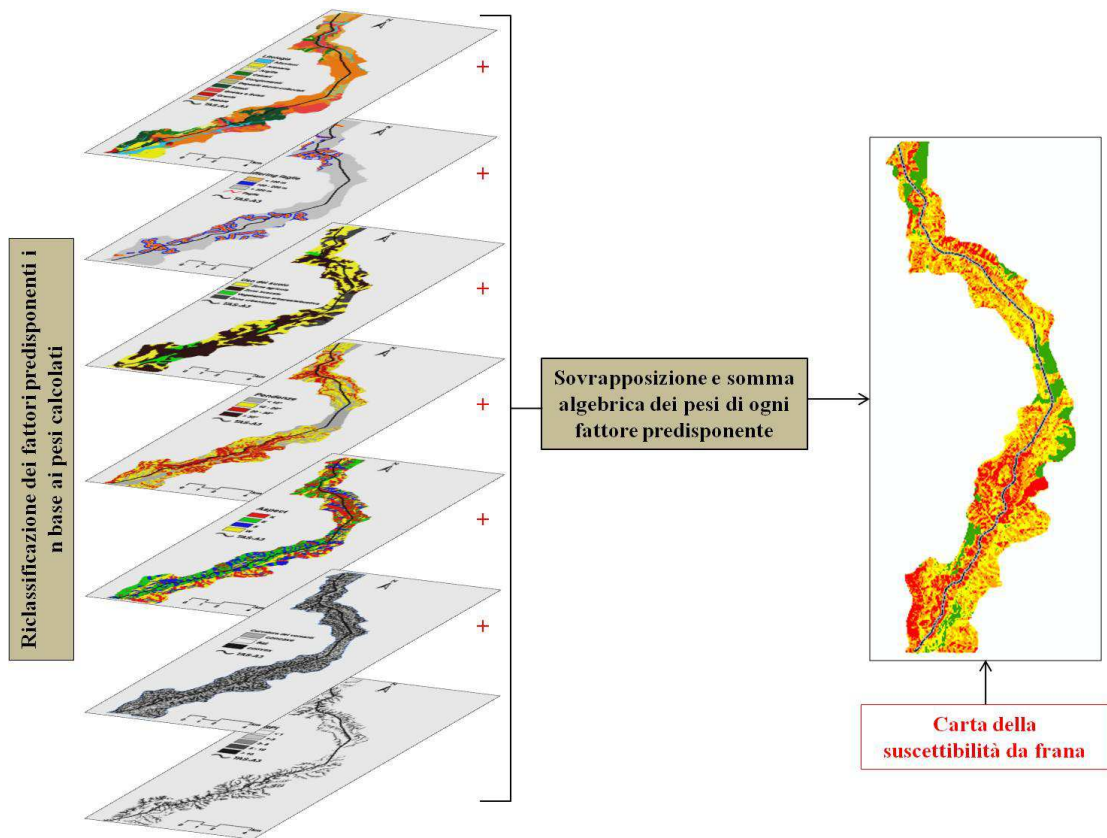


Figura 4.39 Realizzazione della carta di suscettibilità.

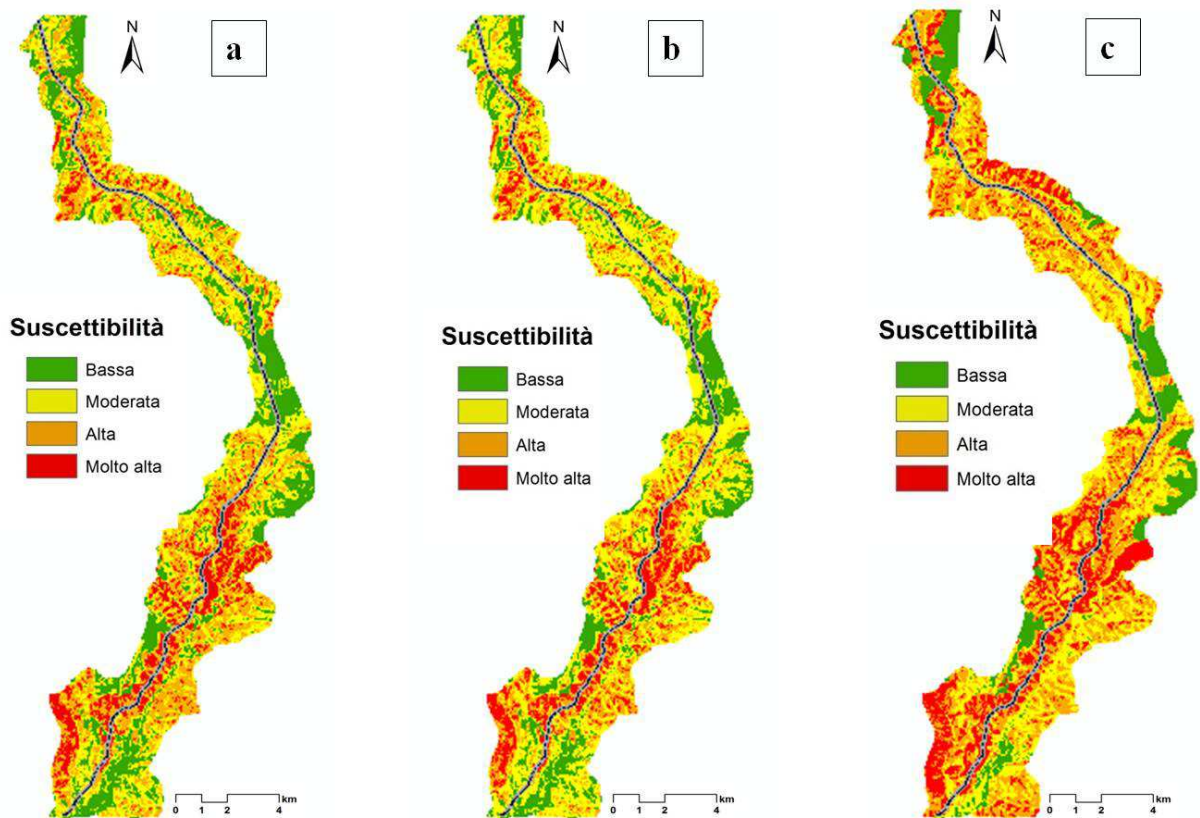


Figura 4.40 Carte della suscettibilità da frana per a) scorrimenti, b) frane complesse (scorrimenti-colate), c) totale delle frane dell'area di studio.

I grafici in figura 4.41 mostrano i valori areali in percentuale delle classi di suscettibilità delle mappe ottenute. Il grafico ottenuto dall'utilizzo della totalità delle frane nell'analisi mostra che il 60% dell'area di studio ricade nelle classi di suscettibilità alta e molto alta.

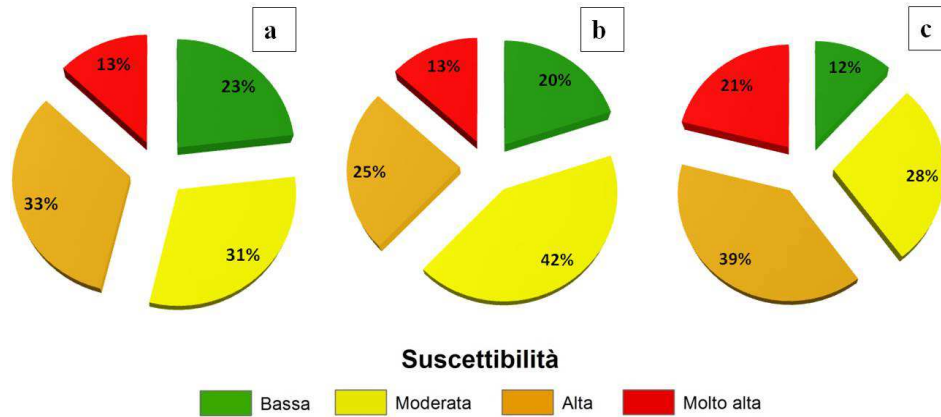


Figura 4.41 Distribuzione areale dei valori di suscettibilità per a) scorrimenti, b) frane complesse (scorrimenti-colate), c) totale delle frane.

#### 4.2.2.3 Analisi condizionale

Il metodo di statistica multivariata “Analisi Condizionale” (Clerici et al., 2002; Zêzere et al., 2007; Gullà et al., 2008; Rago et al., 2013a,b) implementato in ambiente GIS, si basa sulle “Unità di Condizioni Uniche” (UCUs) (Carrara et al., 1995), e rientra nella categoria dei metodi di analisi probabilistica condizionale (Figura 4.42). L'analisi condizionale è un metodo concettualmente semplice e di facile applicazione attraverso cui l'importanza, o peso statistico, dei fattori dell'instabilità viene valutata per ciascuno in modo indipendente dagli altri, attraverso il confronto con la distribuzione dei dissesti (Reichenbach et al., 2002).

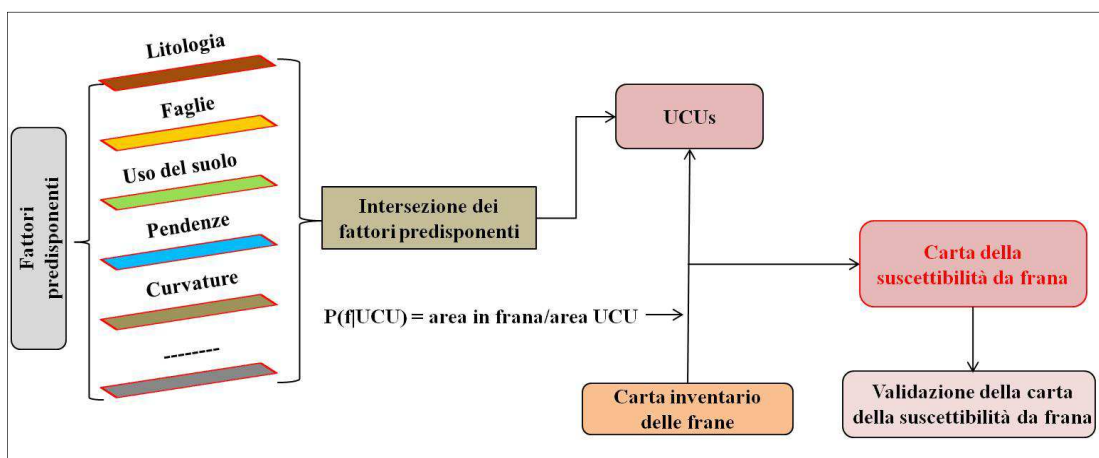


Figura 4.42 Schema del modello di analisi condizionale per la valutazione della suscettibilità da frana.

La sovrapposizione delle mappe dei fattori predisponenti, tramite tecniche di analisi spaziale ed operazioni di algebra di mappa in ambiente GIS, porta alla definizione dei domini omogenei (UCU), caratterizzati da combinazioni uniche delle classi in cui i fattori predisponenti sono stati suddivisi (Hansen, 1984; Falaschi et al., 2007). Si crea così una carta che rappresenta la distribuzione spaziale delle UCU (Figura 4.43), con una tabella associata che contiene tutte le combinazioni tra i fattori predisponenti; un esempio è riportato in Tabella 4.9.

Il numero di UCU dipende dal numero delle classi che sono state individuate per ciascuno dei fattori predisponenti considerati. Infatti, il numero massimo di UCU è dato dal prodotto del numero delle classi di ciascun fattore considerato, come espresso dalla seguente relazione:

$$N_{max} = N1 \times N2 \times \dots \times Nn$$

Il numero di classi per ciascun fattore predisponente non dovrebbe essere nè troppo alto, con il rischio di incorrere in domini omogenei statisticamente poco significativi, nè, all'opposto troppo basso (Chung e Fabbri, 1995). In alcuni casi è infatti possibile accorpare quelle classi che mostrano un'importanza relativa del tutto simile nei confronti dei dissesti (valori simili di frequenza di frana), in modo da ridurre il numero stesso delle categorie; in altri casi, l'assetto geomorfologico peculiare dell'area di studio può influenzare il dato di partenza, talvolta riducendone la variabilità.

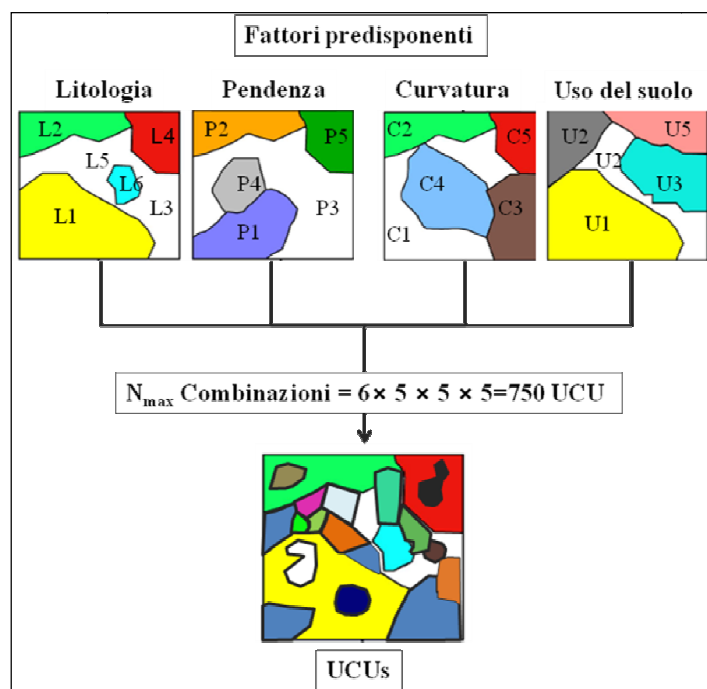


Figura 4.43 Schema del procedimento per la definizione delle UCUs.

N. UCU	N. Pixels	Fattori predisponenti			
		Litologia	Pendenza	Curvatura	Esposizione
212	677	Argille	20-30°	Concava	N
325	778	Sabbie	10-20°	Convessa	E
123	233	Arenarie	10-20°	Planare	S
107	499	Conglomerati	20-30°	Convessa	E
331	123	Conglomerati	0-10°	Planare	O
645	567	Gneiss	20-30°	Concava	N

**Tabella 4.9 Esempio di possibili combinazioni di UCU.**

Dalla sovrapposizione della mappa delle UCU con quello delle frane si ottiene la densità di frana in ciascuna UCU (rapporto tra l'area in frana in ciascuna UCU e l'area della UCU) che rappresenta il grado di propensione al dissesto nella UCU, secondo quanto espresso nell'assunto di *Bayes* (Morgan B.W., 1968). Da un punto di vista formale la probabilità condizionata è data da:

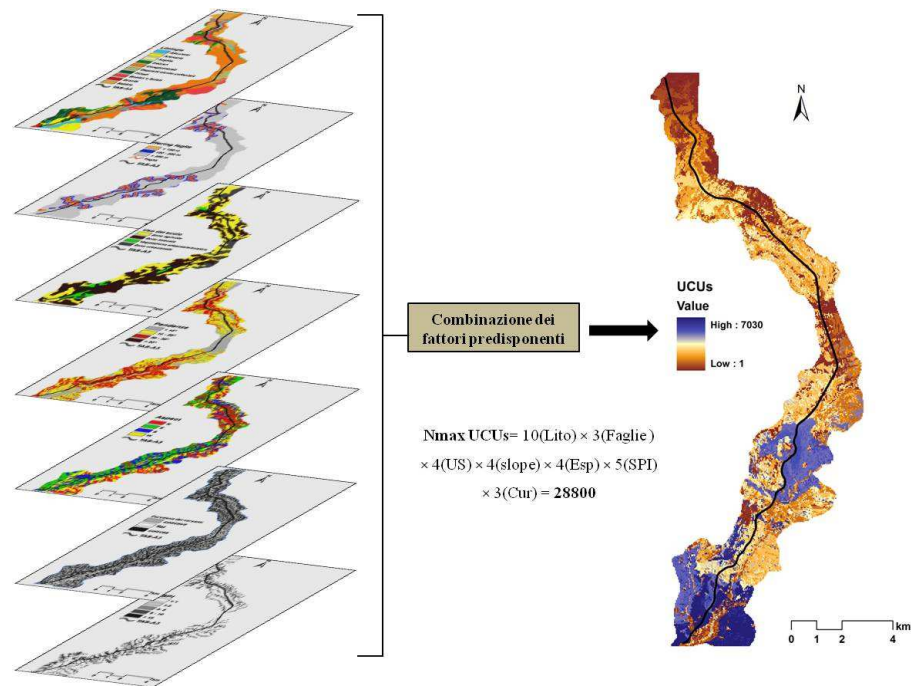
$$P(f | UCU) = \text{area in frana} / \text{area UCU}$$

dove  $P(f | UCU)$  rappresenta la probabilità (P) che si verifichi una frana (f) in futuro, data una certa combinazione dei fattori predisponenti (UCU).

Questo metodo è stata applicato per la previsione spaziale degli scorrimenti, delle frane complesse (del tipo scorrimento-colata) e del totale delle frane, mediante l'utilizzo del *software* GIS ArcMap 10.

Per quanto riguarda la preparazione dei dati, dopo aver effettuato la selezione dei fattori predisponenti, questi sono stati opportunamente suddivisi in classi e organizzati ciascuno in un livello informativo a se stante o *layer*; mentre il *database* delle scarpate di frana, è stato suddiviso in due *dataset*, uno per costruire il modello (*Training set*), costituito dal 70% delle scarpate, e uno per validare il metodo (*Validation set*), costituito dal restante 30% delle scarpate.

Dalla sovrapposizione spaziale delle sette carte tematiche dei fattori predisponenti, sono state ottenute le unità territoriali (UCU) per l'area di studio. Delle 28800 possibili UCU ne sono risultate 7030, a causa della correlazione spaziale delle variabili in gioco (Fig. 4.44; 4.45).



**Figura 4.44** Calcolo delle UCUs.

UCU	COUNT	Litologia	Uso del suolo	Distanza dalle faglie (m)	SPI	Curvature	Esposizione	Pendenze
1	4	Argille	Vegetazione erbacea/arbustiva	> 200	1	Flat	W	< 10°
2	111	Argille	Zone agricole	> 200	1	Convex	S	< 10°
3	66	Argille	Zone agricole	100 - 200	3	Convex	S	< 10°
4	77	Argille	Zone agricole	100 - 200	1	Convex	W	10 - 20°
5	69	Argille	Zone agricole	< 100	2	Convex	W	10 - 20°
6	57	Argille	Zone agricole	> 200	1	Flat	W	10 - 20°
7	79	Argille	Zone agricole	> 200	1	Convex	W	10 - 20°
8	122	Sabbie	Zone agricole	> 200	5	Convex	S	< 10°
9	161	Sabbie	Zone agricole	> 200	1	Convex	W	< 10°
10	39	Sabbie	Zone agricole	> 200	1	Flat	W	20 - 30°

**Figura 4.45** Esempio delle UCUs ottenute nell'area di studio.

Successivamente, è stata effettuata l'operazione di sovrapposizione in ambiente GIS della mappa delle UCUs con le scarpate del *training set* per ottenere la densità di frana in ciascuna UCU (rapporto percentuale tra l'area in frana in ciascuna UCU e l'area della UCU), che rappresenta la probabilità di propensione all'innescio di fenomeni franosi.

La distribuzione di probabilità di occorrenza di frana predetta dal modello multivariato applicato rappresenta la suscettibilità da frana nell'area di studio. Anche per queste analisi per avere dei valori soglia delle classi di pericolosità spaziale da frana quanto più oggettivi è stato utilizzato il sistema di classificazione automatico del *software* GIS che utilizza l'algoritmo di *Jenks* (Jenks, 1989). Sono state individuate quattro classi di suscettibilità da frana, da bassa a molto alta, come riportato nella figura 4.46.

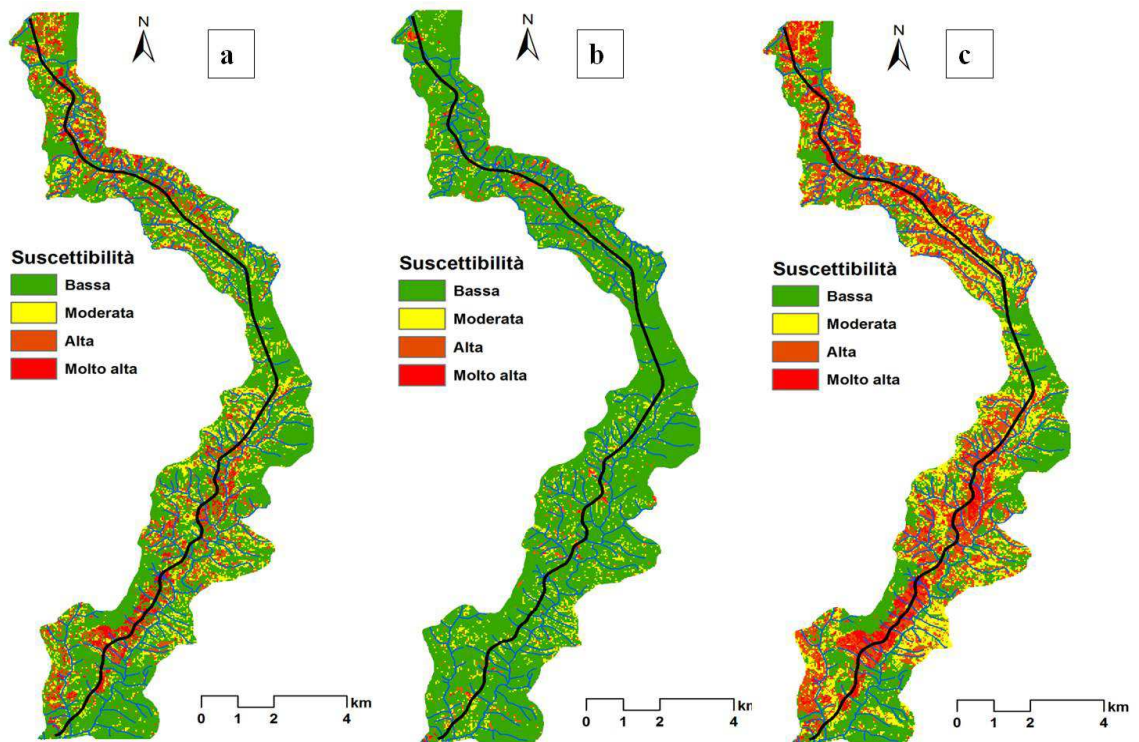


Figura 4.46 Carte della suscettibilità da frana per a) scorrimenti, b) frane complesse (scorrimenti-colate), c) totale delle frane dell'area di studio.

I grafici in figura 4.47 mostrano i valori areali in percentuale delle classi di suscettibilità delle mappe ottenute. Secondo il metodo applicato utilizzando la totalità delle frane il 33% dell'area di studio ricade nelle classi di suscettibilità alta e molto alta.

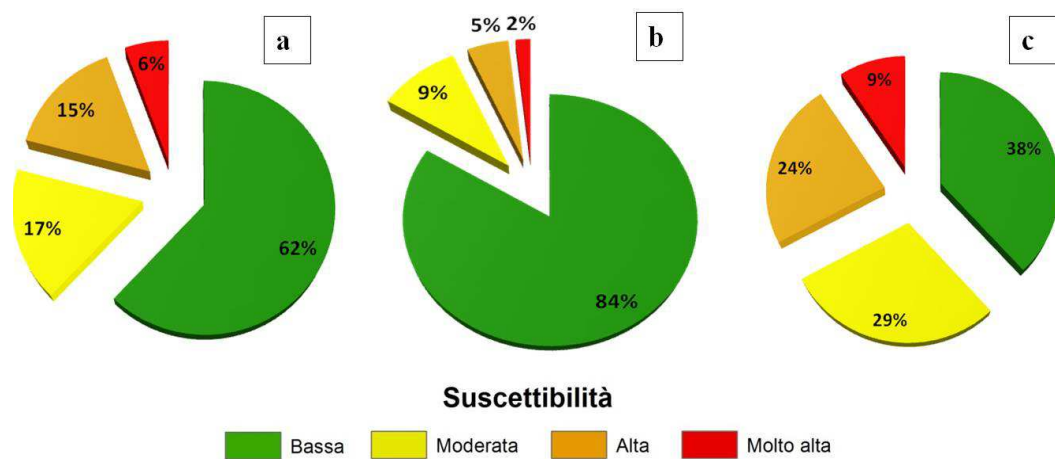


Figura 4.47 Distribuzione areale dei valori di suscettibilità per a) scorrimenti, b) frane complesse (scorrimenti-colate), c) totale delle frane.

#### 4.2.2.4 Metodo “*Weight of Evidence*”

Il metodo *Weights of Evidence* (WofE) è un metodo statistico “*data-driven*” applicato in molti campi scientifici e risultato adatto alla realizzazione di carte della suscettibilità da frana (Neuhäuser e Terhorst, 2007; Armaş, 2012; Regmi et al., 2010; tra molti altri).

Questo metodo si basa sul teorema di Bayes che permette di combinare una certa quantità di dati per predire il verificarsi di eventi. L’effetto di questa condizione è la diminuzione a poche variabili legate all’innesco di frane nella costruzione del modello (Bonham-Carter, 1994). Sono possibili diverse variazioni di questo approccio (Good, 1998): per questa ricerca è stata utilizzata la forma semplice del teorema di Bayes, che utilizza il metodo della mappa binaria. Questo metodo è caratterizzato da due stati (es. presenza/assenza di un evento in un pixel) e si basa sulla scelta di quale stato è più probabile che si verifichi nei dati disponibili (Armaş, 2012). Il metodo, applicato all’analisi di suscettibilità da frana, ha lo scopo di identificare il grado di influenza espresso come il “peso” che ogni variabile ha nell’innesco di una frana (Barbieri e Cambuli, 2009). I pesi sono calcolati basandosi sullo sviluppo spaziale delle frane nelle mappe tematiche usate come “evidenza”. Nell’analisi statistica Bayesiana sono usati due termini: “*prior*” e “*posterior*”. La “*prior logit*” dell’occorrenza di una frana è stimata da tutte le evidenze presenti (es. variabili predittive come pendenza, litologia, uso del suolo, ecc.) e si basa sulla densità delle aree interessate da frane nell’area di studio. La “*posterior logit*” considera che altre evidenze possono modificare la stima iniziale dell’occorrenza di frane, quindi rappresenta il risultato migliorato alla luce di queste nuove evidenze. Essa è ottenuta secondo la densità delle frane in ogni classe delle variabili predittive, dette “evidenze” (pendenze, litologie, uso del suolo, ecc.).

Per ogni variabile predittiva viene calcolato un peso positivo ( $W^+$ ), quando la frana si verifica, e un peso negativo ( $W^-$ ), quando la frana non si verifica. I pesi sono misure della correlazione tra i fattori predisponenti e le frane, ciò li rende facili da interpretare in relazione all’osservazione empirica. I valori dei pesi delle classi dei fattori predisponenti sono calcolati utilizzando le seguenti equazioni (Armaş, 2012):

$$W^+ = \ln \frac{P(F|Af)}{P(F|\bar{A}f)} = \ln \left[ \frac{\frac{\text{Area in frana nella classe considerata}}{\text{Area in frana totale}}}{\frac{\text{Area non in frana nella classe considerata}}{\text{Area non in frana totale}}} \right]$$

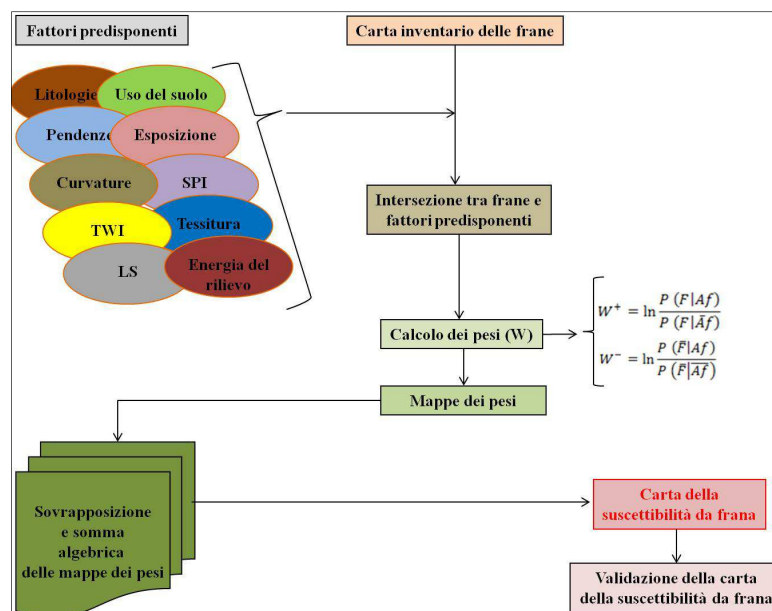


$$W^- = \ln \frac{P(\bar{F}|Af)}{P(\bar{F}|\bar{A}\bar{f})} = \ln \left[ \frac{\frac{\text{Area in frana totale nelle altre classi}}{\text{Area in frana totale}}}{\frac{\text{Area non in frana nelle altre classi}}{\text{Area non in frana totale}}} \right]$$

Dove F è la classe di una particolare variabile predittiva e il segno *overbar* rappresenta l'assenza della classe e/o dell'evento (frana). Il peso positivo  $W^+$  è direttamente proporzionale all'influenza che la rispettiva variabile ha sulla probabilità di occorrenza dell'evento franoso (Barbieri e Cambuli, 2009). La differenza tra i pesi  $W^+$  e  $W^-$  è nota come contrasto dei pesi, e fornisce una misura della robustezza della correlazione tra la variabile predittiva e l'occorrenza delle frane (Barbieri e Cambuli, 2009):

$$C = W^+ - W^-$$

La differenza ottenuta tra i pesi (C) fornisce una misura della robustezza della correlazione tra la variabile analizzata e le frane (Barbieri e Cambuli, 2009). Un valore di contrasto uguale a 0 indica che la classe considerata del fattore predisponente non è significativa nell'analisi. Un valore positivo di C indica una correlazione spaziale positiva, sarà invece negativa per un valore negativo di C. I pesi positivi e negativi vengono infine sommati per produrre la carta di suscettibilità da frana. Questa metodologia è stata applicata alle frane superficiali, utilizzando il *software* GIS Ilwis 3.4, ed è sintetizzata nel diagramma seguente (Fig. 4.48):



**Figura 4.48** Schema del metodo *Weight of Evidence* per la valutazione della suscettibilità da frana.

I valori positivi e negativi di C indicano, rispettivamente, alta e bassa densità di frane superficiali; in particolare, i valori negativi indicano una bassa influenza delle classi di

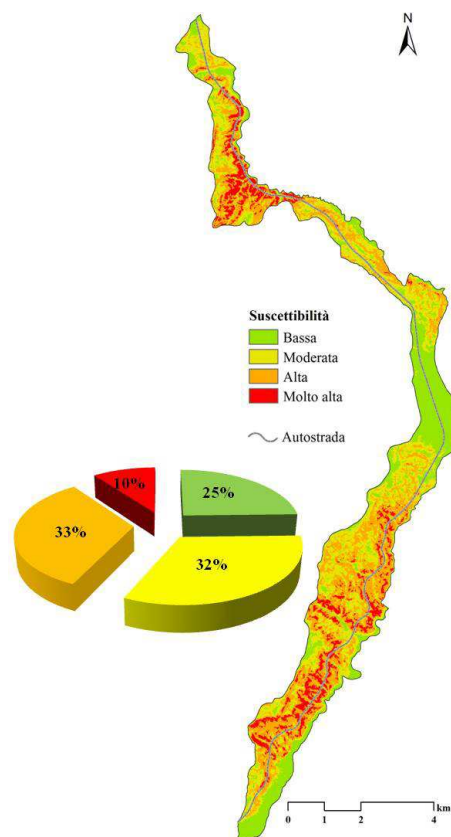
ogni fattore predisponente nell'innescare di frane, mentre i valori positivi implicano un forte controllo sulla franosità superficiale. Sulla base di queste considerazioni, litologie, pendenze, SPI, fattore LS e tessitura del suolo giocano un ruolo importante sulla distribuzione spaziale delle frane superficiali.

La tabella 4.10 mostra i pesi e il valore del contrasto dei fattori predisponenti scelti:

FATTORE PREDISPONENTE	CLASSI	PIXELS DELLA CLASSE	PIXELS IN FRANA DELLA CLASSE	$W^+$	$W^-$	C
Litologie	Argille	1865	2	-0,6898	0,0132	-0,7030
	Depositi colluviali	6572	7	-0,6966	0,0495	-0,7461
	Sabbie	5464	13	0,1084	-0,0090	0,1179
	Conglomerati	7426	31	0,6724	-0,1170	0,7896
	Depositi alluvionali	4806	11	0,0695	-0,0050	0,0747
	Graniti	29719	64	0,0085	-0,0060	0,0145
	Scisti	8194	23	0,2741	-0,0420	0,3156
	Gneiss	7339	0	-2,7605	0,1018	-2,8623
Usi del suolo	Calcari	264	2	1,2718	-0,0090	1,2813
	Boschi	30603	62	-0,0527	0,0376	-0,0903
	Aree agricole	31352	79	0,1659	-0,1510	0,3171
	Aree urbanizzate	5085	1	-2,3869	0,0672	-2,4541
Pendenze	Aree arbustive e/o erbacee	4609	11	0,1115	-0,0080	0,1196
	0° - 7°	22662	8	-1,8017	0,3273	-2,1290
	7° - 15°	18109	41	0,0586	-0,0210	0,0792
	15° - 23°	15301	35	0,0689	-0,0200	0,0885
	23° - 32°	9813	36	0,5427	-0,1210	0,6639
Esposizione	> 32°	5764	33	0,9898	-0,1590	1,1492
	Area pianeggiante	1792	3	-0,2440	0,0055	-0,2493
	N	13259	29	-0,1726	-0,0069	-0,1657
	E	30545	75	0,1399	-0,1180	0,2582
	S	18741	40	-0,0010	0,0002	-0,0007
Curvatura dei versanti	O	7312	6	-0,9580	0,0678	-1,0255
	Concava	26837	44	-0,2650	0,1305	-0,3950
	Sub-pianeggiante	17671	19	-0,6870	0,1510	-0,8380
SPI	Convessa	27141	90	0,4413	-0,4120	0,8532
	< 0,5	42379	66	-0,3160	0,3315	-0,6480
	0,5 - 1	12519	46	0,5443	-0,1660	0,7102
	1 - 2	5091	16	0,3875	-0,0370	0,4243
	2 - 4	4338	12	0,2595	-0,0190	0,2788
TWI	> 4	7322	13	-0,1850	0,0190	-0,2040
	< 2,5	18882	61	0,4151	-0,2030	0,6182
	2,5 - 5	35367	80	0,0577	-0,0600	0,1173
	5 - 7,5	10151	11	-0,6794	0,0783	-0,7577
	7,5 - 10	5879	1	-2,5320	0,0792	-2,6112
LS	> 10	1370	0	-1,0821	0,0128	-1,0949
	< 2,5	28945	22	-1,0344	0,3632	-1,3976
	2,5 - 5	18859	44	0,0887	-0,0340	0,1224
	5 - 7,5	9219	25	0,2395	-0,0410	0,2803
	7,5 - 10	10257	44	0,6997	-0,1850	0,8847
Energia del rilievo	> 10	4369	18	0,6592	-0,0620	0,7216
	< 50 m	7568	0	-2,7912	0,1054	-2,8966
	50 - 100 m	16531	22	-0,4737	0,1073	-0,5810
	100 - 150 m	17034	33	-0,0976	0,0286	-0,1262
	150 - 200 m	16922	56	0,4393	-0,1870	0,6260
Tessitura del suolo	> 200 m	13594	42	0,3703	-0,1110	0,4810
	Moderat. fine	109	0	<b>1,4491</b>	-0,0100	1,4541
	Moderat. grossolana	42554	93	0,0232	-0,0400	0,0582
	Grossolana	24302	60	0,1455	-0,0800	0,2292
	Media	4684	0	-2,3115	0,0610	-2,3727

**Tabella 4.10 Valori dei pesi,  $W^+$  e  $W^-$ , e dei contrasti C calcolati per i fattori predisponenti scelti. In grassetto i pesi  $W^+$  delle classi maggiormente influenti, in corsivo quelli che influiscono meno.**

Il peso finale di ogni di classe è stato calcolato come la somma del peso positivo e dei pesi negativi delle altre classi di quel fattore predisponente (Tabella 4.11). Come indicato nel pacchetto per le analisi statistiche spaziali di Arc-WofE, i pesi tra 0.1 e 0.5 sono mediamente predittivi, tra 0.5 e 1 sono moderatamente predittivi, tra 1 e 2 sono fortemente predittivi e maggiori di 2 sono estremamente predittivi per l'analisi di suscettibilità (Bonham-Carter et al., 1989; Hansen, 1998). La classe di pendenza "> 35°" e la classe tessiturale "moderatamente fine" sono quelle che più influenzano la franosità superficiale. Escludendo l'area in cui sono presenti i "Depositi alluvionali", la classe litologica "Gneiss" e l'energia del rilievo "< 50m" sono quelle che predispongono meno i versanti all'insacco di frane superficiali. La sovrapposizione, in ambiente GIS, di tutte le mappe dei pesi (riclassificate sulla base del valore di contrasto C) ha prodotto la carta di suscettibilità da frane superficiali nell'area di studio (Fig. 4.49).



**Figura 4.49** Carta della suscettibilità da frane superficiali.

Il range dei pesi ottenuti ha un valore minimo di -17,41 ed un valore massimo di 6,35, con un valore medio di -2 e una deviazione standard di 4,73. I valori dei pesi sono stati classificati in quattro classi di suscettibilità, distribuite nell'area di studio come segue: 25% bassa, 32% moderata, 33% alta e 10% molto alta (Fig. 4.49).

FATTORE PREDISPOSENTE	CLASSI	PESI FINALI
Litologie	Argille	-0.7274
	Depositi colluviali	-0.7705
	Sabbie	0.0935
	Conglomerati	0.7652
	Depositi alluvionali	0.0503
	Graniti	-0.0099
	Scisti	0.2912
	Gneiss	-2.8867
	Calcari	1.2569
Uso del suolo	Boschi	-0.1448
	Aree agricole	0.2626
	Aree urbanizzate	-2.5086
	Aree arbustive e/o erbacee	0.0651
Pendenze	0° - 7°	-2.1225
	7° - 15°	0.0857
	15° - 23°	0.0950
	23° - 32°	0.6704
	> 32°	<b>1.1557</b>
Esposizione	Area pianeggiante	-0.3010
	N	0.1001
	E	0.2065
	S	-0.0524
	O	-1.0772
Curvatura dei versanti	Concava	-0.5256
	Sub-pianeggiante	-0.9686
	Convessa	0.7228
SPI	< 0,5	-0.5192
	0,5 – 1	0.8387
	1 – 2	0.5528
	2 – 4	0.4073
	> 4	-0.0755
TWI	< 2,5	0.5258
	2,5 – 5	0.0249
	5 – 7,5	-0.8501
	7,5 – 10	-2.7036
	> 10	-1.1873
LS	< 2,5	-1.3563
	2,5 – 5	0.1637
	5 – 7,5	0.3216
	7,5 – 10	0.9260
	> 10	0.7629
Energia del rilievo	< 50 m	-2.9527
	50 – 100 m	-0.6371
	100 – 150 m	-0.1823
	150 – 200 m	0.5699
	> 200 m	0.4249
Tessitura del suolo	Moderat. fine	<b>1.3916</b>
	Moderat.grossolana	-0.0043
	Grossolana	0.1667
	Media	-2.4352

**Tabella 4.11** Pesi finali delle classi dei fattori predisponenti. In grassetto i pesi delle classi maggiormente influenti, in corsivo quelli che influiscono meno.

#### 4.2.2.5 Validazione delle mappe di suscettibilità

La validazione dei metodi utilizzati per la valutazione della suscettibilità è stata effettuata tramite la realizzazione e l'analisi di due curve: *prediction-rate curve* e *success-rate curve* (Chung e Fabbri, 2003; Remondo et al., 2003; Conoscenti et al. 2008).

Per applicare la metodologia di validazione, come anticipato in precedenza, i *database* relativi delle frane (scorrimenti, frane complesse, totale delle frane, frane superficiali) sono stati divisi rispettivamente in due gruppi, adottando una suddivisione *random* (Chung e Fabbri, 2003); un gruppo (*training set*) è stato utilizzato per stimare la suscettibilità ed un altro (*validation set*) è stato utilizzato per valutare la capacità predittiva del modello. I metodi che si possono utilizzare per suddividere il *database* delle frane censite, tenendo conto delle caratteristiche dei dati disponibili, possono essere: suddivisione temporale, *random* o spaziale (Chung & Fabbri, 2003).

La *prediction-rate curve* è costruita plottando sull'ascisse di un grafico la percentuale di area cumulata a partire dalle aree a più alta suscettibilità, mentre sulle ordinate si riporta la percentuale cumulata delle aree delle frane del *validation set* (non utilizzate nell'analisi) che ricadono nelle rispettive classi di suscettibilità.

La forma delle curve di predizione (*prediction-rate curve*) esprime il tipo di correlazione fra le classi di suscettibilità e l'instabilità geomorfologica "futura". Una tendenza diagonale della curva implica una predizione totalmente casuale (Conoscenti et al., 2008). Pertanto, più la curva si allontana dalla diagonale e più è ripida nella parte iniziale, maggiore sarà la capacità predittiva del modello (Chung e Fabbri, 2003; Remondo et al., 2003).

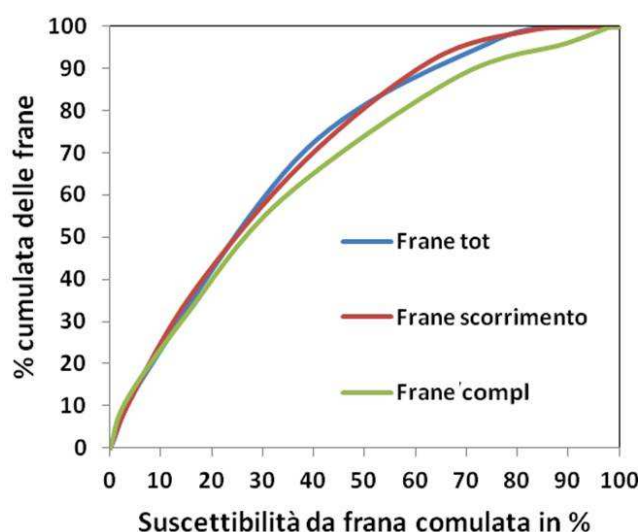
Le *success-rate curve* sono ottenute seguendo la stessa procedura con la differenza che sull'asse delle ordinate si plottano le frane del *training set* utilizzato per costruire il modello. Le curve *success-rate* definiscono la capacità dei modelli nel classificare il *subset* utilizzato per stimare la suscettibilità e, pertanto, ci permettono di stimare la bontà (*goodness of fit*) dei modelli predittivi (Chung e Fabbri, 2003).

Una buona performance del modello si ottiene quando: (a) le frane rilevate in campo ricadono nelle zone classificate dal modello come ad "alta" o "molto alta" suscettibilità (il modello riproduce correttamente la posizione delle frane rilevate in campo), e (b) la percentuale di bacino classificata ad "alta" o "molto alta" suscettibilità risulta essere relativamente contenuta (per evitare di avere una "*overprediction*" dei siti propensi all'instabilità).

Allo scopo di determinare l'affidabilità statistica dei risultati è stata calcolata l'area sotto la curva AUC (*Area Under Curve*). L'AUC è un buon indicatore per valutare la predizione del modello: il modello ideale avrà un valore dell'AUC compreso tra 0,5 e 1. In particolare, valori compresi tra 0,7 e 0,9 indicano un'affidabilità statistica ragionevole, mentre valori maggiori di 0,9 mostrano che i modelli sono altamente accurati (Swets, 1988).

#### Metodo "Hazard Index"

Le tre curve *success-rate* (Fig. 4.50) si presentano sufficientemente ripide nella parte iniziale dopodiché decrescono in maniera abbastanza monotona. Quindi la validazione dei modelli di suscettibilità per gli scorrimenti, le frane complesse e le frane totali dell'area di studio conferma un'effettiva (non casuale) correlazione fra le carte di suscettibilità predette e la distribuzione spaziale delle frane del *training set*.



**Figura 4.50** Curve *success rate* per il modello di suscettibilità degli scorrimenti, delle frane complesse e delle frane totali.

La tabella 4.12 mostra la sovrapposizione delle frane sulle carte di suscettibilità ottenute.

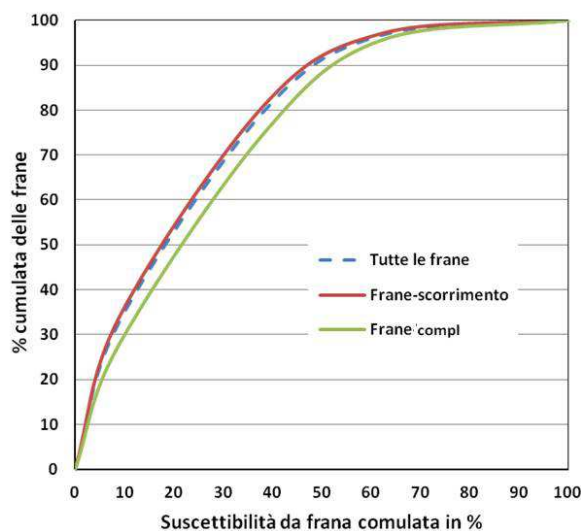
SCORRIMENTI			FRANE COMPLESSE			FRANE TOTALI		
Classi suscettibilità	(%)	Frane (%)	Classi suscettibilità	(%)	Frane (%)	Classi suscettibilità	(%)	Frane (%)
Molto alta	13	41	Molto alta	13	18	Molto alta	21	72
Alta	33	36	Alta	25	63	Alta	39	25
Moderata	31	20	Moderata	42	18	Moderata	28	2
Bassa	23	3	Bassa	20	1	Bassa	12	1

**Tabella 4.12** Distribuzione delle frane nelle diverse classi di suscettibilità.

L'elevata capacità predittiva è, pertanto, giustificata dal fatto che per tutti e tre le applicazioni più dell'75% dei processi ricade nelle classi di suscettibilità alta e molto alta (Tab. 4.12), di contro nelle aree a bassa suscettibilità ricade una percentuale di fenomeni franosi sempre al di sotto del 5% (Tab. 4.12).

### Analisi condizionale

Anche nella validazione del metodo di analisi condizionale applicato agli scorrimenti, alle frane complesse e alle frane totali dell'area di studio, le curve *success-rate* ottenute si presentano generalmente ripide nella parte iniziale e poi decrescono in modo abbastanza monotono (Fig. 4.51), confermando una reale correlazione fra le carte di suscettibilità predette e la distribuzione spaziale delle frane del *training set*.



**Figura 4.51** Curve *success rate* per il modello di suscettibilità degli scorrimenti, delle frane complesse e delle frane totali.

La sovrapposizione delle frane sulle carte di suscettibilità ottenute mostra che la maggior parte delle frane, circa l'80%, ricadono nelle classi di suscettibilità da alta a molto alta, e nelle aree a bassa suscettibilità anche per questa analisi ricade una percentuale di fenomeni franosi sempre al di sotto del 5% (Tab. 4.13).

SCORRIMENTI			FRANE COMPLESSE			FRANE TOTALI		
Classi suscettibilità	(%)	Frane (%)	Classi suscettibilità	(%)	Frane (%)	Classi suscettibilità	(%)	Frane (%)
Molto alta	6	34	Molto alta	2	28	Molto alta	9	33
Alta	15	48	Alta	5	47	Alta	24	47
Moderata	17	16	Moderata	9	21	Moderata	29	17
Bassa	62	3	Bassa	84	4	Bassa	38	3

**Tabella 4.13** Distribuzione delle frane nelle diverse classi di suscettibilità.

### Confronto dei metodi “*Hazard Index*” e “Analisi condizionale” applicati per l’analisi di suscettibilità delle frane profonde

Il confronto tra i due metodi applicati agli scorrimenti, alle frane complesse e alle frane totali (Fig 4.52), mostra che i due diversi metodi classificano l’area in maniera diversa, tranne per la classe moderata nell’analisi delle frane totali. Le percentuali delle classi di suscettibilità ottenute con il metodo *Hazard Index* sono sempre maggiori tranne che per la classe di suscettibilità bassa e la classe moderata per le frane totali. In particolare, considerando le frane totali, nell’analisi condizionale il 33% dell’area ricade nelle classi di suscettibilità da alta a molto alta, mentre con il metodo *Hazard Index* vi ricade il 60% dell’area; quest’ultimo metodo tende quindi a sovrastimare le aree ad elevata suscettibilità. In entrambi i casi, comunque, il confronto dei risultati con la realtà geomorfologica e le caratteristiche legate all’instabilità dei versanti ha mostrato un buon grado di correlazione. I valori di suscettibilità più elevati si osservano nella parte centrale dell’area studiata, dove è presente il tratto autostradale. Alti valori di suscettibilità si sono ottenuti sui versanti con pendenze superiore ai 20 gradi e lungo i versanti delle valli strette e fortemente incise dal reticolo idrografico. Inoltre, l’analisi ha evidenziato il forte controllo strutturale sulla propensione del territorio a l’innesco di frane.

I grafici in figura 4.53 mostrano il confronto della stima quantitativa delle prestazioni dei modelli, attraverso le curve *prediction rate* ottenute nella validazione dei due metodi applicati per la valutazione della suscettibilità per gli scorrimenti, le frane complesse e le frane totali.

L’analisi dei valori di AUC mostra che essi sono tutti compresi tra il 70 % e il 90 %, tranne che per il metodo *Hazard Index* applicato agli scorrimenti, indicando un’affidabilità statistica ragionevole per entrambi i metodi. Tuttavia la maggiore accuratezza si riscontra per il metodo di Analisi Condizionale applicato per la previsione degli scorrimenti, delle frane complesse e delle frane totali.

Questi risultati consentono di affermare che il metodo di statistica condizionale utilizzato e i fattori predisponenti scelti per l’analisi riescono a valutare in modo soddisfacente la propensione da frana nell’area in cui ricade il tratto di autostrada studiato. Le carte di suscettibilità da frana ottenute, quindi, possono essere utilizzate per prevedere i futuri movimenti franosi profondi; questi ultimi, in concomitanza con eventi in grado di innescare tali fenomeni (piogge intense e/o prolungate), avranno luogo con maggior probabilità in quelle aree del territorio caratterizzate da suscettibilità da alta a



molto alta. In particolare, si è scelto di utilizzare per l'analisi del rischio la mappa di suscettibilità ottenuta dall'utilizzo della totalità delle frane.

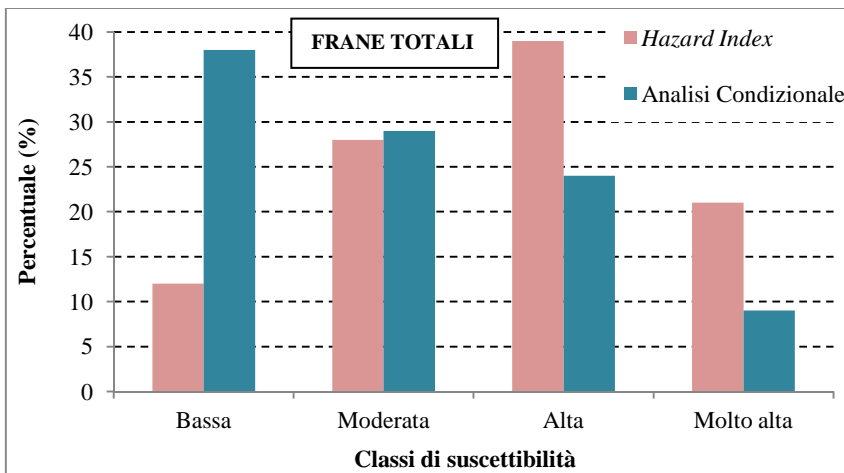
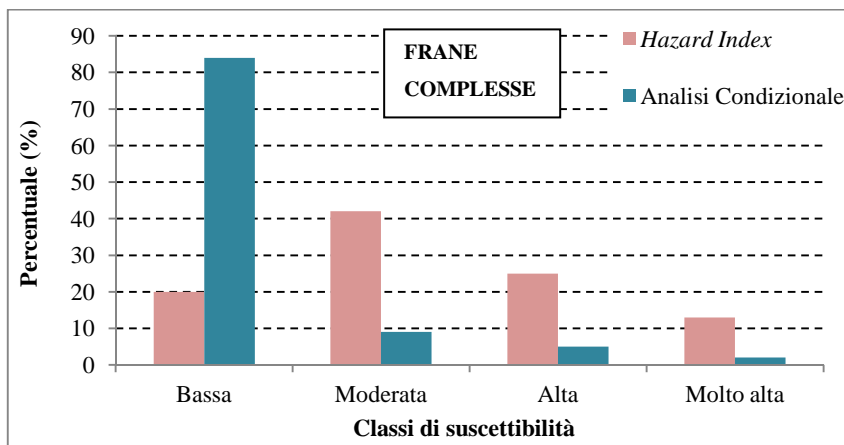
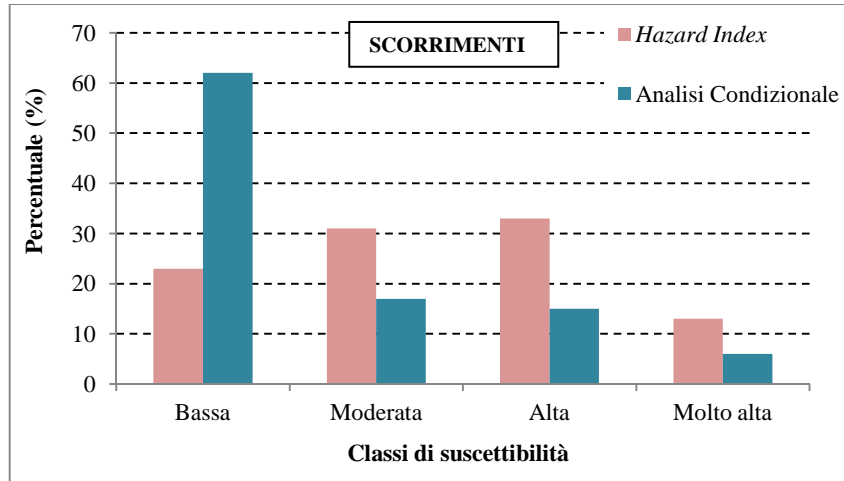
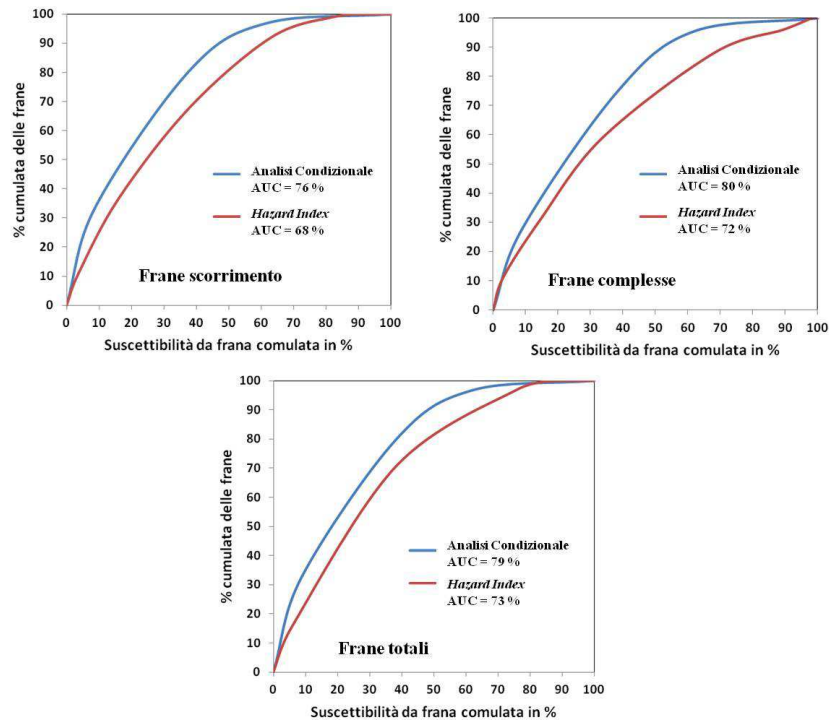


Figura 4.52 Classi di suscettibilità calcolate con i metodi *Hazard Index* e *Analisi Condizionale*, applicati agli scorrimenti, alle frane complesse e alle frane totali.



**Figura 4.53** Confronto delle curve *prediction rate* e del valore AUC per i metodi *Analisi Condizionale* e *Hazard Index*.

### Weight of Evidence

La sovrapposizione della carta della suscettibilità ottenuta e delle frane superficiali ha mostrato che l'80% delle frane sono state correttamente classificate, poiché ricadono nelle classi di suscettibilità alta e molto alta, mentre solo l'1% delle frane ricade nella classe di suscettibilità bassa (Tab. 4.14).

Classi di suscettibilità	Area (%)	Frane (%)
Bassa	25	1
Moderata	32	19
Alta	33	47
Molto alta	10	33

**Tabella 4.14** Percentuale delle classi di suscettibilità nella mappa e delle frane che ricadono all'interno di esse.

Per valutare il potere predittivo del modello e la distribuzione spaziale delle frane superficiali nelle classi di suscettibilità, sono state analizzate e comparate le curve *success rate* e *prediction rate* (Fig. 4.54).

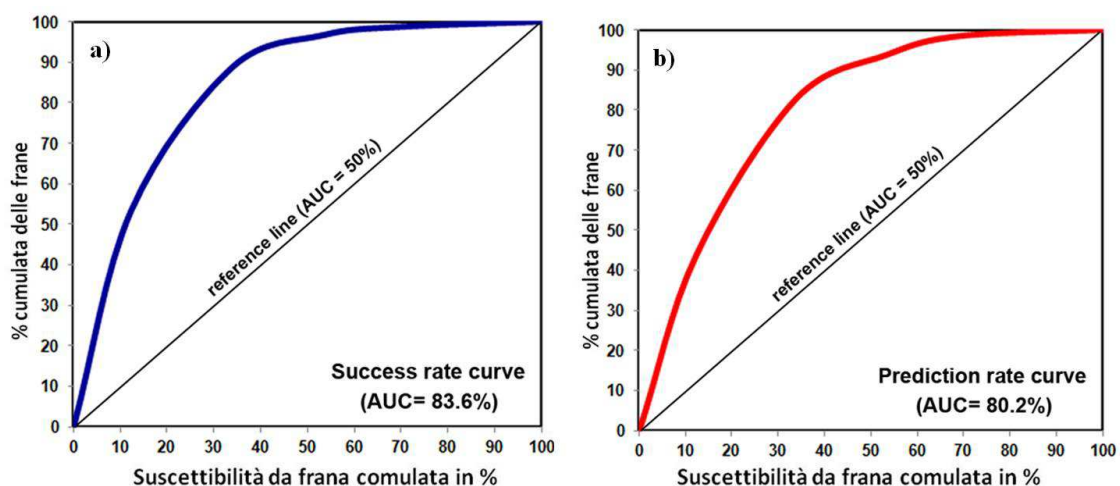


Figura 4.54 a) Curva *success rate*; b) Curva *prediction rate*.

La curva *prediction rate* è stata ottenuta dall'intersezione tra la carta di suscettibilità e le frane superficiali del *validation set*; essa mostra che più del 60% delle frane ricade nel 20% delle aree più suscettibili (Fig. 4.53b). Le curve *success rate* e *prediction rate* presentano una forma simile, si presentano ripide nella parte iniziale dopodiché decrescono in maniera monotona. La precisione del metodo proposto è stata valutata tramite il calcolo dell'AUC per le curve *success rate* e *prediction rate*, che è risultata essere, rispettivamente 83,6% e 80,2%, mostrando una buona performance dell'analisi di suscettibilità (Fig. 4.53). Questi risultati suggeriscono una buona affidabilità del metodo statistico applicato e dei fattori predisponenti scelti.

#### 4.2.3 Valutazione del rischio spaziale da frana

Negli ultimi decenni, gli studi sulle frane sono passati da approcci qualitativi ad approcci quantitativi e da studi prevalentemente geologici e geomorfologici a valutazioni della pericolosità e del rischio (Varnes e IAEG, 1984). Sebbene sono presenti studi sulla suscettibilità e sulla pericolosità da frana dagli anni '70 (Fell et al., 2008), l'approccio scientifico ancora collima con molte difficoltà metodologiche soprattutto per quantificare e mappare il rischio da frana a varie scale (van Westen et al., 2005). Così, nuovi metodi vengono sviluppati e continuamente migliorati: modelli geofisici per valutare la stabilità di versante e le dinamiche delle frane (Gallipoli et al., 2000; Jongmans e Garambois, 2007); predizione della suscettibilità e della pericolosità (Guzzetti et al., 2005; Günther et al., 2012); valutazione della vulnerabilità (Glade, 2003; Uzielli et al., 2008); approcci complessi per la quantificazione del rischio da frana

(Bell e Glade, 2004; Crozier e Glade, 2005). La valutazione quantitativa del rischio da frana ha assunto un ruolo sempre più importante allo scopo di fronteggiare le perdite economiche, materiali e di vite umane causate da questi processi geomorfologici. Come detto nel paragrafo 2.5, nella valutazione quantitativa del rischio, il rischio è dato dal prodotto della pericolosità, della vulnerabilità e dell'esposizione. Data l'elevata complessità concettuale, ne esistono molti punti di vista, con delle sovrapposizioni tra la pericolosità e il rischio o il considerare l'esposizione come elemento della pericolosità o come parte della vulnerabilità. La valutazione del rischio in questa area di studio è stata effettuata sulla base della suscettibilità da frana e degli elementi esposti al rischio, senza considerare la variabilità temporale delle frane o la dimensione economica o funzionale della vulnerabilità.

La valutazione della suscettibilità da frana rappresenta un passo obbligatorio nella valutazione della pericolosità e del rischio (Cardinali et al., 2002; Guzzetti et al., 2008), infatti l'individuazione della localizzazione di frane future è possibile solo attraverso una buona conoscenza e valutazione dei fattori predisponenti e innescanti i fenomeni franosi.

L'analisi è stata applicata all'autostrada A3, nel tratto compreso tra gli svincoli di Cosenza sud e Altilia, dove i fenomeni franosi presenti ne rappresentano un aspetto caratterizzante. A causa delle sue caratteristiche litologiche, strutturali, tettoniche, topografiche ed idrologiche, questo territorio è ben noto per essere affetto da numerosi dissesti, documentati già agli inizi del '900, che attualmente causano spesso problemi di viabilità (Fig. 4.55).

All'interno del bacino del fiume Savuto l'autostrada fiancheggia il corso d'acqua lungo la sponda occidentale (destra idrografica), con alcuni brevi tratti in galleria; l'alveo risulta fortemente incassato ed i versanti (di cui il più alto è il monte S. Lucerna di 1256 m) possiedono un'elevata energia del rilievo. Infatti, la maggior parte delle frane si individua proprio all'interno di questo bacino nei pressi di Altilia (Viadotto di Grotta della Paglia 1 e Viadotto S. Ruiz) e di Belsito. Si tratta di frane complesse e di scorrimenti che si impostano su vari litotipi. Più a nord una sostanziale stabilità caratterizza l'altopiano di Pian del Lago. Nel tratto ancora più a settentrione, all'altezza di Donnici Superiore e Inferiore, l'autostrada corre lungo una cresta a monte del Torrente Albicello che scorre poco più ad est; a valle della A3 vi sono anche numerose frane di scorrimento e complesse. Tuttavia, le frane in questione, essendo poste a valle della A3, non sembrano rappresentare una minaccia per l'autostrada a meno di



**Figura 4.55** Restringimenti di carreggiata a causa di movimenti franosi sul tratto di autostrada considerato.

arretramenti consistenti. Continuando verso nord la A3 entra nuovamente in una valle incassata, quella del Torrente Iassa che gli scorre ad est. Poco dopo lo sdoppiamento delle due carreggiate autostradali ed il Viadotto Friddizza, fino a Laurignano, si riscontrano diverse frane di tipo complesso in corrispondenza dei Viadotti San Martino, Specola, Acqua Ceraso, Torre di Surice. Nel tratto terminale, dopo il Viadotto Busento, ad 1 km dallo svincolo di Cosenza Sud, ulteriori frane di scorrimento e complesse interessano l'autostrada.

La causa innescante più comune dei fenomeni franosi è costituita dalle precipitazioni (eventi Gennaio 2009, Marzo 2010), spesso molto intense e di breve durata, che riattivano frane preesistenti o innescano colate di fango rapide, *debris flows* o scorrimenti superficiali di terra che rappresentano un serio pericolo per la vita umana e per l'infrastruttura.

Per ottenere l'elemento esposto al rischio da frana, il tratto di autostrada studiato è stato digitalizzato dalle ortofoto, in scala 1:10000, e successivamente trasformato in formato raster in ambiente GIS. Nell'analisi è stata utilizzata la carta di suscettibilità ottenuta con il metodo dell'Analisi Condizionale applicato alla totalità delle frane profonde, perché risultata maggiormente affidabile nella predizione delle frane nella validazione, e la carta di suscettibilità da frane superficiali ottenuta con il metodo *Weight of Evidence*. Per l'analisi del rischio il tratto di autostrada è stato sovrapposto prima sulla carta di suscettibilità da frane profonde (Fig. 4.56), e successivamente sulla carta di suscettibilità da frane superficiali (Fig. 4.57).

L'analisi della presenza dell'autostrada nelle aree caratterizzate da differenti gradi di suscettibilità da frana profonde ha mostrato che il 37,2% del tratto di autostrada studiato (10,4 km) ricade in aree con suscettibilità da alta a molto alta (Fig. 4.56); mentre l'analisi del rischio spaziale nelle aree caratterizzate da differenti gradi di suscettibilità da frana superficiali ha mostrato che il 55% del tratto di autostrada studiato (14,9 km) ricade in aree con suscettibilità da alta a molto alta (Fig. 4.57). I risultati mostrano che il rischio da frana è strettamente connesso con l'espansione delle infrastrutture costruite dall'uomo in aree che potrebbero essere interessate da frane.

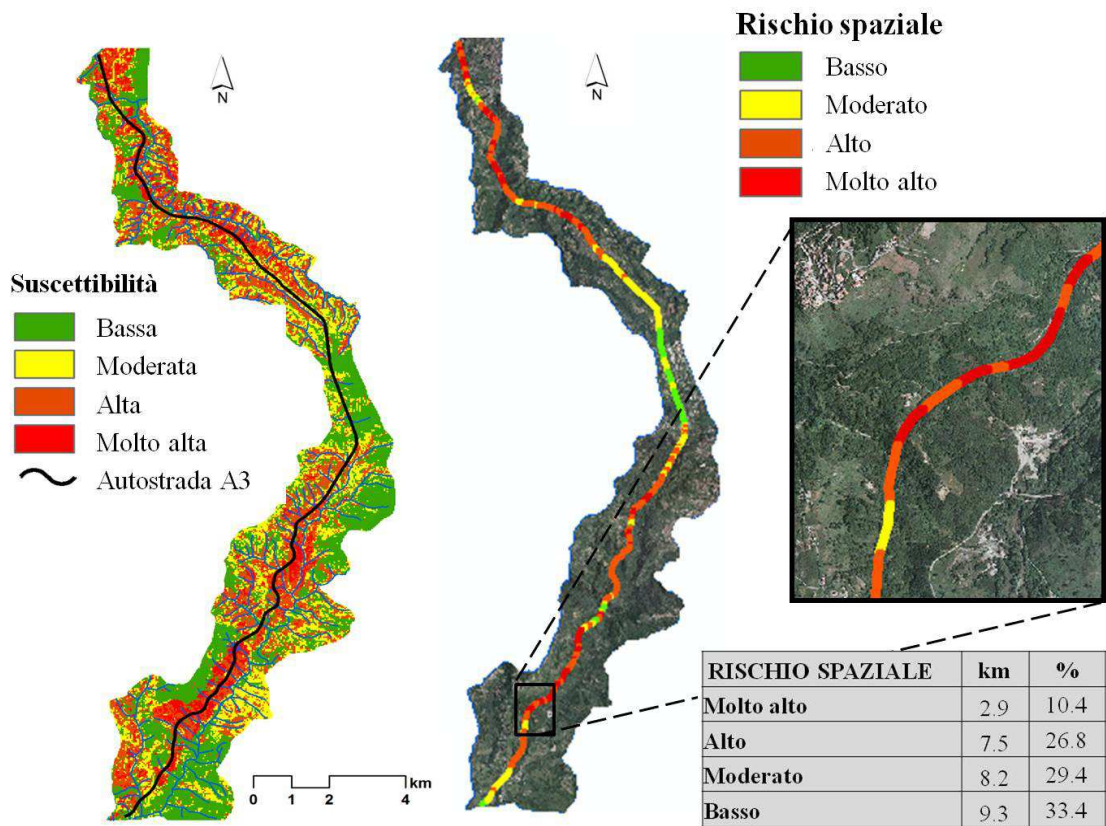


Figura 4.56 Rischio spaziale da frane profonde per il tratto di autostrada considerato.

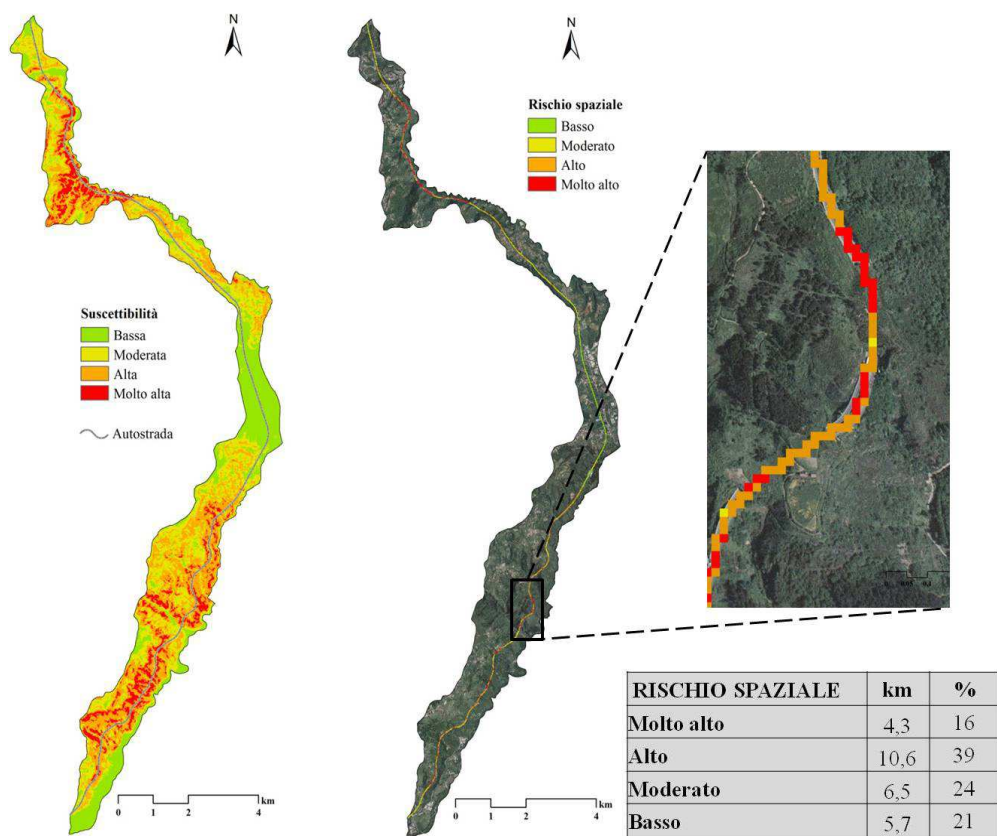


Figura 4.57 Rischio spaziale da frane superficiali per il tratto di autostrada considerato.

## CAPITOLO 5 - CASO DI STUDIO: AMENDOLARA

In questo capitolo, il primo paragrafo descrive le caratteristiche geologiche, geomorfologiche e degli aspetti climatici del settore nord-orientale della Calabria, in cui è localizzata l'area che si è scelto di esaminare, e descrive più in dettaglio questi aspetti nell'ambito dell'area di studio. Nel secondo paragrafo si espone la valutazione quantitativa del rischio da frane profonde e da frane superficiali realizzata per questo caso di studio. La metodologia applicata si basa sulla formula:  $\text{Rischio} = \text{Pericolosità} * \text{Vulnerabilità} * \text{Valore economico degli elementi esposti al rischio}$ . Sono riportati i dati utilizzati, le fonti e la loro preparazione per l'analisi, ponendo maggiore attenzione ai dati relativi ai fenomeni franosi. La valutazione completa della pericolosità ha incluso il calcolo della probabilità spaziale (probabilità che una certa area sia interessata da una frana) attraverso i metodi: "valutazione spaziale multi-criteriale", "*Hazard Index*" e "*Weight of Evidence*", della probabilità temporale (probabilità che si inneschi una frana con un certo periodo di ritorno) quantificata attraverso un approccio storico-probabilistico basato sulla ricorrenza temporale degli eventi del passato (utilizzando una carta inventario multi-temporale) e della probabilità di magnitudo (probabilità che una frana abbia determinate dimensioni) valutata mediante l'analisi della relazione magnitudo-frequenza. Successivamente è stata calcolata la vulnerabilità fisica considerando le caratteristiche degli elementi a rischio considerati (edifici e strade) e la magnitudo delle frane. La fase finale ha riguardato il calcolo del rischio, in termini economici, indicando cioè la quantità di soldi che è probabile che vada persa come conseguenza del verificarsi di un evento franoso in una data area, in un certo intervallo di tempo e con delle precise dimensioni.



## 5.1 Inquadramento dell'area di studio

### 5.1.1 Inquadramento geografico ed orografico

L'area di studio è ubicata nel settore nord-orientale della Calabria (Fig. 5.1), al confine con la Basilicata, ed è geograficamente posizionata tra le coordinate 634283 E 4422422 N e 636205 E 4424957 N, del sistema di proiezione UTM, datum WGS84. Essa è localizzata a ridosso dello spartiacque che separa i bacini idrografici del Torrente Straface e del Torrente Ferro, che hanno origine dal Massiccio del Pollino e si estendono approssimativamente in direzione ONO - ESE, perpendicolarmente alla linea di costa, sfociando nel Mar Ionio. Il bacino del Torrente Straface presenta un'estensione areale di circa 40 km<sup>2</sup>, compreso tra le quote 0 e 1124 m s.l.m., con un valore medio di pendenza abbastanza elevato pari all'8%. Mentre il bacino del Torrente Ferro occupa un'area di circa 120 km<sup>2</sup>, tra le quote 0 e 1150 m s.l.m., e presenta un valore medio di pendenza d'alveo del 3,8 %.

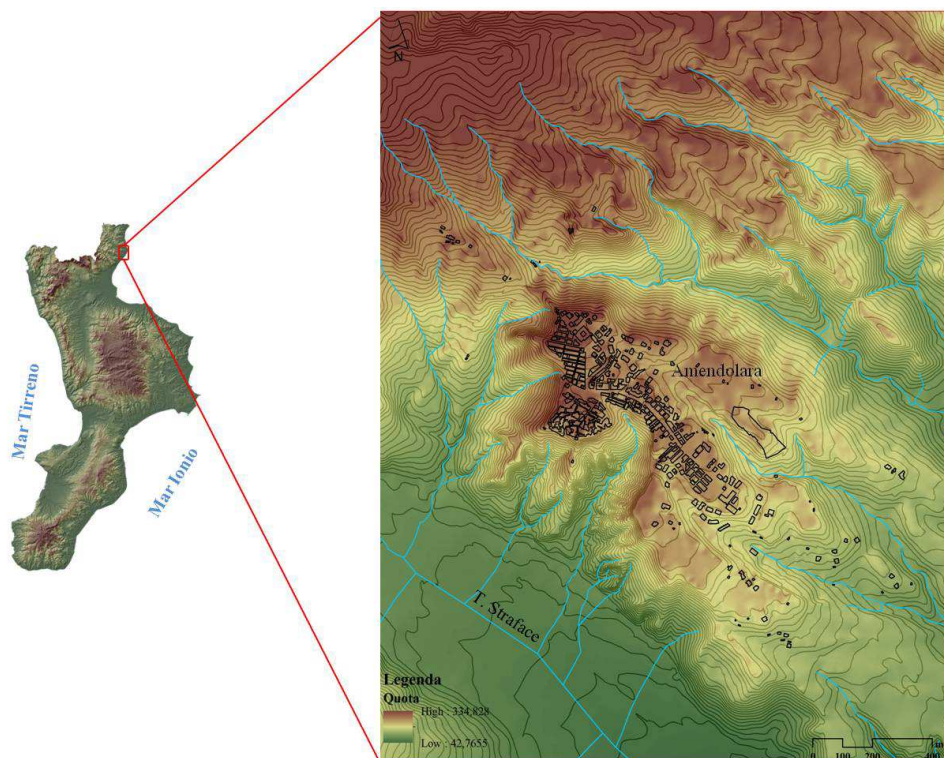
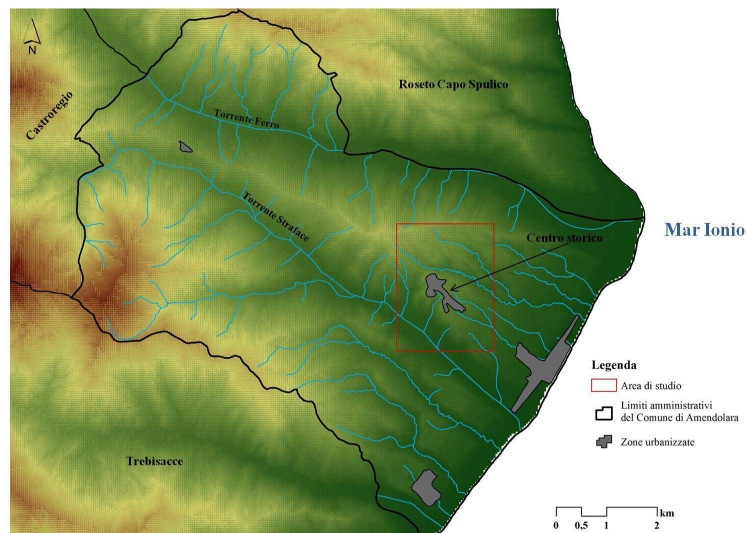


Fig. 5.1 Ubicazione dell'area di studio.

L'area di studio ricade nel comune di Amendolara (Fig. 5.2), che ha un'estensione territoriale di 64,21 km<sup>2</sup> e quote che oscillano da 0 a 803 metri (Bosco di Straface) s.l.m., ed ingloba la parte più antica del centro abitato. Questo sorge a quota 227 m s.l.m, a circa 3 km dalla costa ed occupa totalmente la parte sommitale di un'ampia superficie terrazzata, che degrada verso sud.



**Figura 5.2 Area di studio nel comune di Amendolara.**

Per quando riguarda l'aspetto orografico più generale il territorio di Amendolara è caratterizzato da quattro unità fisiografiche (Bruno e Perrotta, 2010):

- area montana: tra i 500 e gli 800 m. s.l.m. (Bosco di Straface), i versanti sono caratterizzati dalla presenza di lunghe creste originate dai processi tettonici e geomorfologici tuttora in atto, responsabili degli stress sulle rocce e dell'attività dei versanti;
- area collinare: tra 200 e i 500 m. s.l.m., che comprende cinque terrazzi degradanti verso il mare tra i 200 e i 300 m s.l.m., con un margine interno e un bordo esterno chiaramente distinguibili;
- area di fondovalle: tra la linea di costa e i 100 m. s.l.m., caratterizzata da un alveo a "V", che vicino la foce diventa ampio e più tabulare. La rete idrografica è fortemente condizionata dalle strutture tettoniche e presenta tratti asciutti in molti settori abbandonati;
- area costiera: si estende dalla foce del T. Avena a quella del T.Ferro ed è costituita principalmente da sedimenti grossolani. E' interessata da un notevole arretramento della linea di costa, dovuto sia a fattori naturali che antropici.

Con riferimento alla cartografia I.G.M. (Istituto Geografico Militare) del 1954, l'area di studio ricade nelle seguenti sezioni, in scala 1:10.000:

- Foglio N°222, IV-NE-c, "Amendolara"
- Foglio N°222, IV-NE-d, "Roseto Capo Spulico"
- Foglio N°222, IV-NO-b, "Masseria Maristella"
- Foglio N°222, IV-NO-a, "Bivio Pietra Stoppa"

Mentre, in riferimento alla Carta Geologica d'Italia redatta dall'ISPRA in scala 1:50000, l'area ricade nel

- Foglio N°535, "Trebisacce".

## 5.1.2 Inquadramento geologico

### 5.1.2.1 Geologia regionale

L'evoluzione geologica della penisola italiana è legata all'Orogenesi Alpino-Himalayana, che ha portato alla formazione della Catena Alpina e della Catena Appenninica a partire, rispettivamente, dal Cretacico superiore e dal Miocene inferiore. In sintesi, il movimento di convergenza tra Africa e Europa è stato caratterizzato da una prima subduzione di litosfera oceanica al di sotto della placca africana con conseguente collisione continentale nell'Eocene-Oligocene e formazione della catena alpina Europa vergente (Boccaletti et al., 1977; Scandone et al., 1977), e successivamente da una subduzione di litosfera africana al di sotto della placca europea nel Paleogene-Miocene inferiore, che ha portato alla formazione delle falde di ricoprimento della catena appenninica. L'orogene appenninico, relativamente giovane (45 Ma), è caratterizzato da un andamento NNW-SSE; esso viene distinto in tre porzioni, chiamate rispettivamente settentrionale, centrale e meridionale (Boccaletti et al., 1980). L'Appennino meridionale è caratterizzato da un dominio di avampaese, un dominio di catena e dal dominio tirrenico (Fig. 5.3).

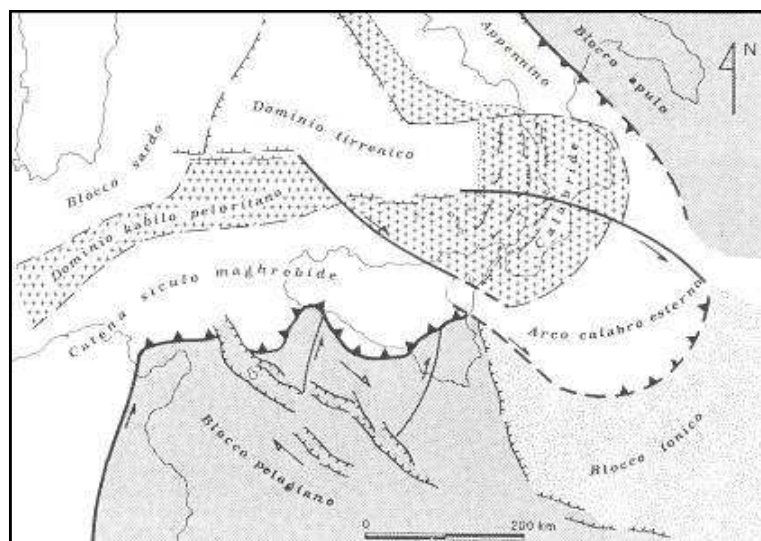


Figura 5.3 Schema cinematico del Mediterraneo centrale. Sono evidenziati i principali domini strutturali e le aree di deformazione marcano la zona di collisione tra Africa e Europa (da Ben Avraham et al., 1990).

#### DOMINIO DI AVAMPAESE

Nel dominio di avampaese si identificano il Blocco Pelagiano, il Blocco Apulo e il Bacino Ionico, i quali differiscono tra loro per le caratteristiche crostali e per le coperture sedimentarie.

I blocchi pelagiano e apulo sono costituiti da crosta continentale, caratterizzata da spessori dell'ordine dei 25-30 Km (Boccaletti et al., 1984), su cui poggiano successioni carbonatiche mesozoico-terziarie di piattaforma (Burolet et al., 1978; Channel et al., 1979; Ricchetti, 1980; Ricchetti et al., 1988). Lungo il margine esterno della catena, su questo dominio si sviluppano le successioni terrigene plio-pleistoceniche dell'Avanfossa Bradanica, in Appennino Meridionale, e dell'Avanfossa di Gela, in Sicilia.

Il Bacino Ionico è costituito, invece, da crosta oceanica, caratterizzata da spessori dell'ordine dei 10-15 Km (Finetti, 1982; Boccaletti et al., 1984), nella quale si riconoscono circa 2000 - 4000 m di sedimenti carbonatici mesozoico-paleogenici e da circa 2000 - 4000 m di sedimenti terrigeni supramiocenici - quaternari.

#### DOMINIO DI CATENA

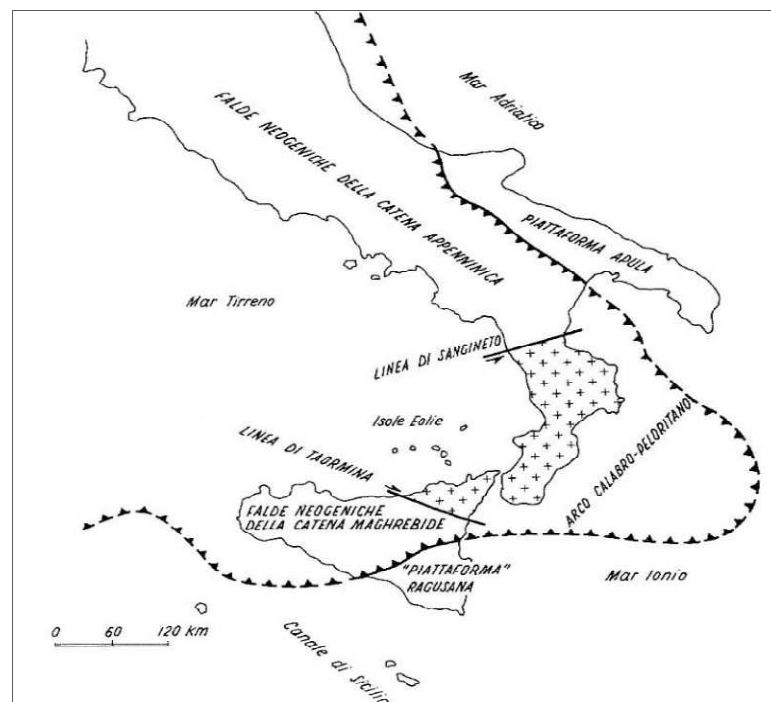
Il dominio di catena comprende l'Appennino Meridionale, con andamento NO-SE, e la Catena Maghrebide, con andamento circa E-O. L'elemento di congiunzione tra questi due elementi d'orogene è rappresentato dall'Arco Calabro-Peloritano.

La catena appenninico-maghrebide è costituita da falde di ricoprimento, con vergenza verso ENE nel tratto appenninico e verso SE nel tratto siculo-maghrebide. Queste derivano dalla deformazione del dominio oceanico della Tetide (Unità Liguridi e Sicilidi) e delle sequenze mesozoico-terziarie di piattaforma e di bacino, con le relative coperture flyscioidi mioceniche, associate al paleomargine africano (Ogniben, 1960; 1969 (b); 1973; Scandone, 1972; D'Argenio et al., 1973; Amodio-Morelli et al., 1976; Scandone et al., 1977).

In particolare, nell'Appennino calabro-lucano la deformazione dei domini paleogeografici, situati tra il paleomargine dell'Adria e quello sardo-corso, ha portato i terreni alloctoni a sovrascorrere sulle successioni dell'Avampaese Apulo, nel Pliocene-Pleistocene inferiore (Agip, 1977; Mostardini e Merlini, 1986; Cello et al., 1987; 1989; Catalano et al., 2004), originando bacini in discordanza sulle falde, come il Bacino di Sant'Arcangelo (Vezzani, 1967; Hippolyte et al., 1994). Nello stesso periodo, nella zona assiale della catena, deformazioni estensionali hanno portato alla formazione di

bacini intermontani, come il Vallo di Diano, mentre la flessurazione della piattaforma apula al di sotto della catena ha creato l'avanfossa bradanica. La fase finale del processo di orogenesi ha modificato il sistema a falde apulo vergenti attraverso deformazioni trascorrenti sinistre (Dewey et al., 1989; Cinque et al., 1993; Catalano et al., 1993; 2004; Monaco et al., 2001).

L'Arco Calabro-Peloritano rappresenta l'elemento più arcuato e deformato tra le catene perimediterranee ed è costituito da coltri cristalline derivanti dalla deformazione di crosta oceanica e continentale. I rapporti tra L'Arco Calabro-Peloritano, la catena appenninica a nord e la catena siculo-maghrebide a sud, sono rappresentati da due zone di trascorrenza principale, la Linea di Sanginetto e la Linea di Taormina, caratterizzate rispettivamente da movimenti sinistri e destri (amodio-Morelli et al., 1976; Scandone, 1982) (Fig. 5.4).



**Figura 1.4 Arco Calabro - Peloritano nell'orogene appenninico – maghrebide (da Amodio- Morelli et al., 1976).**

#### DOMINIO TIRRENICO

Il dominio tirrenico, formatosi a partire dal Tortoniano (Scandone, 1979; Dewey et al., 1989), è situato nelle aree interne rispetto al sistema orogenico ed è delimitato da strutture orientate da NO-SE a N-S lungo il margine dell'Appennino meridionale e

dell'Arco Calabro ed E-O lungo il margine siculo. Lungo queste fasce si sviluppa un vulcanismo quaternario sia alcalino (Ustica) che calcoalcalino (Eolie).

Esso è caratterizzato dalla presenza di bacini con spessori crostali minimi (Moho < 10 Km), ossia il Bacino Magnaghi-Vavilov e il Bacino del Marsili, originatisi rispettivamente nel Pliocene inferiore e nel Pliocene superiore – Pleistocene inferiore (Kastens et al., 1986).

Alcuni autori hanno interpretato il dominio tirrenico come un bacino di retroarco in un sistema arco-fossa di tipo estensionale, creatosi in seguito alla subduzione della placca ionica sotto la placca europea (Boccaletti e Guazzone, 1972; Dewey et al., 1973; Moussat, 1983; Malinverno e Ryan, 1986; Rehault et al., 1987). In questa interpretazione, i bacini Magnaghi-Vavilov e Marsili, nei quali sono stati dragati basalti di tipo MORB, rappresenterebbero due nuclei di oceanizzazione, che si sono creati a causa del notevole assottigliamento crostale.

#### 5.1.2.1.1 Caratterizzazione geologica dell'Appennino calabro-lucano

L'Appennino meridionale è costituito dalla sovrapposizione tettonica di due elementi strutturali che definiscono, regionalmente, una struttura a *duplex*, i cui due orizzonti sono ben rappresentati nell'area del confine calabro-lucano (Fig. 5.5).

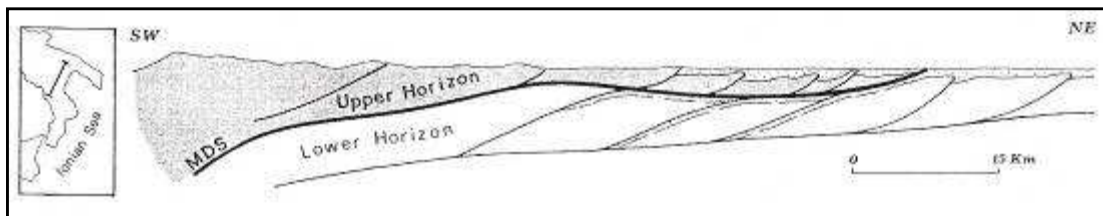


Figura 5.5 Sezione geologica schematica attraverso l'Appennino calabro-lucano (da Cello et al., 1989). I puntini indicano i depositi plio-pleistocenici; MDS: *sole-thrust* della catena.

L'orizzonte strutturale inferiore è rappresentato dalle successioni carbonatiche mesozoiche - terziarie di piattaforma (Unità del Pollino; Monaco e Tortorici, 2008). A nord-est del massiccio del Pollino queste successioni affiorano in strutture monocliniche immergenti verso NE, estruse dai terreni alloctoni liguridi a causa della tettonica trascorrente pleistocenica delle ultime fasi della collisione continentale (Catalano et al., 1993).

L'orizzonte strutturale superiore è, invece, costituito dalle falde alloctone dell'Appennino s.s., in cui sono rappresentate le unità di origine oceanica dei Complessi

Liguride (Unità tettonica Nord-calabrese; Monaco e Tortorici, 2008) e Sicilide, strutturatesi durante le fasi di subduzione oligo-miocenica e accavallatesi sul margine continentale adriatico durante la successiva fase di collisione (Monaco e Tortorici, 2008). Queste unità sono ricoperte in discordanza da depositi pleistocenici che, coinvolti nelle fasi tettoniche più recenti, affiorano lungo la costa ionica ad est e lungo la valle del Torrente Raganello. I sedimenti più recenti, tardo quaternari, sono depositi continentali e marini, generalmente grossolani e mal classati, affioranti lungo le valli fluviali e la costa.

La successione tettono-stratigrafica è descritta nel Foglio 535 “Trebisacce”, in scala 1:50000 della Carta Geologica d’Italia (Monaco e Tortorici, 2008) (Fig. 5.6), separando le unità tettoniche della catena dai depositi pleistocenici discordanti su di esse. Quindi gli autori distinguono:

#### UNITÀ TETTONICHE DELLA CATENA

- **Unità tettonica Nord-calabrese:** (“coltri nord-calabresi” di Selli, 1962) affiora lungo il versante nord-orientale del massiccio del Pollino; poggia tettonicamente sulla sottostante Unità del Pollino e, insieme con le “coltri silentine” di Selli (1962), corrispondono al Complesso Liguride di Ogniben (1969 b), così denominato per le correlazioni con le unità ofiolitifere dell’Appennino Settentrionale. Le unità litologiche costituiscono una successione continua di età compresa tra il Giurassico e l’Eocene medio, formata dal basso verso l’alto da ofioliti con le relative coperture sedimentarie (Giurassico sup.), dalle formazioni del Frido-Crete Nere (Neocomiano-Albiano) e dalle successioni torbiditiche della formazione del Saraceno (Albiano-Daniano) e del Flysch di Albidona (Eocene inf.-medio).
- **Unità tettonica sicilide:** (denominato Complesso Sicilide da Ogniben, 1969, per analogia con i terreni alloctoni di eugeosinclinale presenti estesamente in Sicilia), affiora lungo le porzioni frontali della catena, dal Mare Ionio fino all’area di Potenza. Esso è costituito da sedimenti prevalentemente pelagici, riferibili alle Argille Varicolori Inferiori (Lentini, 1979) con caratteri di mélange tettonico (Hsu, 1968). I blocchi inclusi appartengono ad altri domini paleogeografici e si riferiscono alle formazioni del Flysch Rosso e del Flysch Numidico. Questi terreni passano in apparente continuità di sedimentazione ad alternanze calcareo-marnose supracretaceo-eoceniche della Formazione di Monte Sant’Arcangelo. Le due formazioni formano il Gruppo delle

Argille Variegate, che è ricoperto in discordanza da coperture terrigene dell'Oligocene superiore appartenenti alla Formazione di Corleto Perticara.

- **Unità tettonica del Pollino:** l'unità tettonica più profonda affiora lungo la dorsale del Pollino. E' costituita da successioni carbonatiche mesozoico-terziarie di piattaforma.

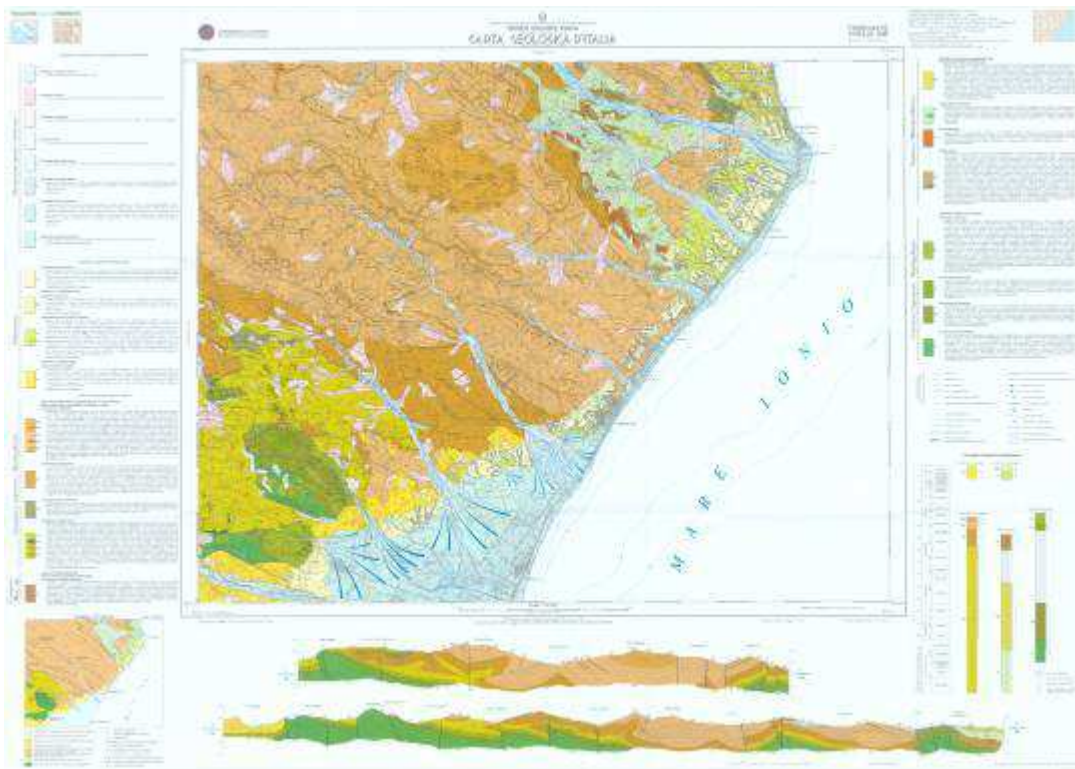


Figura 5.6 Foglio 535 “Trebisacce”, in scala 1:50000 della Carta Geologica d'Italia (Monaco e Tortorici, 2008).

#### DEPOSITI MARINI PLEISTOCENICI

Sulle unità precedentemente descritte si trovano in discordanza depositi marini pleistocenici, rappresentati da sedimenti terrigeni infrapleistocenici e da depositi terrazzati medio-suprapleistocenici. I primi affiorano lungo la costa ionica (area di Amendolara) e lungo il corso del Torrente Raganallo. In base alla litologia e alla posizione, i depositi marini infrapleistocenici sono stati suddivisi in due gruppi: il *Gruppo di Cassano*, affiorante nel bacino del basso Crati, e il *Gruppo di Trebisacce*, affiorante lungo la costa ionica. I depositi marini terrazzati medio-suprapleistocenici, invece, poggiano in discordanza al di sopra dei due gruppi suddetti e delle unità della catena lungo tutta la fascia costiera ionica.



## DEPOSITI CONTINENTALI E TRANSIZIONALI QUATERNARI

I depositi più recenti dell'area sono rappresentati da depositi alluvionali del Pleistocene medio - Olocene, distinti in terrazzati, recenti ed attuali, affioranti lungo le valli dei corsi d'acqua, e ancora depositi di spiaggia antichi, depositi di versante, depositi di frana e depositi di spiaggia attuali.

### **5.1.2.1.2 Caratterizzazione strutturale dell'Appennino calabro-lucano**

Le strutture tettoniche presenti nell'Appennino calabro-lucano hanno registrato in modo completo la complessa storia deformativa legata alla convergenza tra Africa e Europa.

Le principali strutture riconoscibili nell'area esaminata sono raggruppabili in tre famiglie (Monaco et al., 1995; Iovine e Merenda, 1996).

La *prima famiglia* è rappresentata da sovrascorrimenti con piani orientati mediamente NO-SE ed immergenti verso SO, che hanno interessato, tra il Cretaceo superiore ed il Miocene inferiore, le Unità ofiolitifere liguridi. Sono strutture che si sono formate durante la costruzione del cuneo d'accrezione e forniscono, così, informazioni sulla fase di chiusura oceanica e sulle prime fasi della collisione continentale (Ghisetti et al., 1994). Le strutture più antiche sono quelle riconducibili a processi sviluppatasi sulla porzione più superficiale del cuneo di accrezione tra il Cretaceo superiore-Eocene e l'Oligocene inferiore. Queste sono state successivamente parzialmente obliterate dalle deformazioni più tardive, costituite dalle strutture a *thrusts* che hanno portato l'intera Unità del Frido a sovrascorrere sui terreni non metamorfici dell'Unità del Flysch calabro-lucano, nell'Oligocene superiore. Queste deformazioni avrebbero consentito la formazione di alti strutturali delimitanti bacini più o meno profondi, all'interno dei quali sarebbe avvenuta la sedimentazione delle successioni torbiditiche delle formazioni del Saraceno e di Albidona (Ghisetti et al., 1994).

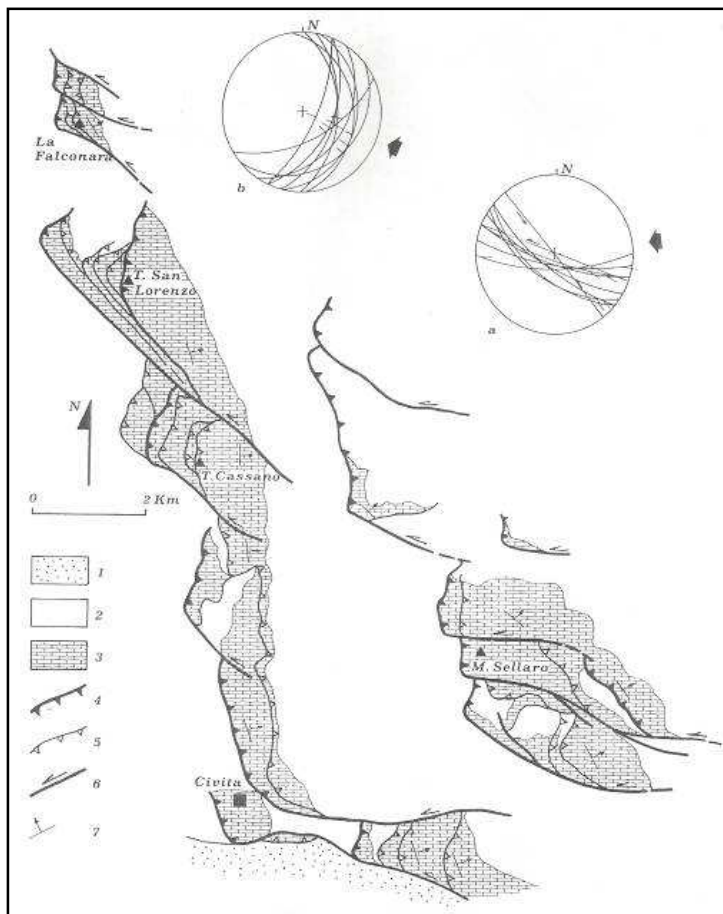
A questa famiglia sono riferibili anche le pieghe-faglie, con assi orientati mediamente NO-SE (vergenza NE), che, tra il Miocene ed il Pleistocene inferiore, hanno portato l'intero Complesso Liguride a sovrascorrere sulle unità carbonatiche. Questo accavallamento avviene lungo una superficie di taglio sub orizzontale con estensione regionale che costituisce il *thrust* di tetto della struttura a *duplex* dell'intero Appennino meridionale.

Nel complesso, queste strutture determinano l'assetto tettonico generale del tratto più meridionale della Catena Appenninica.

La *seconda famiglia* è rappresentata da faglie trascorrenti sinistre, orientate mediamente ONO-ESE, che hanno interessato sia il substrato carbonatico che i terreni alloctoni sovrastanti nell'ultima fase dei processi collisionali, nel Pleistocene medio. Durante questo stadio il forte ispessimento crostale ha inibito l'ulteriore propagazione verso zone più esterne del sistema a *thrust*, favorendo così l'attivazione di queste strutture trascorrenti.

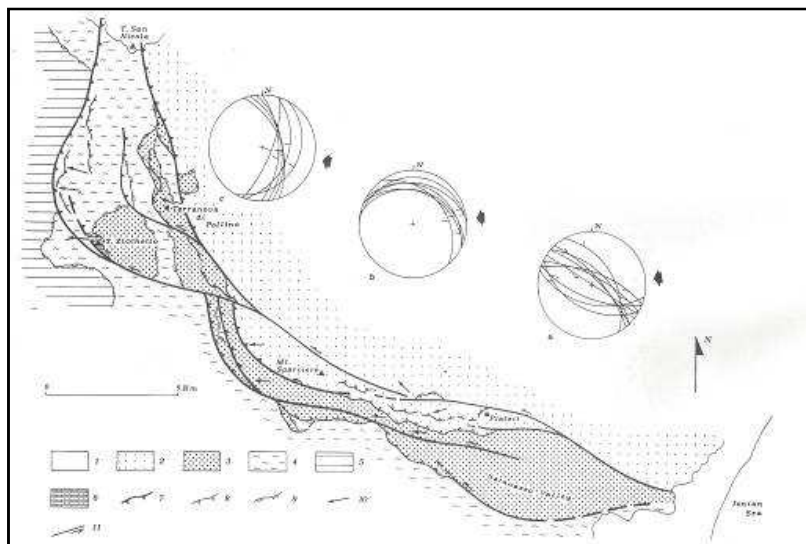
Nel loro insieme, tali strutture formano una fascia che interessa l'intero Appennino meridionale (Catalano et al., 1993; Van Dijk e Okkes, 1991), le cui geometrie e le modalità di deformazione sono strettamente controllate dalle litologie coinvolte e dai lineamenti strutturali preesistenti. Si distinguono, infatti, due stili deformativi a seconda che siano coinvolte le unità del substrato carbonatico o i terreni plastici delle falde appenniniche.

Le strutture che interessano il substrato carbonatico si estendono lungo il versante nord-orientale del Pollino (Monaco, 1993; Monaco e Tansi, 1992) e sono caratterizzate da una serie di faglie trascorrenti *en echelon* con sovrapposizione destra (Fig. 5.7).



**Figura 5.7** Schema strutturale della zona trascorrente pleistocenica su terreni carbonatici. 1: depositi pleistocenici; 2: Unità Liguridi e "mélange basale"; 3: unità carbonatica; 4: sovrascorrimenti pleistocenici principali; 5: sovrascorrimenti pleistocenici secondari; 6: principali faglie trascorrenti; 7: giacitura degli strati. I diagrammi (SCHIMIDT, emisfero inferiore) riportano i dati mesostrutturali lungo le superfici di faglia (a) e di thrust (b); le frecce rappresentano le direzioni di raccorciamento (da Catalano et al., 1993).

L'interferenza tra i singoli segmenti individua aree in compressione (Woodcock e Fisher, 1986), all'interno delle quali si ha l'estrusione dalla copertura alloctona (unità Liguridi) di sequenze carbonatiche del Mesozoico, le quali immergono di circa 35°-45° verso NE. I maggiori tra questi cunei calcarei sono dati dalle strutture di Madonna di Pollino, La Falconara, T.pa di San Lorenzo, T.pa di Porace – Cassano, M.te Sellaro e Civita. Essi sono bordati a SSO da faglie sub-verticali orientate ONO-ESE (direzioni variabili da N90° a N130°E), con i piani che mostrano striature suborizzontali ben preservate (*pitch* variabile da 10 a 25°), indicative di componenti di movimento sinistro (Ghisetti et al., 1994). Le strutture che interessano i terreni alloctoni sono caratterizzate, invece, da fasce altamente deformate larghe fino a circa 2 Km, all'interno delle quali si osservano faglie sinistre a direzione variabile tra N100° e N130°, caratterizzate da piani striati (*pitch* variabile tra 5° e 20°) (Fig. 5.7). Lungo queste fasce, dai piani di faglia si sviluppano una serie di accavallamenti con piani convessi verso l'alto ed inclinati verso NNE, i quali, nel loro insieme, danno luogo a geometrie tipo *flower* asimmetriche (Naylor et al., 1986). Queste strutture si propagano frequentemente lungo i contatti stratigrafici tra le singole formazioni o lungo i preesistenti contatti tettonici e sono marcati dallo sviluppo di fasce cataclastiche spesse fino a 30 m. Cinematicamente si tratta di accavallamenti obliqui (*pitch* delle strie variabile tra 10° e 50°) attivati da direzioni di raccorciamento N80°E (Fig.5.8).



**Figura 5.8** Schema strutturale della zona trascorrente pleistocenica su terreni alloctoni. 1: depositi quaternari; 2: Formazione di Albidona; 3: Formazione del Sarceno; 4: Unità del Flysch calabro-lucano; 5: Unità del Frido; 6: unità carbonatica; 7: sovrascorrimenti pleistocenici principali; 8: sovrascorrimenti pleistocenici secondari; 9: sovrascorrimenti oligo-miocenici; 10: *slip vector* lungo le superfici di sovrascorrimento pleistoceniche; 11: principali faglie trascorrenti pleistoceniche. I diagrammi (SCHMIDT, emisfero inferiore) riportano i dati mesostrutturali lungo le superfici di faglia (a), e di *thrust* (b) del settore sud-orientale e di *thrust* (c) del settore nord-occidentale. Le frecce rappresentano le direzioni di raccorciamento (da Catalano et al., 1993).

La *terza famiglia* è rappresentata, infine, da strutture estensionali che chiudono il ciclo orogenetico accomodando le deformazioni legate al sollevamento finale della catena. Si tratta di strutture sub verticali orientate da N-S a NE-SO (circa parallele alla linea di costa), generate dalla tettonica distensiva che ha interessato la zona dal Pleistocene superiore e che continua presumibilmente fino ad oggi, definendo le caratteristiche sismotettoniche dell'Appennino meridionale; esse risultano responsabili del sollevamento dei sedimenti argilloso-sabbioso-conglomeratici plio-pleistocenici (Guerricchio e Melidoro, 1986). Il sollevamento pleistocenico è ben rappresentato nell'analisi dei tassi di sollevamento delle sequenze dei terrazzi marini con gli stadi glacioeustatici dell'altezza del livello del mare (Carobene, 2003). Nella parte meridionale di Amendolara i tassi di sollevamento, calcolati per ogni ordine di terrazzo, sono compresi tra 0.5 e 1 mm/anno. Lo studio dei terrazzi dimostra un sollevamento continuo nell'area di studio durante il tardo Quaternario, con un sollevamento maggiore nella parte occidentale durante il tardo Pleistocene (Robustelli et al., 2008).

#### **5.1.2.2 Geologia dell'area di studio**

I principali tipi di rocce presenti sono sedimentarie marine e continentali (Fig. 5.9). I litotipi più antichi sono rappresentati da rocce arenaceo-marnose torbiditiche (*flysch*) (Miocene inferiore-medio), che affiorano nella parte nord-occidentale dell'area di studio (T.ne del Prato e Tambarell), seguite da argille marnoso-siltose grigio-azzurro (Pleistocene inf.), che affiorano nella zona centrale dell'area di studio e lungo i versanti che bordano il terrazzo su cui è localizzato il centro storico, e sabbie gialle poco cementate al top della sequenza del Terziario (Pleistocene inf.), queste ultime affioranti limitatamente nella parte settentrionale dell'area. Questi depositi sono coperti da conglomerati poligenici del Pleistocene medio-superiore, che costituiscono i depositi dei terrazzi marini presenti. I depositi continentali nell'area includono: sedimenti alluvionali, conoidi alluvionali e depositi di frana.

Le rocce arenaceo-marnose torbiditiche appartengono all'unità tettonica Nord-calabrese (Monaco e Tortorici, 2008) e prendono il nome di *Formazione di Albidona* (Burdigaliano medio-Langhiano; Bonardi et al., 1985) (Fig. 5.10), che giace in continuità stratigrafica sulla sottostante Formazione del Saraceno. Nella porzione basale si trova un'alternanza arenaceo-pelitica, contenente megastrati di calcilutiti e marne calcaree biancastre e di conglomerati ricchi in matrice. Nella parte centrale la

successione è caratterizzata da torbiditi pelitico-arenacee caratterizzate da sequenze di Bouma tronche degli intervalli basali e con locali livelli a *slump*. Le porzioni più alte (membro arenaceo) rappresentano un sub-sistema torbiditico in leggera discordanza angolare e localmente erosivo sui depositi sottostanti. La composizione delle arenarie dell'intera formazione varia dal basso verso l'alto da litoarenitica ad arcossica.

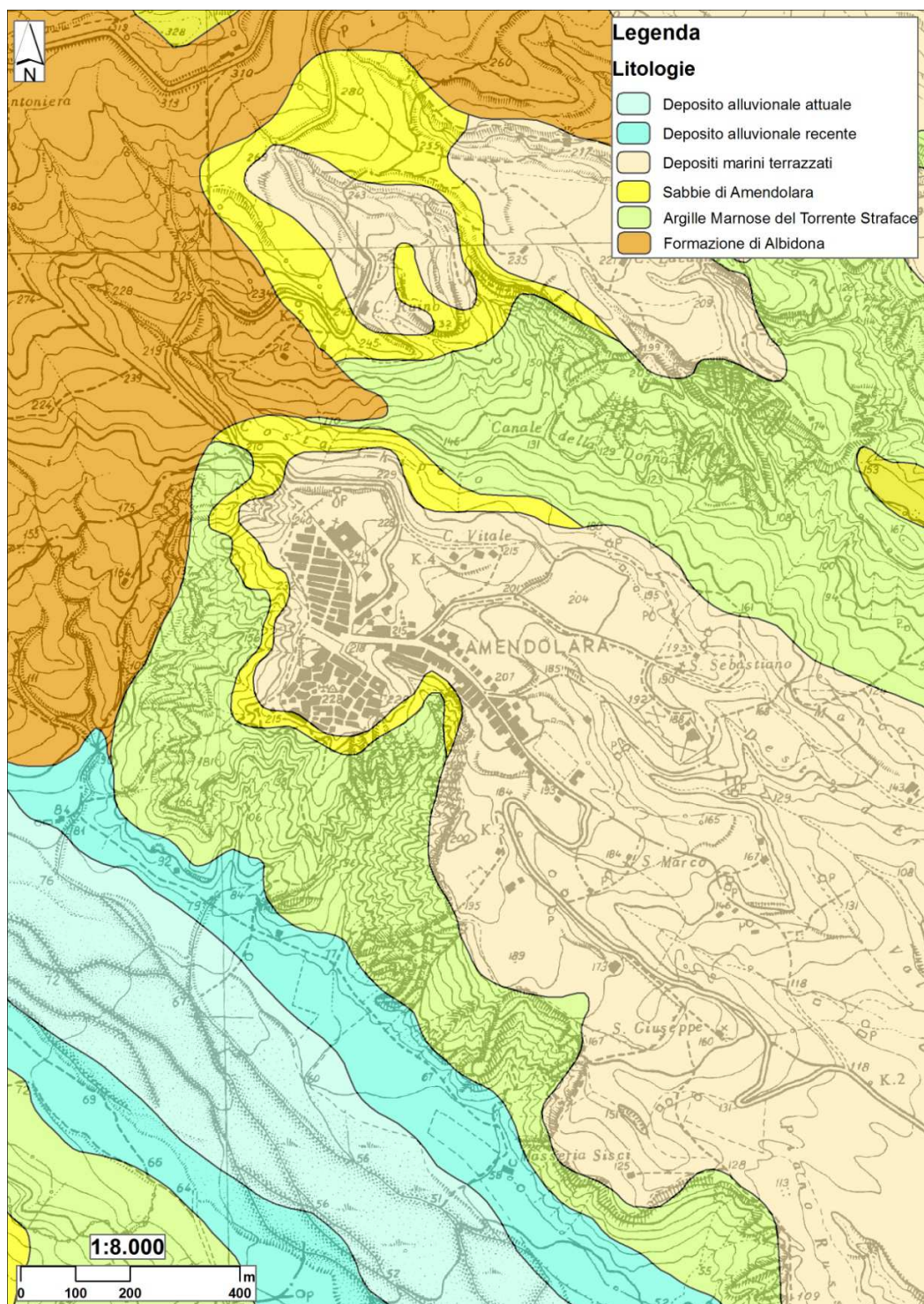


Figura 5.9 Carta litologica dell'area di studio.



**Figura 5.10** Alternanza arenaceo-pelitica, Formazione di Albidona (Burdigaliano-Langhiano).

I depositi marini pleistocenici appartengono al *Gruppo di Trebisacce* e ai terrazzi marini presenti. La successione del Gruppo di Trebisacce poggia in discordanza sui terreni dell'Unità Sicilide e Nord-Calabrese, ed è costituita alla base dalle *Argille Marnose del T.te Straface* che verso l'alto passano gradualmente alle *Sabbie di Amendolara*. Le prime sono argille marnose-siltose (Fig. 5.11), di colore grigio-azzurro, contenenti rare intercalazioni di argille sabbiose e sabbie grigio chiare in strati decimetrici. Contengono scarse associazioni a nannofossili. Esse passano lateralmente e superiormente alle Sabbie di Amendolara (Fig. 5.12). Queste sono sabbie giallastre a granulometria medio-fine, talora siltose, con accenni di stratificazione e con rare lenti conglomerati. Sono ricoperte in discordanza dai depositi marini terrazzati.



**Figura 5.11** Sabbie di Amendolara (Pleistocene Inf.).



**Figura 5.12 Argille marnose del T.te Straface (Pleistocene Inf.).**

I depositi marini terrazzati (Fig. 5.13) sono costituiti da sabbie giallastre a granulometria medio-fine a stratificazione incrociata, talora massive e bioturbate, con intercalati livelli spessi da 50 cm a 1 m di conglomerati poligenici ricchi in matrice, in facies di mare basso. Sono stati distinti sei ordini di terrazzi, separati da scarpate orientate all'incirca parallelamente all'attuale linea di costa.

Per quanto riguarda, invece, i depositi continentali quaternari sono presenti:

- depositi alluvionali recenti (Olocene), costituiti da sabbie medie e fini con livelli di sabbie grossolane e ghiaie, ubicate lateralmente ai corsi d'acqua principali e fissate dalla vegetazione. Esse formano depositi di canale, argine e rotta fluviale e costituiscono, inoltre, i depositi di conoidi alluvionali allo sbocco dei corsi d'acqua nelle aree di pianura, dove passano lateralmente e verticalmente a depositi di piana inondabile con argille limose e limi argillosi con rare intercalazioni di limi sabbiosi e sabbie limose;

- depositi alluvionali attuali, costituiti da ghiaie, sabbie e limi argillosi che si trovano nei tratti dei corsi d'acqua abbandonati e negli alvei attuali;

- deposito di frana, ossia accumuli gravitativi di materiale eterogeneo ed eterometrico presenti estesamente in tutta l'area di studio.



**Figura 5.13 Conglomerati dei terrazzi marini (Pleistocene medio-superiore).**



### 5.1.3 Inquadramento geomorfologico del settore nord-orientale della Calabria

L'area di studio è ubicata nella parte nord-orientale della Calabria, al confine con la Basilicata. Quest'area, denominata "Alto Jonio", si estende dalla Piana di Sibari a sud alla Piana di Metaponto a nord (Fig. 5.14).

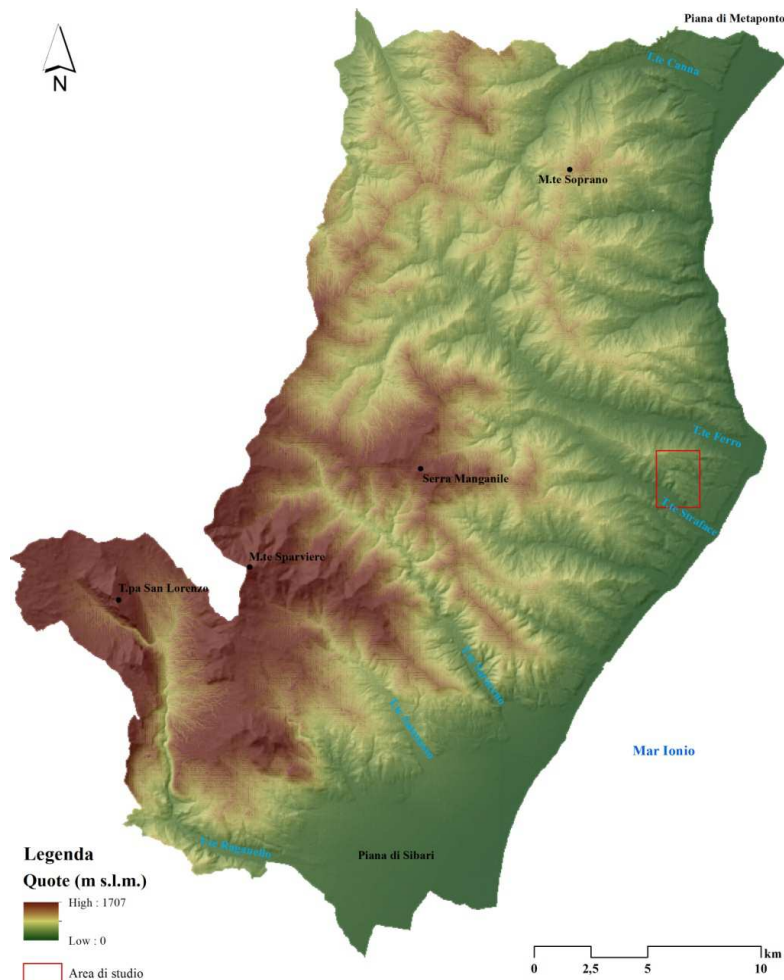


Fig. 5.14 Modello digitale del terreno del settore nord-orientale della Calabria.

Da un punto di vista geomorfologico, il territorio dell'Alto Jonio può essere suddiviso in due aree, secondo i processi di formazione e modellamento dei versanti: un'area montano-collinare nel settore centro-occidentale, in cui il modellamento dei versanti è il risultato di processi di degradazione sui pendii e aggradazione alla loro base, e un'area pianeggiante nel settore orientale, prodotto del trasporto e della deposizione del materiale alluvionale dei corsi d'acqua (Rago, 2012).

#### *Morfologia dei versanti*

La morfologia dei versanti riflette la natura dei terreni affioranti ed è influenzata dalle strutture tettoniche e dai fenomeni gravitativi. Nella parte sud-occidentale, gli

affioramenti di carbonati sono caratterizzati da linee preferenziali di erosione selettiva localizzate lungo piani di faglia ad alto angolo che, morfologicamente, si esprimono in scarpate sub-verticali di notevole altezza. La morfologia delle aree in cui affiorano i depositi terrigeni mesozoico terziari dei Complessi Liguride e Sicilide è condizionata, invece, dalla loro distribuzione irregolare e dalla loro diversa resistenza all'erosione. Sono presenti morfologie arrotondate, che diventano più aspre dove prevalgono i tipi litologici più resistenti o dove le condizioni tettoniche influenzano la morfologia. Le scarpate rocciose, caratterizzate dalla presenza di intercalazioni marnose più tenere, sono soggette ad una tipica erosione selettiva che produce depressioni in corrispondenza delle rocce tenere, e creste e rilievi nelle rocce più resistenti. Le litologie argillose plioceniche e quaternarie sono caratterizzate da morfologie calanchive. Questi versanti calanchivi danno luogo a drenaggi densi e gerarchizzati, formati da profonde incisioni, si creano in seguito all'approfondimento, all'erosione retrogressiva e al moltiplicarsi dei solchi di erosione; questo processo può interessare interi versanti fino a creare un mosaico di "micro" bacini idrografici in rapida evoluzione, ciascuno dei quali separato da sottili creste. L'erosione superficiale delle acque di ruscellamento in queste aree è molto intensa, e rappresenta l'agente morfogenetico principale, in quanto tende ad approfondire il solco lungo l'asse delle vallecole. Il regime termo-pluviometrico, caratterizzato da una piovosità concentrata nel periodo fine autunno - inizio primavera, con una lunga stagione estiva secca, favorisce la dinamica di questo fenomeno.

#### *Morfologia fluviale*

L'idrografia dell'area di studio presenta i caratteri idrologici e morfologici tipici delle fiumare, corsi d'acqua caratteristici della Calabria. Questi sono caratterizzati da un regime idraulico non perenne, in relazione alle precipitazioni concentrate nel periodo autunnale - invernale, con piene improvvise e lunghi periodi di secca. La portata idrica, infatti, inesistente tra maggio ed ottobre, comincia a crescere fino a raggiungere un massimo tra i mesi di gennaio e febbraio per poi decrescere in primavera. Quindi, questi corsi d'acqua si formano e scorrono durante la stagione delle piogge, e, in alcuni casi, interessano solamente il singolo evento atmosferico. I corsi dei torrenti presentano lunghezze ridotte ed elevate pendenze fino allo sbocco nella piana alluvionale poiché i rilievi si trovano a ridosso della costa. Essi devono, così, superare pendenze elevate in pochissimo spazio, raggiungendo, di conseguenza, elevate velocità della corrente e grande capacità di erosione. L'intensa degradazione laterale delle sponde durante le piene e la scarsa erosione sul fondo nei periodi di magra produce nelle fiumare un

ampio letto, costituito da materiali alluvionali poco classati. Le valli principali presentano profili a V con versanti meno acclivi alle quote più elevate, per la presenza di corpi di paleofrane, e versanti più ripidi alle quote più basse. Generalmente, dove affiorano le formazioni meno resistenti ai processi di degrado dei versanti (argille, flysch arenaceo -marnoso) le valli sono caratterizzate da versanti ripidi e fondo sub-pianeggiante molto largo e ciottoloso, come nei torrenti Straface e Ferro; mentre, nelle aree di affioramento delle formazioni più resistenti sono presenti valli molto profonde, come la stretta valle del Torrente Caldanello nei calcari cretaceo - paleogenici, o profili ripidi ma con letto largo e piatto, come nel tratto intermedio del Torrente Satanasso e nel tratto finale del Torrente Saraceno nel flysch calcareo - argilloso. Le valli che si osservano oggi sono il risultato di un processo di sollevamento tettonico regionale, che, a partire dal Pleistocene medio, ha prodotto, attraverso diversi cicli erosivi, un approfondimento del reticolo idrografico e la conseguente fossilizzazione di depositi alluvionali terrazzati a varie quote al di sopra dell'alveo attuale, come nei torrenti Raganello, Satanasso e Saraceno. L'area di studio è caratterizzata, inoltre, dalla presenza di numerose conoidi alluvionali, di dimensioni variabili, allo sbocco delle valli laterali tributarie nelle valli principali e allo sbocco dei corsi d'acqua nelle zone di pianura. I depositi che le caratterizzano sono costituiti da clasti sempre più arrotondati e classati verso valle.

#### *Morfologia costiera*

Nella piana costiera i depositi alluvionali recenti passano lateralmente ai depositi fluvio - costieri spesso attraverso conoidi alluvionali di dimensioni variabili. I depositi alluvionali recenti, quelli di piana inondabile e di cordone litorale possono essere riferiti all'ultimo ciclo climatico post-Wurm e alla conseguente risalita del livello del mare, che, a partire dalla fine del Pleistocene superiore e nel corso dell'Olocene, ha creato la linea di costa attuale (Monaco & Tortorici, 2008). La fascia costiera è caratterizzata dalla presenza di depositi marini terrazzati, costituiti da ghiaie e sabbie, che generalmente si trovano al di sopra delle argille pliocenico - quaternarie. I terrazzi più recenti, cioè quelli che si trovano a quote più basse, sono costituiti da ampie superfici pianeggianti, con lieve pendenza verso il mare, interrotte dalle ampie valli dei corsi d'acqua principali (da nord: Torrenti Canna, Ferro, Straface, Avena, Pagliara, Saraceno e Satanasso) e da valli strette e profonde di corsi d'acqua minori. Nel settore compreso tra Roseto Capo Spulico e il Torrente Saraceno, essi presentano un andamento parallelo alla linea di costa attuale; mentre, verso sud, essi tendono ad allargarsi e a divergere

dalla linea di costa attuale. Elemento caratteristico dei terrazzi sono le scarpate ripide originate dall'erosione nei sedimenti ghiaiosi - sabbiosi e che separano i diversi ordini di terrazzi. I terrazzi più antichi sono quelli più incisi, e di questi restano affioramenti di limitata estensione, ma ben riconoscibili sui sedimenti pliocenico - quaternari (Mostardini e Pieri, 1969). Nell'area sono stati riconosciuti sette ordini di terrazzi con bordi interni, corrispondenti alle linee di riva, posti a quote comprese tra ~5 m e ~480 m (Ferranti et al., 2009). La serie completa è stata riconosciuta nei pressi di Amendolara.

### 5.1.3.1 Inquadramento geomorfologico dell'area di studio

L'analisi dell'assetto geomorfologico dell'area (Fig. 5.15) mette in evidenza che i lineamenti morfologici principali sono controllati dalle strutture tettoniche, dalla natura litologica delle formazioni affioranti e dai processi di degradazione meteorica e gravitativi di versante (Conforti et al., 2014).

Nell'area, nonostante i sollevamenti plio-pleistocenici, si riscontra una morfologia collinare, con una topografia ondulata e pendenze dolci: le pendenze sono comprese tra 0 e 45°, con locali incrementi oltre i 45°.

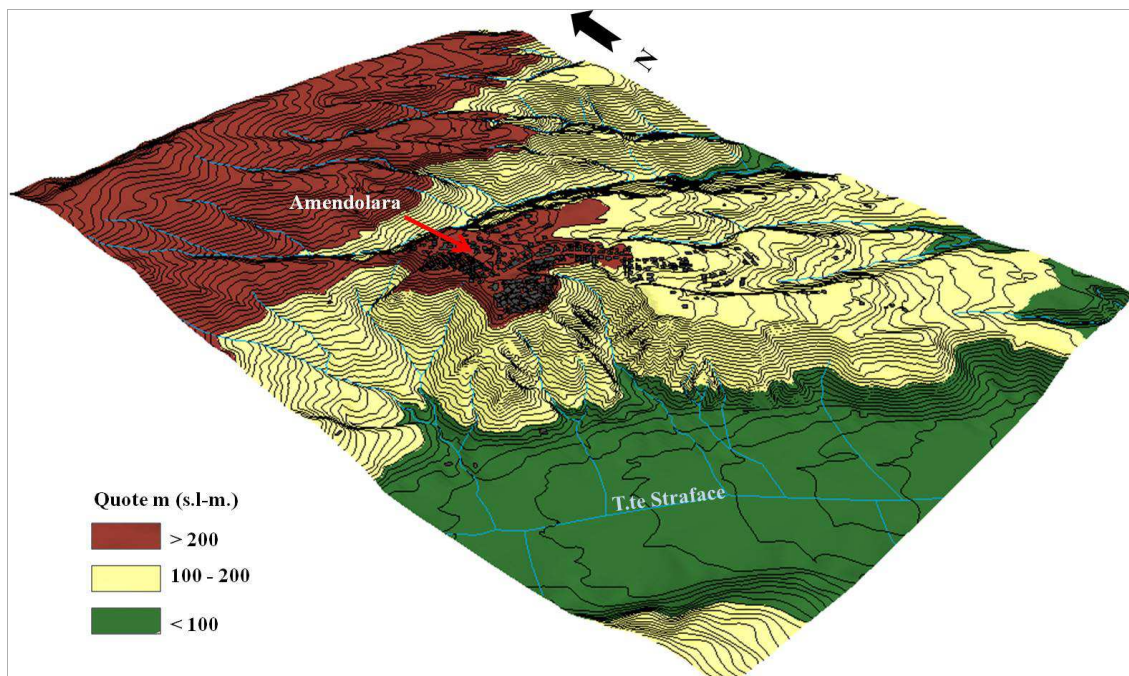


Figura 5.15 Visione tridimensionale dell'area di studio.

La morfologia più dolce si ha nella zona dove affiorano i depositi fliscioidi e le argille grigio-azzurre (Fig. 5.16a), mentre i versanti più acclivi sono localizzati vicino il centro abitato, in corrispondenza di zone fortemente erose ed incise dai corsi d'acqua, spesso effimeri, ed in corrispondenza della testata degli strati sabbioso-conglomeratici (Fig. 5.16b). La combinazione dei processi tettonici e geomorfologici produce versanti caratterizzati da lunghe creste, sfruttate spesso per la costruzione di infrastrutture, come la strada provinciale 266 che attraversa il centro abitato.



**Figura 5.16 a) morfologia dolce su depositi argillosi; b) versante acclive in un'area interessata da frane ed erosione areale.**

Nell'area si riconoscono paleosuperfici terrazzate a quote diverse (Fig. 5.17), che riflettono l'interazione tra i cambiamenti del livello del mare e l'attività tettonica quaternaria (Ferranti et al., 2009). Complessivamente, si identificano sette ordini di terrazzi, con i margini interni ed esterni chiaramente distinguibili. I terrazzi possono

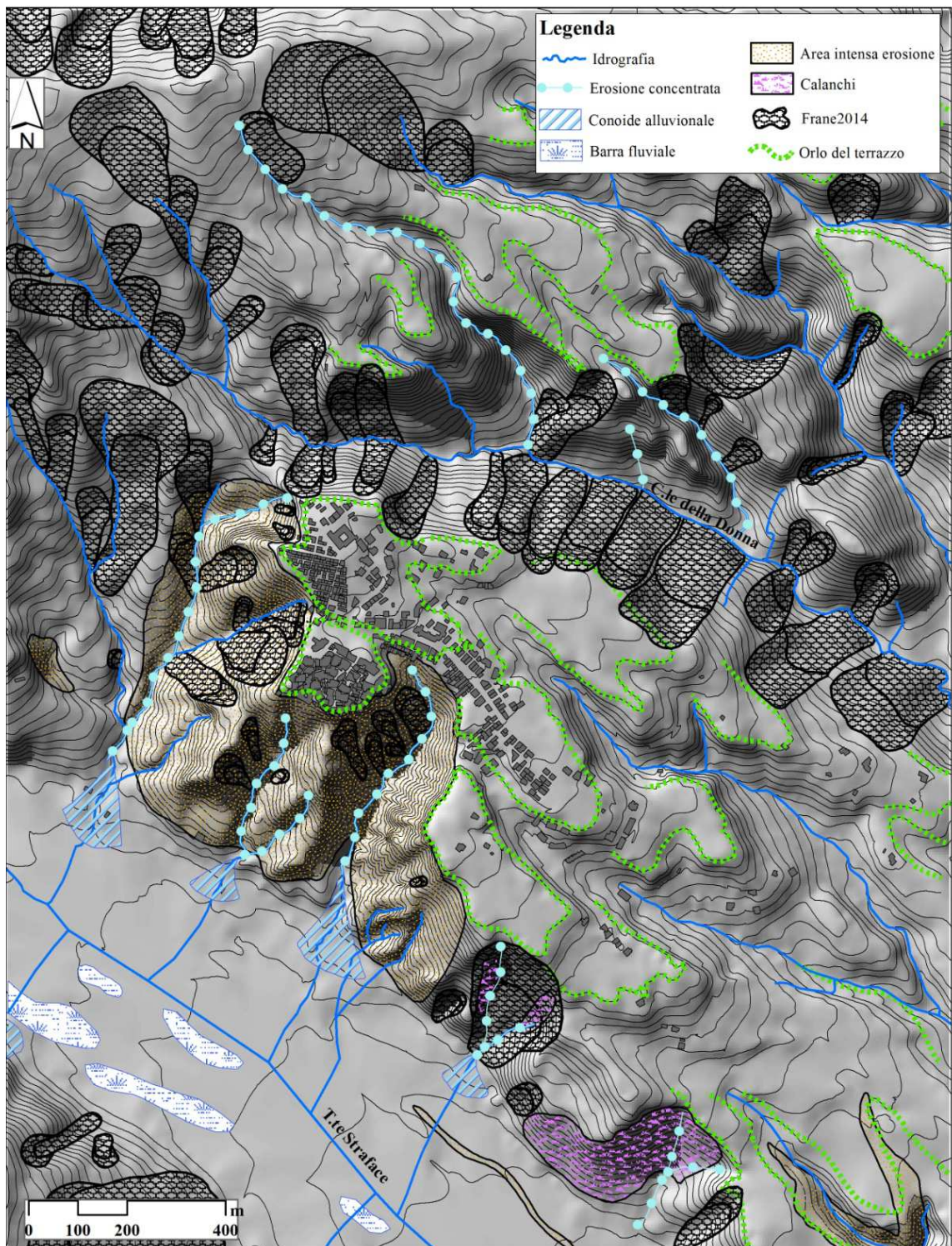


Figura 5.17 Carta geomorfologica dell'area di studio.

essere correlati con l'isotopo di ossigeno agli stadi 1, 5°, 5c, 5e, 7, 9 e 15 che corrispondono ai livelli di *high stand* 7, 81, 102, 124, 215, 330 e circa 600 ka della paleo curva del livello del mare (Bordoni e Valensise, 1998). Il sollevamento dell'area è legata all'attività della faglia di Castrovillari e probabilmente all'attività precedente di una faglia responsabile dei notevoli spostamenti verticali dei terrazzi vicino il Torrente Avena (Cucci e Cinti, 1998). In media, la quota più alta dei margini interni del terrazzo è di circa 300 m s.l.m. (vicino il centro storico), mentre il bordo più basso affiora a meno di 10 m s.l.m., vicino C. Sisco.

Il terrazzo sul quale è ubicato il centro storico (Fig. 5.18) è delimitato verso NE e SO, rispettivamente, dagli ampi greti dei torrenti Ferro e Straface. Dal punto di vista morfologico, esso è suddiviso in tre ordini di terrazzamenti e ulteriormente smembrata dalla tettonica distensiva recente.



**Figura 5.18 Terrazzo sul quale è ubicato il centro abitato di Amendolara.**

La superficie terrazzata mostra tracce di una idrografia evoluta e matura, attualmente decapitata e troncata da fenomeni di intensa erosione a causa dell'arretramento delle testate delle incisioni calanchive che si raccordano al livello di base locale, rappresentato dall'alveo dello Straface. Alcuni corsi d'acqua risultano, pertanto, catturati dall'attuale rete idrografica e presentano valli tronche. Inoltre, il terrazzo è delimitato da versanti con pendenze variabili secondo la composizione litologica e la giacitura degli strati. In generale, i versanti presentano una pendenza maggiore (parete Nord-Occidentale), dove gli strati sono a reggipoggio, mentre nel versante meridionale, dove gli strati presentano una struttura leggermente a franapoggio, il pendio è meno inclinato. Inoltre, questa parte del versante è modellato in una serie di rivoletti superficiali, con disposizione molto casuale, e da incisioni più profonde ad andamento

rettilineo e presenza di veri e propri burroni, con caratteristiche forme a “V”, che stanno ad indicare processi erosivi in stato evolutivo molto avanzato (Fig. 5.17; 5.19).



**Figura 5.19** Incisioni con caratteristiche forme a “V”.

La parte più antica del centro storico, denominata Rione Vecchio, è delimitata per tre quarti da calanchi argillosi (Scofea, Case Cadute, Gallizze), localizzati sul fianco sinistro del T.te Straface (esposto a sud) (Fig. 5.20). Queste aree calanchive producono una tipica morfologia caratterizzata da profonde incisioni separate da strette creste. Il rilevamento geomorfologico in queste aree ha messo in evidenza che, nei principali *gullies*, piccoli movimenti gravitativi e processi di dissecazione creano creste smussate. Invece, processi di dissecazione verticali prevalgono nei canali secondari, creando creste più strette e affilate. Depositi di debris flow sono spesso accumulati alla foce dei canali di tutti gli ordini.



**Figura 5.20** Forme calanchive.



### *Reticolo idrografico*

La dinamica fluviale e lo stato di franosità risultano in uno stadio evolutivo abbastanza giovanile. Nel reticolo idrografico secondario, sono presenti tracce di catture fluviali, con valli morte e corsi decapitati, morfologicamente maturi, a testimonianza di un'idrografia antica più evoluta rispetto a quella attuale. Quest'ultima mostra, infatti, di essere in una fase di intenso smantellamento, con fenomeni erosivi aggressivi ed intensi. Gli impluvi, ad andamento sub-parallelo, convergono nella parte terminale per confluire in un'asta torrentizia di ordine maggiore. Alcuni di essi mostrano tratti piuttosto rettilinei, seguiti da improvvise tortuosità e/o catture, e quindi nuovi tratti lineari in una direzione diversa, come in zona T.ne del Prato.

Il corso d'acqua principale è la porzione terminale del T.te Straface (Fig. 5.21), che presenta caratteristiche morfologiche e idrologiche tipiche del fiume, con regime idraulico effimero ed impulsivo; il letto si presenta largo e tabulare, e spesso asciutto con molte barre abbandonate (Fig. 5.17).



**Figura 5.21** Porzione terminale del T.te Straface.

Negli alvei sono presenti conoidi alluvionali, e molte di queste mostrano segni recenti di riattivazione testimoniando nuove attività sui versanti a monte. Molte conoidi alluvionali sono formate da episodici eventi di *debris flow* che mobilizzano grandi quantità di materiale superficiale nelle porzioni superiori dei bacini.

### **Dissesti**

Il rilevamento in campo ha permesso di evidenziare tutte le forme derivate da processi di versante, dovute a fenomeni gravitativi o di ruscellamento (Fig. 5.17).

### *Forme di versante dovute alla gravità*

I fenomeni gravitativi più diffusi, localizzati nella porzione a monte del Comune, sono scorrimenti, colate e fenomeni complessi (scorrimento-colata) (Fig.5.22).

Il versante in sinistra idrografica del T.te Straface è interessato per lo più da scorrimenti e *soil creep*. Le maggiori criticità caratterizzano tutta l'area compresa tra il T.te Ferro ed il T.te Straface, in particolare da Timpone del prato verso O-NO, fino ai confini comunali. In tale settore sono stati individuati i segni di attività più recente. La strada, infatti, pur essendo stata asfaltata da poco, mostra evidenti segnali di cedimento. Anche alcune gabbionate, realizzate a ridosso della stessa strada provinciale appaiono in parte ribaltate verso valle. Le aree più stabili coincidono con le superfici terrazzate, anche se in prossimità degli orli morfologici è in atto un intenso processo erosivo, in evoluzione retrogressiva, con arretramento delle testate per franosità superficiale e crolli.



**Figura 5.22 a) scorrimenti; b) colate.**

### *Forme di versante dovute al dilavamento*

Nell'ambito di questi fenomeni sono stati rilevati tutte le forme dovute all'erosione sia areale sia lineare. La prima ha dato luogo a zone degradate contraddistinte da trasporto di materiale colluviale ad opera delle acque di ruscellamento.

L'erosione lineare ha determinato, invece, particolari forme dette calanchi, osservabili su tutta la fascia bassa del territorio. Queste incisioni, che si delineano principalmente su litologie argillose, sono bene evidenti sui versanti esposti a sud del Fosso Carrara e del T.te Straface (a valle del centro storico). Nel complesso, il centro storico risulta fortemente colpito da fenomeni di dissesto, infatti su tutto il versante esposto a sud-ovest si osservano scorrimenti e fenomeni legati sia all'erosione areale che calanchiva (Fig. 5.23).



**Figura 5.23** Zona d'intensa erosione sul versante sud-ovest del terrazzo.

#### **5.1.4 Aspetti climatici dell'area di studio**

L'area di studio ricade nella zona ionica, caratterizzata secondo Versace et al. (1989), da un regime pluviometrico impulsivo, con periodi prolungati di siccità interrotti da eventi pluviali brevi e intensi. Questi ultimi sono legati a perturbazioni, provenienti da S-SE, che investono saltuariamente il versante jonico: solo quelle di provenienza più francamente orientale riescono però ad interessare sensibilmente l'Alto Jonio; quelle di provenienza più meridionale vengono, in buona parte, ostacolate nel loro percorso dalla barriera orografica (a sviluppo SO-NE) costituita dal sistema Aspromonte-Serre-Sila,

rilasciando il proprio carico di piogge soprattutto sulla costa ionica centro-meridionale (Iovine e Merenda, 1996).

Le precipitazioni sono, dunque, in genere molto scarse: l'analisi delle piogge per il periodo 1921-1980 indica valori di precipitazioni medie annue che, in funzione della quota e della distanza dalla costa, variano tra 500 e 1100 mm/a (Caloiero et al., 1990), con valore medio di circa 800 mm/a (70% del valore regionale). La stazione pluviometrica caratterizzata dal valore più basso (a scala regionale) di precipitazione media annua è Villapiana Scalo, distante poco più di 15 km dall'area di studio (Iovine e Merenda, 1996). Le temperature medie annue dell'area superano i 12°C nelle zone più interne e raggiungono i 18°C sulla costa. In estate le massime si registrano nelle valli, con punte che superano i 40°C, e la temperatura media supera i 22°C (clima di tipo "Csa", secondo la classificazione di Köppen); in inverno, invece, le medie mensili superano i 5°C (Iovine e Merenda, 1996).

Dalla ricerca sugli eventi alluvionali nell'area di studio, si evince che precipitazioni di una certa importanza sotto il profilo dell'instabilità dei versanti si sono verificate con una frequenza bassa. L'area è stata interessata significativamente dai seguenti eventi pluviali: gennaio 1940, ottobre 1953, gennaio 1960, dicembre 1972 – marzo 1973, novembre 1976, dicembre 1990 – gennaio 1991.

In particolare, l'evento alluvionale dell'inverno 1972-1973 costituisce un caso di interesse idrogeologico per le caratteristiche pluviometriche e per i notevoli effetti di instabilità che produsse sui versanti. Questo evento fu caratterizzato da piogge prolungate nel tempo, ma non intense. Alla stazione pluviometrica di Albidona, l'evento alluvionale durò 106 giorni (dal 21 dicembre al 5 aprile), con valori di pioggia cumulata pari a 994.1 mm (circa 2,5 volte la media del periodo dicembre-marzo). Le precipitazioni furono particolarmente abbondanti solo negli ultimi giorni di marzo: fra il 24 ed il 31 marzo, si registrarono infatti oltre 314 mm di pioggia (circa 3,5 volte la media del mese di marzo) (Iovine e Petrucci, 1998). L'effetto del perdurare di questo periodo piovoso produsse una mobilitazione franosa insolita rispetto a quella che si verifica in quest'area in occasione di eventi "estremi": durante questo evento alluvionale ad una franosità superficiale si sostituirono eventi franosi profondi e di notevoli dimensioni, con volumi di decine di milioni di metri cubi di materiale coinvolto. I fenomeni franosi individuabili oggi, tramite l'interpretazione di foto aeree recenti e in campagna, risultano essersi mobilitati proprio nel corso dell'inverno 1972-1973 (Iovine e Merenda, 1996). I centri abitati interessati da movimenti franosi sono

stati Amendolara, Montegiordano, Roseto Capo Spulico, Plataci, Albidona e Rocca Imperiale. In questi casi, si è trattato per lo più di riattivazioni di frane pregresse, come le rimobilizzazioni di scorrimenti rotazionali e traslazionali antichi e profondi nei terreni flyscioidi.

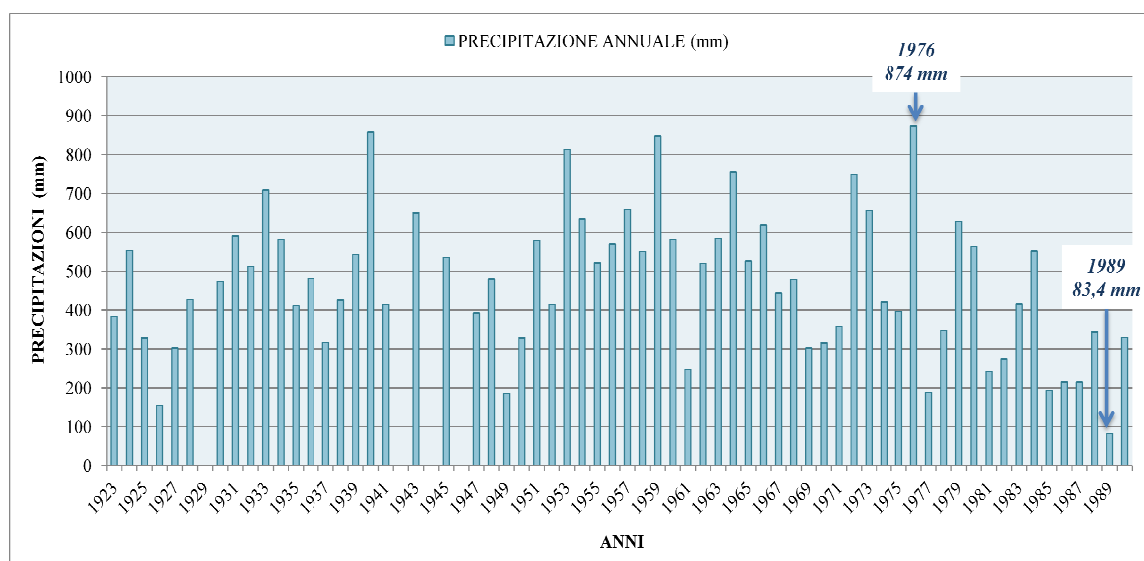
### Analisi delle precipitazioni

Nell'area di studio è stata ubicata la stazione pluviometrica "Amendolara" dal 1921 fino al 1990. In tabella 5.1 sono riportate le caratteristiche principali relativa a questa stazione di monitoraggio.

Quota	Precipitazione media annua	Numero giorni piovosi	Massima precipitazione giornaliera
m	mm	–	mm
237	608	63	180

**Tabella 5.1** Caratteristiche della stazione pluviometrica considerata. Valori calcolati sul periodo 1921-1980 (da Iovine e Merenda, 1996; mod.).

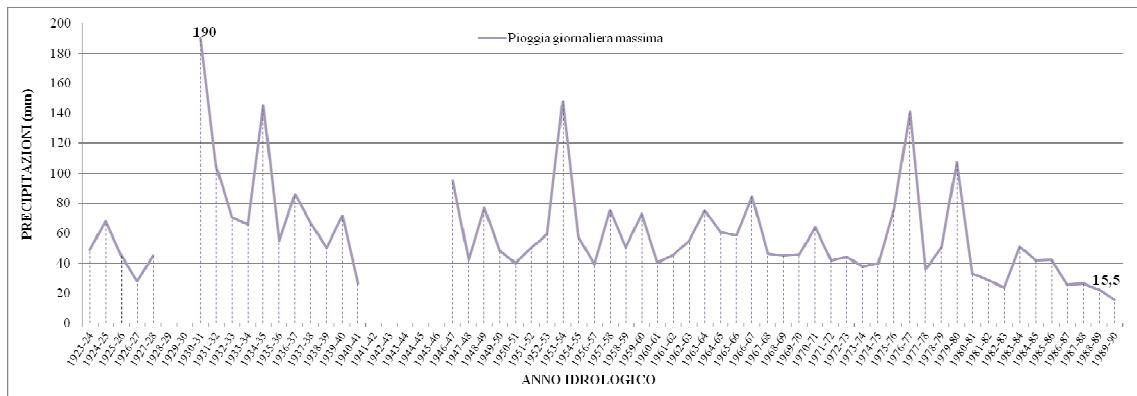
L'analisi delle precipitazioni di questa stazione pluviometrica è stata condotta a partire dal 1923 e senza considerare gli anni 1929, 1942, 1944 e 1946, a causa della mancanza di dati. L'analisi della pioggia totale riferita ad ogni anno (Fig. 5.24) mostra che l'anno in cui si è registrata la precipitazione minima annuale è stato il 1989 con 83,4 mm di pioggia, mentre la massima precipitazione si è avuta nel 1976 con 874 mm di pioggia, anno in cui, come detto sopra, si è verificato uno degli eventi pluviali più importanti dell'Alto Jonio, con valori di precipitazione giornaliera molto elevati (come il giorno 23 ad Albidona con 244,4 mm di pioggia) (Iovine e Merenda, 1996).



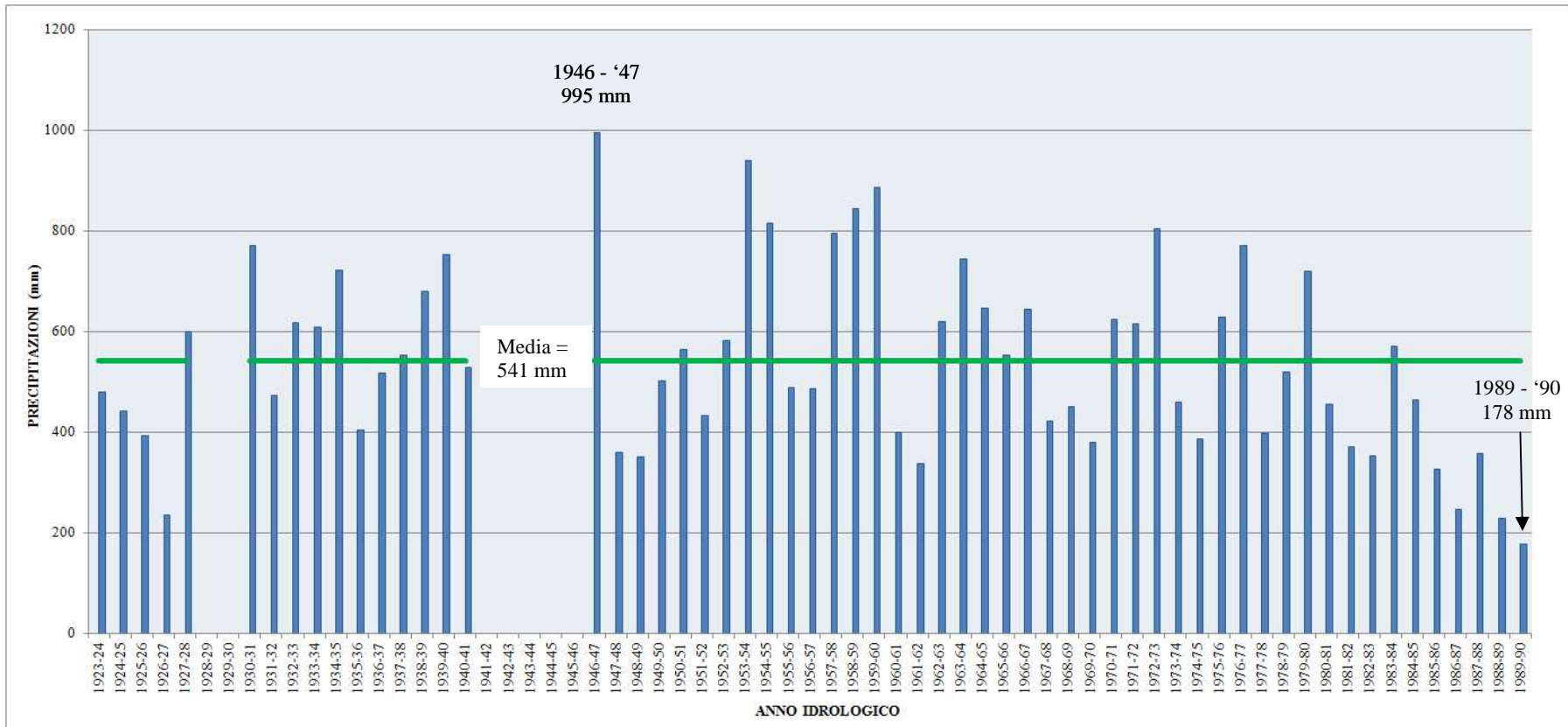
**Figura 5.24** Precipitazione totale annuale.

L'analisi della pioggia totale è stata effettuata anche in riferimento agli anni idrologici (1 ottobre – 30 settembre) del periodo esaminato, dal 1923 al 1990. Il grafico in figura 5.25 mostra che la media delle precipitazioni registrate è stata di 541 mm, ed il picco massimo e il picco minimo si sono avuti negli anni idrologici 1946-'47 e 1989-'90 con, rispettivamente 995 mm e 178 mm di pioggia.

L'analisi delle pioggia giornaliera massima (Fig. 5.26) mostra che il picco massimo si è avuto nell'anno idrologico 1930-'31 con 190 mm di pioggia in un giorno (13 Gennaio 1931), mentre il picco minimo si è avuto nell'anno idrologico 1989-'90 con 15,5 mm di pioggia in un giorno (1 Gennaio 1990).



**Figura 5.26 Piogge giornaliere massime negli anni idrologici.**



**Figura 5.25** Precipitazione totale rispetto agli anni idrologici.

## 5.2 Valutazione del rischio

La valutazione del rischio da frana è stata effettuata mediante l'applicazione di un approccio quantitativo, che si basa sull'analisi delle tre componenti del rischio, ossia pericolosità, vulnerabilità ed elementi esposti al rischio (Fig. 5.27).

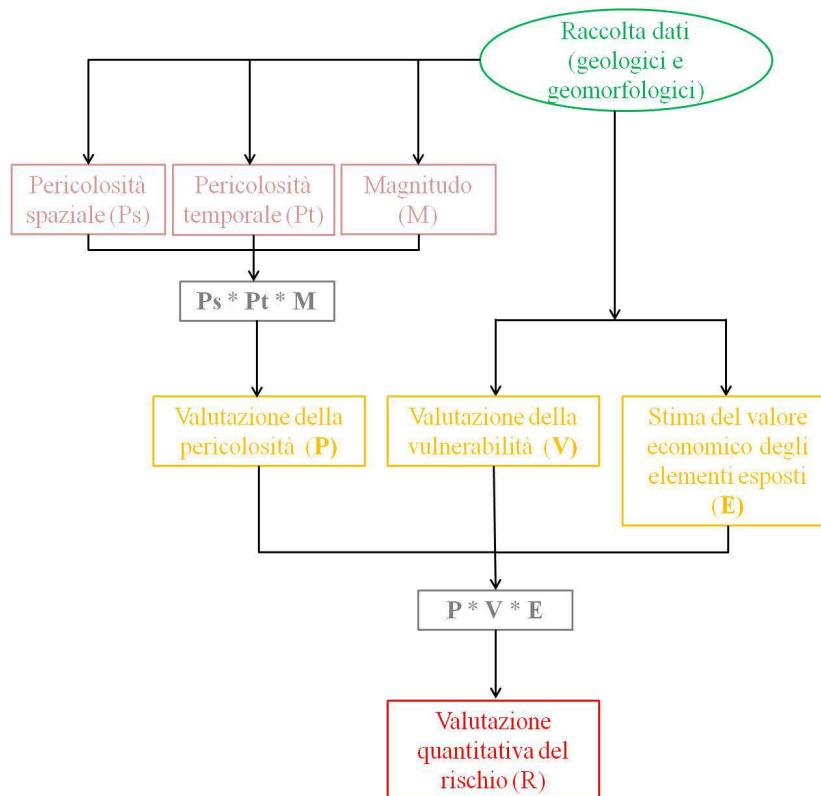


Figura 5.27 Schema metodologico dell'approccio applicato.

### 5.2.1 Raccolta e preparazione dei dati

In questo paragrafo sono descritti i dati raccolti utili per l'analisi del rischio e la loro preparazione. Le fonti dei dati sono riportati nella tabella 5.2.

Anche per questa area di studio, nella fase iniziale della ricerca è stata svolta un'accurata indagine bibliografica sulle caratteristiche geologiche e geomorfologiche e sul dissesto idrogeologico dell'area e una ricerca del materiale cartografico ed aerofotografico disponibile. Per quanto riguarda il materiale aero-fotografico sono stati utilizzati i voli IGM degli anni 1954, 1984, 1990, alla scala approssimativa di 1:33000, e le ortofoto del 2006 della Regione Calabria, alla scala approssimativa di 1:5000.



<b>DATI</b>	<b>FONTE</b>
Litologie	Carta geologica d'Italia 1:50000 – Carta geologica della Calabria 1:25000 - Rilievi sul campo
Uso del suolo	Corine Land Cover 2012 - Google Earth - Rilievi sul campo
Idrografia	Geoportale della Regione Calabria
Strada	
<i>Digital Elevation Model</i>	CTR della Regione Calabria 1:5000 – Carta topografica I.G.M. 1:1000
Frane	Foto aeree I.G.M. – Google Earth – Ortofoto 2006 - Iovine e Merenda, 1996 – Crescenzi et al., 1996 - Rilievi sul campo
Edifici	CTR della Regione Calabria 1:5000 - Google Earth – Ortofoto 2006 - Catasto Provincia di Cosenza – Rilievi sul campo
Strade	CTR della Regione Calabria 1:5000 - Google Earth - Ortofoto 2006

**Tabella 5.2 Dati utilizzati e loro fonti.**

I dati reperiti riguardanti le litologie, l'uso del suolo, l'idrografia, le strade, gli edifici e le frane sono stati tutti georeferiti e digitalizzati in un GIS, che ha permesso la catalogazione e la manipolazione di tutti i dati utili per l'analisi del rischio. Il DEM con cella di 5m e quello con cella 10m sono stati ricavati dalle isoipse digitalizzate rispettivamente dalla CTR e dalla carta topografica dell'I.G.M. Dal DEM con cella 5m sono stati ricavati i dati relativi alle pendenze e all'esposizione dei versanti dell'area di studio.

Il controllo e l'incremento dei dati è stato svolto attraverso la consultazione delle ortofoto, di Google Earth e l'analisi stereoscopica delle foto aeree. In particolare, la fase di foto-interpretazione è servita ad identificare e cartografare i movimenti gravitativi, definendone i limiti areali, la tipologia e lo stato di attività (stimato in base al grado di freschezza morfologica) per i diversi voli a disposizione, realizzando così in GIS mappe multi-temporali delle frane rilevate.

Le informazioni e i dati riguardanti le frane sono stati, inoltre, incrementati mediante la consultazione dei *database* Progetto AVI, ASICal e PTCP della provincia di Cosenza, delle monografie Petrucci e Versace, 2005, 2007, Petrucci et al., 2009, Petrucci et al., 1996 e dell'articolo Ferrari et al., 2000.

La fase successiva è stata quella del rilevamento dei dati sul campo per validare quanto appreso dai dati bibliografici e interpretato dalle foto aeree, dalle ortofoto e da Google Earth e per raccogliere ulteriori informazioni riguardo gli edifici. Dunque, durante i sopralluoghi si è:

- verificata la tipologia, lo stato di attività, le cause dei dissesti e stimata la profondità;
- cartografate le frane superficiali non visibili nelle foto aeree;
- verificato le litologie affioranti e l'uso del suolo;
- raccolto informazioni sui dissesti presenti nell'area di studio mediante interviste;
- verificato e raccolto le informazioni riguardo il materiale e l'uso degli edifici e il numero di persone che vi abitano.

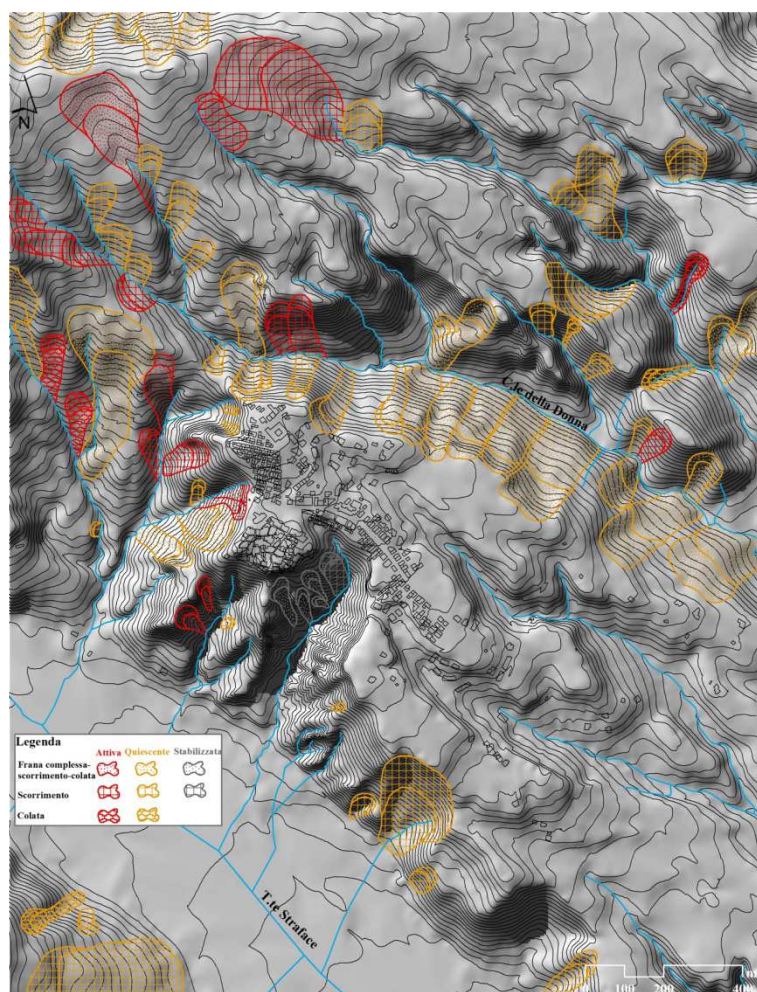
Il valore economico di ogni singolo edificio è stato attribuito secondo i dati riportati sul sito del catasto della provincia di Cosenza; mentre il valore economico delle strade si basa sui dati presenti sul sito SITEB.

### **5.2.1.1 Carta inventario dei fenomeni franosi e analisi dell'inventario**

L'inventario multi-temporale realizzato contiene frane innescate da più eventi in un periodo lungo 60 anni, dal 1954 al 2014. Le mappe realizzate relative agli anni 1954, 1984, 1990, 2006 e 2014 (Fig. 28), mostrano così la loro evoluzione spazio-temporale.

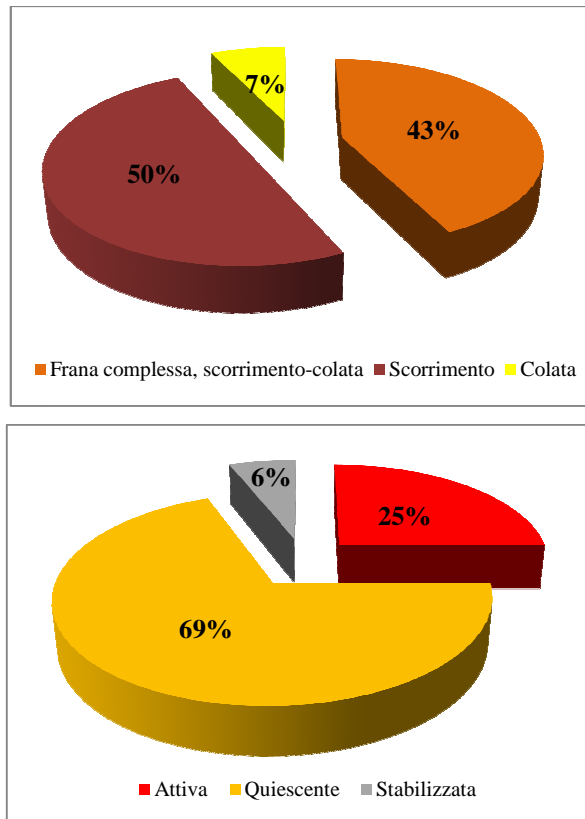
L'inventario dei fenomeni franosi per la valutazione del rischio ha richiesto principalmente i seguenti dati: localizzazione, tipologia, stato di attività, frequenza, area e stima della profondità delle frane. Le analisi per la valutazione del rischio sono state eseguite su due *database* distinti: uno delle frane profonde (con profondità maggiore di 2 m) e uno delle frane superficiali (con profondità minore di 2 m) presenti nell'area di studio. Questa distinzione è stata effettuata in seguito a valutazioni geologiche e geomorfologiche durante i rilievi sul campo, in particolare attraverso una stima della profondità, basata sul tipo di frana e sulla morfologia e geometria dell'area di distacco e dell'area di deposito.

La localizzazione riporta l'ubicazione, in scala 1:5000 ("inventario a grande scala >1:25000", Guzzetti et al., 2000), della zona di distacco (concavità sulla superficie topografica) e della zona di accumulo (convessità sulla superficie topografica). I limiti areali delle frane innescatesi non molto prima del rilevamento ed in aree non coperte da alberi sono stati facilmente e chiaramente riconosciuti dalle foto aeree e sul campo. Meno immediato è stato il riconoscimento dei limiti delle frane meno recenti, per le quali il limite tra l'area in frana e il terreno in posto non è più netto, soprattutto al piede, e in alcuni casi sui fianchi, a causa dell'erosione, di nuove frane e di locali adattamenti delle frane al nuovo assetto morfologico.



**Figura 5.28** Carta inventario dei fenomeni franosi, anno 2014.

La tipologia e lo stato di attività sono stati attribuiti secondo le classificazioni di Cruden & Varnes (1996) e WP/WLI, 1993 (Fig. 5.29). Le tipologie riconosciute sono scorrimenti, colate e frane complesse, del tipo scorrimento-colata. Mentre lo stato di attività è stato definito come quiescente o attivo (Fig. 5.29). La definizione “stabilizzata” indica le frane su cui sono stati effettuati degli interventi per mitigarne il rischio. L’aver osservato in campagna lesioni recenti ai manufatti, quali edifici e strade, scarsa vegetazione e terreno smosso ha portato all’attribuzione dello stato “attivo” ai fenomeni franosi rilevati. Al contrario, lo stato “quiescente” è stato attribuito a frane che, al momento dell’indagine in campagna, non hanno mostrato indizi di movimenti in atto o recenti, quindi con profili regolari, vegetazione con grado di sviluppo analogo a quello delle aree circostanti non in frana, assenza di terreno smosso e di lesioni recenti alle infrastrutture.



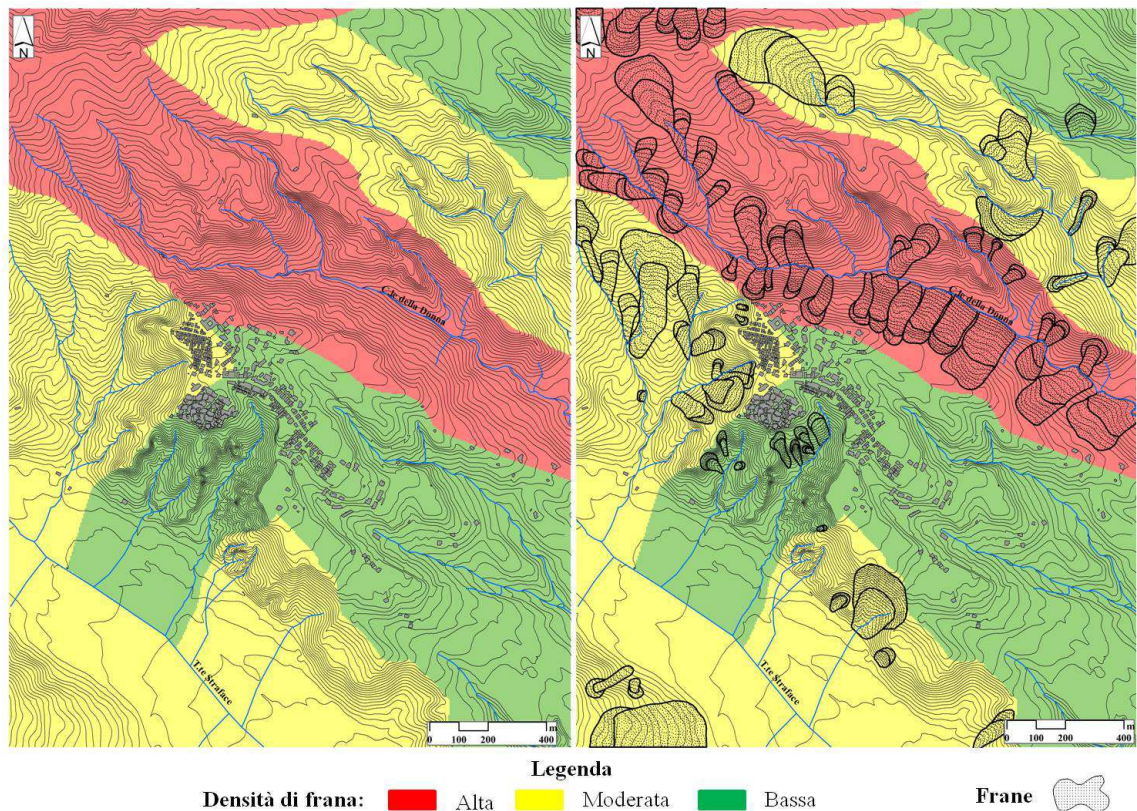
**Figura 5.29** Percentuali delle tipologie e dello stato di attività dei fenomeni franosi.

Per quantificare l'abbondanza geografica (spaziale) delle frane presenti nell'area di studio è stata preparata una mappa di densità delle frane. Le mappe di densità (o frequenza) delle frane misurano la distribuzione spaziale degli inneschi dei fenomeni gravitativi (Campbell, 1973; Wright *et al.*, 1974; DeGraff, 1985; DeGraff e Canuti, 1988). La densità di frana è comunemente calcolata come (Guzzetti, 2006):

$$D_l = \frac{A_l}{A_m}, 0 \leq D_l \leq 1$$

Dove  $A_l$  è l'area totale in frana nell'unità di mappa considerata, e  $A_m$  è l'area dell'unità di mappa usata per calcolare la densità (es. cella, unità di versante, unità di condizioni uniche, ecc.).

In base all'unità di mappa utilizzata per calcolare la densità, le mappe di densità di frana possono essere basate su criteri statistici o geomorfologici (Guzzetti *et al.*, 2000). Per questo caso di studio, l'area è stata suddivisa in bacini che contengono le aste fluviali di secondo ordine, seguendo così un criterio geomorfologico. Dunque la densità di frana sarà la percentuale di bacino occupata da frane (Fig. 5.30)



**Figura 5.30 Densità di frana nell'area di studio.**

La figura 5.29 mostra a sinistra la densità di frana suddivisa in tre classi, ottenuta dal calcolo della percentuale di area in frana in ogni bacino, mentre a destra è riportata la sovrapposizione delle frane dell'inventario sulla mappa della densità di frana; questa mappa mostra una buona correlazione tra le classi di densità e le frane dell'inventario. La mappa così costruita fornisce una visione sinottica della distribuzione delle frane e rappresenta un'approssimazione della suscettibilità da frana nell'area di studio (Bulut et al., 2000; Guzzetti et al., 2006b).

### 5.2.2 Valutazione della pericolosità da frana

Varnes e IAEG (1984) hanno definito la pericolosità da frana come la probabilità di occorrenza di un fenomeno potenzialmente dannoso in uno specifico periodo di tempo in una data area. In Guzzetti et al. (1999) la definizione è stata approfondita includendo la magnitudo dell'evento (dimensioni o intensità): "La pericolosità da frana è la probabilità di occorrenza in uno specifico periodo ed in una data area di una frana di una certa magnitudo". La definizione di pericolosità da frana include così i concetti di luogo, tempo e dimensioni. Per una completa valutazione della pericolosità occorre

predirre (quantitativamente) “dove” la frana avverrà, “quando” o quanto frequentemente si verificherà, e “quanto grande” sarà.

Matematicamente, la definizione adottata per la pericolosità da frana può essere scritta come:

$$P_F = P[A_F \geq a_F \text{ in un intervallo di tempo } t, \text{ dati } \{\text{litologia, uso del suolo, topografia, ..} \} ]$$

Dove  $A_F$  è l'area di una frana più grande o uguale a precise dimensioni minime, misurate, ad esempio, in metri quadri.

Secondo il modello probabilistico per la valutazione della pericolosità da frana proposto da Guzzetti et al., 2005, per una qualsiasi area, la pericolosità da frana è espressa come la probabilità di avere una frana con determinate dimensioni,  $P_{A_F}$ , la probabilità che si verifichi in un tempo  $t$  stabilito,  $P_T$ , e la probabilità che si inneschi in una determinata area,  $P_S$ . Assumendo indipendenza tra le tre probabilità, la pericolosità da frana è data da:

$$P_F = P_{A_F} \times P_T \times P_S$$

Da un punto di vista geomorfologico, l'assunzione che le tre probabilità (le tre componenti della pericolosità da frana) sono indipendenti può non essere valida sempre e ovunque (Guzzetti et al., 2005). In molte aree ci si aspetta che si verifichino frane più frequentemente (componente temporale) dove le frane sono più abbondanti e l'area in frana è estesa (componente spaziale). Tuttavia, date le lacune su tutti i processi coinvolti nei fenomeni franosi, l'indipendenza è una prima approssimazione accettabile che rende il problema matematicamente trattabile.

Questo modello probabilistico si basa sulla interpretazione sistematica di *sets* di foto aeree di differenti anni, correlata da investigazioni storiche e rilievi sul campo, per ottenere una carta inventario delle frane multi-temporale. L'inventario multi-temporale è utile per (Guzzetti et al., 2006a):

- ottenere la probabilità spaziale dell'occorrenza delle frane, dati i parametri ambientali dell'area;
- stimare la probabilità temporale delle frane, dalla ricorrenza empirica degli inneschi;
- determinare la probabilità delle dimensioni (area) delle frane, considerato come un proxy della magnitudo delle frane.

La probabilità spaziale (o suscettibilità da frana) utilizzata è stata ottenuta da un metodo indiretto quantitativo che ha fornito stime numeriche (probabilistiche) della probabilità spaziale di occorrenza delle frane. La probabilità di occorrenza in un dato periodo è stata stimata dall'analisi della carta inventario multi-temporale, ed è stata quantificata adottando il modello di distribuzione binomiale per l'occorrenza di eventi franosi. La probabilità delle dimensioni delle frane è stata stimata dall'analisi della distribuzione frequenza-area delle frane conosciute.

#### **5.2.2.1 Valutazione della pericolosità spaziale o suscettibilità da frana**

Nel presente studio, per stimare la pericolosità spaziale sono stati applicate e messe a confronto metodologie qualitative e quantitative (Rago et al., 2015b), utilizzando i software GIS Ilwis 3.4 (*Integrated Land and Water Information System*) e ArcMap 10.

Per quanto riguarda i metodi qualitativi, l'approccio euristico è stato sviluppato attraverso l'applicazione di un metodo di valutazione spaziale multi-criteriale (SMC); mentre tra i metodi quantitativi, sono stati applicati due metodi di statistica bivariata, *Hazard Index* e *Weights of evidence*, su frane superficiali e su frane profonde.

Nel metodo euristico scelto, sono utilizzati strumenti di supporto decisionale disponibili in GIS. Essi permettono di strutturare meglio le varie componenti dell'analisi, includendo sia aspetti soggettivi che aspetti oggettivi, e comparandoli in un modo logico e accurato (Saaty, 1980).

Nell'approccio statistico bivariato si effettua una sovrapposizione della mappa di ogni fattore predisponente con la carta inventario delle frane in modo da calcolare le statistiche per le combinazioni delle due mappe. L'importanza di ogni fattore predisponente nell'innescò delle frane è valutata attraverso il confronto della densità di frana nell'area occupata dal fattore con la densità di frana nell'intera area di studio. L'adozione di un approccio di tipo statistico ha contribuito quindi a definire con maggiore oggettività la valutazione critica del contributo dei fattori che regolano l'innescò dei fenomeni franosi sui versanti.

Anche per le analisi di suscettibilità da frana per quest'area di studio sono state utilizzate le scarpate di frana, suddivise in due gruppi adottando una suddivisione *random* (Chung e Fabbri, 2003): il gruppo *training set* (70%) per costruire il modello di suscettibilità e il gruppo *validation set* (30%) per valutare la capacità previsionale del modello.

Le carte di suscettibilità ottenute descrivono la variazione nello spazio della somma dei pesi dei fattori predisponenti, a cui si è associata una descrizione qualitativa suddividendo il campo di variabilità dei pesi in 3 classi, a cui corrisponde un diverso livello di suscettibilità (bassa, moderata, alta).

Infine, le tecniche adottate sono state validate e confrontate allo scopo di utilizzare nell'analisi del rischio la metodologia che meglio predice l'innescò di frane nell'area di studio.

### 5.2.2.1.1 Fattori predisponenti

Sono stati utilizzati sette fattori predisponenti: litologia, uso del suolo, pendenza, esposizione dei versanti, curvatura dei versanti, distanza dai corsi d'acqua e distanza dalle strade. La tabella 5.3 mostra il significato di tutti i parametri scelti. Tutti i fattori predisponenti sono stati utilizzati nelle analisi di suscettibilità come *raster*, con cella 5x5 m.

FATTORI	SIGNIFICATO
Litologia	Variazione dei materiali affioranti
Uso del suolo	Influenza degli aspetti antropici
Pendenza	Velocità del flusso sub-superficiale
Esposizione dei versanti	Evapo-traspirazione
Curvatura	Direzione del flusso dell'acqua, contenuto di acqua del suolo
Distanza dai corsi d'acqua	Scalzamento al piede dei versanti
Distanza dalle strade	Decremento del carico alla base dei versanti o via preferenziale per l'acqua

Tabella 5.3 Fattori predisponenti la franosità.

### 5.2.2.1.2 Metodo di valutazione spaziale multi-criteriale

L'approccio euristico è stato applicato in prima analisi per ottenere una mappa qualitativa di pericolosità spaziale dalla quale ricavare una valutazione di suscettibilità in tempi relativamente brevi, non richiedendo né calcoli statistici né una raccolta di dati geotecnici (Rago et al., 2015a).

Il modello è stato sviluppato in diversi steps effettuando una valutazione multi-criteriale basata sul processo di gerarchia analitica (AHP) sviluppato da Saaty (1980). Il AHP è stato molto applicato nei problemi decisionali (Saaty e Vargas, 2001), e di recente si sta applicando alla valutazione della suscettibilità da frana (Komac, 2006; Yoshimatsu e



Abe, 2006; Castellanos Abella e Van Westen, 2007; Feryandi, 2011; Gaprindashvili, 2011; Puorghasemi et al., 2012).

In generale, l'analisi decisionale usa delle procedure sistematiche per analizzare problemi decisionali complessi. Il principio basilare è quello di dividere il problema decisionale in parti più piccole, analizzarle e integrarle in modo logico per produrre una soluzione significativa (Malczewski, 1999).

Da un punto di vista del processo decisionale, la valutazione multi-criteriale può essere espressa in una matrice (Triantaphyllou, 2000; Tab. 5.4).

	$C_1$	$C_2$	$C_3$	...	$C_n$
	$(W_1 W_2 W_3 \dots W_n)$				
$A_1$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	...	$a_{1n}$
$A_2$	$a_{21}$	$a_{22}$	$a_{23}$	...	$a_{2n}$
.	.	.	.	.	.
$A_m$	$a_{m1}$	$a_{m2}$	$a_{m3}$	...	$a_{mn}$

**Tabella 5.4 Matrice decisionale multi-criteriale (da Castellanos Abella e van Westen, 2007, mod.).**

La matrice contiene i criteri su un asse (da  $C_1$  a  $C_n$ ), e un elenco di possibili alternative, dalle quali dev'essere presa una decisione sull'altro asse (da  $A_1$  a  $A_n$ ). Ogni cella della matrice ( $a_{ij}$ ) indica il comportamento di una particolare alternativa in base ad un particolare criterio. Il valore di ogni cella nella matrice è dato dal prodotto del valore standardizzato (tra 0 e 1) del criterio di una particolare alternativa, per il peso (da  $w_1$  a  $w_n$ ) associato al criterio. Quando la matrice è completata, il valore finale può essere ottenuto sommando i valori di tutte le celle dei diversi criteri per una particolare alternativa (es.  $a_{11}$  to  $a_{1n}$  per l'alternativa  $A_1$ ).

Per implementare la matrice secondo il AHP, devono essere considerati tre principi (van Westen et al., 2011): la decomposizione, il giudizio comparativo (“*comparative judgement*”) e la sintesi delle priorità (Malczewski, 1996). Il primo principio decompone il problema (e i pesi) in una struttura gerarchica. Il secondo considera il processo di assegnazione dei pesi, impiegando il confronto a coppie dei criteri, mentre la sintesi è riferita al prodotto tra i livelli gerarchici. Inoltre, nell'implementazione spaziale di questa procedura, ogni criterio ( $C_j$ ) è trasformato in un raster, ed ogni pixel (o set di pixels) della *composite index map* finale eventualmente diventa un'alternativa  $A_j$  (Malczewski, 1996). In questo contesto il concetto di alternativa non è la scelta di un'azione, ma una diversa realizzazione spaziale dell'obiettivo finale (es. la pericolosità

spaziale da frana). Questa applicazione è spiegata nella figura 5.31. L'obiettivo finale (*goal*) è decomposto nei livelli dei criteri  $C^{L1}$  e  $C^{L2}$ . I livelli intermedi sono spesso indicati come *sub-goals*. Ogni criterio di ogni livello avrà un peso assegnato. Poiché i criteri sono mappe rasterizzate, la loro performance spaziale ( $a_{ij}$ ) e l'alternativa ( $A_i$ ) saranno identificati per ogni cella del raster.

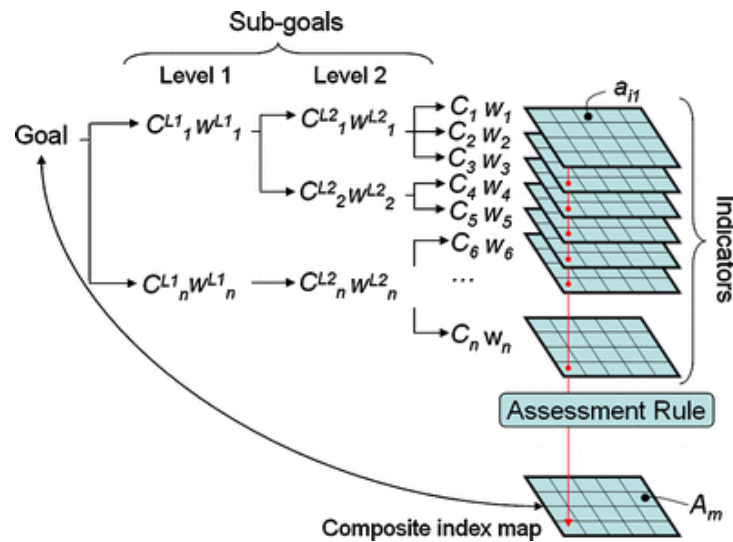


Figura 5.31 Procedura schematica per la valutazione spaziale multi-criteriale basata sul processo gerarchico analitico (da van Westen et al., 2011).

La *composite index map* è ottenuta da una *assessment rule* (o *decision rule*), la quale è calcolata sommando i valori delle celle dei diversi criteri ( $a_{ij}$ ) per una particolare alternativa. Ogni elemento della matrice ( $a_{ij}$ ) è ottenuto in un modo diverso:

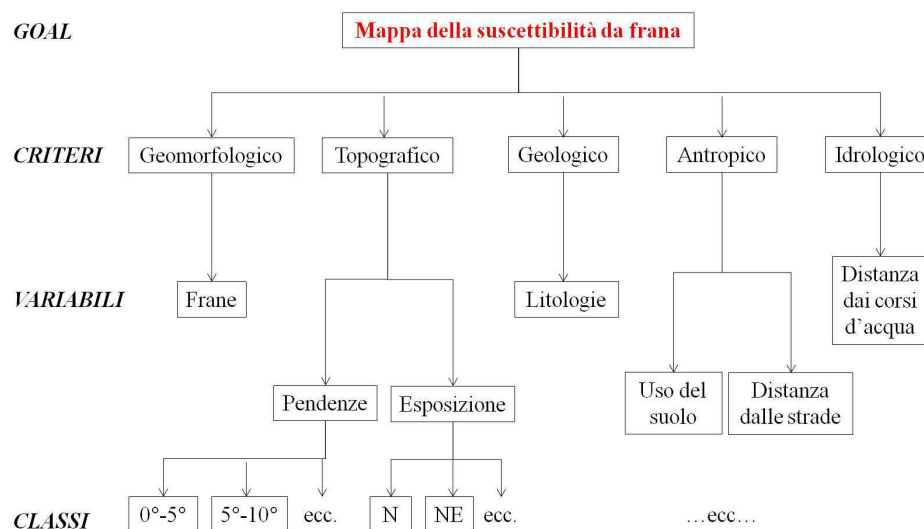
$$a_{ij} = v_{ij} \cdot w_{Lj}$$

In questa equazione,  $v_{ij}$  si riferisce al valore standardizzato del criterio ( $C_j$ ) per l'alternativa ( $A_i$ ), e  $w_{Lj}$  si riferisce al peso del criterio ( $C_j$ ) per il livello  $L$  (livelli 0-h).

Per implementare il modello è stato utilizzato il modulo SMCE (*Spatial Multi-Criteria Evaluation*) del software GIS Ilwis. L'applicazione di SMCE permette di effettuare una valutazione multi-criteriale spaziale (ITC, 2001). I dati di input sono delle mappe che costituiscono la rappresentazione spaziale dei criteri. Il modello è costruito attraverso un "*criteria tree*", dove le mappe dei vari parametri sono raggruppate, standardizzate e pesate. L'output del modello è una mappa ("*composite index map*") che risulta dalla composizione degli indici delle mappe dei parametri (Castellanos Abella e Van Westen, 2007).

La fase iniziale è consistita nella scelta delle variabili (fattori predisponenti) e nella determinazione della loro relazione gerarchica, sulla base delle considerazioni

geologiche e geomorfologiche fatte sul campo. In seguito, sono stati assegnati i pesi a queste mappe, in modo standardizzato, ed una formula ha integrato i pesi per produrre la mappa finale, rappresentata in classi (Bonham-Carter, 1994). Il diagramma ad albero mostra le componenti del modello di valutazione della suscettibilità da frana (Figura 5.32).



**Figura 5.32** Componenti del processo di analisi euristica della suscettibilità da frana.

Il livello maggiore è costituito dai criteri, che sono, secondo l'ordine scelto, geomorfologico, topografico, geologico, idrologico e antropico. Questi criteri sono stati suddivisi in sette variabili (Tab. 5.5), come pendenze ed esposizione per il criterio topografico. La relazione tra le variabili e lo scopo del modello (*goal*) può essere favorevole o sfavorevole. In questo caso, tutte le variabili (fattori predisponenti) contribuiscono in modo positivo (sono favorevoli) all'innesco di frane.

VARIABILI	SCALA	UNITA'
Frane	Categorie	----
Pendenze	Intervalli	Gradi
Esposizione	Intervalli	Gradi
Litologie	Categorie	----
Distanza dai corsi d'acqua	Intervalli	Metri
Uso del suolo	Categorie	----
Distanza dalle strade	Intervalli	Metri

**Tabella 5.5** Variabili del modello euristico.

Le variabili scelte devono essere standardizzate in modo da poter essere confrontate. I valori delle variabili sono stati convertiti in un certo numero di classi, a seconda del tipo

di variabile. Ad ogni classe è stato assegnato un valore tra 0 e 1, che indica il grado di influenza nell'innescare di frane di quella classe (relativa suscettibilità ad innescare frane): 1=molto influente, 0=non influente. Questi valori sono stati assegnati sulla base di dati di letteratura e di valutazioni critiche (Tab. 5.6).

Le pendenze sono state standardizzate sulla base dei lavori di Berti et al., 2000; Catani et al., 2005; Dai et al., 2002; Thiery et al., 2007. Alla classe con i valori più bassi è stato assegnato 0, mentre il valore massimo 1 è stato assegnato alla classe che nell'area di studio è più propensa all'innescare di frane. I valori standardizzati dell'esposizione dei versanti si basano sulla caratteristica generale che i versanti esposti a nord sono i più umidi, mentre quelli esposti a sud sono i più secchi (Capitani et al., 2014). Molti studi hanno analizzato la relazione tra le litologie e le frane (Akgun et al., 2008; Wang et al., 2009; Perri et al., 2013), secondo i quali più le rocce sono alterate e più sono predisposte all'innescare di frane e le rocce a grana fine (scisti, marne, argille) e quelle con intercalazioni di materiali a grana fine sono più suscettibili; sulla base di questi concetti sono stati assegnati i valori alle varie litologie. Per quanto riguarda la distanza dai corsi d'acqua, questa nell'area di studio, influenza la possibilità che si verifichino fenomeni di scalzamento al piede perciò sono stati assegnati valori decrescenti dalla distanza minore a quella maggiore. I valori per le classi dell'uso del suolo sono stati assegnati in base alla vegetazione presente: più la vegetazione è rada più aumenta la probabilità di avere frane sul versante. La distanza dalle strade influenza l'innescare di frane dove sono presenti tagli stradali, quindi anche in questo caso sono stati assegnati dei valori in ordine decrescente dalla distanza minore a quella maggiore.

Il passo successivo è consistito nell'attribuzione dei pesi ai vari criteri. Il software fornisce tre metodi di confronto per fare ciò: “*direct*”, “*pair-wise*” e “*rank ordering*”. Nel primo metodo i pesi dei criteri sono assegnati direttamente sulla base delle conoscenze dell'operatore e dai rilievi sul campo. Per il metodo “*pair-wise*” ogni criterio è confrontato agli altri a coppie in modo da valutare se essi hanno la stessa importanza, o uno dei due ha più importanza per il raggiungimento dello scopo finale. Nel metodo “*ranking*” i criteri sono classificati in una scala ordinale secondo la loro influenza nel raggiungimento dello scopo finale.

VARIABILI	CLASSI	VALORE STANDARDIZZATO
Pendenze	0° - 5°	0
	5° - 10°	0.1
	10° - 15°	0.8
	15° - 25°	1
	25° - 35°	0.8
	35° - 45°	0.2
	> 45°	0.1
Esposizione	Zona pianeggiante	0
	N	1
	NE	0.8
	E	0.5
	SE	0.3
	S	0.2
	SO	0.3
	O	0.5
NO	0.8	
Litologie	Formazione di Albidona	1
	Argille marnose	0.8
	Depositi terrazzi marini	0.2
	Sabbie	0.3
	Alluvioni	0
Distanza dai corsi d'acqua	0 - 100 m	1
	100 - 200 m	0.562
	200 - 300 m	0.343
	300 - 400 m	0.197
	> 400 m	0
Uso del suolo	Zone a vegetazione arbustiva e/o erbacea	1
	Bosco	0.1
	Zone urbanizzate	0.2
	Seminativi	0.8
	Zone agricole eterogenee	0.2
Zone con vegetazione rada o assente	0.4	
Distanza dalle strade	0 - 100 m	1
	100 - 200 m	0.520
	200 - 300 m	0.280
	> 300 m	0.120

**Tabella 5.6 Valori standardizzati assegnati alle classi di tutte le variabili.**

Nell'assegnare il peso relativo alle variabili topografiche e antropiche è stato usato il metodo di confronto "pair-wise". Mentre per il confronto di tutti i criteri è stato utilizzato il metodo "rank ordering". Nella letteratura sulle frane è generalmente accettato che la topografia contribuisce in maggior modo nell'innescare di frane. Quindi, al criterio topografico (pendenze ed esposizione) è stato assegnato il peso più alto, seguito dai criteri geologico, molto importante nell'area di studio, idrologico e antropico (Tab. 5.7). Più è elevato il peso e più è elevato il contributo nella costruzione della mappa dei pesi finale. Il peso cumulativo di tutti i criteri è uguale a 1.

CRITERI	PESI
Topografico	0.521
Geologico	0.271
Idrologico	0.146
Antropico	0.063

Tabella 5.7 Pesì assegnati ai criteri attraverso il metodo “Rank Ordering”.

Utilizzando sempre il modulo SMCE di Ilwis (Fig. 5.33), le mappe dei pesi dei criteri sono state così combinate per ottenere una mappa dei pesi finale con valori compresi tra 0 e 1 (Fig. 5.34): i pixels con valori vicino a 1 sono quelli più suscettibili, mentre i pixels con valori vicino a 0 sono quelli meno suscettibili. Nella mappa ottenuta il valore più alto che indica la più alta suscettibilità è 1, mentre il valore più basso è 0.04 che indica la suscettibilità più bassa (Fig. 5.34).

Le mappe di output create con il modulo ILWIS utilizzano per la rappresentazione il cosiddetto dominio “NILto1”, che prevede per la visualizzazione delle mappe colori che vanno dal rosso, partendo dal valore 0, fino ad arrivare al verde per i valori pari a 1.

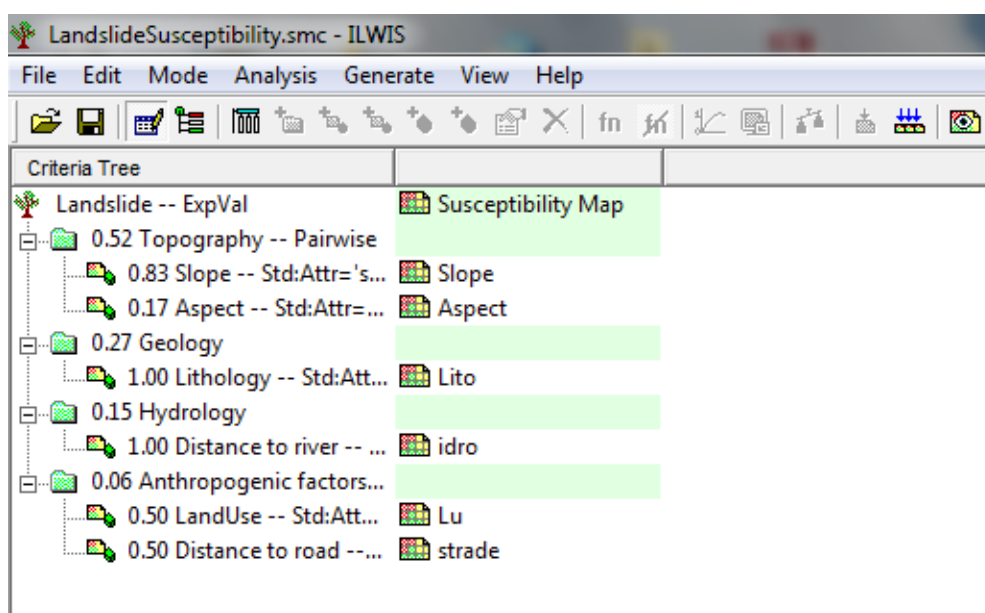
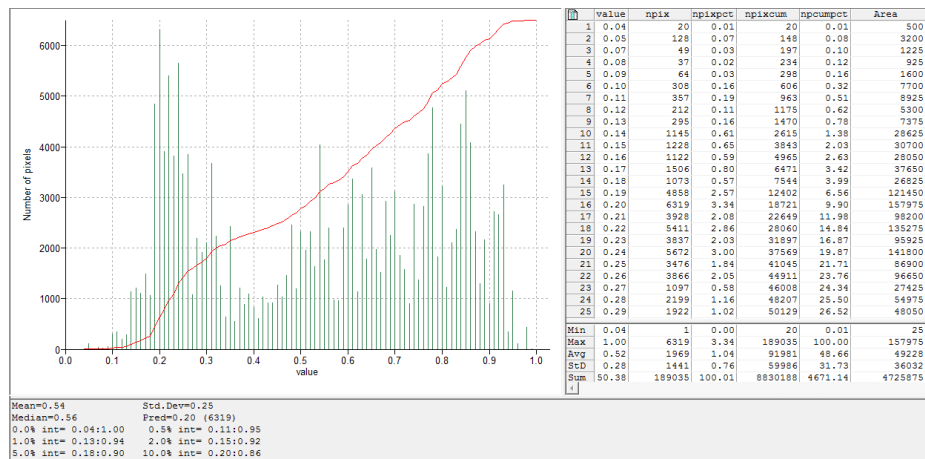
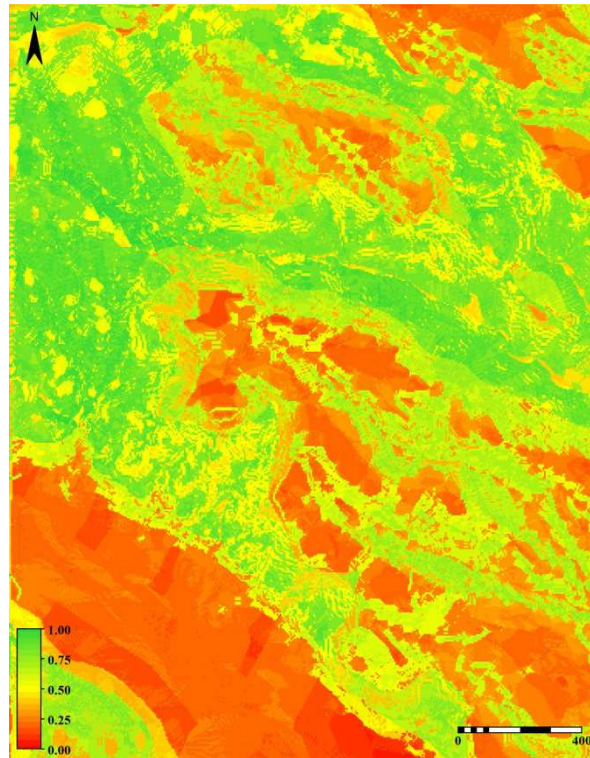


Figura 5.33 “Criteria tree” nel modulo SMCE di Ilwis.



**Figura 5.34** Mappa dei pesi finale ed il corrispondente istogramma, che mostra la statistica del valore dei pixels.

La mappa dei pesi prodotta rappresenta la mappa qualitativa di pericolosità spaziale (o suscettibilità da frana) dell'area di studio. I valori dei pesi sono stati raggruppati in tre categorie (Fig. 5.35): alta, moderata e bassa. La suscettibilità bassa corrisponde al range 0.04-0.3, quella moderata al range 0.3-0.73 e quella alta al range 0.73-1. Nella tabella 5.8 sono riportati i valori areali e in percentuale delle classi di suscettibilità della mappa ottenuta. Secondo il metodo applicato il 30.60 % dell'area di studio ricade nella classe di suscettibilità alta.

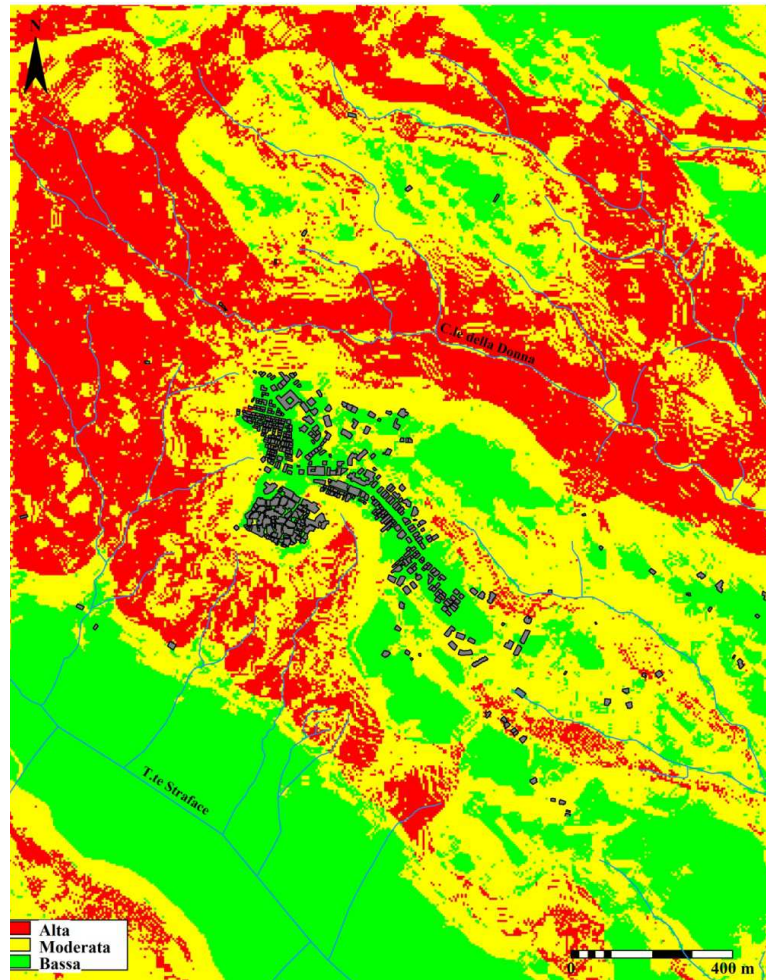


Figura 5.35 Mappa della suscettibilità da frana, realizzata mediante il metodo euristico.

Classe di suscettibilità	Area (mq)	%
Alta	1445975	30.60
Moderata	1973800	41.77
Bassa	1306100	27.64

Tabella 5.8 Area e percentuale delle classi di suscettibilità.

### 5.2.2.1.3 Metodo “*Hazard Index*”

Il metodo è descritto nel paragrafo 4.2.2.2 ed è sintetizzato nella figura 5.36.

Tutte le operazioni di calcolo e di elaborazione grafica sono state eseguite utilizzando il software GIS Ilwis 3.4. Per l’analisi, in accordo con (Suzen e Doyuran, 2004; Conoscenti et al., 2008; Magliulo et al., 2008), sono state utilizzate le sole scarpate di frana, in quanto rappresentative delle zone di innesco dei fenomeni gravitativi. Le scarpate di frana sono state divise in due gruppi quantitativamente analoghi adottando una suddivisione *random* (Chung e Fabbri, 2003). Un gruppo (*training set*) è stato



utilizzato per costruire il modello di stima della suscettibilità, mentre l'altro (*validation set*) è stato impiegato per valutare la capacità previsionale del modello, verificando la percentuale di scarpate di frana del *validation set* che ricadono nelle diverse classi di suscettibilità.

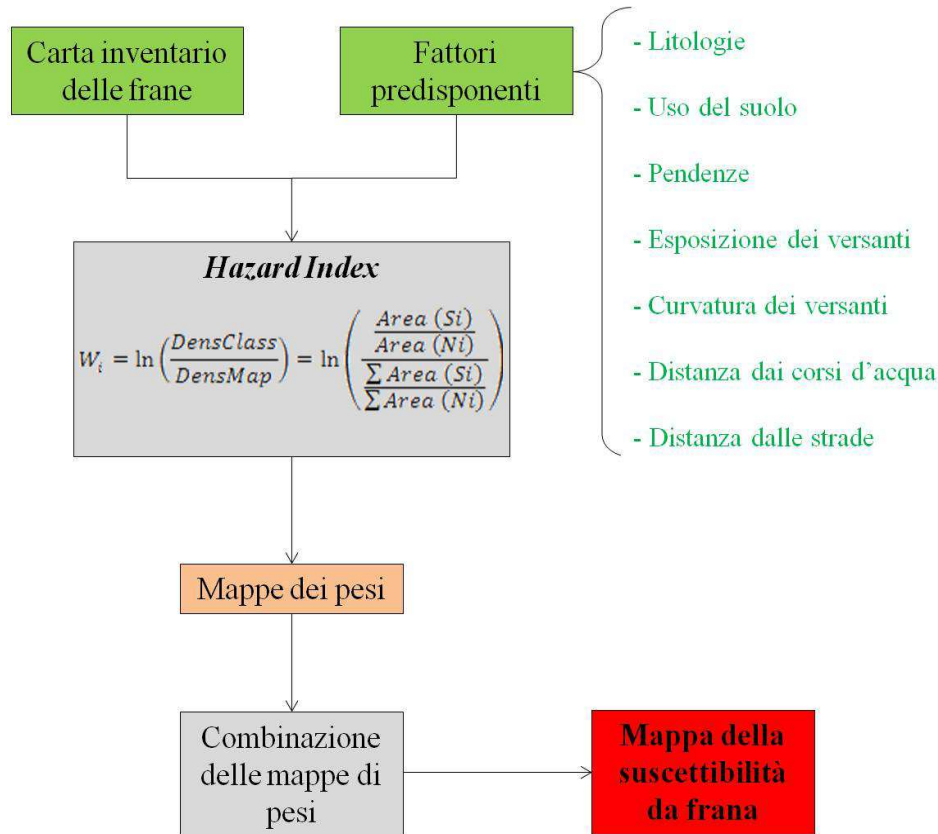


Figura 5.36 Diagramma di flusso delle fasi del metodo *Hazard Index*.

I fattori predisponenti scelti per l'analisi, organizzati ciascuno in un livello informativo a se stante, suddivisi in classi e convertiti in formato *grid* con celle quadrate di 5 m di lato, sono stati relazionati mediante un'operazione di sovrapposizione in ambiente GIS, con il *grid* "training set" delle scarpate di frana. Determinati i pesi  $W$  per ciascuna classe di ogni fattore predisponente, le carte tematiche dei fattori predisponenti sono state sommate ottenendo così la relativa carta di suscettibilità da frana.

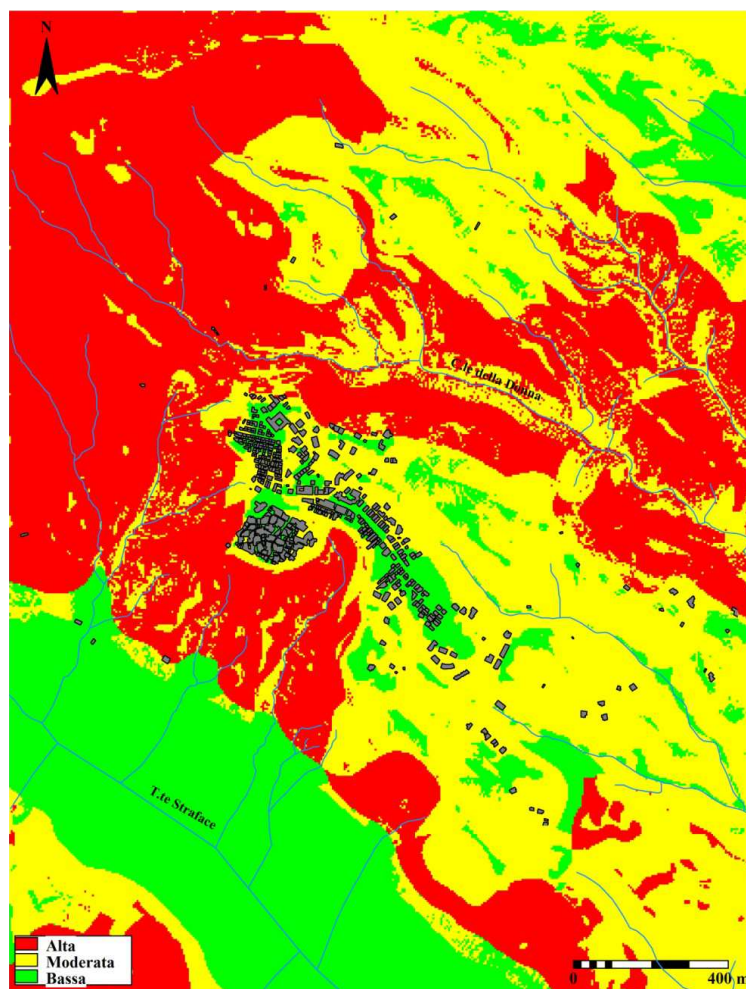
### Frane profonde

Nella tabella 5.9 si riporta la suddivisione in classi dei fattori predisponenti scelti per l'analisi della suscettibilità da frane profonde, e tutti i termini necessari alla determinazione dei relativi pesi. Essa mostra quali classi influenzano l'instabilità generata da frane profonde nell'area di studio.

FATTORE PREDISPOSINENTE	CLASSI	AREA DELLA CLASSE	AREA IN FRANA DELLA CLASSE	DensClass	DensMap	W
Litologie	Formazione di Albidona	869300	71050	0.0817	0.0370	<b>0.7921</b>
	Argille marnose del T.te Straface	1196375	58425	0.0488	0.0370	0.2768
	Depositi marini terrazzati	1865875	35675	0.0191	0.0370	-0.6612
	Sabbie di Amendolara	241175	15150	0.0628	0.0370	0.5290
	Dep. alluvionali	697500	0	0.0001	0.0370	<i>-5.9135</i>
Uso del suolo	Seminativo	950650	74625	0.0785	0.0370	<b>0.7522</b>
	Bosco	109750	0	0.0001	0.0370	<i>-5.9135</i>
	Zone agricole eterogenee	1516400	12600	0.0083	0.0370	-1.4947
	Zone aperte con veg. rada o assente	1018200	52200	0.0513	0.0370	0.3268
	Veg. arbustiva e/o erbacea	924275	39800	0.0431	0.0370	0.1526
	Zone urbanizzate	350975	1075	0.0031	0.0370	-2.4795
Pendenze	0° - 5°	1201650	2300	0.0019	0.0370	-2.9691
	5° - 10°	853400	29550	0.0346	0.0370	-0.0671
	10° - 15°	836525	36725	0.0439	0.0370	0.1710
	15° - 25°	1223650	65975	0.0539	0.0370	0.3762
	25° - 35°	611300	36275	0.0593	0.0370	0.4717
	35° - 45°	129975	9375	0.0721	0.0370	0.6671
	> 45°	13750	100	0.0073	0.0370	-1.6230
Esposizione	Zona pianeggiante	151175	3575	0.0236	0.0370	-0.4497
	N	181500	8775	0.0483	0.0370	0.2665
	NE	763550	27350	0.0358	0.0370	-0.0330
	E	832650	28575	0.0343	0.0370	-0.0758
	SE	839850	26550	0.0316	0.0370	-0.1578
	S	1085325	37450	0.0345	0.0370	-0.0700
	SO	731075	35475	0.0485	0.0370	0.2706
	O	225300	7750	0.0344	0.0370	-0.0729
Curvatura dei versanti	Concava	942250	39675	0.0421	0.0370	0.1291
	Sub-pianeggiante	2965975	101550	0.0342	0.0370	-0.0787
	Convessa	962025	39075	0.0406	0.0370	0.0929
Distanza dai corsi d'acqua	50 m	1853675	29375	0.0158	0.0370	-0.8509
	100 m	1380275	67700	0.0490	0.0370	0.2809
	150 m	796025	41450	0.0521	0.0370	0.3422
	> 150 m	840275	41775	0.0497	0.0370	0.2951
Distanza dalle strade	50 m	1965825	68900	0.0350	0.0370	-0.0556
	100 m	1169450	47750	0.0408	0.0370	0.0978
	150 m	811475	28975	0.0357	0.0370	-0.0358
	> 150 m	923500	34675	0.0375	0.0370	0.0134

**Tabella 5.9** Valori dei pesi calcolati per i fattori predisponenti utilizzati nell'analisi di suscettibilità per le frane profonde. In grassetto i pesi delle classi maggiormente influenti, in corsivo quelli che influiscono meno.

Dalla somma dei pesi è stata ottenuta la mappa di suscettibilità da frane profonde; il campo di variabilità del peso W è stato suddiviso in tre classi a cui corrisponde un diverso livello di suscettibilità (bassa, moderata, alta) (Fig. 5.37).



**Figura 5.37** Mappa della suscettibilità da frane profonde, realizzata mediante il metodo *Hazard Index*.

Per quanto riguarda la propensione da frana profonda, è stato stimato che quasi il 38,57% dell'area totale ricade nella classe di suscettibilità alta (Tab. 5.10).

Classe di suscettibilità	Area (mq)	%
<b>Alta</b>	1878450	38.57
<b>Moderata</b>	2004500	40.78
<b>Bassa</b>	987275	20.09

**Tabella 5.10** Area e percentuale delle classi di suscettibilità.

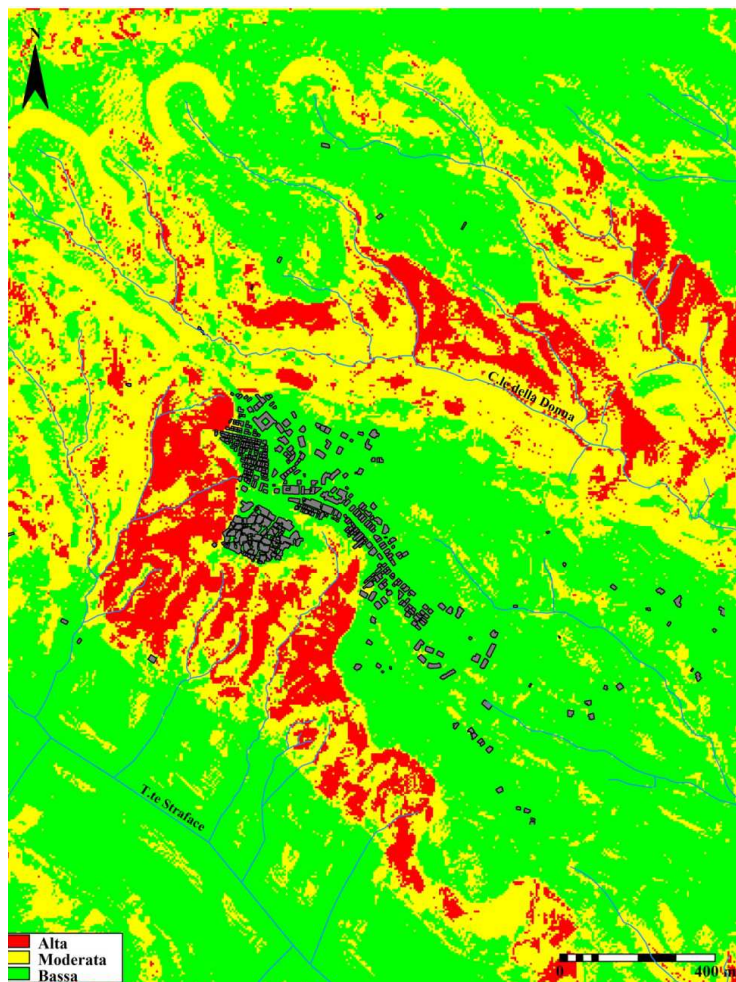
### Frane superficiali

Nella tabella 5.11 si riporta la suddivisione in classi dei fattori predisponenti scelti per l'analisi della suscettibilità da frane superficiali, e tutti i termini necessari alla determinazione dei relativi pesi. Essa mostra le classi che influenzano maggiormente l'innescio di frane superficiali nell'area di studio.

FATTORE PREDISPOSINENTE	CLASSI	AREA DELLA CLASSE	AREA IN FRANA DELLA CLASSE	DensClass	DensMap	W
Litologie	Formazione di Albidona	869300	225	0.0003	0.0001	1.0986
	Argille marnose del T.te Straface	1196375	350	0.0003	0.0001	1.0986
	Depositi marini terrazzati	1865875	125	0.0001	0.0001	<i>0.0000</i>
	Sabbie di Amendolara	241175	25	0.0001	0.0001	<i>0.0000</i>
	Depositi alluvionali	697500	0	0.0001	0.0001	<i>0.0000</i>
Uso del suolo	Seminativo	950650	225	0.0002	0.0001	0.6931
	Bosco	109750	0	0.0001	0.0001	<i>0.0000</i>
	Zone agricole eterogenee	1516400	0	0.0001	0.0001	<i>0.0000</i>
	Zone aperte con vegetazione rada o assente	1018200	225	0.0002	0.0001	0.6931
	Zone con vegetazione arbustiva e/o erbacea	924275	275	0.0003	0.0001	1.0986
	Zone urbanizzate	350975	0	0.0001	0.0001	<i>0.0000</i>
Pendenze	0° - 5°	1201650	0	0.0001	0.0001	<i>0.0000</i>
	5° - 10°	853400	0	0.0001	0.0001	<i>0.0000</i>
	10° - 15°	836525	75	0.0001	0.0001	<i>0.0000</i>
	15° - 25°	1223650	225	0.0002	0.0001	0.6931
	25° - 35°	611300	175	0.0003	0.0001	1.0986
	35° - 45°	129975	225	0.0017	0.0001	<b>2.8332</b>
	> 45°	13750	25	0.0018	0.0001	<b>2.8904</b>
Esposizione	Zona pianeggiante	151175	0	0.0001	0.0001	<i>0.0000</i>
	N	181500	0	0.0001	0.0001	<i>0.0000</i>
	NE	763550	25	0.0001	0.0001	<i>0.0000</i>
	E	832650	125	0.0002	0.0001	0.6931
	SE	839850	50	0.0001	0.0001	<i>0.0000</i>
	S	1085325	125	0.0001	0.0001	<i>0.0000</i>
	SO	731075	225	0.0003	0.0001	1.0986
	O	225300	125	0.0006	0.0001	1.7918
Curvatura dei versanti	NO	104475	50	0.0005	0.0001	1.6094
	Concava	942250	375	0.0004	0.0001	1.3863
	Sub-pianeggiante	2965975	225	0.0001	0.0001	<i>0.0000</i>
Distanza dai corsi d'acqua	Convessa	962025	125	0.0001	0.0001	<i>0.0000</i>
	50 m	1853675	250	0.0001	0.0001	<i>0.0000</i>
	100 m	1380275	375	0.0003	0.0001	1.0986
	150 m	796025	75	0.0001	0.0001	<i>0.0000</i>
Distanza dalle strade	> 150 m	840275	25	0.0001	0.0001	<i>0.0000</i>
	50 m	1965825	225	0.0001	0.0001	<i>0.0000</i>
	100 m	1169450	225	0.0002	0.0001	0.6931
	150 m	811475	100	0.0001	0.0001	<i>0.0000</i>
	> 150 m	923500	175	0.0002	0.0001	0.6931

**Tabella 5.11 Valori dei pesi calcolati per i fattori predisponenti utilizzati nell'analisi di suscettibilità per le frane superficiali. In grassetto i pesi delle classi maggiormente influenti, in corsivo quelli che influiscono meno.**

Dalla somma dei pesi è stata ottenuta la mappa di suscettibilità da frane profonde; il campo di variabilità del peso  $W$  è stato suddiviso in tre classi a cui corrisponde un diverso livello di suscettibilità (bassa, moderata, alta) (Fig. 5.38).



**Figura 5.38** Mappa della suscettibilità da frane superficiali, realizzata mediante il metodo *Hazard Index*.

Per quanto riguarda la propensione da frane superficiali, è stato stimato che il 10.21 % dell'area totale ricade nella classe di suscettibilità alta (Tab. 5.12).

Classe di suscettibilità	Area (mq)	%
<b>Alta</b>	497025	10.21
<b>Moderata</b>	1625525	33.38
<b>Bassa</b>	2747675	56.42

**Tabella 5.12** Area e percentuale delle classi di suscettibilità.

#### 5.2.2.1.4 Metodo “*Weight of Evidence*”

La metodologia, descritta nel paragrafo 4.2.2.4, è stata applicata utilizzando il *software* GIS Ilwis 3.4, ed è sintetizzata nel diagramma seguente (Fig. 5.39).

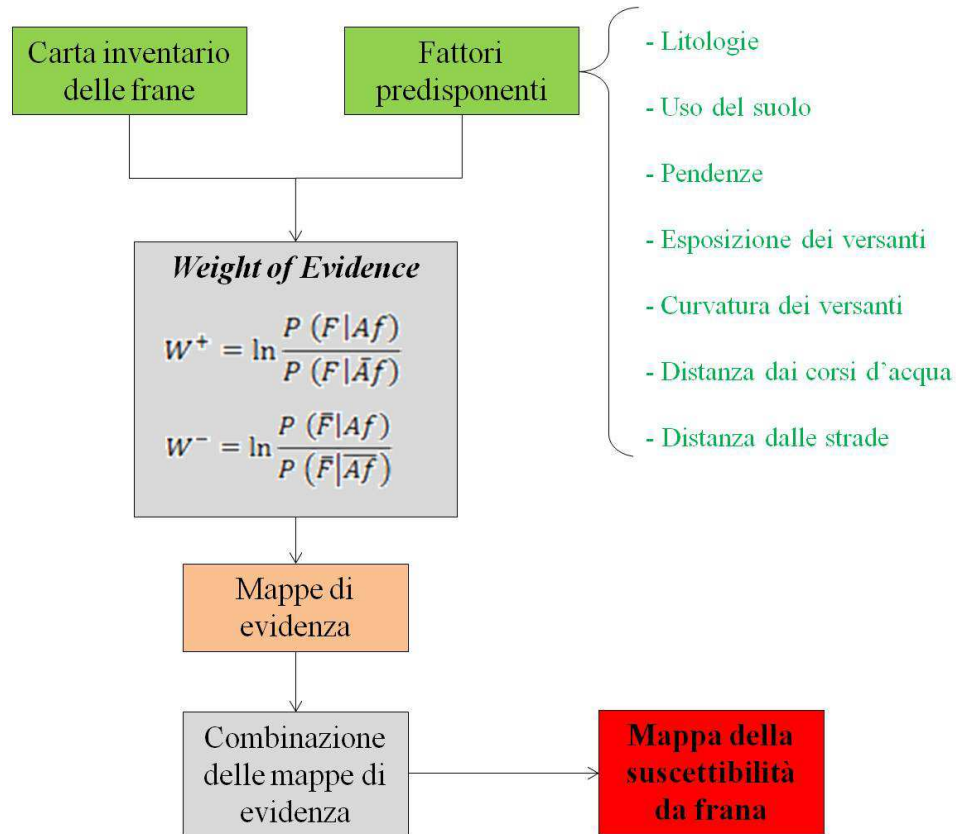


Figura 5.39 Diagramma di flusso delle fasi del metodo *Weight of Evidence*.

Nell'applicazione del modello, per ognuno dei layers usato come "evidenza" (litologie, uso del suolo, pendenze, esposizione, curvatura dei versanti, distanza dai corsi d'acqua e distanza dalle strade), è stata calcolata una mappa binaria che mostra la relazione statistica tra la variabile predittiva (fattore predisponente) e l'evento (l'innescò di frane).

I pesi positivi e negativi delle classi dei fattori predisponenti vengono infine sommati per produrre la carta di suscettibilità da frana.

## Frane profonde

La tabella 5.13 mostra i pesi e il contrasto delle classi dei fattori predisponenti scelti.

FATTORE PREDISPOSNENTE	CLASSI	PIXELS DELLA CLASSE	PIXELS IN FRANA DELLA CLASSE	$W^+$	$W^-$	C
Litologie	Formazione di Albidona	34772	2842	0.8395	-0.3144	<b>1.1539</b>
	Argille marnose del T.te Straface	47855	2337	0.2893	-0.1137	0.4030
	Depositi marini terrazzati	74635	1427	-0.6792	0.2742	-0.9534
	Sabbie di Amendolara	9647	606	0.5559	-0.0384	0.5943
	Depositi alluvionali	27900	0	-6.9780	0.1609	<i>-7.1389</i>
Uso del suolo	Seminativo	38026	2985	0.7956	-0.3275	1.1231
	Bosco	4390	0	-5.1287	0.0235	-5.1522
	Zone agricole eterogenee	60656	504	-1.5235	0.3142	-1.8377
	Zone aperte con vegetazione rada o assente	40728	2088	0.3405	-0.1112	0.4517
	Zone con vegetazione arbustiva e/o erbacea	36971	1592	0.1574	-0.0404	0.1978
Pendenze	Zone urbanizzate	14039	43	-2.5268	0.0716	-2.5984
	0° - 5°	48066	92	-2.9981	0.2825	-3.2806
	5° - 10°	34136	1182	-0.0693	0.0142	-0.0835
	10° - 15°	33461	1469	0.1777	-0.0408	0.2185
	15° - 25°	48946	2639	0.3937	-0.1721	0.5658
	25° - 35°	24452	1451	0.4953	-0.0938	0.5891
Esposizione	35° - 45°	5199	375	0.7041	-0.0273	0.7314
	> 45°	550	4	-1.6578	0.0024	-1.6602
	Zona pianeggiante	6047	143	-0.4525	0.0116	-0.4641
	N	7260	351	0.6825	-0.0124	0.6949
	NE	30542	1094	-0.0248	0.0045	-0.0293
	E	33306	1143	-0.0691	0.0136	-0.0827
	SE	33594	1062	-0.1540	0.0292	-0.1832
	S	43413	1498	-0.0635	0.0173	-0.0808
Curvatura dei versanti	SO	29243	1419	0.2921	-0.0602	0.3523
	O	9012	310	-0.0667	0.0031	-0.0698
	NO	4179	192	0.2347	-0.0057	0.2404
Distanza dai corsi d'acqua	Concava	37690	1587	0.1340	-0.0348	0.1688
	Sub-pianeggiante	118639	4062	-0.0810	0.1152	-0.1962
	Convessa	38481	1563	0.0965	-0.0251	0.1216
Distanza dalle strade	50 m	74147	1175	-0.8703	0.3148	-1.1851
	100 m	55211	2708	0.2939	-0.1425	0.4364
	150 m	31841	1658	0.3569	-0.0858	0.4427
	> 150 m	33611	1671	0.3081	-0.0769	0.3850
Distanza dalle strade	50 m	78633	2756	-0.0568	0.0368	-0.0936
	100 m	46778	1910	0.1019	-0.0343	0.1362
	150 m	32459	1159	-0.0375	0.0073	-0.0448
	> 150 m	36940	1387	0.0147	-0.0035	0.0182

Tabella 5.13 Valori dei pesi,  $W^+$  e  $W^-$ , e dei contrasti C calcolati per i fattori predisponenti scelti. In grassetto è indicato il valore del contrasto maggiore, in corsivo quello minore.

Più è alto il valore di  $W^+$ , maggiore è la correlazione positiva nell'innesco di frane. La correlazione positiva più alta è stata ottenuta per la classe litologica "Formazione di Albidona" con un valore di  $W^+$  pari a 0,8395. Per quanto riguarda il valore del contrasto C, quando questo è approssimativamente 2, si ha una correlazione significativa (Barbieri e Cambuli, 2009). In questo caso, è sempre la classe litologica "Formazione di Albidona" a rappresentare quella che maggiormente influenza l'innesco di frane, con un valore di C pari a 1,1539. Tra i fattori predisponenti morfometrici, la classe di pendenza 35°- 45° è quella che più influisce sull'innesco di frane con un valore di C pari a 0,7314, mentre le classi di pendenza 0°-5° e >45° sono quelle più stabili. Inoltre, escludendo le classi "Depositi alluvionali", "Zone urbanizzate" e pendenze "0° - 5°", si osserva che i "Boschi" e le "Zone agricole eterogenee" hanno un ruolo fondamentale nel mantenere stabili le aree suscettibili all'innesco di frane.

Il peso finale di ogni di classe è stato calcolato come la somma del peso positivo e dei pesi negativi delle altre classi di quel fattore predisponente (Tabella 5.14).

Secondo la classificazione dei pesi del pacchetto per le analisi statistiche spaziali di Arc-Wofe, riportata nel paragrafo 4.2.2.4, la classe di litologia "Formazione di Albidona", che si riferisce ad un *flysch* arenaceo-marnoso, è il fattore che più influenza l'innesco di frane nell'area di studio. Mentre, escludendo l'area in cui sono presenti i "Depositi alluvionali", la categoria "Boschi" è quella che più stabilizza i versanti.

La sovrapposizione, in ambiente GIS, di tutte le mappe dei pesi (riclassificate sulla base del valore di contrasto C) ha prodotto la carta di suscettibilità da frane profonde nell'area di studio (Fig. 5.40). Le aree che hanno un peso più alto avranno una maggiore probabilità di innescare frane.

Il *range* dei pesi ottenuti ha un valore minimo di -17,57 ed un valore massimo di 3,90, con un valore medio di -2,47 e una deviazione standard di 4,33. I valori dei pesi sono stati classificati in tre classi di suscettibilità, distribuite nell'area di studio come segue: 17,18% bassa, 41,12% moderata, 40,79% alta (Tab. 5.15).

Si osserva chiaramente come il letto del T.te Straface e i lembi di terrazzi non sono interessati dal pericolo di frane, in confronto alle aree in pendenza e quello in cui affiora il *flysch* arenaceo-marnoso (Fig. 5.40).



FATTORE PREDISPONENTE	CLASSI	PESI FINALI
Litologie	Formazione di Albidona	<b>1.1225</b>
	Argille marnose del T.te Straface	0.3716
	Depositi marini terrazzati	-0.9848
	Sabbie di Amendolara	0.5629
	Depositi alluvionali	<i>-7.1703</i>
Uso del suolo	Seminativo	1.0533
	Bosco	<i>-5.2220</i>
	Zone agricole eterogenee	-1.9075
	Zone aperte con vegetazione rada o assente	0.3819
	Veg. arbustiva e/o erbacea	0.1280
	Zone urbanizzate	-2.6682
Pendenze	0° - 5°	-3.3155
	5° - 10°	-0.1184
	10° - 15°	0.1836
	15° - 25°	0.5309
	25° - 35°	0.5542
	35° - 45°	0.6965
	> 45°	-1.6951
Esposizione	Zona pianeggiante	-0.4631
	N	0,5629
	NE	-0.0283
	E	-0.0817
	SE	-0.1822
	S	-0.0798
	SO	0.3533
	O	-0.0688
NO	0.2414	
Curvatura dei versanti	Concava	0.2241
	Sub-pianeggiante	-0.1409
	Convessa	0.1769
Distanza dai corsi d'acqua	50 m	-1.1755
	100 m	0.4460
	150 m	0.4523
	> 150 m	0.3946
Distanza dalle strade	50 m	-0.0873
	100 m	0.1425
	150 m	-0.0385
	> 150 m	0.0245

Tabella 5.14 Pesì finali delle classi dei fattori predisponenti. In grassetto i pesi delle classi maggiormente influenti, in corsivo quelli che influiscono meno.

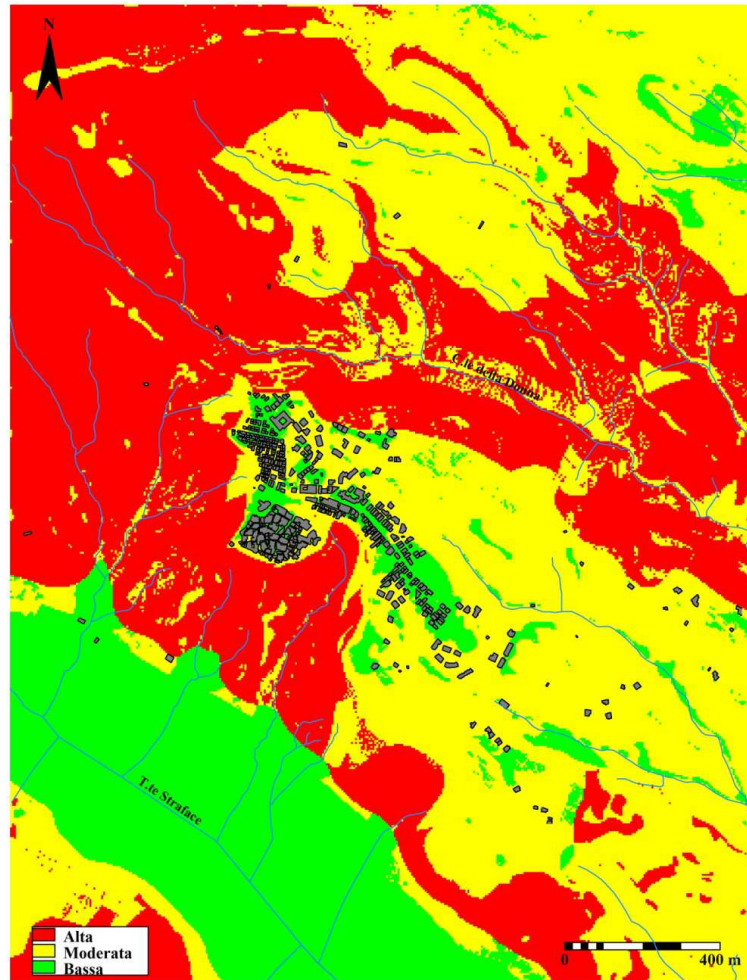


Figura 5.40 Mappa della suscettibilità da frane profonde, realizzata mediante il metodo *Weight of Evidence*.

Classe di suscettibilità	Area (mq)	%
Alta	2004875	40,79
Moderata	2021050	41.12
Bassa	844300	17.18

Tabella 5.15 Area e percentuale delle classi di suscettibilità.

### Frane superficiali

La tabella 5.16 mostra i pesi e il contrasto delle classi dei fattori predisponenti scelti.

Il valore più alto di  $W^+$  e di  $C$  appartiene alle classi di pendenza  $> 35^\circ$ , che quindi rappresentano le classi con la maggiore correlazione positiva all'innescio di frane. Tra i fattori predisponenti morfometrici, le classi di pendenza  $< 10^\circ$  sono invece quelle più stabili. Inoltre, escludendo le classi "Depositi alluvionali", "Zone urbanizzate" e pendenze  $< 10^\circ$ , si osserva che le "Zone agricole eterogenee" hanno un ruolo molto importante nel mantenere stabili le aree suscettibili all'innescio di frane con  $C$  pari a -

2,5737. La somma del peso positivo e dei pesi negativi delle altre classi di quel fattore predisponente ha permesso il calcolo del peso finale di ogni di classe (Tabella 5.17).

FATTORE PREDISPONENTE	CLASSI	PIXELS DELLA CLASSE	PIXELS IN FRANA DELLA CLASSE	$W^+$	$W^-$	C
Litologie	Formazione di Albidona	34772	9	0.5532	-0.1750	0.7282
	Argille marnose del T.te Straface	47855	14	0.6757	-0.3774	1.0531
	Depositi marini terrazzati	74635	5	-0.7985	0.2939	-1.0924
	Sabbie di Amendolara	9647	1	-0.3620	0.0157	-0.3777
	Depositi alluvionali	27900	0	-1.4580	0.1207	-1.5787
Uso del suolo	Seminativo	38026	9	0.4638	-0.1544	0.6182
	Bosco	4390	0	0.3913	-0.0111	0.4024
	Zone agricole eterogenee	60656	0	-2.2345	0.3392	-2.5737
	Zone aperte con vegetazione rada o assente	40728	9	0.3951	-0.1370	0.5321
	Veg. arbustiva e/o erbacea	36971	11	0.6926	-0.2665	0.9591
	Zone urbanizzate	14039	0	-0.7712	0.0409	-0.8121
Pendenze	0° - 5°	48066	0	-2.0019	0.2495	-2.2514
	5° - 10°	34136	0	-1.6597	0.1588	-1.8185
	10° - 15°	33461	3	-0.5071	0.0793	-0.5864
	15° - 25°	48946	9	0.2113	-0.0822	0.2935
	25° - 35°	24452	7	0.6541	-0.1422	0.7963
	35° - 45°	5199	9	2.4551	-0.3446	<b>2.7997</b>
	> 45°	550	1	2.5042	-0.0323	2.5365
Esposizione	Zona pianeggiante	6047	0	0.0802	-0.0027	0.0829
	N	7260	0	1.3129	-0.0304	1.3433
	NE	30542	1	-1.5054	0.1338	-1.6392
	E	33306	5	0.0176	-0.0036	0.0212
	SE	33594	2	-0.9074	0.1159	-1.0233
	S	43413	5	-0.2475	0.0603	-0.3078
	SO	29243	9	0.7356	-0.2105	0.9461
	O	9012	5	1.3251	-0.1423	1.4674
Curvatura dei versanti	NO	4179	2	1.1773	-0.0500	1.2273
	Concava	37690	15	0.9836	-0.5133	1.4969
	Sub-pianeggiante	118639	9	-0.6742	0.5676	-1.2418
Distanza dai corsi d'acqua	Convessa	38481	5	-0.1360	0.0308	-0.1668
	50 m	74147	10	-0.0987	0.0562	-0.1549
	100 m	55211	15	0.6017	-0.3950	0.9967
	150 m	31841	3	-0.4575	0.0693	-0.5268
Distanza dalle strade	> 150 m	33611	1	-1.6102	0.1543	-1.7645
	50 m	78633	9	-0.2629	0.1454	-0.4083
	100 m	46778	9	0.2566	-0.0970	0.3536
	150 m	32459	4	-0.1890	0.0338	-0.2228
	> 150 m	36940	7	0.2414	-0.0660	0.3074

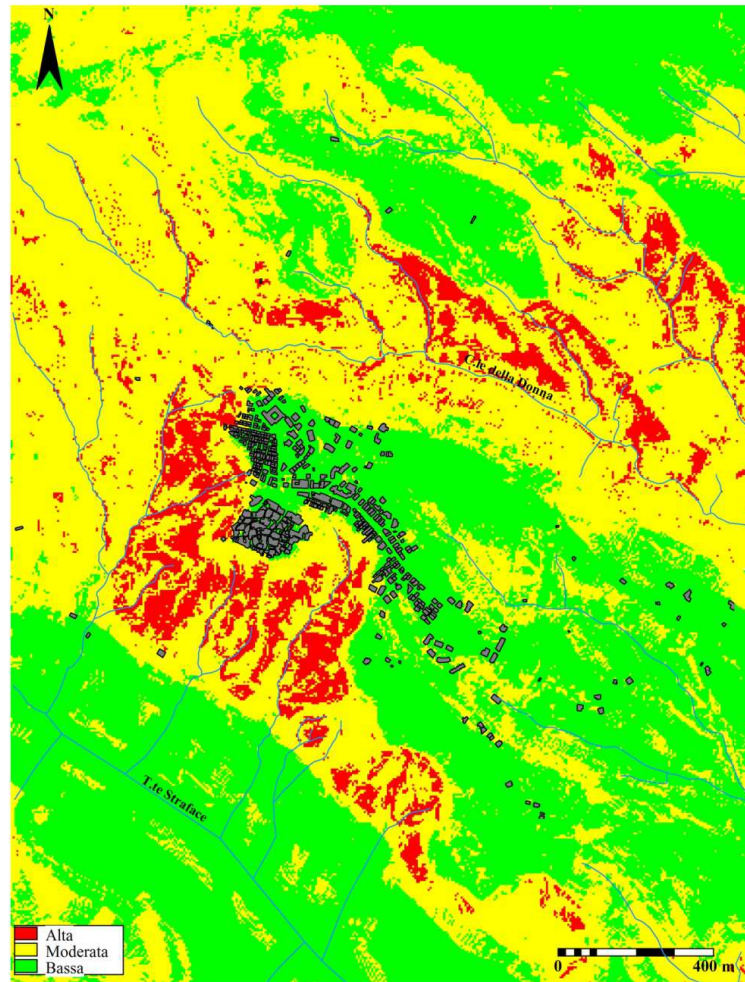
**Tabella 5.16 Valori dei pesi,  $W^+$  e  $W^-$ , e dei contrasti C calcolati per i fattori predisponenti scelti. In grassetto il valore del contrasto maggiore, in corsivo quello che influisce meno.**

FATTORE PREDISPOSENTE	CLASSI	PESI FINALI
Litologie	Formazione di Albidona	0.6061
	Argille marnose del T.te Straface	0.9310
	Depositi marini terrazzati	-1.2145
	Sabbie di Amendolara	-0.4998
	Depositi alluvionali	-1.7008
Uso del suolo	Seminativo	0.4293
	Bosco	0.2135
	Zone agricole eterogenee	-2.7626
	Zone aperte con vegetazione rada o assente	0.3432
	Zone con vegetazione arbustiva e/o erbacea	0.7702
	Zone urbanizzate	-1.0010
Pendenze	0° - 5°	-2.3651
	5° - 10°	-1.9322
	10° - 15°	-0.7001
	15° - 25°	0.1798
	25° - 35°	0.6826
	35° - 45°	<b>2.6860</b>
	> 45°	2.4228
Esposizione	Zona pianeggiante	-0.0466
	N	0.1783
	NE	-1.7687
	E	-0.1083
	SE	-1.1528
	S	-0.4373
	SO	0.8166
	O	1.3379
Curvatura dei versanti	NO	1.0978
	Concava	1.5820
	Sub-pianeggiante	-1.1567
Distanza dai corsi d'acqua	Convessa	-0.0817
	50 m	-0.2701
	100 m	0.8815
	150 m	-0.6420
Distanza dalle strade	> 150 m	-1.8797
	50 m	-0.3921
	100 m	0.3698
	150 m	-0.2066
	> 150 m	0.3236

**Tabella 5.17** Pesì finali delle classi dei fattori predisponenti. In grassetto i pesì delle classi maggiormente influenti, in corsivo quelli che influiscono meno.

Dalla tabella 5.17 risulta che la classe di pendenza 35°-45° è la classe che più influenza l'innescò di frane nell'area di studio. Escludendo l'area in cui sono presenti i "Depositi alluvionali", la classe "Zone agricole eterogenee" è quella che più stabilizza i versanti. Come per le frane profonde, anche per quelle superficiali la presenza delle aree pianeggianti dei terrazzi riduce la probabilità dell'innescò di frane, aumentando la stabilità in quelle aree.

La sovrapposizione delle mappe dei pesi ha prodotto la carta di suscettibilità da frane superficiali (Fig. 5.41). Il range dei pesi ottenuti ha un valore minimo di -12,03 ed un valore massimo di 8,56, con un valore medio di -2,96 e una deviazione standard di 3,99. I valori dei pesi sono stati classificati in tre classi di suscettibilità (Tab. 5.18).



**Figura 5.41** Mappa della suscettibilità da frane superficiali, realizzata mediante il metodo *Weight of Evidence*.

Classe di suscettibilità	Area (mq)	%
Alta	354325	7,21
Moderata	2386200	48,55
Bassa	2129700	43,33

**Tabella 5.18** Area e percentuale delle classi di suscettibilità.

### 5.2.2.1.5 Validazione delle mappe di suscettibilità

La validazione dei metodi utilizzati per la valutazione della suscettibilità da frana è stata effettuata tramite la realizzazione e l'analisi delle curve *prediction-rate* e *success-rate* (Chung e Fabbri, 2003; Remondo et al., 2003; Conoscenti et al. 2008), mentre l'affidabilità statistica dei risultati è stata valutata tramite l'area sotto la curva ROC (AUC, *Area Under Curve*) (Swets, 1988). Tutti questi parametri sono descritti nel paragrafo 4.2.2.5.

Per applicare la metodologia di validazione, come detto nel paragrafo 5.2.2.1, i *database* relativi alle frane profonde e alle frane superficiali sono stati divisi in due gruppi, adottando una suddivisione *random* (Chung e Fabbri, 2003): il gruppo *training set* è stato utilizzato per stimare la suscettibilità ed il gruppo *validation set* è stato utilizzato per valutare la capacità predittiva del modello.

#### Metodo spaziale multi-criteriale

La figura 5.42 mostra la curva ROC e il valore dell'area sotto la curva AUC, che è risultato essere 0.96, indicando un'elevata affidabilità del modello applicato. Il maggior limite di questo metodo è rappresentato dal fatto che il risultato dipende in modo significativo dall'esperienza dell'operatore e dall'accuratezza dei dati di input (Armaş, 2011).

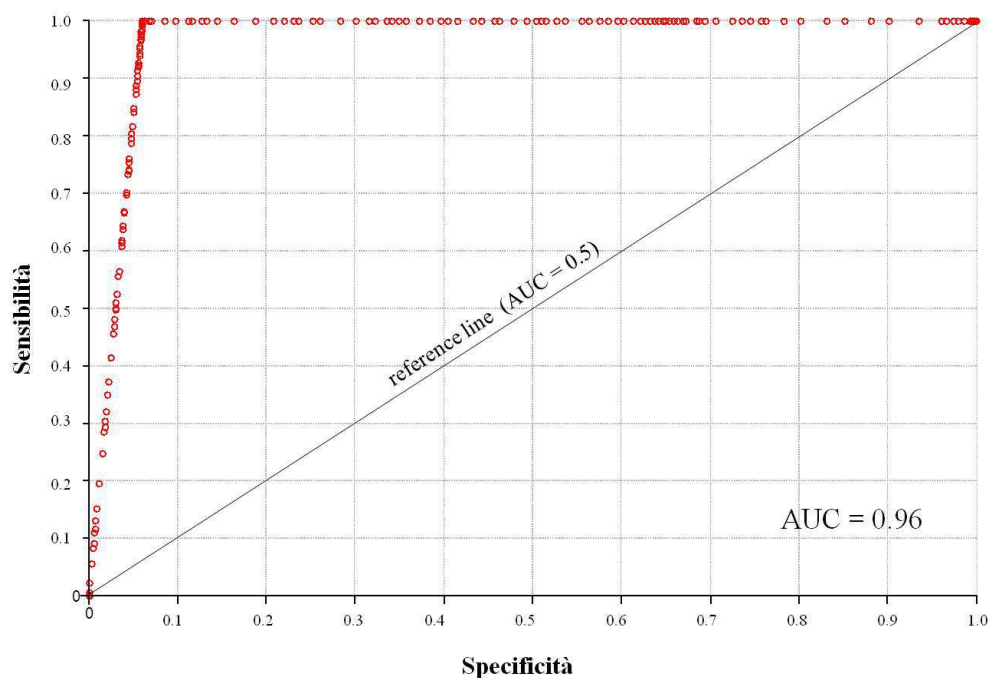
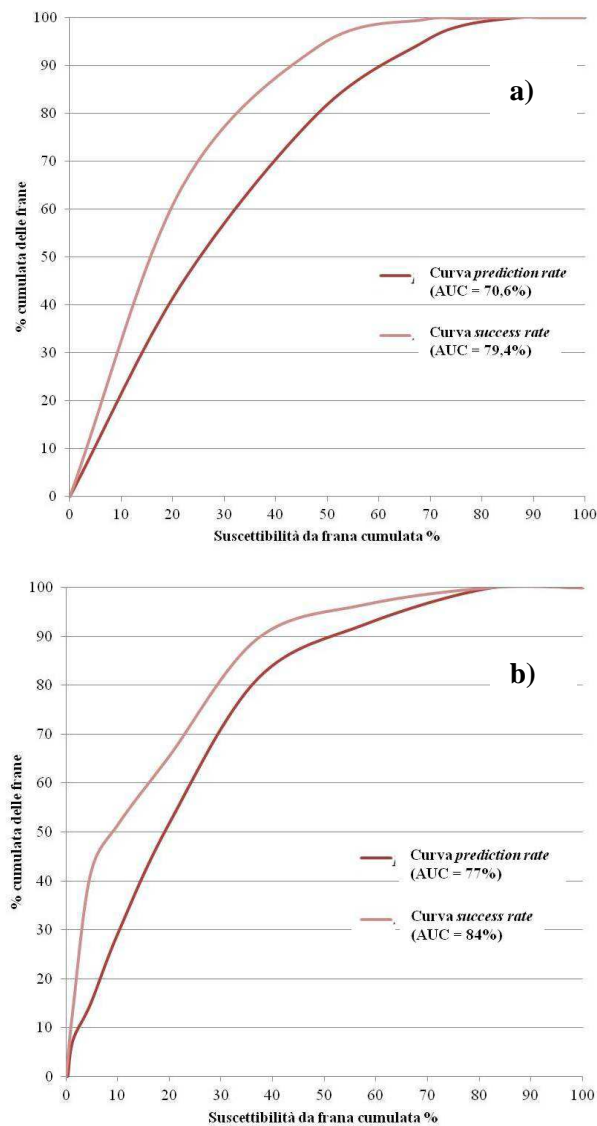


Figura 5.42 Curva ROC per il metodo spaziale multi-criteriale.

### Metodo Hazard Index

Le curve *success-rate* ottenute (Fig. 5.43), si presentano abbastanza ripide nella parte iniziale, soprattutto quella del modello applicato alle frane superficiali, e poi si stabilizzano in maniera monotona. Le curve *prediction-rate* (Fig. 5.43) mostrano una forma simile alle curve *success-rate*. La validazione della suscettibilità da frane profonde e superficiali conferma un'effettiva (non casuale) correlazione fra le carte di suscettibilità predette e la distribuzione spaziale delle frane del *validation set*.

Dunque si può affermare che il metodo *Hazard Index* applicato e i fattori predisponenti scelti per l'analisi riescono a valutare in modo soddisfacente la propensione da frane profonde e da frane superficiali nell'area di studio.

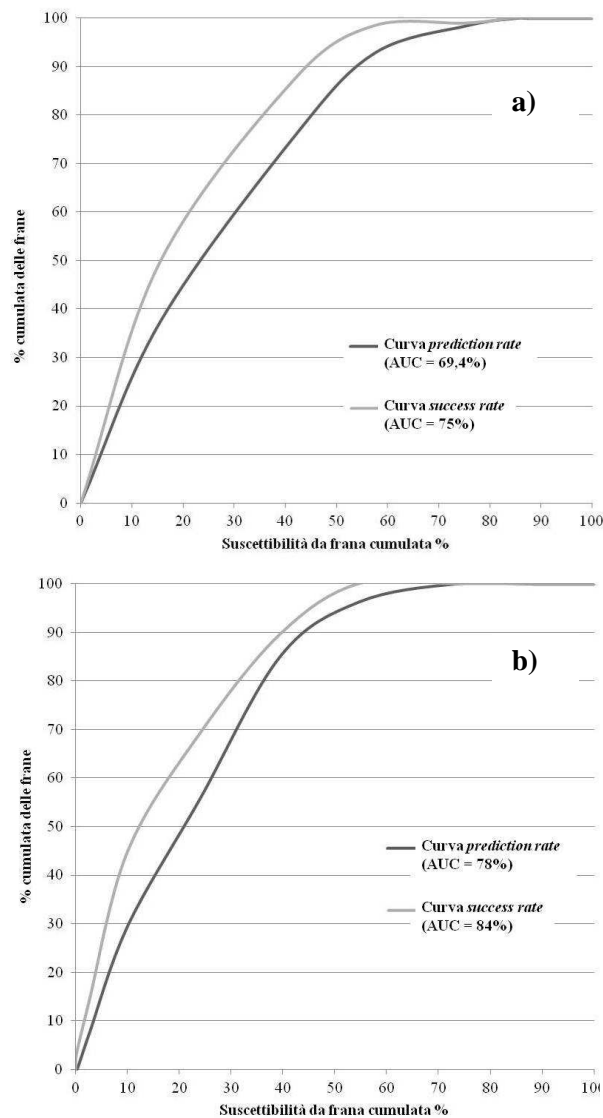


**Figura 5.43** Curve *prediction* e *success rate* e valore dell'AUC per il modello di suscettibilità da frane profonde (a) e da frane superficiali (b).

### Metodo *Weight of Evidence*

La forma delle curve *success-rate* e *prediction-rate* ottenute (Fig. 5.44) per la validazione della suscettibilità da frane profonde e superficiali conferma un'effettiva correlazione fra le carte di suscettibilità predette e la distribuzione spaziale delle frane del *validation set*.

Quindi anche il metodo *Weight of Evidence* riesce a valutare in modo soddisfacente la propensione da frane profonde e da frane superficiali nell'area di studio.



**Figura 5.44** Curve *prediction* e *success rate* e valore dell'AUC per il modello di suscettibilità da frane profonde (a) e da frane superficiali (b).



### Confronto dei metodi “Hazard Index” e “Weight of Evidence” applicati per l’analisi di suscettibilità delle frane profonde e frane superficiali

La valutazione dell’affidabilità statistica dei metodi applicati per le frane profonde e per le frane superficiali ha fornito valori dell’AUC tutti al di sopra di 0,5 (Tab. 5.19), così i modelli possono essere considerati “ideali” (Yesilnacar e Topal, 2005; Yilmaz, 2010; Kavzoglu et al., 2013).

In particolare, l’analisi dei valori di AUC mostra che essi sono tutti compresi tra il 0,7 e il 0,9, tranne che per la curva *prediction rate* del metodo *Weight of Evidence* applicato alle frane profonde, indicando un’affidabilità statistica ragionevole per entrambi i metodi (Yesilnacar e Topal, 2005; Yilmaz, 2010; Kavzoglu et al., 2013). Tuttavia, la maggiore accuratezza si riscontra per il metodo *Hazard Index*, perciò nell’analisi della pericolosità sono state utilizzate le mappe di suscettibilità da frane profonde e da frane superficiali ottenute con questo metodo.

Frane		AUC	
		<i>Hazard Index</i>	<i>Weight of Evidence</i>
Profonde	<i>Success rate</i>	0,79	0,75
	<i>Prediction rate</i>	0,70	0,69
Superficiali	<i>Success rate</i>	0,84	0,84
	<i>Prediction rate</i>	0,77	0,78

**Tabella 5.19** Valori dell’AUC per il metodo *Hazard Index* e *Weight of Evidence*.

#### **5.2.2.2 Valutazione della pericolosità temporale da frana**

In prima approssimazione, le frane possono essere considerate come eventi puntuali random e indipendenti nel tempo (Croveli, 2000). In questo contesto, la *exceedance probability* dell’innesco di eventi franosi nel tempo  $t$  è:

$$P_N = P [N(t) \geq 1]$$

Dove  $N(t)$  è il numero di frane che si verificano nel tempo  $t$  nell’area studiata.

Comunemente, sono utilizzati due modelli di probabilità per analizzare il verificarsi naturale di eventi puntuali random nel tempo: il modello di Poisson e il modello binomiale (Croveli, 2000; Önöz e Bayazit, 2001). Il modello di Poisson è un modello continuo nel tempo, che consiste di eventi puntuali random i quali si verificano indipendentemente nel tempo. E’ stato utilizzato per analizzare l’occorrenza temporale di eruzioni vulcaniche (Klein, 1982; Connor e Hill, 1995; Nathenson, 2001), alluvioni (Yevjevich, 1972; Önöz e Bayazit, 2001) e frane (Croveli, 2000; Coe et al., 2000).

Adottando il modello di Poisson per l'occorrenza temporale delle frane, la probabilità di avere  $n$  frane nel tempo  $t$  è data da (Crovelli, 2000):

$$P [N(t) = n] = \exp(-\lambda t) \frac{(\lambda t)^n}{n!} \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Dove  $\lambda$  è il tasso di occorrenza medio stimato delle frane, che corrisponde a  $1/\mu$ , con  $\mu$  che rappresenta l'intervallo di ricorrenza medio stimato tra due eventi di innesco successivi. Le variabili  $\lambda$  e  $\mu$  possono essere ottenute da un catalogo storico delle frane, o da una carta inventario delle frane multi-temporale.

Dall'ultima equazione, la probabilità di innesco di una o più frane nel tempo  $t$  (*exceedance probability*) è:

$$\begin{aligned} P [N(t) \geq 1] &= 1 - P [N(t) = 0] = 1 - \exp(-\lambda t) \\ &= 1 - \exp\left(-\frac{t}{\mu}\right) \end{aligned}$$

In base a questa equazione, secondo Crovelli (2000) per un periodo di tempo  $t$ , se  $\mu \rightarrow \infty$ , allora  $P [N(t) \geq 1] \rightarrow 0$ , ossia se l'intervallo di ricorrenza medio stimato tra due eventi successivi è molto grande, non vi è nessuna possibilità che si verifichi una frana nel periodo considerato. Inoltre, se la ricorrenza media stimata  $\mu$  è fissata e l'intervallo di tempo è molto grande ( $t \rightarrow \infty$ ), allora  $P [N(t) \geq 1] \rightarrow 1$ , e vi è la certezza che si verifichi un evento franoso.

Il modello di Poisson permette di determinare la probabilità di frane future per differenti tempi  $t$  (per differenti numeri di anni) basandosi sulle statistiche degli eventi di frana del passato, considerando le seguenti assunzioni (Crovelli, 2000):

- il numero di frane che si verificano in intervalli di tempo non collegati sono indipendenti;
- la probabilità che un evento si verifichi in un tempo molto breve è proporzionale alla lunghezza dell'intervallo di tempo;
- la probabilità di più di un evento in un intervallo di tempo molto breve è trascurabile;
- la distribuzione di probabilità del numero di eventi è uguale per tutti gli intervalli di tempo di lunghezza fissata;
- la ricorrenza media degli eventi nel future sarà uguale a quella osservata nel passato.

Le conseguenze di queste assunzioni, le quali non sempre sono valide per le frane, dovrebbero essere considerate quando si interpretano e si usano i risultati del modello di probabilità.

In alternativa al modello di Poisson, si può applicare il modello binomiale. Il modello di probabilità binomiale è un modello discreto nel tempo e considera l'occorrenza di eventi puntuali random nel tempo. In questo modello, il tempo è diviso in incrementi discreti di uguale lunghezza. In ogni incremento temporale un singolo evento puntuale può o non può verificarsi. Il modello binomiale è stato adottato da Costa e Baker (1981) per studiare l'occorrenza delle alluvioni, e da Keaton et al. (1988), Lips e Wieczorek (1990), e Coe et al. (2000) per studiare l'occorrenza temporale delle frane e dei *debris flows*.

Seguendo Crovelli (2000), e adottando il modello binomiale probabilistico, la *exceedance probability* di avere una o più frane nel tempo  $t$  è:

$$\begin{aligned} P [N(t) \geq 1] &= 1 - P [N(t) = 0] = 1 - (1 - p)^t \\ &= 1 - \left(1 - \frac{1}{\mu}\right)^t \end{aligned}$$

Dove,  $p$  è la probabilità stimata di un evento franoso nel tempo  $t$ , e  $\mu = 1/p$  è la ricorrenza media stimata nell'intervallo tra inneschi successivi.

Come per il modello di Poisson,  $\mu$  può essere ottenuto da un catalogo storico delle frane o da una carta inventario delle frane multi-temporale. Il modello di probabilità binomiale si basa sulle stesse o simili assunzioni elencate per il modello di Poisson.

Crovelli (2000) ha confrontato i due modelli, e ha mostrato che i due modelli differiscono per brevi intervalli di ricorrenza media (quando  $\mu$  è piccolo) e per periodi brevi (quando  $t$  è piccolo), con il modello binomiale che sovrastima la *exceedance probability* degli eventi di frana futuri. Per periodi lunghi e intervalli di ricorrenza medio lunghi, ad esempio per eventi rari, il modello binomiale coincide con il modello di Poisson.

L'approccio storico-probabilistico scelto è stato basato sull'analisi della ricorrenza temporale degli eventi del passato attraverso il modello di Poisson, utilizzando la carta inventario delle frane multi-temporale. Il periodo studiato è stato di 60 anni, dal 1954 al 2014. Lo studio è stato svolto per le frane superficiali, con profondità minore di 2 m, e per le frane profonde, con profondità maggiore di 2 m, suddivise in base ai bacini idrografici dell'area di studio: bacino del T.te Straface e Bacino del T.te Ferro.

Per ottenere la frequenza dell'occorrenza delle frane, nel *geo-database* multi-temporale sono stati contati gli eventi di frana (occorrenze) (Guzzetti et al., 2005) profondi e superficiali in 60 anni nei due bacini idrografici (Tabella 5.20).

	Frane profonde	Frane superficiali
Bacino T.te Straface	26	49
Bacino T.te Ferro	28	40

Tabella 5.20 Numero degli eventi di frane profonde e di frane superficiali.

Il *database* delle frane contiene 44 siti e 54 attivazioni di frane profonde, e 29 siti e 89 attivazioni di frane superficiali. Le attivazioni degli eventi franosi sono state determinate dall'analisi sistematica delle foto aeree degli anni 1954, 1984, 1990, delle ortofoto del 2006, da Google Earth per l'anno 2011 e dai rilievi sul campo per l'anno 2014.

Per ogni bacino, sulla base del tasso di occorrenza delle frane del passato è stata ottenuta la ricorrenza media delle frane, ossia il tempo atteso tra due successivi inneschi, dividendo il numero totale di attivazioni nei due bacini per il numero di anni investigato (60 anni). Conoscendo l'intervallo di ricorrenza media delle frane profonde e superficiali nei due bacini idrografici (dal 1954 al 2014), assumendo che il tasso degli inneschi resterà uguale in futuro, e adottando il modello di distribuzione di Poisson (Crovelli, 2000; Guzzetti et al., 2003), è stata calcolata la *exceedance probability* di avere frane (profonde e superficiali) in ogni bacino per differenti intervalli di tempo (Guzzetti et al., 2005, Guzzetti, 2006; Guzzetti et al, 2006).

La figura 5.45 mostra l'*exceedance probability* per differenti periodi: da 1 a 10 anni per le frane profonde e da 1 a 5 anni per le frane superficiali. Si osserva come la probabilità che si verificano frane aumenta con il tempo. Le probabilità di innesco ottenute sono state utilizzate per il calcolo della pericolosità da frana nell'area di studio.

### 5.2.2.3 Valutazione della magnitudo

Hungr (1997) afferma che non esiste un'unica misura della magnitudo (intensità) delle frane, ed ha proposto di adottare la capacità di provocare danni come misura della magnitudo delle frane. Il danno causato da una frana dipende soprattutto dalla velocità e dalla forza di impatto della massa che si sposta, ma questi parametri sono estremamente difficili da calcolare e da integrare nella valutazione della pericolosità. Tuttavia, per alcune tipologie di frane, come scorrimenti e frane complesse, l'area o il volume della frana rappresentano un'approssimazione ragionevole della magnitudo (Guzzetti et al, 2002; Guzzetti et al., 2005). In questo studio, ho considerato l'area in frana come *proxy* della magnitudo delle frane, in quanto i movimenti gravitativi presenti nell'area di studio sono essenzialmente scorrimenti e frane complesse.

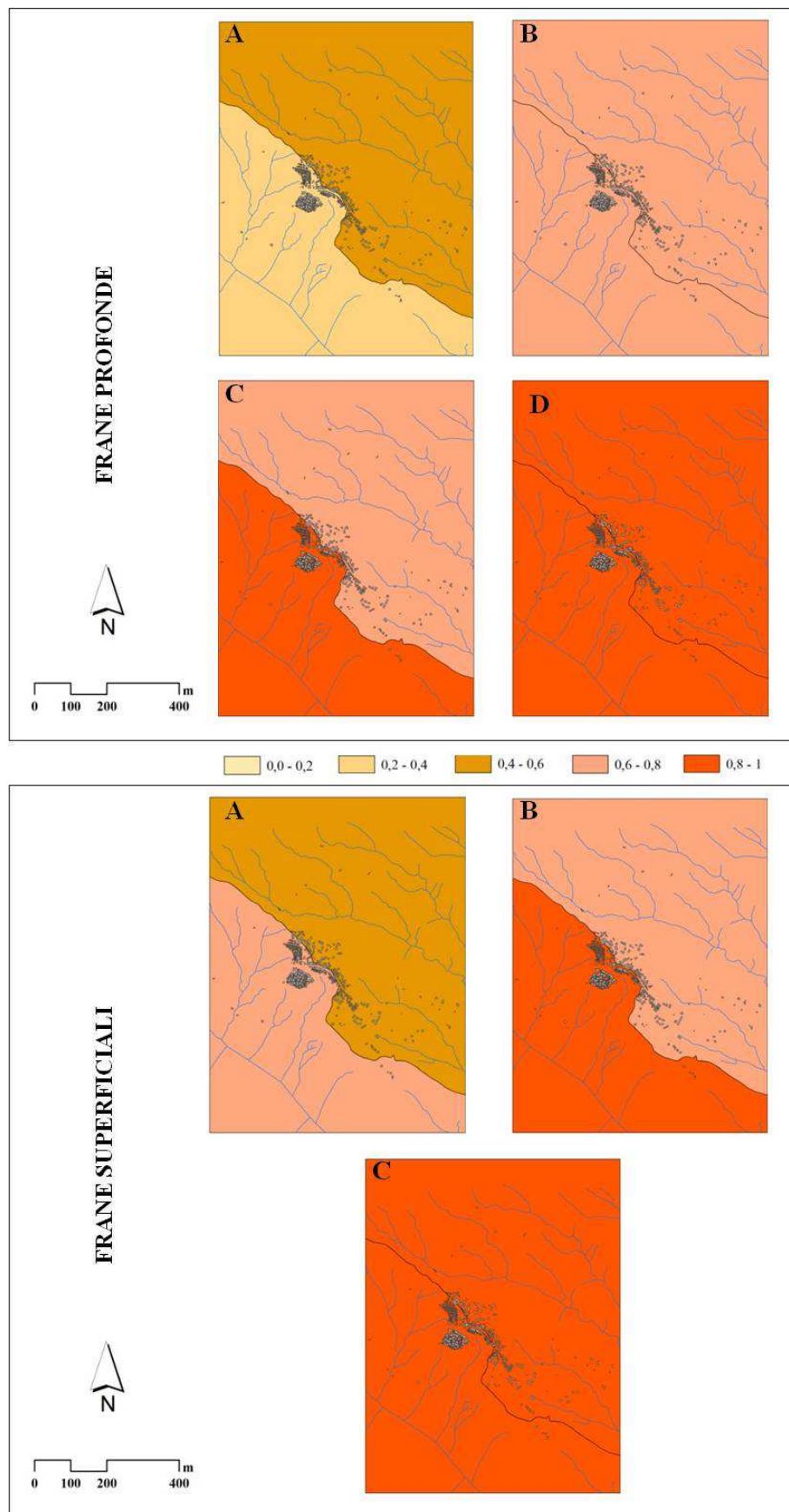


Figura 5.45 *Exceedance probability* dell'occorrenza delle frane ottenuta dal calcolo dell'intervallo di ricorrenza media degli eventi di frana del passato, assumendo che resterà uguale in futuro. Essa è stata calcolata per le frane profonde per i periodi: A – 1 anno, B – 3 anni, C – 5 anni, D – 10 anni; e per le frane superficiali per i periodi: A – 1 anno, B – 3 anni, C – 5 anni.

Questo è ragionevole perché le informazioni storiche sui danni causati da frane nell'area di studio suggeriscono che: i danni sono causati sia da frane lente che veloci (profonde e superficiali), e che le frane più estese tendono a produrre danni maggiori. Per lo studio della magnitudo, l'area planimetrica di ogni frana è stata calcolata in ambiente GIS. Frane piccole all'interno di frane più grandi, se di diversa tipologia ed età, sono state separate per ottenere l'area di ogni singola frana.

Utilizzando tutte le aree calcolate, si realizzerebbe un numero elevato di scenari di pericolosità difficili da interpretare. L'uso di differenti classi di aree aiuta a ridurre la quantità di scenari di pericolosità e a generare mappe maggiormente significative, di più facile comprensione e utilizzabili nell'analisi del rischio.

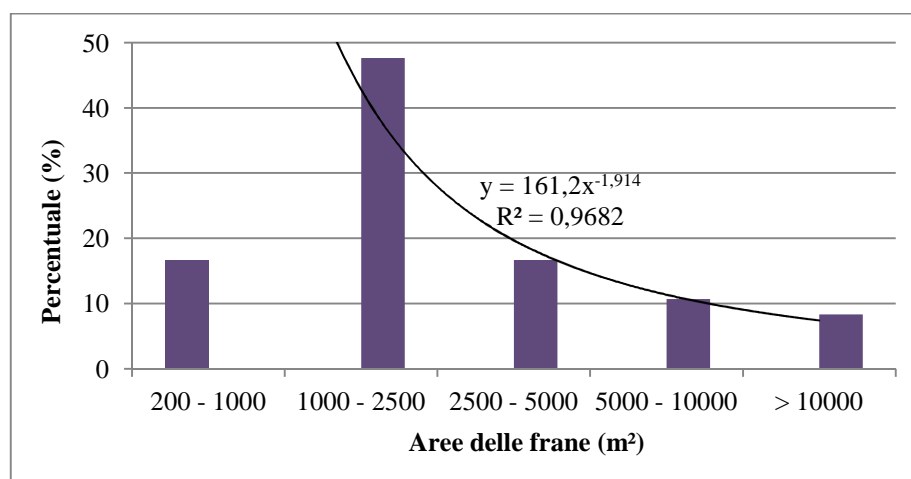
In questo studio, viene proposta una classificazione della magnitudo, nella quale le frane dell'area di studio sono raggruppate in cinque classi (Tab. 5.21). Solo la misura dell'area può non essere sufficiente a percepire il rischio, perciò sono state utilizzate anche altre variabili nella classificazione, ossia il tipo di frana, la stima della profondità, l'area e la probabilità di occorrenza (scala 0 – 1). La classificazione è semi-quantitativa e tutte le variabili sono derivate dalle informazioni ottenute durante il rilevamento delle frane pregresse, eccetto l'area e la probabilità. Per rendere la classificazione di immediata comprensione, sono fornite le descrizioni del potenziale impatto, in particolare del danno probabile. Nell'area di studio, le frane che hanno una magnitudo più piccola ( $< 1000 \text{ m}^2$ ) costituiscono una minaccia minore rispetto le frane che hanno una magnitudo maggiore, di cui sono registrati più danni nei confronti delle strade e degli edifici.

Il database delle frane contiene 84 movimenti gravitativi, includendo frane superficiali e profonde. L'analisi dell'inventario delle frane rivela che l'abbondanza delle frane cresce fino ad un valore massimo dell'area, dove le frane sono più frequenti, e poi decresce rapidamente secondo la legge di potenza mostrata in figura 5.46 (Pelletier et al., 1997; Hovius et al., 1997; Stark e Hovius, 2001; Guzzetti et al., 2002, 2003; Guthrie e Evans, 2004a,b; Malamud et al., 2004).

La figura 5.45 mostra che le frane più probabili sono quelle che hanno un'estensione compresa tra  $1000$  e  $2500 \text{ m}^2$ , e la probabilità di avere frane con aree più grandi decresce secondo la funzione mostrata in figura, fino alla classe  $>10000 \text{ m}^2$  che risulta la meno rappresentata.

Area (m <sup>2</sup> )	Caratteristiche delle frane	Probabilità	Danni possibili
200 - 1000	Superficiali; profondità < 2 m	0,6	Nessun danno o piccole lesioni, ma la funzionalità e la stabilità non sono compromesse
1000 - 2500	Profonde; profondità > 2 m; scorrimenti rotazionali e traslativi, e frane complesse	0,8	Lesioni centimetriche, la funzionalità e la stabilità sono compromesse
2500 - 5000		0,4	Deformazioni e lesioni, la funzionalità e la stabilità sono compromesse
5000 - 10000		0,2	Distruzione parziale
>10000		0,05	Distruzione completa

**Tabella 5.21** Classificazione delle aree in frana (magnitudo) sulla base dei rilievi sul campo.



**Figura 5.46** Distribuzione delle aree in frana.

#### 5.2.2.4 Mappe di pericolosità da frana

Per determinare quantitativamente la pericolosità da frana nell'area di studio sono stati utilizzati:

- la probabilità che le frane abbiano una certa area, che rappresenta un *proxy* della magnitudo, ottenuta dall'analisi statistica della distribuzione frequenza-area delle frane cartografate;

- la probabilità dell'occorrenza delle frane per periodi stabiliti, ottenuta dal calcolo dell'intervallo di ricorrenza media tra inneschi successivi nei due bacini idrografici dell'area di studio, e utilizzando il modello di probabilità di Poisson;
- la probabilità spaziale (o suscettibilità) che si verifichino frane, ottenuta dal metodo *Hazard Index* (van Westen, 1997).

Le tre probabilità, considerate indipendenti, sono state moltiplicate ed è stata così calcolata la pericolosità, ossia la probabilità che un'unità di mappa in futuro sarà interessata da frane, con determinate dimensioni e in un dato periodo, a causa di fattori ambientali locali.

Il prodotto delle mappe ottenute nell'analisi delle tre probabilità sopra elencate è stato effettuato su 16 combinazioni per le frane profonde e 3 combinazioni per le frane superficiali (Tab. 5.22).

	<b>Ps</b>	<b>Pt</b>		<b>Magnitudo</b>
		Bacino Straface	Bacino Ferro	
<b>Frane con profondità &gt; 2 m</b>	<i>Hazard Index</i>	Tr1		▪ 1000-2500 m <sup>2</sup>
		Tr3		▪ 2500-5000 m <sup>2</sup>
		Tr5		▪ 5000-10000 m <sup>2</sup>
		Tr10		▪ > 10000 m <sup>2</sup>
<b>Frane con profondità &lt; 2 m</b>		Tr1		200-1000 m <sup>2</sup>
		Tr3		
		Tr5		

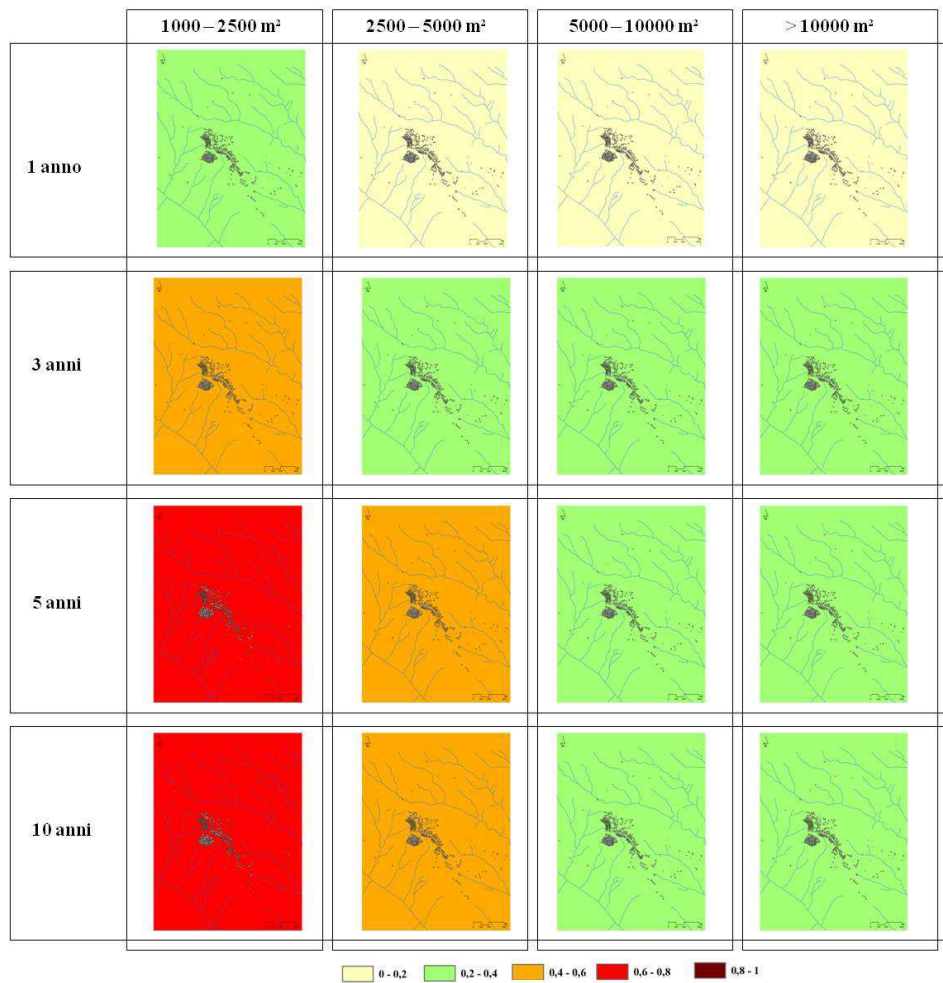
**Tabella 5.22 Dati per il calcolo della pericolosità.**

Le figure 5.47, 5.48 mostrano la pericolosità ottenuta nell'area di studio, rispettivamente, per le frane profonde e le frane superficiali.

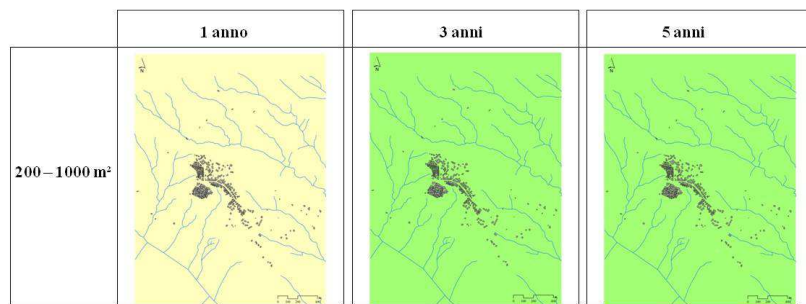
La pericolosità per le frane profonde (Fig. 5.46) è stata calcolata per quattro periodi (1, 3, 5 e 10 anni) e per quattro differenti intervalli di area (1000 – 2500 m<sup>2</sup>, 2500 – 5000 m<sup>2</sup>, 5000 – 10000 m<sup>2</sup> e > 10000 m<sup>2</sup>).

La pericolosità per le frane superficiali (Fig. 5.47) è stata calcolata per tre periodi (1, 3 e 5 anni) e per un intervallo di aree compreso tra 200 e 1000 m<sup>2</sup>.





**Figura 5.47** Mappe di pericolosità per le frane profonde.



**Figura 5.48** Mappe di pericolosità per le frane superficiali.

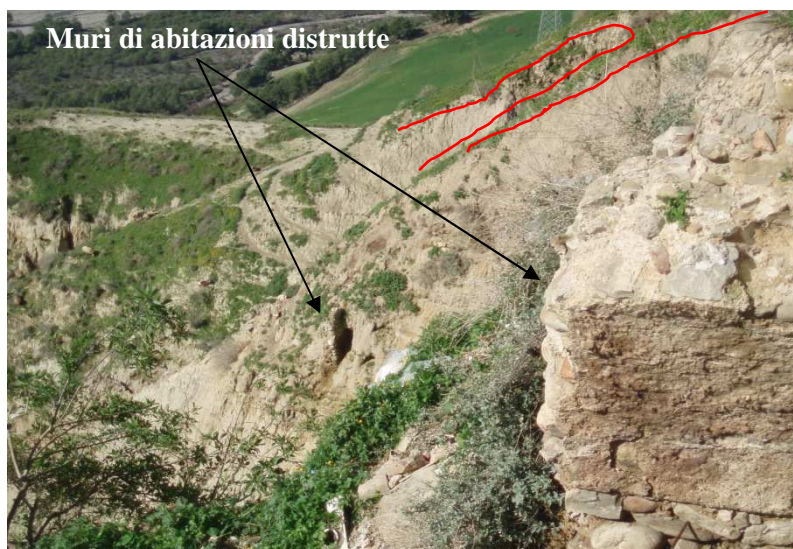
### 5.2.3 Valutazione della vulnerabilità

I rami di ricerca basilari sulla vulnerabilità sono l'analisi della vulnerabilità come mancanza di diritti sociali e l'analisi della vulnerabilità nei confronti dei fenomeni naturali potenzialmente pericolosi (Adger, 2006).

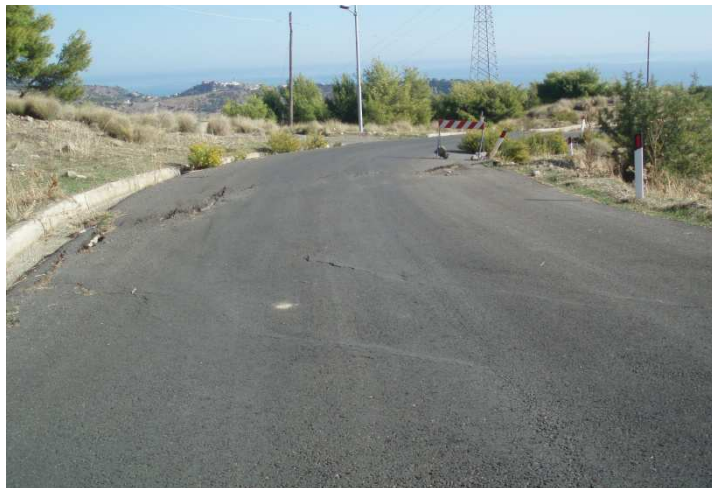
L'analisi della vulnerabilità nell'area di studio è stata basata sul secondo approccio, considerando gli elementi fisici esposti al rischio e l'impatto delle frane. La vulnerabilità essendo un elemento dinamico è stata valutata considerandone l'aspetto spaziale, poiché non tutte le cose presenti in una zona a rischio sono ugualmente vulnerabili. Secondo gli studi che descrivono l'impatto delle frane su edifici e strade, questi, durante un evento franoso, potrebbero essere completamente distrutti, parzialmente danneggiati o subire solo deformazioni (EPFL, 2002) (Fig. 5.49; 5.50). Molti fattori giocano un ruolo nell'impatto ed influenzano quindi la vulnerabilità, come il materiale di costruzione, presenza di muri di sostegno, l'età, l'altezza/area, il numero di piani e le fondazioni degli edifici. Un altro fattore che influisce sulla vulnerabilità fisica di un elemento esposto durante una frana è la sua localizzazione, non solo riguardo le aree a suscettibilità alta, ma anche riguardo le caratteristiche dei versanti vicini. Un versante con un'inclinazione costante ricoperta da vegetazione è più sicuro di un versante con profilo irregolare (ad esempio per la costruzione di strade) o di un versante senza vegetazione. Altri dati che potrebbero giocare un ruolo nella valutazione della vulnerabilità sono la presenza di misure di mitigazione o di edifici con un'elevata importanza economica.

In questo lavoro sono stati considerati come elementi a rischio solo gli edifici e le strade. Il danno al contenuto degli edifici e il danno ai veicoli sulle strade possono rappresentare una parte importante dei costi dovuti alle frane, ma sono molto difficili da stimare. Tali danni non sono stati considerati in questa ricerca a causa della mancanza di dati. Inoltre, il rischio riferito alla vita delle persone non è stato analizzato, perché la probabilità che una persona venga uccisa o ferita da una frana nell'area di studio è molto bassa. Altri elementi vulnerabili, come la linea elettrica o del telefono non sono state considerate, sebbene esse sono fonti potenziali di rischio, riguardo i costi indiretti che possono causare.

Utilizzando la CTR (scala 1:5000), Google Earth e le ortofoto sono stati riconosciuti e digitalizzati in ambiente GIS 497 edifici. La figura 5.51 sintetizza i dati riguardanti il materiale di costruzione e l'uso degli edifici. La quasi totalità degli edifici (92%) è costruita in muratura ed è ad uso abitativo (83%). La classe "Altro" nel materiale da costruzione rappresenta legno e metallo, mentre nell'uso degli edifici rappresenta magazzini e stalle. Le strade sono state digitalizzate dalla CTR in scala 1:5000, e successivamente sono state effettuate delle verifiche tramite Google Earth, ortofoto e sopralluoghi sul campo. La lunghezza totale delle strade presenti nell'area di studio è di



**Figura 5.49** Abitazioni distrutte a causa delle frane innescatesi durante l'evento alluvionale dell'inverno 1973-'72.



**Figura 5.50** Danni alle strade causati da movimenti gravitativi.

circa 28,5 km; la figura 5.52 mostra che il 56% sono strade asfaltate e che sono presenti molte strade sterrate (32%), essendo un territorio in cui prevalgono nettamente le attività agricole nell'economia locale.

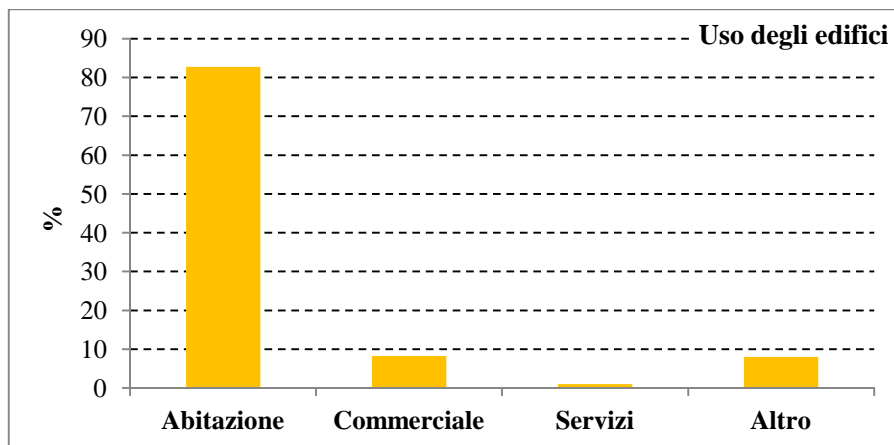
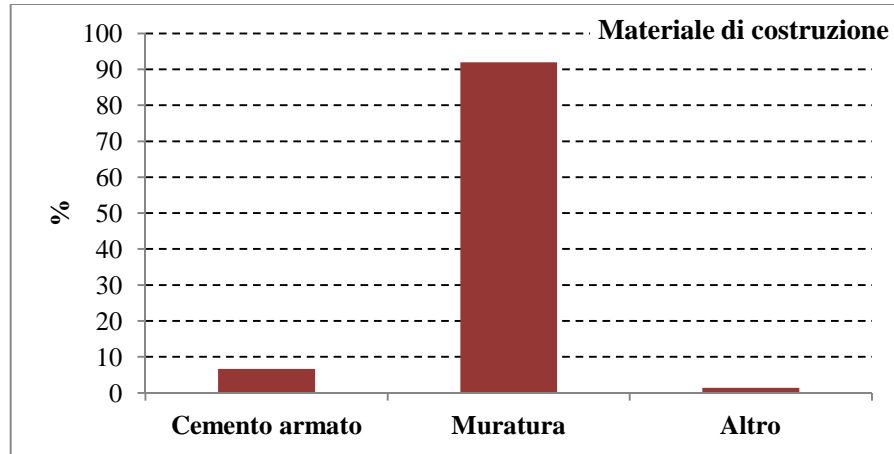


Figura 5.51 Dati sugli edifici nell'area di studio.

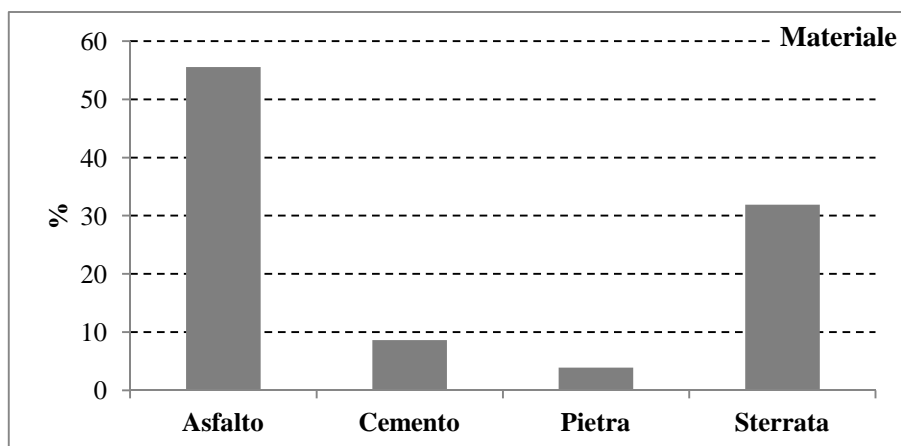


Figura 5.52 Dati sulle strade nell'area di studio.

In letteratura sono descritte alcune procedure per la valutazione della vulnerabilità, tra le altre, Mejía-Navarro et al. (1994), Fell (1994), Leone et al. (1996), Leroi (1996), Glade (2003), Papathoma-Köhle et al. (2007), Zêzere et al. (2008). L'attribuzione della vulnerabilità fisica agli edifici e alle strade è stata basata sui valori riportati in Zêzere et al. (2008) (Tab. 5.23). Questi si basano non solo sulle proprietà strutturali degli elementi esposti al rischio (materiale di costruzione), ma anche sulla magnitudo delle frane. Quindi, la vulnerabilità, che non può essere attribuita in termini assoluti, è stata assegnata rispetto ad uno specifico processo (vulnerabilità nei confronti delle frane superficiali e nei confronti delle frane profonde); in questo modo gli elementi a rischio (edifici e strade) mostrano differenti livelli di vulnerabilità, collegata all'esposizione a differenti tipi di frane. La vulnerabilità degli elementi esposti è stata assegnata sulla base della suddivisione tra frane superficiali e frane profonde, considerata anche nella valutazione della pericolosità, e sulla base delle seguenti considerazioni (Zêzere et al., 2008) (Tab. 5.23):

- le frane future avranno una magnitudo simile a quelle che si sono verificate in passato nell'area di studio;
- le frane future (superficiali e profonde) produrranno livelli di danno comparabili a quelli prodotti in passato;
- la perdita totale di edifici e strade è ammessa se questi elementi sono esposti a frane profonde;
- le frane superficiali non hanno la capacità di generare la distruzione totale di nessuno degli elementi esposti a rischio nell'area di studio.

I valori di vulnerabilità in riferimento alle frane superficiali rappresentano il livello di danno più alto, espresso come grado di perdita monetaria potenziale (0-1), sulla base delle proprietà fisiche dell'elemento a rischio. Infine, sono state realizzate due mappe in formato raster per gli edifici e le strade.

Elementi vulnerabili		Vulnerabilità	
		Frane superficiali	Frane profonde
Edifici	Cemento armato	0.3	1
	Muratura	0.5	1
	Altro (legno, metallo)	0.4	1
Strade	Asfalto	0.6	1
	Cemento	0.6	1
	Pietra	0.6	1
	Sterrata	0.6	1

**Tabella 5.23 Valori di vulnerabilità considerando l'esposizione a frane superficiali e a frane profonde nell'area di studio.**

Ogni mappa è collegata all'esposizione ad uno specifico gruppo di frane: superficiali e profonde (Fig. 5.53).

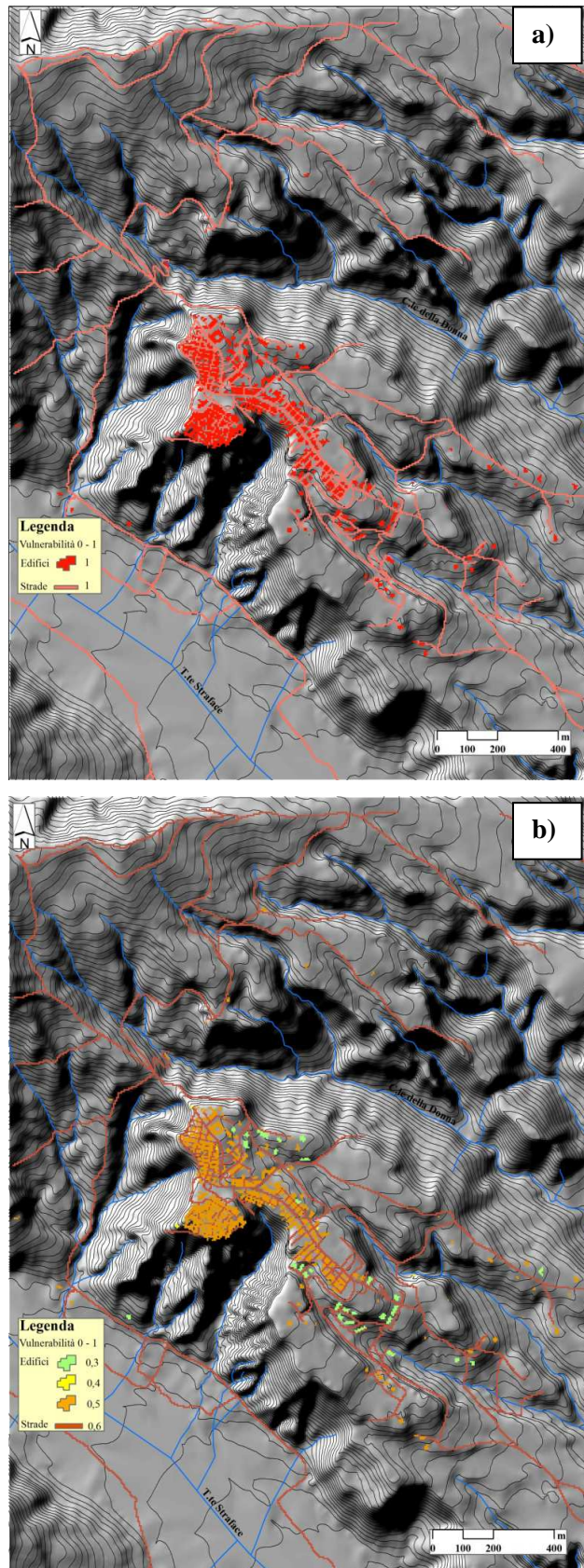


Figura 5.53 Distribuzione spaziale della vulnerabilità degli edifici e delle strade esposti a frane profonde (a) e a frane superficiali (b).

#### 5.2.4 Valutazione del rischio da frana

La probabilità che un evento con una certa pericolosità avvenga e le conseguenze del suo verificarsi sono componenti fondamentali del concetto di rischio (Zêzere et al., 2008). Il modello concettuale considera il livello di rischio come il risultato dell'intersezione della pericolosità con il valore degli elementi a rischio, considerando la loro vulnerabilità (Crozier e Glade, 2005). Quindi, il rischio da frana è considerato il prodotto di tre fattori (Crozier e Glade, 2005): la probabilità che si verifichi una frana con una certa pericolosità, il grado di perdita dato dal verificarsi di una frana con una certa magnitudo (la vulnerabilità) e il valore degli elementi esposti al rischio. Questo concetto di rischio è stato applicato in molti studi negli ultimi 20 anni (Varnes e IAEG, 1984; Leroi, 1996; Einstein, 1997; Guzzetti, 2000; Cardinali et al., 2002; Remondo et al., 2004; Armaş, 2013).

Il rischio dato dal verificarsi di una frana può essere diretto e indiretto: in questa area di studio il rischio è stata svolta analizzato considerando i danni diretti alle proprietà, in termini economici (euro). Questa analisi è stata effettuata in modo automatico in ambiente GIS (Zêzere et al., 2008), incrociando i seguenti tre *layers*:

- 1 – mappa della pericolosità;
- 2 – mappa della vulnerabilità;
- 3 – mappa degli elementi esposti al rischio, considerando i costi di ricostruzione.

Il rischio è stato calcolato per ogni elemento esposto al rischio in una matrice digitale (pixel= 5 x 5 m), utilizzando la seguente equazione:

$$R = P \times V \times E$$

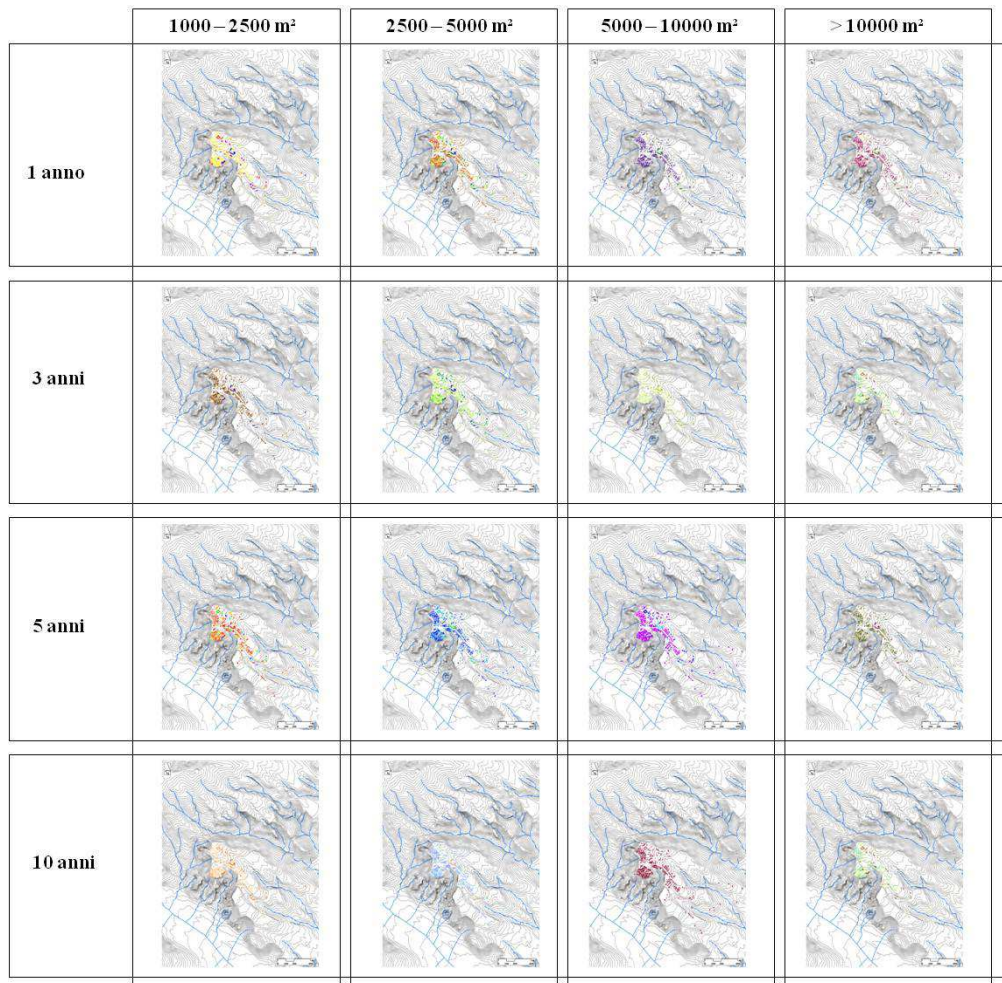
Dove P è la probabilità che un pixel sia interessato da una tipologia di frana con una certa magnitudo in certo periodo di tempo; V è la vulnerabilità (grado di perdita) dell'elemento esposto al rischio; E è l'elemento esposto al rischio (dato come valore economico, euro).

Il rischio da frana è stato calcolato prima separatamente per ogni tipo di elemento a rischio (rischio specifico) e poi è stato calcolato un rischio totale integrando i precedenti.

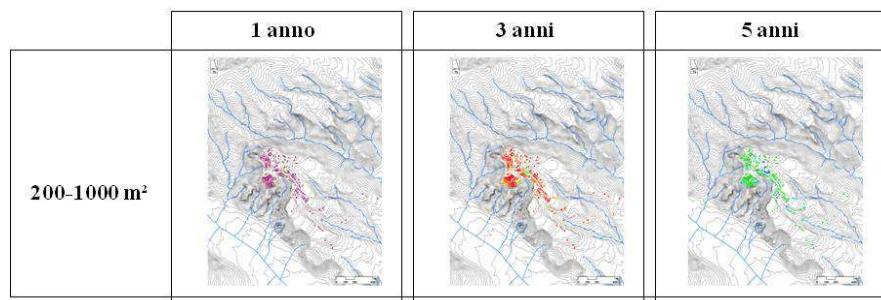
Le figure 5.54 e 5.55 mostrano il rischio da frana, espresso attraverso i costi diretti in Euro, per gli edifici, calcolato separatamente per gli scenari di pericolosità descritti nel paragrafo 5.2.2.4. I risultati ottenuti sono stati poi sommati per ogni pixel, allo scopo di ottenere il rischio specifico complessivo degli edifici indipendentemente dalla



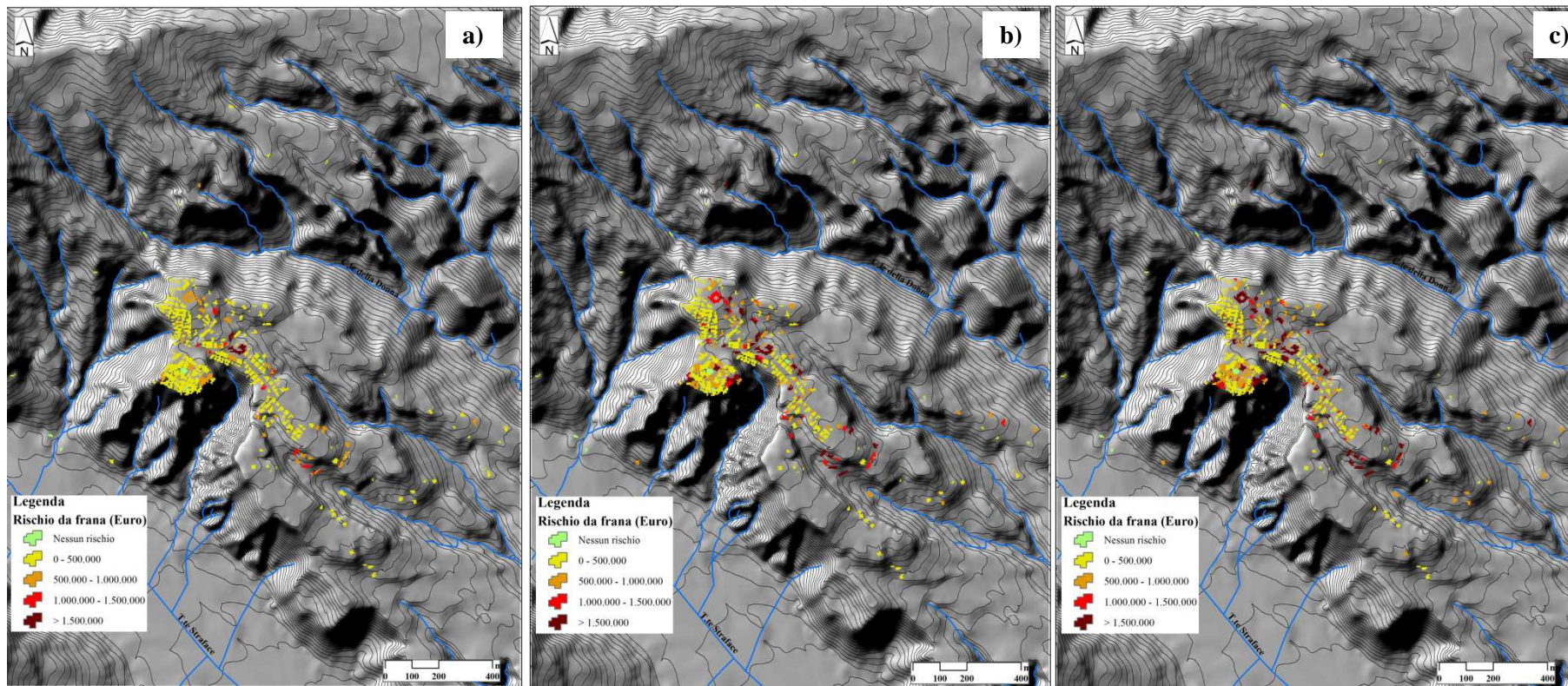
magnitudo delle frane, per gli scenari corrispondenti a 1 anno, 3 anni e 5 anni (Fig. 5.56).



**Figura 5.54** Mappe del rischio da frana (costi diretti in euro) per gli edifici, considerando le frane profonde.



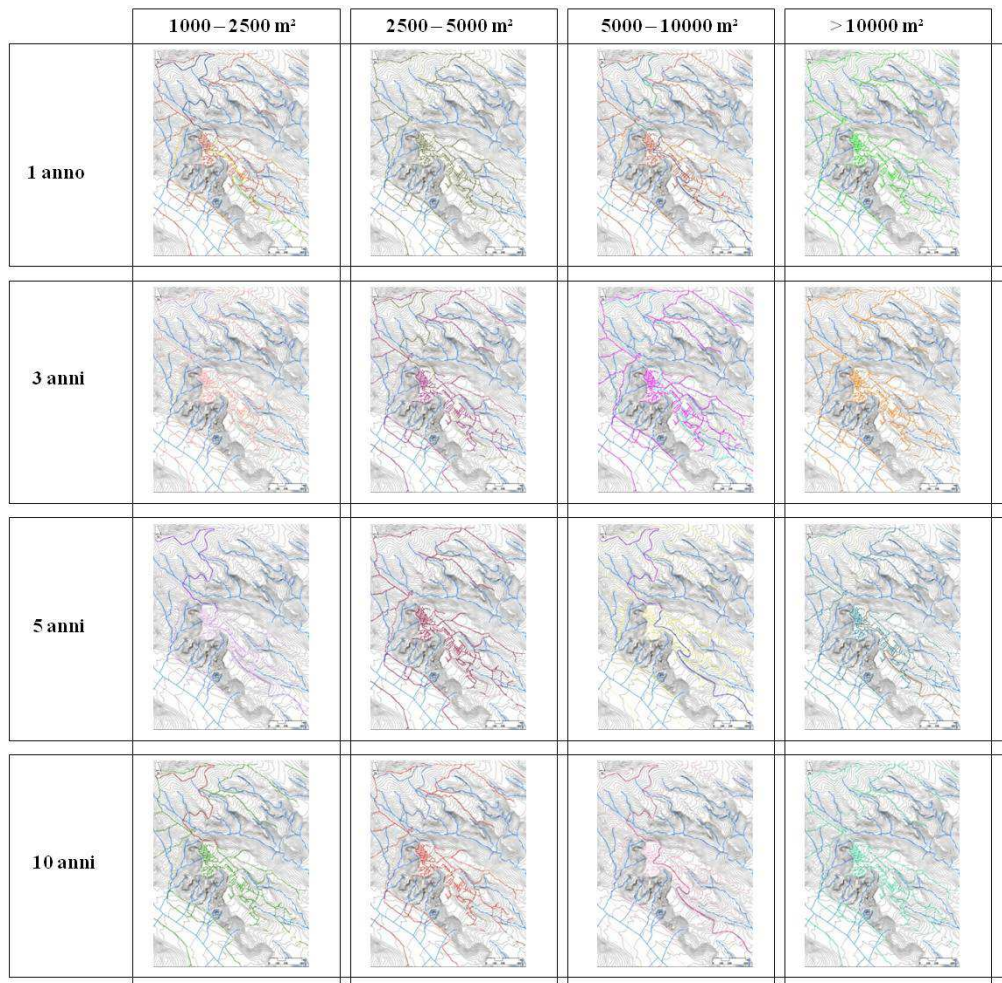
**Figura 5.55** Mappe del rischio da frana (costi diretti in euro) per gli edifici, considerando le frane superficiali.



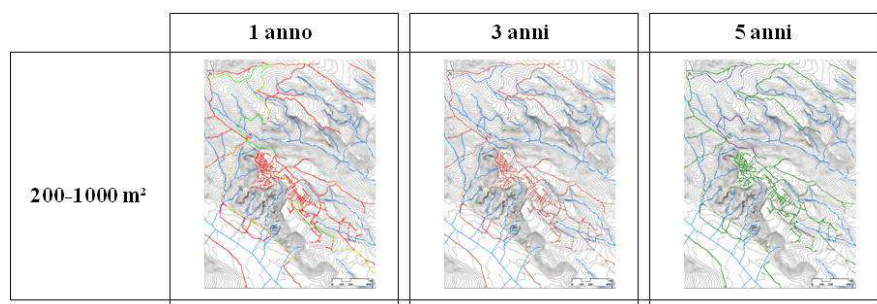
**Figura 5.56 Rischio da frana (costi diretti in Euro) per gli edifici, considerando tutte le magnitudo delle frane in tre scenari di pericolosità:**

**a) 1 anno; b) 3 anni; c) 5 anni.**

Il rischio da frana, espresso attraverso i costi diretti in Euro, è stato calcolato anche per le strade per ognuno degli scenari di pericolosità del paragrafo 5.2.2.4 (Fig. 5.57; 5.58).



**Figura 5.57** Mappe del rischio da frana (costi diretti in euro) per le strade, considerando le frane profonde.



**Figura 5.58** Mappe del rischio da frana (costi diretti in euro) per le strade, considerando le frane superficiali.

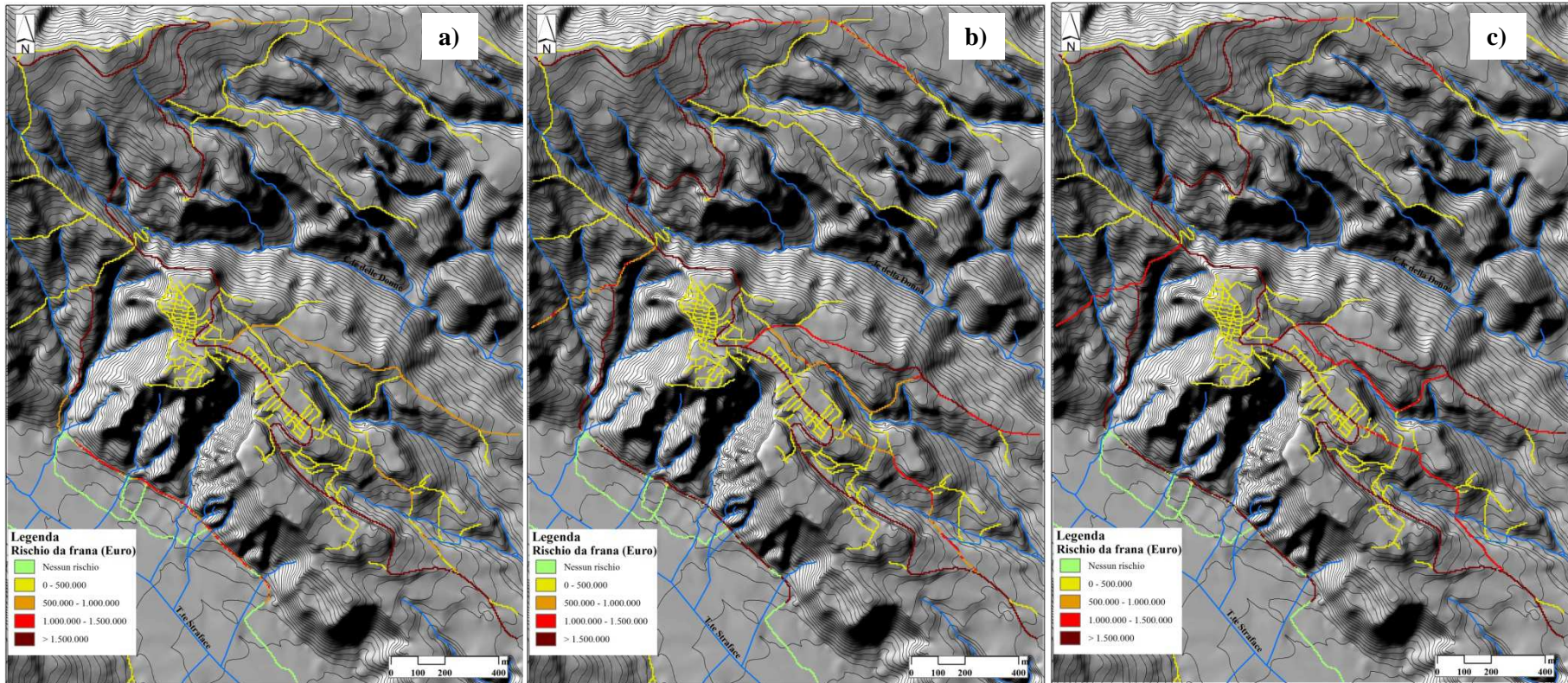
I risultati ottenuti riguardo il rischio da frana per le strade sono stati sommati per ogni pixel, in modo da ottenere anche per questo elemento esposto rischio specifico complessivo indipendentemente dalla magnitudo delle frane, per gli scenari corrispondenti a 1 anno, 3 anni e 5 anni (Fig. 5.59).

La tabella 5.24 sintetizza i valori cumulati dei costi diretti (euro) degli elementi esposti al rischio dell'area di studio (edifici e strade), per gli scenari 1 anno, 3 anni e 5 anni relativi alle frane superficiali, alle frane profonde e alla totalità delle frane. Nell'area di studio il danno causato dall'innescò di frane profonde è sia per gli edifici che per le strade maggiore di quello causato da frane superficiali, nonostante queste abbiano una ricorrenza maggiore. In tutti e tre gli scenari considerati il rischio da frana sulle strade è sempre maggiore rispetto a quello riferito agli edifici, infatti corrisponde a circa il 75% del rischio totale. Secondo i risultati presentati (Tab.5.24), le perdite potenziali potrebbero essere più del doppio quando si considera lo scenario "più pessimistico", ossia del rischio da frana che si potrebbero avere in 5 anni.

E' opportuno precisare che i valori di rischio ottenuti non sono precise predizioni delle perdite future, ma rappresentano piuttosto un modo per identificare le aree dove si ha la probabilità di avere danni maggiori e che quindi richiedono priorità nelle misure di mitigazione.

<b>RISCHIO CUMULATO (Euro)</b>				
	Elementi esposti al rischio	Frane superficiali	Frane profonde	Frane totale
<b>1</b> anno	Edifici	182.545	2.951.392	3.133.937
	Strade	762.976	8.630.025	9.393.001
	Totale	945.521	11.581.417	<b>12.526.938</b>
<b>3</b> anni	Edifici	296.635	5.982.551	6.279.186
	Strade	1.333.849	17.573.499	18.907.348
	Totale	1.630.484	23.556.050	<b>25.186.534</b>
<b>5</b> anni	Edifici	319.454	7.179.062	7.498.516
	Strade	1.494.809	21.220.958	22.715.767
	Totale	1.814.263	28.400.020	<b>30.214.283</b>

**Tabella 5.24 Valore cumulato del rischio da frana espresso in costi diretti (Euro) per gli elementi esposti (edifici e strade) considerando gli scenari 1 anno, 3 anni e 5 anni. In grassetto il valore del rischio totale per i tre scenari.**



**Figura 5.59** Rischio da frana (costi diretti in Euro) per le strade, considerando tutte le magnitudo delle frane in tre scenari di pericolosità:

a) 1 anno; b) 3 anni; c) 5 anni.

## **CAPITOLO 6 DISCUSSIONI E CONCLUSIONI**

Questo capitolo sintetizza e discute i risultati ottenuti nei due casi di studio, e sottolinea i vantaggi e i limiti delle due metodologie proposte in questa ricerca.

L'individuazione e la selezione delle aree di studio è ricaduta su zone di interesse socio-economico della Calabria settentrionale per le quali la franosità rappresenta potenzialmente un problema.

La prima area di studio comprende la zona a monte e a valle del tratto di autostrada A3 compreso tra gli svincoli di Cosenza sud ed Altilia, dove le caratteristiche litologiche, strutturali, topografiche ed idrologiche rendono l'area particolarmente vulnerabile ai fenomeni franosi, che causano spesso problemi alla viabilità. La seconda area di studio è il territorio intorno il centro abitato di Amendolara (Alto Jonio), dove l'assetto geomorfologico è tale che annualmente si verifica un evento pluviale sufficiente a mobilitare frane, ed in particolare la parte più esterna dell'abitato è stata coinvolta più volte in fenomeni di dissesto, dove le abitazioni sono state danneggiate o totalmente distrutte in passato (Crescenzi et al., 1996).

Per la prima area di studio la scala di lavoro è stata di 1:25000, mentre per la seconda area di studio è stata di 1:5000. Di conseguenza, nell'analisi del rischio del primo caso di studio è stato utilizzato un approccio qualitativo e nel secondo caso di studio un approccio quantitativo, come suggerito in Soeters e van Westen (1996) e Aleotti e Chowdhury (1999).

Nel primo caso di studio la valutazione qualitativa del rischio è stata effettuata attraverso la sovrapposizione dell'unico elemento a rischio considerato (il tratto di autostrada) sulla mappa di pericolosità spaziale (o suscettibilità da frana) ottenuta per le frane profonde (profondità >2 m) e per le frane superficiali (profondità <2 m).

La pericolosità spaziale da frane profonde è stata valutata attraverso due metodi statistici (bivariato e multivariato), i cui risultati sono stati confrontati in modo da utilizzare nell'analisi del rischio la carta di suscettibilità che meglio predice le frane profonde nell'area di studio. Entrambi i metodi sono stati applicati agli scorrimenti, alle frane complesse e alla totalità delle frane profonde dell'area di studio, e sono stati costruiti attraverso l'utilizzo del 70 % delle scarpate dell'area di studio (*Training set*), scelte in modo random (Chung e Fabbri, 2003), e sette fattori predisponenti scelti in base a valutazioni fatte durante i rilievi di campagna. Mentre nella valutazione della capacità previsionale dei metodi è stato utilizzato il restante 30% delle scarpate di frana. I limiti delle classi di suscettibilità sono state definite sulla base del metodo *Natural breaks* di Jenks (1989).

Il metodo bivariato utilizzato è il metodo "*Hazard Index*". Dall'incrocio delle scarpate di frana del *training set* con i fattori predisponenti sono stati ottenuti i pesi delle varie

classi dei fattori predipienti. L'analisi dei pesi delle classi dei fattori predisponenti scelti mostra che per tutte e tre le analisi di suscettibilità la classe litologica "Argille" influisce molto poco, e questo è riferibile al fatto che esse occupano un'area ristretta rispetto alle altre classi litologiche, mentre il fattore predipiente che maggiormente influenza tutte e tre le analisi è lo SPI (*Stream Power Index*, potere erosivo del flusso idrico), che raggiunge i valore più elevati nelle linee di impluvio, sede infatti dell'innescio di gran parte delle frane. La sovrapposizione delle mappe dei pesi ha prodotto la mappa di suscettibilità per gli scorrimenti, per le frane complesse e la totalità delle frane.

La validazione delle mappe ottenute è stata effettuata tramite la realizzazione della curva *success rate*; le tre curve ottenute si presentano sufficientemente ripide nella parte iniziale dopodiché decrescono in maniera abbastanza monotona. Quindi la validazione conferma un'effettiva (non casuale) correlazione fra le carte di suscettibilità predette e la distribuzione spaziale delle frane del *training set*.

Il metodo multivariato utilizzato è il metodo di "Analisi condizionale". L'incrocio della carta delle UCU (*Unique Conditions Units*), ottenuta dalla sovrapposizione dei fattori predisponenti, e delle frane del *training set* ha prodotto la mappa di suscettibilità per gli scorrimenti, per le frane complesse e la totalità delle frane.

Anche nella validazione del metodo di analisi condizionale applicato agli scorrimenti, alle frane complesse e alle frane totali dell'area di studio, le curve *success-rate* ottenute confermano una reale correlazione fra le carte di suscettibilità predette e la distribuzione spaziale delle frane del *training set*.

Il confronto dei dati ottenuti con i metodi "*Hazard Index*" e "Analisi Condizionale", mostra che nell'analisi condizionale il 33% dell'area ricade nelle classi di suscettibilità da alta a molto alta, mentre con il metodo *Hazard Index* vi ricade il 60% dell'area; quest'ultimo metodo tende quindi a sovrastimare le aree ad elevata suscettibilità. In entrambi i casi, comunque, il confronto dei risultati con la realtà geomorfologica e le caratteristiche legate all'instabilità dei versanti ha mostrato un buon grado di correlazione. I valori di suscettibilità più elevati si osservano nella parte centrale dell'area studiata, dove è presente il tratto autostradale. Alti valori di suscettibilità si sono ottenuti sui versanti con pendenze superiore ai 20 gradi e lungo i versanti delle valli strette e fortemente incise dal reticolo idrografico. Inoltre, il confronto dei valori di AUC, ottenuti al di sotto della curva *prediction rate* costruita per la validazione di entrambi i metodi, mostra che essi sono tutti compresi tra il 70 % e il 90 %, tranne che



per il metodo *Hazard Index* applicato agli scorrimenti, indicando un'affidabilità statistica ragionevole per entrambi i metodi. Tuttavia la maggiore accuratezza si riscontra per il metodo di Analisi Condizionale. Questi risultati consentono di affermare che il metodo di statistica condizionale utilizzato e i fattori predisponenti scelti per l'analisi riescono a valutare in modo soddisfacente la propensione da frane profonde nell'area in cui ricade il tratto di autostrada studiato. In particolare, si è scelto di utilizzare per l'analisi del rischio da frane profonde la mappa di suscettibilità ottenuta dall'utilizzo della totalità delle frane.

La pericolosità spaziale da frane superficiali è stata valutata attraverso un metodo statistico bivariato, *Weight of Evidence*. Nell'analisi sono stati utilizzati dieci fattori predisponenti, e dall'incrocio di questi con le frane del *training set* sono stati calcolati i pesi di ogni classe ed il valore di contrasto. Secondo questo metodo, le classi positivamente correlate con l'innesco delle frane superficiali nell'area di studio sono la tessitura del suolo "moderatamente fine" e le pendenze ">35°", mentre quella che influiscono meno, escludendo l'area dei depositi alluvionali, sono la classe litologica "Gneiss" e la classe "< 50m" dell'energia del rilievo, che corrisponde alle aree in cui vi è una minore azione erosiva ed un minore approfondimento fluviale. I maggiori valori del contrasto C sono stati riscontrati per i fattori predisponenti litologie, pendenze, SPI, fattore LS e tessitura del suolo, che quindi esercitano un ruolo importante sulla distribuzione spaziale delle frane superficiali. La sovrapposizione dei fattori pesati ha permesso la realizzazione della carta di suscettibilità da frane superficiali.

La validazione del modello applicato è stata effettuata tramite la realizzazione delle curve *success rate* e *prediction rate*. Esse presentano una forma simile: ripide nella parte iniziale e stabilizzate su un valore nella parte finale, indicando che il modello e i fattori scelti sono capaci di predire correttamente l'occorrenza delle frane superficiali. La precisione del metodo è stata valutata anche per questo metodo tramite il calcolo dell'AUC per le curve *success rate* e *prediction rate*, che è risultata essere, rispettivamente 83,6% e 80,2%, mostrando una buona performance dell'analisi di suscettibilità.

Sulla mappa della suscettibilità da frane profonde e da frane superficiali è stato sovrapposto l'elemento a rischio considerato, ossia il tratto di autostrada A3.

Analizzando l'elemento esposto e il suo peso sulle classi di suscettibilità da frane profonde si è riscontrato che il 37,2% del tratto di autostrada studiato (10,4 km) ricade in aree con suscettibilità da alta a molto alta; mentre l'analisi del rischio spaziale nelle

aree caratterizzate da differenti gradi di suscettibilità da frana superficiali ha mostrato che il 55% del tratto di autostrada studiato (14,9 km) ricade in aree con suscettibilità da alta a molto alta.

I risultati mostrano che il rischio da frana è strettamente connesso con l'espansione delle infrastrutture costruite dall'uomo in aree che potrebbero essere interessate da frane. La valutazione della probabilità spaziale di occorrenza in alcune aree e, implicitamente, l'identificazione degli elementi esposti che potrebbero essere interessati, rappresentano una fase obbligatoria per un'adeguata gestione del rischio. L'identificazione delle aree suscettibili e degli elementi esposti può servire per una pianificazione territoriale sostenibile. L'analisi regionale effettuata dovrebbe essere continuata e completata ad un livello di maggiore dettaglio, includendo la stima dei potenziali costi socio-economici e ambientali.

Nel secondo caso di studio la valutazione quantitativa del rischio da frane profonde (profondità >2 m) e da frane superficiali (profondità <2 m) è stata effettuata attraverso l'applicazione del modello secondo il quale il livello di rischio è il risultato dell'intersezione della pericolosità con la vulnerabilità ed il valore degli esposti al rischio (Crozier e Glade, 2005). Questo concetto di rischio da frana è stato applicato attraverso la generica equazione:  $\text{Rischio da frana} = \text{Pericolosità da frana} * \text{Vulnerabilità} * \text{Elementi esposti al rischio}$ ; dove la pericolosità da frana include i concetti di localizzazione spaziale ("dove"), ricorrenza temporale ("quando") e magnitudo ("quanto grande") come elementi chiave nella previsione dell'occorrenza delle frane (Guzzetti et al., 1999).

Il modello utilizzato per il calcolo della pericolosità da frana ne ha consentito una valutazione quantitativa. Le informazioni utilizzate nell'analisi della pericolosità sono state ottenute da un inventario multi-temporale delle frane. Il modello utilizzato considera le seguenti assunzioni (Guzzetti et al., 2005): 1) le frane si verificheranno in futuro sotto le stesse condizioni che le hanno innescate in passato; 2) gli eventi di frana sono eventi indipendenti (non correlati) e random nel tempo; 3) la ricorrenza media degli inneschi in futuro sarà uguale a quella osservata in passato; 4) le statistiche dell'area in frana sono corrette e non si modificheranno in futuro; 5) l'area in frana è un proxy ragionevole della magnitudo di una frana; e 6) la probabilità delle dimensioni di una frana, la probabilità di occorrenza per periodi stabiliti e la probabilità spaziale degli inneschi sono indipendenti.

L'assunzione secondo la quale le frane si verifichino sotto le stesse condizioni che le hanno innescate nel passato è riconosciuta in tutte le analisi statistiche di suscettibilità (Carrara et al., 1991; Hutchinson, 1995; Aleotti e Chowdhury, 1999; Chung e Fabbri, 1999; Guzzetti et al., 1999), tuttavia ciò ha delle limitazioni geomorfologiche (Guzzetti et al., 2005). La prima attivazione di una frana infatti si verifica sotto condizioni di resistenza di picco (angolo d'attrito e coesione), mentre le riattivazioni si verificano sotto condizioni di resistenza intermedie o residue. Inoltre, l'innescamento di una frana cambia la morfologia del versante ed è funzione delle condizioni ambientali, le quali possono variare nel tempo, in alcuni casi a causa delle attività antropiche (uso del suolo, deforestazione, irrigazione, ecc), che sono anche altamente modificabili. A causa di queste complicazioni, ogni frana si verifica in un distinto contesto ambientale. Nonostante le limitazioni, in questa ricerca si è assunto che questo principio vale nell'area di studio.

L'analisi degli eventi di frana e dei siti in cui si sono verificati indica che 143 eventi presenti nel *database* si sono verificati in 71 siti. Dunque lo stesso sito è stato interessato in media 2 volte in 60 anni, indicando un basso tasso di ricorrenza di eventi nello stesso sito. Questo permette di affermare che per il periodo considerato, nell'area di studio le frane possono essere considerate eventi non correlati e random nel tempo.

La componente spaziale della pericolosità da frane (suscettibilità da frana) profonde e superficiali è stata valutata a scala dei pixels mediante l'applicazione di due metodi statistici bivariati, *Hazard Index* e *Weight of Evidence*. Sia le frane profonde che le frane superficiali sono state suddivise in maniera random in due dataset (Chung e Fabbri, 2003), di cui uno, costituito dal 70% delle scarpate, è stato utilizzato per costruire il modello (*Training set*) e il restante 30% per validare il modello (*Validation set*). La correlazione tra le frane pregresse del *training set* e un set di sette fattori predisponenti, assunti indipendenti tra loro, ha portato al calcolo dei pesi delle classi dei fattori predisponenti scelti e in seguito alla realizzazione delle mappe di pericolosità spaziale per entrambi i metodi.

Nel metodo *Hazard Index* applicato alle frane profonde le classi che hanno correlazione positiva maggiore con l'innescamento delle frane profonde sono la classe litologica "Formazione di Albidona" (*flysch* arenaceo-marnoso) e le aree individuate come "Seminativo"; mentre le classi meno influenti sono la classe litologica "Depositi alluvionali" e la classe "Bosco" dell'uso del suolo. Per quanto riguarda le frane superficiali, il fattore predisponente che maggiormente ne influenza l'innescamento è la

pendenza ed in particolare i versanti con pendenze maggiori di  $35^\circ$  sono quelli più propensi a franare.

Nella validazione del metodo, sia per le frane profonde che per le frane superficiali, le curve *success-rate* ottenute si presentano abbastanza ripide nella parte iniziale, soprattutto quella del modello applicato alle frane superficiali, e poi si stabilizzano in maniera monotona, e le curve *prediction-rate* mostrano una forma simile alle curve *success-rate*. Quindi la validazione della suscettibilità da frane profonde e superficiali conferma una reale correlazione fra le carte di suscettibilità e la distribuzione spaziale delle frane del *validation set*.

Nel metodo *Weight of Evidence* applicato alle frane profonde l'analisi del valore del contrasto C e dei pesi finali delle classi mostra che anche in questo metodo la classe litologica "Formazione di Albidona" è quella che maggiormente influenza l'innescò di frane, con un valore di C pari a 1,1539. Tra i fattori predisponenti morfometrici, la classe di pendenza  $35^\circ - 45^\circ$  è quella che più influisce sull'innescò di frane, mentre le classi di pendenza  $0^\circ - 5^\circ$  e  $>45^\circ$  sono quelle più stabili. Inoltre, escludendo le classi "Depositi alluvionali", "Zone urbanizzate" e pendenze " $0^\circ - 5^\circ$ ", si osserva che i "Boschi" e le "Zone agricole eterogenee" hanno un ruolo fondamentale nel mantenere stabili le aree suscettibili all'innescò di frane. Ma anche la presenza delle aree pianeggianti dei terrazzi riduce le condizioni per l'innescò di frane, incrementando la stabilità. La costruzione di strade e di edifici incrementa la suscettibilità da frana e potrebbe riattivare vecchie frane, con un impatto notevole sulla popolazione. Per quanto riguarda le frane superficiali, le classi con la maggiore correlazione positiva all'innescò di frane sono le classi di pendenza  $> 35^\circ$ . Tra i fattori predisponenti morfometrici, le classi di pendenza  $< 10^\circ$  sono invece quelle più stabili. Inoltre, escludendo le classi "Depositi alluvionali", "Zone urbanizzate" e pendenze  $< 10^\circ$ , si osserva che le "Zone agricole eterogenee" hanno un ruolo molto importante nel mantenere stabili le aree suscettibili all'innescò di frane con C pari a -2,5737. Come per le frane profonde, anche per quelle superficiali la presenza delle aree pianeggianti dei terrazzi riduce la probabilità dell'innescò di frane, aumentando la stabilità in quelle aree.

La valutazione del potere predittivo del modello di suscettibilità, effettuata con le frane del *validation set* delle frane profonde e delle frane superficiali e con la realizzazione delle curve di *success-rate* e *prediction-rate*, mostra che anche il metodo *Weight of Evidence* riesce a valutare in modo soddisfacente la propensione da frane profonde e da frane superficiali nell'area di studio.

Nella valutazione dell'affidabilità statistica dei metodi applicati per le frane profonde e per le frane superficiali, entrambi i modelli possono essere considerati "ideali" (Yesilnacar e Topal, 2005; Yilmaz, 2010; Kavzoglu et al., 2013), poiché i valori dell'AUC sono risultati tutti al di sopra di 0,5.

In particolare, l'analisi dei valori di AUC mostra che essi sono tutti compresi tra il 0,7 e il 0,9, tranne che per la curva *prediction rate* del metodo *Weight of Evidence* applicato alle frane profonde, indicando un'affidabilità statistica ragionevole per entrambi i metodi. Tuttavia, la maggiore accuratezza si riscontra per il metodo *Hazard Index*, quindi nell'analisi della pericolosità sono state utilizzate le mappe di suscettibilità da frane profonde e da frane superficiali ottenute con questo metodo.

In entrambi i casi, comunque, i modelli applicati mostrano buone performance nel riprodurre i fenomeni franosi realmente avvenuti, a fronte di errori predittivi di entità contenuta. Per quanto riguarda le frane profonde, i valori di suscettibilità più elevati si osservano nella parte occidentale dell'area studiata e sul versante del terrazzo che delimita il centro abitato, a partire da pendenze di circa 20 gradi; mentre per la franosità superficiale i valori più alti risultano all'interno degli impluvi sui versanti con pendenze maggiori di 30 gradi.

Va sottolineato che nei modelli di suscettibilità non sono stati considerati i fattori innescanti. L'analisi delle frane nell'area di studio indica che la causa innescante principale sono le precipitazioni. Cambiamenti nella frequenza o intensità dei fattori innescanti non influiscono (almeno nel periodo considerato) sul modello di suscettibilità, tuttavia, possono influenzare il tasso di occorrenza delle frane. Se il tasso di occorrenza degli eventi meteorologici che innescano frane si modificherà, il tasso medio di inneschi cambierà di conseguenza. Nei prossimi decenni, i modelli del cambiamento climatico globale predicono la stessa quantità di pioggia annuale concentrata in un numero più basso di eventi a più alta intensità (Bradley et al., 1987; Brunetti et al., 2000; Easterling et al., 2000; sito web IPCC). Questo può portare ad una maggiore abbondanza di frane superficiali e ad una frequenza minore di frane profonde (Buma e Dehn, 1998; Malet et al., 2005).

La componente temporale della pericolosità da frane profonde e superficiali è stata valutata attraverso un approccio storico-probabilistico basato sull'analisi della ricorrenza media temporale degli eventi del passato attraverso il modello di Poisson. Il periodo studiato è di 60 anni, dal 1954 al 2014. Nell'analisi sia le frane superficiali che

le frane profonde sono state suddivise in base ai bacini idrografici dell'area di studio: bacino del T.te Straface e Bacino del T.te Ferro.

Il modello utilizzato ha consentito di calcolare la probabilità che si inneschino frane (profonde e superficiali) in ogni bacino per differenti periodi: da 1 a 10 anni per le frane profonde e da 1 a 5 anni per le frane superficiali. Si osserva come la probabilità che si verifichino frane aumenta con il tempo. In particolare, si è ottenuto che in entrambi i bacini idrografici dopo 5 anni si ha un'elevata probabilità che si verifichino frane profonde; mentre si ha un'elevata probabilità che si verifichino frane superficiali dopo 3 anni. Questi risultati confermano ciò che è stato possibile rilevare sul campo e le notizie storiche sugli eventi di frana, soprattutto per le frane superficiali che hanno una frequenza di accadimento maggiore rispetto alle frane profonde. I differenti scenari di innesco di frane, come detto prima, sono stati ottenuti assumendo che gli inneschi avuti nel passato si verificheranno con la stessa frequenza del passato. L'incertezza inerente questa assunzione è molto alta, perché gli eventi franosi possono cambiare la suscettibilità dei versanti nei confronti di eventi di instabilità futuri, rimuovendo materiale suscettibile e aumentando la resistenza del terreno (Crozier e Preston, 1999; Dykes, 2002; Crozier e Glade, 2005). Quindi, la frequenza storicamente derivata non sempre può essere una misura affidabile dell'attività futura delle frane, soprattutto per i movimenti superficiali di versante (Crozier e Preston, 1999; Glade e Crozier, 2005).

Per quanto riguarda la magnitudo, il primo approccio è stato quello di valutare statisticamente la relazione frequenza-area delle frane a partire dall'inventario delle frane. Questa analisi ha consentito di determinare la probabilità attesa dell'area delle frane attraverso le funzioni di densità di probabilità utilizzate in letteratura (Hungry et al., 1999; Stark e Hovius, 2001; Guzzetti et al., 2002; Malamud et al., 2004; Guzzetti et al., 2005; Jaiwal et al., 2009). Tuttavia l'analisi non ha prodotto risultati soddisfacenti in quanto l'area di studio non ha un'estensione tale da racchiudere una popolazione di frane statisticamente significative. Per questo motivo, è stata elaborata una metodologia semi-quantitativa, sulla base sia di considerazioni geomorfologiche che della relazione frequenza-area (Malamud et al., 2004), per l'attribuzione delle probabilità di magnitudo. Dal momento che la classificazione è basata sui dati ottenuti in campo, essa non può essere applicata totalmente ad altre aree caratterizzate da differenti condizioni geo-ambientali.

L'ultima assunzione del modello di pericolosità da frana proposto, come detto prima, è che le probabilità delle dimensioni delle frane, dell'occorrenza delle frane e

dell'incidenza spaziale delle frane sono indipendenti. Questa assunzione è difficile da spiegare in modo quantitativo. In prima approssimazione, si può affermare che la probabilità dell'area di frana è indipendente dalla suscettibilità. La suscettibilità è stata valutata senza considerare i fattori innescanti che controllano il tasso di occorrenza degli inneschi, dunque il tasso degli eventi di frana è indipendente dalla suscettibilità. L'inventario delle frane mostra che le frane si verificano con varie dimensioni, e questa può essere considerata un'indicazione del fatto che il tasso di inneschi è indipendente dalle dimensioni delle frane.

Per quanto riguarda la pericolosità da frana, dunque il metodo proposto ha permesso di preparare differenti mappe sulla base della suscettibilità da frana, dei periodi considerati e della magnitudo delle frane.

Gli elementi esposti al rischio da frana considerati nello studio sono gli edifici e le strade. Dall'analisi dei dati riguardanti il materiale di costruzione e l'uso degli edifici è risultato che la quasi totalità degli edifici (92%) è costruita in muratura ed è ad uso abitativo (83%). Ciò significa che prevalgono gli edifici strutturalmente meno resistenti e quindi più vulnerabili. Mentre sulla totalità delle strade prevalgono quelle in asfalto, quindi strutturalmente più resistenti.

La vulnerabilità degli elementi esposti al rischio da frane richiede la conoscenza del tipo di elementi esposti e della magnitudo delle frane attese, la cui stima è abbastanza complessa data la complessità e l'enorme varietà di processi gravitativi. Quindi, in molti studi la vulnerabilità da frana è semplicemente considerata 1, assumendo la completa distruzione dell'elemento esposto al rischio.

In questa ricerca, conoscendo il tipo di materiale di costruzione degli elementi esposti e la magnitudo dei fenomeni franosi, i valori di vulnerabilità sono stati attribuiti agli elementi a rischio in base ai valori riportati in Zêzere et al. (2008). Alla vulnerabilità degli edifici e delle strade nei confronti di frane profonde è stato assegnato valore 1, in quanto nell'area di studio la ricerca sui danni del passato causati da frane profonde ha mostrato che queste hanno causato in alcuni eventi la completa distruzione sia di edifici che di strade.

Per quanto riguarda, invece, la vulnerabilità degli edifici nei confronti di frane superficiali, sono stati assegnati dei valori più bassi ed in funzione del materiale di costruzione, in quanto frane di questo tipo non hanno mai causato il crollo di edifici, ma, hanno ad esempio destabilizzato le abitazioni poste sul ciglio del terrazzo mettendo a giorno le fondazioni. A tutti i tipi di strade è stato assegnato, invece, lo stesso valore

di vulnerabilità nei confronti delle frane superficiali perché queste causano in tutti i casi problemi alla viabilità. I valori di vulnerabilità sono abbastanza conservativi, perché la perdita totale degli edifici e delle strade è considerata solo se questi elementi sono esposti a frane profonde.

L'analisi quantitativa del rischio (valutazione dei costi diretti) è stata realizzata attraverso il prodotto della pericolosità da frana probabilistica per il valore economico degli elementi a rischio (edifici e strade) e per la vulnerabilità, in modo da ottenere la perdita totale degli elementi esposti.

L'analisi del rischio è stata effettuata in modo automatico, in ambiente GIS, considerando gli scenari relativi alle frane profonde per quattro periodi (1, 3, 5 e 10 anni) e per quattro differenti intervalli di area (1000 – 2500 m<sup>2</sup>, 2500 – 5000 m<sup>2</sup>, 5000 – 10000 m<sup>2</sup> e > 10000 m<sup>2</sup>), e relativi alle frane superficiali per tre periodi (1, 3 e 5 anni) e per un intervallo di aree compreso tra 200 e 1000 m<sup>2</sup>.

La valutazione del rischio per gli edifici e per le strade è stata prima effettuata separatamente e poi, i risultati ottenuti sono stati sommati per ogni pixel, allo scopo di ottenere il rischio totale per gli scenari corrispondenti a 1 anno, 3 anni e 5 anni, indipendentemente dalla magnitudo delle frane.

Per quanto riguarda gli edifici, l'analisi dei risultati ottenuti ha messo in luce che l'attenzione dovrebbe essere posta sugli edifici localizzati nella parte orientale del paese, ubicati al di sopra di un'area in frana. Questi fenomeni franosi, seppure quiescenti al momento del rilevamento, in molti punti non presentano segni di stabilizzazione e riattivandosi, in condizioni di evoluzione retrogressiva, potrebbero provocare danni a questi edifici. L'altra area di attenzione riguarda gli edifici situati sul ciglio del terrazzo nella parte ad ovest del centro storico. Il centro storico è la zona del paese più a rischio, infatti in un recente passato, nella zona a sud, una parte è franata nel sottostante calanco ed una parte è stata comunque dichiarata pericolante poiché le nicchie erosive e le aste dei calanchi hanno raggiunto le fondazioni degli edifici. Di tutta l'area coincidente con il ciglio del terrazzo, solo quella appena descritta è stata messa in sicurezza alla luce di questi eventi. Secondo questo studio, dunque è la parte ad ovest del centro storico che presenta il rischio maggiore e su cui sarebbe necessario porre l'interesse poiché ad oggi è priva di misure di mitigazione.

Per quanto riguarda le strade, invece, le uniche a non presentare nessuna criticità dovuta a movimenti di versante sono quelle nel fondovalle lontano dalla base dei versanti. In



tutti e tre gli scenari considerati il rischio da frana sulle strade è sempre maggiore rispetto a quello riferito agli edifici, infatti corrisponde a circa il 75% del rischio totale. Dunque nell'area di studio i danni alla viabilità sono più probabili e più frequenti, e comportano dei costi notevoli di manutenzione in tempi brevi. In particolare, questo studio mostra che il rischio maggiore si riscontra per la strada provinciale SP 266, per la strada sul fondovalle che costeggia il terrazzo e per le strade sullo spartiacque del Canale della Donna. Il risultato ottenuto per la strada provinciale sicuramente conferma le osservazioni fatte durante i rilievi sul campo, durante i quali si è constatato ogni volta che la strada subisce danni da frane in vari punti. In riferimento, invece, alla strada lungo la base del versante e quelle sullo spartiacque il rischio elevato è giustificato in quanto soggette, rispettivamente, ad una pericolosità dovuta alle frane presenti sui versanti del terrazzo e ad una pericolosità data dall'arretramento delle frane nel bacino del C.le della Donna.

L'approccio metodologico proposto fornisce i mezzi per ottenere delle mappe di rischio con un significato quantitativo monetario, e permette la realizzazione di mappe di pericolosità e di rischio che non considerano solo lo scenario che implica più risorse economiche, ma anche altri scenari probabili sulla base dei trends evolutivi del passato. Queste mappe di rischio non devono essere considerate come predizioni precise di danni futuri, ma strumenti utili per identificare le aree dove si prevedono danni maggiori e che dovrebbero ricevere la priorità nell'uso delle risorse limitate indirizzate a piani preventivi per ridurre l'impatto del rischio idrogeologico.

Tuttavia, il processo è caratterizzato da molte fonti di incertezza: il dettaglio delle variabili nell'analisi di suscettibilità, la risoluzione dei dati relativi alla frequenza delle frane nel passato, e le incertezze relative alla magnitudo e alla vulnerabilità. Ridurre le incertezze in tutte le fasi del processo porterebbe risultati migliori e più precisi, ma ciò non influisce comunque sulla validità del metodo.

I risultati sono stati ottenuti in modo oggettivo e comprensivo, e questo è il principale vantaggio dell'approccio. Inoltre, il metodo permette un confronto del rischio dato da frane superficiali e profonde. Tuttavia, l'espressione del rischio ottenuta non è facilmente trasferibile alla gestione del rischio da frana (*risk management*) perché lo stesso risultato può essere accettabile o no a seconda del livello di probabilità e danno. Inoltre, i costi indiretti, dati dal disturbo sulle attività economiche causato dal danno alle infrastrutture (strade), non sono stati considerati in questo studio, ed essi potrebbero essere tanto rilevanti quanto i costi diretti.

L'applicazione sia di un metodo qualitativo che di un metodo quantitativo ha confermato i limiti e i vantaggi di entrambi gli approcci. Il modello qualitativo è fortemente legato alle conoscenze dell'operatore ed è caratterizzato da incertezze e approssimazioni, tuttavia rappresenta il metodo più veloce e più economico da applicare. Il modello quantitativo è oggettivo e consente la riproducibilità dei risultati, in quanto il giudizio dell'operatore è molto ridotto, ma ha lo svantaggio di richiedere molti dati per l'applicazione e ciò ne riduce le applicazioni.

In conclusione, è importante sottolineare che tutti i modelli di predizione del rischio sono sempre una versione semplificata della realtà più complessa, e che sono fortemente influenzati dalla qualità dei dati di input. Per quanto questi possono essere migliorati, una certa quantità di incertezze sarà sempre presente nell'analisi delle pericolosità e del rischio. Dunque è molto importante trovare un modo per considerare queste incertezze.

IUGS Working Group on Landslides – Committee on Risk Assessment (1997) e Heinimann (1999) raccomandano che i risultati finali dovrebbero essere trattati come risultati relativi e non assoluti. Questo probabilmente è l'unico modo di utilizzare i risultati dell'analisi della pericolosità e del rischio da frana nella fase di mitigazione del rischio stesso, senza perdere la fiducia nei risultati ottenuti.

## **BIBLIOGRAFIA**

- AA.VV. (2002) Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico –Autorità di Bacino Nord Occidentale della Campania. 4 voll, Naples: T.P.S. – SELCA.
- Adger, W. N. (2006) Vulnerability, *Global Environ. Change*, 16, 268–281.
- AGIP (1977) Temperature sotterranee. F.lli Brugora, Segrate, 1390 pp.
- Agliardi, F., Crosta, G.B., Zanchi, A., Ravazzi, C. (2009a) Onset and timing of deep-seated gravitational slope deformations in the eastern Alps, Italy. *Geomorphology* 103:113–129.
- Agliardi, F., Crosta, G.B., Frattini, P. (2009b) Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 9:1059–1073.
- Akgun, A., Dag, S., Bulut, F. (2008) Landslide susceptibility mapping for a landslide-prone area (Findikli, NE of Turkey) by likelihood-frequency ratio and weighted linear combination models. *Environmental Geology*, 54 (6), 1127-1143.
- Aleotti, P. e Chowdhury, R. (1999) Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bull Eng Geol Environ* 58:21–44.
- Aleotti, P. e Polloni, G. (2005) Valutazione e mitigazione del rischio frane. Hevelius Edizioni.
- Almagnà, R. (1910) Studi geografici sopra le frane d'Italia. Volume II, L'Appennino centrale e meridionale – Conclusioni generali, "Mem. Soc. Geogr. It.", 14, 1-432.
- Amadesi, E., Vianello, G. (1978) Nuova guida alla realizzazione di una carta di stabilità dei versanti. *Mem. Soc. Geol. It.*, 19, 53-60.
- Amanti, M., Carrara, A., Castaldo, G., Colosimo, P., Gisotti, G., Govi, M., Marchionna, G., Nardi, R., Panizza, M., Pecci, M. Vianello, G. (1992) Linee guida per la realizzazione di una cartografia della pericolosità geologica connessa ai fenomeni di instabilità dei versanti alla scala 1:50.000. Versione Preliminare. Presidenza del Consiglio dei Ministri. Servizio Geologico, 53 pp.
- Amanti, M., Casagli, N., Catani, F., D'Orefice, M., Motteran, G. (1996) Guida al censimento dei fenomeni franosi ed alla loro archiviazione, in *Miscellanea, servizio geologico nazionale*, VII, Roma.
- Amodio Morelli, L., Bonardi, G., Colonna, V., Dietrich, D., Giunta, G., Ippolito, F., Liguori, V., Lorenzoni, S., Paglionico, A., Perrone, V., Piccarreta, G., Russo, M., Scandone, P., Zanettin Lorenzoni, E., Zuppetta, A. (1976) L'Arco Calabro Peloritano

- nell'Orogene Appenninico Maghrebide. *Memorie della Società Geologica Italiana*, V 17, pp. 1-60.
- Anbalagan, R. (1992) Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. *Eng. Geol.*, 32: 269-277.
- Armaş, I. (2011) An analytic multicriteria hierarchical approach to assess landslide vulnerability. Case study: Cornu village, Subcarpathian Prahova Valley/Romania, *Z Geomorphol* 55(2):209–229.
- Armaş, I. (2012) Weights of evidence method for landslide susceptibility mapping. Prahova Subcarpathians, Romania. *Nat. Hazards*, 60:937-950.
- Armaş, I. (2013) Diagnosis of landslide risk for individual buildings: insights from Prahova Subcarpathians, Romania. *Environ Earth Sci* DOI 10.1007/s12665-013-2854-5.
- Armonia Project report (2005) Collection and evaluation of current methodologies for risk map production - Task 2.3: Collection and evaluation of current methodologies for landslides. 88pp.
- Baeza, C. (1994) Evaluación de las condiciones de rotura y la movilidad de los deslizamientos superficiales mediante el uso de técnica de análisis multi variante, Ph.D. tesi. Universitat Politècnica de Catalunya, Spain.
- Baeza, C. e Corominas, J. (1996) Assessment of shallow landslide susceptibility by means of statistical techniques. *Proc VII Int Symp on Landslides*, Trondheim, June 1996, 1 : 147–152.
- Barbieri, G. e Cambuli, P. (2009) The weight of evidence statistical method in landslide susceptibility mapping of the Rio Pardu Valley (Sardinia, Italy), 18th world IMACS/MODSIM congress, Cairns, Australia. <http://www.mssanz.org.au/modsim09>, 13–17 July 2009.
- Bell, R. e Glade, T. (2004) Quantitative risk analysis for landslides— examples from Bildudalur, NW-Iceland. *Nat Hazard Earth Syst Sci* 4(1):117–131.
- Ben-Avraham, Z., Boccaletti, M., Cello, G., Grasso, M., Lentini, F., Torelli, L., Tortorici, L. (1990) Principali domini strutturali originatisi dalla collisione continentale neogenico-quadernaria nel Mediterraneo centrale. *Mem. Soc. Geol. It.*, 45, 453-462.
- Bernknopf, R.L., Campbell, R.H., Brookshire, D.S., Shapiro, C.D. (1988) A probabilistic approach to landslide hazard mapping in Cincinnati, Ohio, with

- application for economical evaluation. Bull of the Assoc Engin Geologists, 25 :39–56.
- Berti, M., Genevois, R., LaHusen, R., Simoni, A., Tecca, P.R. (2000). Debris flow monitoring in the Acquabona watershed on the Dolomites (Italian Alps). *Physics and Chemistry of the Earth Part B-Hydrology Oceans and Atmosphere*, 25(9), 707-715.
- Birkmann, J. (2006) Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies: Conceptual frameworks and definitions. *Measuring vulnerability to natural hazards: towards disaster resilient societies*. J. Birkmann. Tokyo, United Nations University Press: 9-54.
- Blaikie, P., Cannon, T. (1994) *At risk : natural hazards, people's vulnerability and disasters*. London etc., Routledge.
- Boccaletti, M., Coli, M., Decandia, F., Giannini, E., Lazzaretto, A. (1980) Evoluzione dell'Appennino Settentrionale secondo un nuovo modello strutturale. *Mem. Soc. Geol. It.*, vol. 21, pp. 359-373.
- Boccaletti, M. e Guazzone, G. (1972) Gli archi appenninici, il Mar Ligure e il Tirreno nel quadro della tettonica dei bacini marginali retro-arco. *Mem. Soc. Geol. It.*, 13, 162-199.
- Boccaletti, M., Guazzone, G., Manetti, P. (1977) Evoluzione paleogeografica e geodinamica del Mediterraneo: i bacini marginali. *Mem. Soc. Geol. It.*, 11.
- Boccaletti, M., Nicolich, R., Tortorici, L. (1984) The Calabrian Arc and the Ionian Sea in the dynamic evolution of the central Mediterranean. *Mar. Geol.*, 55, 219-245.
- Bonardi, G., Amore, F.O., Ciampo, G., De capoa, P., Miconnet, P., Perrone, V. (1988) Il Complesso Liguride auct.: stato delle conoscenze e problemi aperti sulla evoluzione preappenninica ed i suoi rapporti con l'Arco Calabro. *Mem. Soc. Geol. It.*, 41, 17-35.
- Bonardi, G., Cello, G., Perrone, V., Tortorici, L., Turco, E., Zuppetta A. (1982) The evolution of the Northern sector of the Calabria Peloritani Arc in a semiquantitative palyrispastic restoration. *Bollettino della Società Geologica Italiana*, v. 101, p. 259-274.
- Bonardi, G., Ciampo, G., Perrone, V. (1985) La Formazione di Albidona nell'Appennino calabro-lucano. *Boll. Soc. Geol. It.*, 104, 539-549.
- Bonham-Carter, G.F. (1994) *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Pergamon Press, Elsevier, Amsterdam. 398 pp.

- Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P., Wright, D.F. (1989) Weights of evidence modeling: a new approach to mapping mineal potential. In: Agterberg F.P., Bonham-Carter G.F. (eds) Statistical application in the earth sciences. Geological Survey of Canada 89(9):171-183.
- Bordoni, P. e Valensise, G. (1998) Deformation of the 125 ka marine terrace in Italy: tectonic implications. In: Stewart IS, Vita-Finzi C (eds) Coastal tectonics, vol 146. Geological Society Special Publications, London, pp 71-110.
- Bouillin, J.P., Duran-Delga, M., Olivier, P. (1986) Betic-rifian and Tyrrhenian arcs: distinctive features, genesis and development stages. In: F.C. Wezel (Ed.) "The origin of Arcs", Elsevier, 281-304.
- Brabb, E.E. (1984) Innovative approaches to landslide hazard mapping. Proc. 4th Int. Symp. on Landslides, Toronto , 1, 307-324.
- Bradley, R.S., Diaz, H.F., Eischeid, J.K., Jones, P., Kelly, P., Goodess, C. (1987) Precipitation fluctuations over Northern Hemisphere land areas since the mid-19th Century. Science 237, 171– 175.
- Brardinoni, F., Church, M. (2004) Representing the landslide magnitude–frequency relation, Capilano River Basin, British Columbia. Earth Surf Proc Land 29:115–124.
- Brunetti, M., Buffoni, L., Maugeri, M., Nanni, T. (2000) Precipitation intensity trends in Northern Italy. International Journal of Climatology 20, 1017– 1032.
- Brunetti, M.T., Guzzetti, F., Rossi, M. (2009) Probability distributions of landslide volumes. Nonlinear Process Geophys 16:179–188.
- Bruno, D.E., Perrotta, P. (2010) Landslide risk evaluation of the Amendolara territory in Calabria, southern Italy: Role of instability phenomena magnitude. Geologically Active – Williams et al. (eds), Taylor & Francis Group, London.
- Brunsdon, D. (1985) Landslide types, mechanisms, recognition, identification. In: Morgan, C.S. (Ed.), Landslides in the South Wales Coalfield, Proceedings Symposium. The Polytechnic of Wales, pp. 19–28.
- Brunsdon, D. (1993) Mass movements; the research frontier and beyond: a geomorphological approach. Geomorphology 7, 85–128.
- Buckle, P., Marsch, G., Smale, S. (2000) New approaches to Assessing Vulnerability and resilience" Australian Journal of Emergency Management, Winrter 2008: 8-156.
- Bulut, F., Boynukalin, S., Tarhan, S., Ataoglu, E. (2000) Reliability of landslide isopleths maps. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 58:2 95-98.

- Buma, J. e Dehn, M. (1998) A method for predicting the impact of climate change on slope stability. *Environmental Geology* 35 (2–3), 190– 196.
- Burollet, P.F., Mugniot, G.M., Sweeney (1978) The geology of the Pelagian Block: the margins and basins of Southern Tunisia and Tripolitania. In: Nairn A., Kanes W. & Stelhi F.G. (Ed.) “The Ocean Basins and Margins”. Plenum Press, New York, 331-339.
- Caloiero, D. (1975) Idrologia del bacino del Crati. CNR-IRPI, Geodata n.4, Cosenza.
- Caloiero, D., Niccoli, R., Reali, C. (1990) Le precipitazioni in Calabria (1921-1980) CNR Istituto per la protezione idrogeologica. Edizioni Bios Cosenza.
- Campbell, R.H. (1973) Isopleth map of landslide deposits, Point Dume Quadrangle, Los Angeles County, California; an experiment in generalizing and quantifying areal distribution of landslides. *U.S. Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map* MF- 535, scale 1:24,000.
- Canuti, P. e Casagli, N. (1996) Considerazioni sulla valutazione del rischio di frana. Atti del Convegno “Fenomeni franosi e centri abitati”, Bologna 27 maggio 1994.
- Canuti, P., Casagli, N., Tarchi, D. (2001) Le nuove tecnologie di allertamento strumentale per la mitigazione del rischio di frana. Giornata di Studio “Tecnologie per la mitigazione del rischio idrogeologico”, Comitato di Parlamentari per l’Innovazione Tecnologica e lo Sviluppo Sostenibile.
- Capitani, M., Ribollini, A., Bini, M. (2014) The slope aspect: A predisposing factor for landsliding?. *C. R. Geoscience* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2013.11.002>.
- Cardinali, M., Carrara, A., Donzellini, G., Giovetti, S., Guzzetti, F., Menegatti, P., Reichenbach, P., Tonelli, G. (1998) MAPPVI. Software per la visualizzazione del Catalogo delle informazioni storiche sulle località colpite da frane ed inondazioni censite dal progetto AVI, CNR-GNDICI, Pubbl. n. 1800, Versione 1.2
- Cardinali, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., Antonini, G., Cacciano, M., Castellani, M., Salvati, P. (2002). A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy. *NHESS*, 2, 57-72.
- Carobene, I. (2003) Genesi, età, sollevamento ed erosione dei terrazzi marini di Crosia-Calopezzati (Costa ionica della Calabria). *Il Quaternario (Italian Journal of Quaternary Science)* 16:43–90.

- Carobene, L. e Damiani, A.V. (1985) Tettonica e sedimentazione pleistocenica nella media valle del Fiume Crati, Area tra il T. Pescara ed il F. Mucone (Calabria). *Bollettino della Società Geologica Italiana* V. 104, p.93-114.
- Carrara A. (1983) Multivariate methods for landslide hazard evaluation. *Mathematical Geol*, 15 : 403–426.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., Reichenbach, P. (1990) Geographical Information System and multivariate models in landslide hazard evaluation. In: *Proc of the 6th Int Conf Field Workshop on Landslides, Switzerland-Austria-Italy. Aug 31st–Sept 12th 1990*, 1 :17–28.
- 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., 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-based techniques for mapping landslide hazard. In: Carrara A., Guzzetti F. (eds) *Geographical information systems in assessing natural hazards*. Kluwer, Dordrecht, 135-175.
- Carrara, A., D’Elia, B., Semenza, E. (1985) Classificazione e nomenclatura dei fenomeni franosi, in *Geologia Applicata e Idrogeologia* n.20, Bari.
- Carrara, A., Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P. (1999) Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard. *Nat Hazards* 20(2–3):117–135.
- Carrara, A. e Merenda, L. (1974) Metodologia per un censimento degli eventi franosi in Calabria. *Geologia Applicata e Idrogeologia*, 18 (3), 201 – 221.
- Castellanos Abella, E.A., Van Westen, C.J. (2007) Generation of a landslide risk index map for Cuba using spatial multi-criteria evaluation. *Landslides* 4:311–325.
- Catalano, S., Monaco, C., Tortorici, L., Paltrinieri, W., Steel, N. (2004) Neogene Quaternary tectonic evolution of the Southern Apennines. *Tectonics* 23: TC2003, doi: 10.1029/2003TC001512.
- Catalano, S., Monaco, C., Tortorici, L. E Tansi, C. (1993) Pleistocene strike - slip tectonics in the Lucanian Apennine (Southern Italy). *Tectonics*, 12, 656-665.
- 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* 2:329-342.



- Catani, F., Farina, P., Moretti, S., Nico, G and Strozzi, T. (2005) On the application of SAR interferometry to geomorphological studies: estimation of landform attributes and mass movements. *Geomorphology*, 66:1-4 119-131.
- Cello, G., Paltrinieri, W., Tortorici, L. (1987) Caratterizzazione strutturale delle zone esterne dell'Appennino molisano. *Mem. Soc. Geol. It.*, 38, 155-161.
- Cello, G., Tortorici, L., Martini, N., Paltrinieri, W. (1989) Structural styles in the frontal zones of the Southern Apennines, Italy: an example from the Molise district. *Tectonics*, 8 (4), 753-768.
- Çevik, E. e Topal, T. (2003) GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey). *Environ Geol* 44:949–962.
- Chacón, J., Irigaray, C., Fernández, T., El Hamdouni, R. (2006) Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. *Bull Eng Geol Environ* 65:341–411.
- Channel, J.E.T., D'Argenio, B., Horvath, F., (1979) Adria, the African Promontory in Mediterranean Paleogeography. *Earth Sciences Review*, 15, 213-292.
- Cheng, K.S., Wei, C. e Chang, S.C. (2004) Locating landslides using multi-temporal satellite images. *Advances in Space Research*, 33:3 96-301.
- Chung, C.F. e Fabbri, A.G. (1995) Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation. In: Carrara A., Guzzetti F. (1995, eds.) – *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Publisher, Dordrecht, the Netherlands, 107-142.
- Chung C.F. e Fabbri, A.G. (1999) Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65:12 1389-1399.
- Chung, C.F. e Fabbri, A.G. (2003) Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards* 30, 451–472.
- Ciccacci, S., D'Alessandro, L., Fredi, P., Lupia Palmieri, E. (1988) Contributo dell'analisi geomorfica quantitativa allo studio dei processi di denudazione nel bacino idrografico del Torrente Paglia (Toscana meridionale – Lazio settentrionale). *Geogr. Fis. Dinam. Quat. Suppl.*, I, 171 – 188.
- Ciccacci, S., Del Monte, M., Fredi, P. (1992) Caratteristiche geologiche e geomorfologiche del Parco Regionale Suburbano Valle del Treia. In: *L'Ambiente nella Tuscia laziale*. Union Printing. 161-171, Viterbo.

- Cinque, A., Patacca, E., Scandone P., Tozzi, M. (1993) Quaternary kinematic evolution of the Southern Apennines. Relationships between surface geological features and deep lithospheric structures. *Annali di Geofisica*, 36: 249-259.
- Clerici, A. e Dall'Olio, N. (1995) La realizzazione di una carta della stabilità potenziale dei versanti mediante tecniche di analisi statistica multivariata e un Sistema d'Informazione Geografica. *Geologia Tecnica & Ambientale*, 4 :49–57.
- Clerici, A., Perego, S., Tellini, C., Vescovi, P. (2002) A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. *Geomorphology* 48:349–364.
- Coe, J.A., Michael, J.A., Crovelli, R.A., Savage, W.Z. (2000) Preliminary map showing landslide densities, mean recurrence intervals, and exceedance probabilities as determined from historic records, Seattle, Washington. United States Geological Survey Open File Report 00-303.
- Colella, A., De Boer, S., Nio, D. (1987) Sedimentology of marine intermontane Pleistocene Gilbert- type fan-delta in the Crati Basiu, Calabria, southern Italy. *Sedimentology* 34, 721-736.
- Colonna, V. e Piccarreta, G. (1976) Contributo alla conoscenza dell'unità di Castagna in Sila Piccola: rapporti tra micascisti, paragneiss e gneiss occhiadini. *Boll. Soc. Geol. It.* 95, 39-48.
- Conforti, M., Buttafuoco, G., Rago, V., Aucelli, P.P.C., Robustelli, G., Scarciglia, F. (2015) Soil loss map of the Turbolo catchment 1 (Calabria, Italy). *Journal of Maps*, <http://dx.doi.org/10.1080/17445647.2015.1077168>.
- Conforti, M., Critelli, S., Muto, F., Carbone, M. (2011) Valutazione della suscettibilità da frana mediante un'analisi statistica in ambiente GIS: applicazione al bacino del T. Incinerato (Calabria Meridionale). *Engineering Hydro Environmental Geology*, Vol. 14, pp. 37-47.
- Conforti, M., Muto, F., Rago, V., Critelli, S. (2014) Landslide inventory map of northeastern Calabria (South Italy). *Journal of Maps*, 10, 1, 90-102, DOI: 10.1080/17445647.2013.852142.
- Conforti, M., Robustelli, G., Muto, F., Critelli, S. (2012) Application and validation of bivariate GIS-based landslide susceptibility assessment for the Vittravo river catchment (Calabria, south Italy). *Natural Hazards*, Vol. 61, pp. 127-141.

- Connor, C.B. e Hill, B.E. (1995) Three nonhomogeneous Poisson models for the probability of basaltic volcanism: application to the Yucca Mountain region, Nevada. *Journal of Geophysical Research* 100, 10107–10125.
- Conoscenti, C., Di Maggio, C., Rotigliano, E. (2008) GIS analysis to assess landslide susceptibility in a fluvial basin of NW Sicily (Italy). *Geomorphology* 94, 325–339.
- Corominas et al. (2010) Overview of landslide hazard and risk assessment practices. Deliverable 2.1, SafeLand: Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change, and risk management strategies.
- Corominas, J., Moya, J. (2008) A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes. *Eng Geol* 102:193–213.
- Corominas, J., van Westen, C.J., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitilakis, K., Winter, M.G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J., Smith, J.T. (2014) Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bull. Eng. Geol. Environ.* Vol. 73, n. 2, 209-263.
- Crescenti, U. (1998) Il rischio di frana: appunti per la valutazione. *Quaderni di Geologia Applicata*, Vol. 5(2), pp. 87-100, Pitagora Ed., Bologna.
- Crescenzi, E., Grassi, D., Iovine, G., Merenda, L., Miceli, F., Sdao F. (1996) Fenomeni di instabilità franosa nei centri abitati calabresi: esempi rappresentativi. Estratto da *Geologia Applicata e Idrogeologia*, volume XXXI.
- Critelli, S. e Gabriele, S. (1991) Lineamenti fisici e climatici della Calabria. In: *Indagine a scala regionale sul dissesto idrogeologico in Calabria provocato dalle piogge dell'inverno 1990*. A cura di Antronico, L., Critelli, S., Gabriele, S., Versace, P.. Editoriale Bios.
- Critelli, S., Gabriele, S., Le Pera, E., Cozza, C. (1993) Il bacino del Crati (Calabria settentrionale): Evoluzione Geologica, Idrologica e Morfo-Strutturale. Rapporto Interno N. 403 CNR-IRPI, Cosenza.
- Critelli S., Gullà, G., Matano, F. (1990) Alterazione delle rocce cristalline e sua incidenza sulla franosità in Calabria. In: *Indagine a scala regionale sul dissesto idrogeologico in Calabria provocato dalle piogge dell'inverno 1990* (Antronico L., Critelli S., Gabriele S. e Versace R, eds.): CNR-GNDC1 vol. spec., Ed. Bios Cosenza, p. 51-71.

- Critelli, S. e Matano, R. (1993) Considerazioni preliminari sulla natura del weathering nelle rocce cristalline della Calabria settentrionale. CNR IRPI Rapporto Interno N. 393, 22pp.
- Crovelli, R.A. (2000) Probabilistic models for estimation of number and cost of landslides. Open file report 00-249. US Geological Survey, Reston, p 23. <http://pubs.usgs.gov/of/2002/ofr-02-424/>
- Crozier, M.J. (1996) The climate-landslide couple: a Southern Hemisphere perspective. *Paleocl. Res.* 19 (ESF Special Issue 12), 329 – 350.
- Crozier, M.J. (2005) Multiple occurrence regional landslide events in New Zealand: hazard management issues. *Landslides* 2:247–256.
- Crozier, M.J. e Glade, T. (2005) Landslide Hazard and Risk: Issues, Concepts and Approach. In: Glade T., Anderson M.G. & Crozier M.J. (Eds.) - *Landslide Hazard and Risk*. Wiley, 1-40.
- Crozier, M.J. e Preston, N.J. (1999) Modelling changes in terrain resistance as a component of landform evolution in unstable hill country. Hergarten S and Neugebauer HJ (Eds.) *Process Modelling and Landform Evolution*. Heidelberg, Springer. 78:267-84.
- Cruden, D. (1991) A simple definition of a landslide. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 43(1): 27-29.
- Cruden, D.M. e Varnes, D.J. (1996) Landslides Types and Processes. In: Turner A.K. & Schuster R.L. (Eds.) *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247. NationalAcademy Press, WA, 36-75.
- Cucci, L. e Cinti, F.R. (1998) Studio dei terrazzi marini dell'Alto Jonio Cosentino: considerazioni su sollevamento regionale e deformazione tettonica locale. *Il Quaternario, Italian Journal of Quaternary Sciences*, 10 (2), 1997, 549-556.
- Czuchlewski, K.R., Weissel, J.K. e Kim, Y. (2003) Polarimetric synthetic aperture radar study of the Tsaoling landslide generated by the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan. *Journal of Geophysical Research*, 108: F1, 7/1-10, 6006, doi:10.1029/2003JF000037.
- D'Argenio, B., Pescatore, T., Scandone P. (1973) Schema geologico dell'Appennino Meridionale. *Accademia Nazionale dei Lincei*, 183, 49-72.
- Dai, F.C., Lee, C.F., Ngai, Y.Y. (2002) Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology* 64, 65-87.

- DeGraff, J.V. (1985) Using isopleth maps of landslides deposits as a tool in timber sale planning. *Bulletin American Association of Engineering Geologists*, 22: 445-453.
- DeGraff, J.V. e Canuti, P. (1988) Using isopleth mapping to evaluate landslide activity in relation to agricultural practices. *International Association Engineering Geology Bulletin*, 36: 61-71.
- Desio, A. (1959) *Geologia applicata alla Ingegneria*, Hoepli, Milano, 1058 pp.
- Desio, A. (1971) Caratteristiche geologiche delle frane, in “Guida alla classificazione delle frane ed ai primi interventi”, *Atti della Commissione Interministeriale per lo studio della sistemazione idraulica e della difesa del suolo*, Roma.
- Dewey, J.F., Helman, M.L., Turco, E., Hutton, D.H.W., Knott, S.D. (1989) Kinematics of the western Mediterranean. In: Coward M.P., Dietrich D. & Park R.G. (ed.), 1989, *Alpine Tectonics*, Geological Society Special publication, 45, 265-283.
- Dewey, J.F., Pitman, W.C., Ryan, W.B.F., Bonnin, J. (1973) Plate tectonics and evolution of the alpine system. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 84, 3137-3180.
- Dietrich, D., Lorenzoni, S., Scandone, P., Zanettin-Lorenzon, E., Di Pierro, M. (1976) Contribution to knowledge of the tectonic units of Calabria. Relationships between composition of K-white micas and metamorphic evolution. *Boll. Soc. Geol. It.*, 95, 193-217.
- Dikau, R., Brunsten, D., Schrott, L., Ibsen, M.-L. (eds.) (1996) *Landslide recognition. Identification, movements and causes*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 251 p.
- Dilley, M., Chen, R.S., Deichmann, U., Lerner-Lam, A.L., Arnold, M. (2005) *Natural disaster hotspots—a global risk analysis*. Report International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank and Columbia University, p 132.
- D.P.C.M. 29/09/98 (Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 29 settembre 1998). Atto di indirizzo e coordinamento per l'individuazione dei criteri relativi agli adempimenti di cui all'art. 1, commi 1 e 2, del D.L. 11 giugno 1998, n. 180 (published on 5 January 1999).
- Dramis, F. e Gentili, B. (1977) Contributo allo studio delle acclività dei versanti nell'Appennino umbro-marchigiano. *Studi Geologici Camerti*, 3, 153-164.
- DRM – Délégation aux Risques Majeurs (1990) *Les études préliminaires à la cartographie réglementaire des risques naturels majeurs*. Secrétariat d'Etat auprès du Premier Ministre chargé de l'Environnement et de la Prévention des Risques technologiques et naturels majeurs. La Documentation Française. 143 p.

- Dussauge-Peisser, C., Helmstetter, A., Grasso, J.-R., Hantz, D., Desvarreux, P., Jeannin, M., Giraud, A. (2002) Probabilistic approach to rock fall hazard assessment: potential of historical data analysis. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 2:15–26.
- Dykes, A.P. (2002) Weathering-limited rainfall-triggered shallow mass movements in undisturbed steepland tropical rainforest. *Geomorphology*, 46:1-2 73-93.
- Easterling, D.R., Meehl, G.M., Parmesan, C., Changnon, S.A., Karl, T.R., Mearns, L.O. (2000) Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science* 289, 2068–2074.
- EEA (2010) Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in Europe: an overview of the last decade. European Environmental Agency Technical report 13. Office for Official Publications of the European Union, Luxembourg.
- EM-DAT (2003) The OFDA/CRED international disaster database. Université Catholique de Louvain, Brussels. [www.em-dat.net](http://www.em-dat.net)
- Einstein, H.H. (1988) Special lecture: landslide risk assessment procedure. Proc. V Int. Symp. On Landslides, Lausanne, 2, 1075-1090.
- Einstein, H.H. (1997) Landslide risk — systematic approaches to assessment and management. In: Cruden, D., Fell, R. (Eds.), *Landslide risk assessment*. Balkema, Rotterdam, pp. 51–109.
- EPFL (2002) Ecole Polytechnique de Lausanne: Relevant Criteria to assess vulnerability and risk. Unpublished Deliverable (D16) of project IMIRILAND: Impact of Large Landslides in the mountain environment.
- Ercanoglu, M. e 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, 229-250.
- Ermini, L., Catani, F., Casagli N. (2005) Artificial neural networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology*, 66, 327–343.
- Evans, I.S. (1980) An integrated system of terrain analysis and slope mapping, *Zeitschrift für Geomorphologie*, Supplement Band 36: 274–95.
- Falasci, F., Federici, P.R., Puccinelli, A., Bottai, M., Casarosa, N., D’Amato Avanzi, G., Giacomelli, F., Gianecchini, R., Pochini, A., Ribolini, A., Salvati, N., Stano, S., Testi, C. (2007) Metodologie di valutazione della suscettibilità di frana in alcune aree

- campione della Toscana settentrionale. *Atti Soc. tosc. Sci. nat., Mem., Serie A*, 112, 21-39.
- Fell, R. (1994) Landslide risk assessment and acceptable risk. *Canadian Geotechnical Journal*, 31: 261-274.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W.Z. (2008) Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning; *Engineering Geology*, v. 102, p. 85-98.
- Ferranti, L., Santoro, E., Mazzella, M.E, Monaco, C., Morelli, D. (2009) Active transpression in the northern Calabria Apennines, southern Italy. *Tectonophysics* 476, 226-251.
- Ferrari, E., Iovine, G., Petrucci, O. (2000) Evaluating landslide hazard through geomorphologic, hydrologic and historical analyses in North-Eastern Calabria (Southern Italy). *Mediterranean Storms*, Siccardi F. e Claps P. Eds. Maratea, 14-16 October 1999. Editoriale Bios, 425-437. ISBN 88-7740-296-2.
- Feryandi, F.T.H. (2011) Landslide susceptibility assessment in karanganyar regency – Indonesia. Comparison of Knowledge-Based and Data-Driven Models. Dissertation of Master of Science in Geospatial Technologies. Erasmus Mundus Master program in Geospatial Technologies.
- Finetti, I. (1982) Structure, stratigraphy and evolution of Central Mediterranean. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 24, 247-312.
- Finlay, P.J., Fell, R.A. (1996) Study of landslide risk assessment for Hong Kong. School of Engineering Report. The University of New South Wales, Sydney.
- Formetta, G., Rago, V., Capparelli, G., Rigon, R., Muto, F., Versace, P. (2014) Integrated physically based system for modeling landslide susceptibility. *Procedia Earth and Planetary Science*, 9: 74-82.
- Foster, G.R. e Wischmeir, W.H. (1974) Evaluating irregular slopes for soil loss prediction. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 17, 2, 305-309.
- Fotopoulou, S., Pitilakis, K. (2013a) Vulnerability assessment of reinforced concrete buildings subjected to seismically triggered slow-moving earth slides. *Landslides* 10:563–582. doi:10.1007/s10346-012-0345-5.
- Fotopoulou, S., Pitilakis, K. (2013b) Fragility curves for reinforced concrete buildings to seismically triggered slow-moving slides. *Soil Dyn Earthq Eng* 48:143–161.

- Frattini, P., Crosta, G.B., Sosio, R. (2009) Approaches for defining thresholds and return periods for rainfall-triggered shallow landslides. *Hydrol Process* 23(10):1444–1460.
- Galli, M., Ardizzone, F., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P. (2008) Comparing landslide inventory maps. *Geomorphology* 94, 268–289. doi:10.1016/j.geomorph.2006.09.023.
- Gallipoli, M., Lapenna, V., Lorenzo, P., Mucciarelli, M., Perrone, A., Piscitelli, S., Sdao, F. (2000) Comparison of geological and geophysical prospecting techniques in the study of a landslide in southern Italy. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 4: 117-128.
- Gaprindashvili, G. (2011) Landslide hazard assessment in Georgia. Report on the 1st project of AES Geohazards Stream. Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC) of the University of Twente, 7500 AA Enschede, the Netherlands.
- Ghisetti, F. (1979) Evoluzione neotettonica dei principali sistemi di faglie della Calabria centrale (Neotectonic evolution of main fault systems of Central Calabria). *Boll. Soc. Geol. It.* 98, 387–430.
- Ghisetti, F., Monaco, C., Tortorici, L., Vezzani, L. (1994) Strutture ed evoluzione del Settore del pollino ( Appennino Calabro-Lucano). Guida all'escursione.
- Gisotti, G. (2012) Il dissesto idrogeologico: Previsione, prevenzione e mitigazione del rischio. Ed. Dario Flaccovio, Collana Sigea di Geologia Ambientale.
- Glade, T. (2003) Vulnerability assessment in landslide risk analysis. *Die Erde*, 134: 121-138.
- Glade, T. e Crozier, M.J. (2005) The nature of landslide hazard impact. In: Glade, T., Anderson, M.G. and Crozier, M.J. (eds.) *Landslide risk assessment*. John Wiley, 43-74.
- Gokceoglu, C., Sonmez, H., Nefeslioglu, H.A., Duman, T.Y., Can, T. (2005) The 17 March 2005 Kuzulu landslide (Sivas, Turkey) and landslide-susceptibility map of its near vicinity. *Eng Geol* 81:65–83.
- Good, I.J. (1998) Statistical evidence. In: Kotz S., Johnson N.L. (eds) *Encyclopedia of statistics*, vol 8. Wiley, New York, pp 651-655.
- Guerricchio, A. e Melidoro, G. (1986) Problematiche di geologia applicata lungo la fascia costiera del golfo di Taranto. *Atti Conv. "Evoluzione dei litorali. Problematiche relative al golfo di Taranto"*, 4-29. 16-17 ottobre, Plicoro (MT).



- Gullà, G., Antronico, L., Iaquina, P., Terranova, O. (2008) Susceptibility and triggering scenarios at a regional scale for shallow landslides. *Geomorphology* 99:39–58. doi:10.1016/j.geomorph.2007.10.005.
- Günther, A., Reichenbach, P., Malet, J.-P., Van Den Eeckhaut, M., Hervás, J., Dashwood, C., Guzzetti, F. (2012) Tier-based approaches for landslide susceptibility assessment in Europe. *Landslides*, DOI 10.1007/s100346-012-0349-1.
- Gupta, V. (2005) The relationship between tectonic stresses, joint patterns and landslides in the higher Indian Himalaya. *Journal of Nepal Geological Society* 31, 51-58.
- Gupta, P. e Anbalagan, R. (1997) Slope stability of Theri Dam Reservoir Area, India, using landslide hazard zonation (LHZ) mapping. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 30, 27-36.
- Guthrie, R.H., Deadman, P.J., Raymond Cabrera, A., Evans, S.G. (2008) Exploring the magnitude–frequency distribution: a cellular automata model for landslides. *Landslides* 5:151–159.
- Guthrie, R.H. e Evans, S.G. (2004a) Magnitude and frequency of landslides triggered by a storm event, Loughborough Inlet, British Columbia. *Natural Hazards and Earth System Science* 4, 475– 483.
- Guthrie, R.H. e Evans, S.G. (2004b) Analysis of landslide frequencies and characteristics in a natural system, coastal British Columbia. *Earth Surface Processes and Landforms* 29 (11), 1321– 1339.
- Guzzetta, G. (1974) Ancient tropical weathering in Calabria. *Nature*, CCLI, 5473, 302-303.
- Guzzetti, F. (2000) Landslide fatalities and the evaluation of landslide risk in Italy. *Engineering Geology* 58, 89–107.
- Guzzetti, F. (2002) Landslide hazard assessment and risk evaluation: overview, limits and prospective. *Proceedings 3rd MITCH Workshop Floods, Droughts and Landslides — Who Plans, Who Pays*, pp. 24–26. November 2002, Potsdam, available at [http://www.mitch-ec.net/workshop3/Papers/paper\\_guzzetti.pdf](http://www.mitch-ec.net/workshop3/Papers/paper_guzzetti.pdf).
- Guzzetti, F. (2006) *Landslide Hazard and Risk Assessment*. In: Tesi di PhD. Facoltà di Matematica e Scienze, Università di Bonn, Germania, 389.
- Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., Reichenbach, P., Rossi, M. (2008) Distribution of landslides in the Upper Tiber River basin, central Italy. *Geomorphology*, 96 (1-2):105-122.

- 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., 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 Geomorphol* 31(1–4):181–216.
- Guzzetti, F., Cesare Mondini, A., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., Chang, K.T. (2012) Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews* 112, 42–66.
- Guzzetti, F., Galli, M., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M. (2006a) 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 Planet Sci Lett* 195:169–183.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone F., Cardinali, M., Galli, M. (2006b) Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology* 81(1), 166-184.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Ardizzone, F., Galli, M. (2003) Impact of landslides in the Umbria Region, Central Italy, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 3, 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., Cardinali, M., Galli, M. and Ardizzone, F. (2005c) Landslide hazard assessment in the Staffora basin, northern Italian Apennines. *Geomorphology*
- Hansen, A. (1984) Landslide hazard analysis. In: Brunsden, D. and Prior, D.B. (eds.) *Slope instability*, Wiley & Sons, New York, 523-602.
- Hansen, D.T. (1998) Visualizing uncertainty captured from source documents with GRID. In: *Proceedings of the eighteenth annual Esri international user conference*, San Diego, CA.
- Hearn, G.J. (1995) Landslide and erosion hazard mapping at Ok Tedi copper mine, Papua New Guinea. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 28, 47-60.

- Hilley, G.E., Bürgmann, R., Ferretti, A., Novali, F. e Rocca, F. (2004) Dynamics of Slow- Moving Landslides from Permanent Scatterer Analysis. *Science*, 304: 1952-1955.
- Hippolyte, J.C., Angelier, J., Roure, F., Casero, P. (1994) Piggyback basin development and thrust belt evolution: structural and paleostress analyses of the Plio-Quaternary basins in the southern Apennines. *Jl. struct. Geol.*, 16, 159-173.
- Hong, Y., Adler, R., Huffman, G. (2007) Use of satellite remote sensing data in the mapping of global landslide susceptibility. *Nat Hazards* 43:245–256.
- Hovius, N., Stark, C.P., Allen, P.A. (1997) Sediment flux from a mountain belt derived by landslide mapping. *Geology* 25, 231– 234.
- Hsu, K.J. (1968) Principles of melanges and their bearing on the Franciscan-Knoxville paradox. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 79, 1063-1074.
- Hungr, O. (1997) Some methods of landslide hazard intensity mapping, in: *Landslide risk assessment*, edited by: Cruden, D. M. and Fell, R., Balkema Publisher, Rotterdam, 215–226.
- Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M., Hutchinson, J.N. (2001) Review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, v. VII, 221-238.
- Hutchinson, J.N. (1988) General report : morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrology. *Proc. 5th Int. Symp. On Landslides, Lausanne* , 1, 3-35.
- Hutchinson, J.N. (1995) Keynote paper: Landslide hazard assessment. In: Bell (ed.) *Landslides*, A.A. Balkema, Rotterdam, 1805-1841.
- Hutchinson, J.N. e Chandler, M.P. (1991) A preliminary landslide hazard zonation of the Undercliff of the Isle of Wight. *Slope Stability Engineering*, Thomas Telford, London, 197-205.
- Iovine, G. e Merenda, L. (1996) Nota illustrativa alla “Carta delle frane e della mobilizzazione diastrofica, dal 1973 ad oggi, nel bacino del torrente Straface”(Alto Jonio, Calabria). *Geologia Applicata e Idrogeologia*, Bari vol. XXXI, pp. 107-128.
- Iovine, G. e Petrucci, O. (1998) Effetti sui versanti e nel fondovalle indotti da un evento pluviale eccezionale nel bacino di una fiumara calabra (T.Pagliara). *Boll.Soc.Geol.It.*, 117, 821-840, 10 ff., 4 tabb.

- IPCC (2001) *Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability. Summary for Policymakers*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, 50p.
- Ispra (2009) *Tematiche in primo piano. Anuario dei dati ambientali 2009*, Roma.
- Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica (2014) *Rapporto periodico sul Rischio posto alla Popolazione italiana da Frane e Inondazioni*. IRPICNR.
- ITC (2001) *ILWIS 3.0 academic-user's guide*. ITC, Enschede, p 520.
- Jade, S. e Sarkar, S. (1993) *Statistical models for slope stability classification*. *Engineering Geology*, 36 :91–98.
- Jaedicke, C., Van Den Eeckhaut, M., Nadim, F., Hervas, J., Kalsnes, B., Vidar Vangelsten, B., Smith, J.T., Tofani, V., Ciurean, R., Winter, M.G., Sverdrup-Thygeson, K., Syre, E., Smebye, H. (2014) *Identification of landslide hazard and risk “hotspots” in Europe*. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 73: 325-339.
- Jaiswal, P., van Westen, C.J. (2009) *Estimating temporal probability for landslide initiation along transportation routes based on rainfall thresholds*. *Geomorphology* 112:96–105.
- Jenks, G.F. (1989) *Geographic logic in line generalization*. *Cartographica* 26(1):27–42.
- Jongmans, D. e Garambois, S. (2007) *Geophysical investigation of landslides: a review*. *Bulletin of Geological Society of France*, 178 (2):102-112.
- Kääb, A. (2002) *Monitoring high-mountain terrain deformation from repeated air- and spaceborne optical data: examples using digital aerial imagery and ASTER data ISPRS*. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57:1-2 39-52.
- Kanungo, D.P., Aror, 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*. *Eng Geol* 85(3–4):347–366.
- Kastens, K., Mascle, J., Auroux, C., Bonatti, F., Broglia, C., Channel, J., Curzi, P., Emeis, K., Glacon, G., Hasegawa, S., Hieke, W., Mascle, G., McCoy, F., Mckenzie, J., Mendelson, J., Muller, C., Rehault, J.P., Robertson, A., Sartori, R., Sprovieri, R., Torii, M. (1986) *A microcosm of ocean basin evolution in the Mediterranean*. *Nature*, 321.

- Kavzoglu, T., Sahin, E.K., Colkesen, I. (2013) Landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis, support vector machines, and logistic regression. *Landslides* DOI 10.1007/s10346-013-0391-7.
- Kirschbaum, D.B., Adler, R., Hong, Y., Lerner-Lam, A. (2009) Evaluation of a preliminary satellite-based landslide hazard algorithm using global landslide inventories. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 9:673–686.
- Klein, F.W. (1982) Patters of historical eruptions at Hawaiian volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 12, 1– 35.
- Knott, S.D. (1987) The Liguride Complex of Southern Italy – a Cretaceous to Paleogene accretionary wedge. *Tectonophysics*, 142, 217-226.
- Komac, M. (2006) A landslide susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia. *Geomorphology* 74(1–4):17–28.
- Lanzafame, G. e Tortorici, L. (1980) Le successioni giurassico-eoceniche dell'area compresa tra Bocchigliero, Longobucco e Cropalati (Calabria). *Riv. It. Paleont. Strat.*, 86, 31-54.
- Lanzafame, G. e Tortorici, L. (1981) La tettonica recente della Valle del Fiume Crati (Calabria). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 4, 11-21.
- Lanzafame, G. e Zuffa, G. (1976) Geologia e petrografia del foglio Bisignano (Bacino del Crati, Calabria). *Geol. Rom.*, 15, 223-270, con carta geologica 1:50.000.
- Lee, S. (2005) Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data. *Int. J. Remote Sens.*, 26: 1477-1491.
- Lee, E.M., Brunnsden, D., Sellwood, M. (2000) Quantitative risk assessment of coastal landslide problems, Lyme Regis, UK. In: Bromhead, E., Dixon, N., Ibsen, M.-L. (Eds.), *Landslides, in research theory and practice. VIII Int. Symp. On Landslides*, vol. 2, Thomas Telford, pp. 899-904.
- Lee, S. e Min, K. (2001) Statistical analysis of landslide susceptibility at yongin, Korea. *Environ. Geol.*, 40: 1095-1113.
- Lentini, F. (1979) Le Unità Sicilidi della Val d'Agri (Appennino Lucano). *Geol. Romana*, 18, 215-225.

- Leone, F., Asté, J.P., Leroi, E. (1996) Vulnerability assessment of elements exposed to mass-movement: working toward a better risk perception. In: Senneset (ed.) *Landslides*, A.A. Balkema Publisher, Rotterdam, 263-269.
- Le Pera, E. e Sorriso-Valvo, M. (2000) Weathering and morphogenesis in a Mediterranean climate, Calabria, Italy. *Geomorphology* 34, 251–270.
- Leroi, E. (1996) Landslide hazard — risk maps at different scales: objectives, tools and developments. In: Senneset, K. (Ed.), *Landslides – Glissements de Terrain*. Balkema, Rotterdam, pp. 35–51.
- Linee Guida Progetto PON 01\_01503 Sistemi integrati per il monitoraggio, l'early warning e la mitigazione del rischio idrogeologico lungo le grandi vie di comunicazione. AA.VV.
- Lucini, P. (1969) Un metodo grafico per la valutazione della franosità. *Memorie e Note dell'Istituto di Geologia Applicata di Napoli*, 2.
- Lupia Palmieri, E., Ciccacci, S., Civitelli, G., Corda, L., D'Alessandro, L., Del Monte, M., Fredi, P., Pugliese, F. (1995) Geomorfologia quantitativa e morfodinamica del territorio abruzzese: I – Il bacino idrografico del Fiume Tordino. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 18, 31 – 46.
- Lyell, C. (1830-1833) *Principles of Geology*, 3 volumes.
- Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Guzzetti, F., Reichenbach, P. (2004) Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surf Proc Land* 29:687–711.
- Malczewski, J. (1996) A GIS-based approach to multiple criteria group decision-making. *Int J Geogr Inf Syst* 10(8):955–971.
- Malczewski, J. (1999) *GIS and multi criteria decision analysis*. Wiley, New York. ISBN: 978-0- 471-32944-2, p 408.
- Malet, J.-P., van Asch, T.H.W.J., van Beek, R., Maquaire, O. (2005) Forecasting the behaviours of complex landslides with a spatially distributed hydrological model. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5 (1), 71– 85.
- Malinverno, A. E Ryan, W.B.F. (1986) Extension in the Tyrrhenian Sea and Shortening in the Apennines as a result of arc migration driven by sinking of the lithosphere. *Tectonics*, 5, 227-245.
- Marjanovic, M., Kovacevic, M., Bajat, B., Vozenilek, V. (2011) Landslide susceptibility assessment using SVM machine learning algorithm. *Eng Geol* 123:225–234.

- Mavrouli, O., Corominas, J. (2010a) Rockfall vulnerability assessment for reinforced concrete buildings. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 10:2055–2066.
- Mavrouli, O., Corominas, J. (2010b) Vulnerability of simple reinforced concrete buildings in front of the rockfall impact. *Landslides* 7(2):169–180.
- McCalpin, J. (1984) Preliminary age classification of landslides for inventory mapping. Proceedings 21st annual Engineering Geology and Soils Engineering Symposium, Moscow, Idaho, 99-111.
- McKean, J. e Roering, J. (2003) Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. *Geomorphology*, 57:3-4 331-351.
- Mejía -Navarro M., Wohl, E.E., Oaks, S.D. (1994) Geological hazards, vulnerability and risk assessment using GIS: model for Glenwood Springs, Colorado. *Geomorphology*, 10: 331-354.
- Mendicino, G. e Sole, A. (1998) Stima distribuita dell'erosione idrica lungo i versanti di un bacino idrografico sotteso da un invaso artificiale. Atti del XXVI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, p. 97-108.
- Mileti, D.S. (1999) *Disasters by Design: A Reassessment of Natural Hazards in the United States*, Brookfield: Rothstein Associates.
- Monaco, C. (1993) Pleistocene strike-slip tectonics in the Pollino Mountain Range (Southern Italy). *Annales Tectonicae*, 7 (2).
- Monaco, C. e Tansi, C. (1992) Strutture transpressive lungo la zona trascorrente sinistra nel versante orientale del Pollino (Appennino calabro-lucano). *Boll. Soc. Geol. It.*, 111, 291-301.
- Monaco, C., Tansi, C., Tortorici, L., De Francesco, A.M., Morten, L. (1991) *Analisi geologico-strutturale dell'Unità del Frido al confine calabro-lucano (Appennino meridionale)*. *Mem. Soc. Geol. It.*, 47, 341-353.
- Monaco, C. e Tortorici, L. (2008) Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50000, Foglio 535 "Trebisacce".
- Monaco, C., Tortorici, L., Catalano, S., Paltrinieri, W., Steel, N., (2001) The role of the Pleistocene strike-slip tectonics in the Neogene-Quaternary evolution of the southern Apennines orogenic belt: implications for oil trap development. *J. Petroleum Geol.*, 24, 339-359.
- Monaco, C., Tortorici, L., Morten, L., Critelli, S., Tansi, C. (1995) Geologia del versante nord-orientale del Massiccio del Pollino (confine calabro-lucano): nota

- illustrativa sintetica della carta geologica alla scala 1:50000. Boll. Soc. Geol. It., 114, 277-291, Roma.
- Montgomery, D.R. e Dietrich, W.E. (1994) A physically based model for the topographic control of shallow landsliding. *Water Resource Research*, 30 (4), 1153-1171.
- Moore, I.D., Grayson, R.B., Ladson, A.R. (1991) Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes* 5, 3–30.
- Moore, I.D. e Wilson, J.P. (1992) Length–slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: simplified method for estimation. *Journal of Soil and Water Conservation* 47, pp. 423–428.
- Moretti, A., Corea, I., Guerra, I. (1990) Sismicità attuale e sistemi di fratture superficiali in Calabria. In: *Proceedings of GNDT Meeting 1*, pp. 89–101.
- Morgan, B.W. (1968) *An introduction to Bayesian statistical decision process*. Prentice\_Hall New York.
- Mostardini, F. e Merlini, S., (1986) Appennino centro-meridionale. Sezioni geologiche e proposta di modello strutturale. *Mem. Soc. Geol. It.*, 35, 177-202.
- Mostardini, F. e Pieri, M. (1969) Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100000, Foglio 212 "Montalbano Jonico".
- Moussat, E. (1983) *Evolution de la Mer Tyrrhenienne centrale et orientale et des marges septentrionales en relation avec la neotectonique dans l'arc calabrais*. Ph. d. Thesis, Univ. Di P. et M. Curie, Paris.
- Muto, F. (2005) *Evoluzione geologica neogenico- quaternaria della porzione occidentale della Calabria Settentrionale*. Tesi di dottorato. Università degli Studi della Calabria, pp. 121.
- Nadim, F., Kjekstad, O., Peduzzi, P., Herold, C., Jaedicke, C. (2006) Global landslide and avalanche hotspots. *Landslides* 3(2):159–174.
- Nagarajan, R., Roy, A., Vinod Kumar, R., Mukherjee, A., Khire, M.V. (2000) Landslide hazard susceptibility mapping based on terrain and climatic factors for tropical monsoon regions. *Bull. Eng. Geol. Env.* 58, 275–287.
- Nathenson, M. (2001) Probabilities of volcanic eruptions and application to the recent history of Medicine Lake Volcano. In: Vecchia, A.V. (Ed.), *U.S. Geological Survey Open-file Report 2001-324*, pp. 71– 74.



- Naylor, M.A., Mandl, G. e Sijpesteijn, C.H.K. (1986) Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states. *J. Struct. Geol.*, 8, 737-752.
- Nefeslioglu, H.A., Gokceoglu, C., Sonmez, H., Gorum, T. (2011) Mediumscale hazard mapping for shallow landslide initiation: the Buyukkoy catchment area (Cayeli, Rize, Turkey). *Landslides* 8:459–483.
- Neuhäuser, B. e Terhorst, B. (2007) Landslide susceptibility assessment using “weights-of-evidence” applied to a study area at the Jurassic escarpment (SW-Germany). *Geomorphology*, 86(1–2), 12–24.
- O’Callaghan, J.F. e Mark, D.M. (1984) The extraction of drainage network from digital elevation data. *Computer Vision, graphics and Image Processing* 28, 328-344.
- Ogniben, L. (1960) Nota illustrativa dello schema geologico della Sicilia nord-orientale. *Riv. Min. Sic.*, 64-65, 183-222.
- Ogniben, L. (1969) Note illustrative della Carta Geologica d’Italia alla scala 1:100000, Foglio 211 “S. Arcangelo” (a).
- Ogniben, L. (1969) Schema introduttivo alla geologia del confine calabro-lucano. *Mem. Soc. Geol. It.*, 8, 453-763 (b).
- Ogniben, L. (1973) Schema geologico della Calabria in base ai dati odierni. *Geol. Romana*, 12, 243-585.
- Önöz, B. e Bayazit, M. (2001) Effect of the occurrence process of the peaks over threshold on the flood estimates. *Journal of Hydrology* 244, 86–96.
- Pachauri, A.K., Gupta, P.V., Chander, R. (1998) Landslide zoning in a part of the garhwal himalayas. *Envir. Geol.*, 36: 325-334.
- Pachauri, A.K. e Pant, M. (1992) Landslide hazard mapping based on geological attributes, *Engineering Geology*, 32:81–100.
- Pack, R.T., Tarboton, D.G., Goodwin, C.N. (1998) The SINMAP approach to terrain stability mapping. In: 8th Congr Int Assoc Eng Geol, Vancouver, Canada, 21–25 Sept 1998.
- Paglione, A. e Piccarreta, G. (1978) History and petrology of a fragment of the deep crust in the Serra (Calabria, southern Italy). *N. Jb. Miner. Mh.*, 9, 385-396.
- Panizza, M. (2001) Geomorphosites : concepts, methods and example of geomorphological survey. *Chinese Science Bulletin*, 46, Suppl. Bd, 4-6.

- Panizza, M. (2005) *Manuale di geomorfologia applicata*. Ed. FrancoAngeli.
- Papathoma-Köhle, M., Keiler, M., Totschnig, R., Glade, T. (2012) Improvement of vulnerability curves using data from extreme events: a debris-flow event in South Tyrol. *Nat Hazards* 64:2083–2105.
- Papathoma-Köhle, M., Neuhäuser, B., Ratzinger, K., Wenzel, H., Dominey-Howes, D. (2007) Elements at risk as a framework for assessing the vulnerability of communities to landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 7, 765–779.
- Parise, M. e Calcaterra, D. (1999) La franosità storica nei dintorni di Acri e Bisignano (Sila, Calabria): risultati preliminari. CNR-IRPI, Cosenza, Rapporto Interno 59.
- Parise, M., Sorriso-Valvo, M., Tansi, C. (1997) Mass movements and tectonics in the Aspromonte massif (Southern Italy). *Engineering Geology*, 47, 89-106.
- Partsh, J. (1911) *Schlesien, eine Landeskunde für deutsche Volk*. II, S. 586, Breslau.
- Pašek, J. (1975) Landslide inventory. *International Association Engineering Geologist Bulletin* 12, 73–74.
- Peduzzi, P. (2010) Landslides and vegetation cover in the 2005 North Pakistan earthquake: a GIS and statistical quantitative approach. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 10:623–640.
- Pelletier, J.D., Malamud, B.D., Blodgett, T., Turcotte, D.L. (1997) Scale-invariance of soil moisture variability and its implications for the frequency–size distribution of landslides. *Engineering Geology* 48, 255– 268.
- Penta, F. (1959) Contributo alla sistematica delle frane. *Rend. Acc. Sc.Fis. Mat. Soc. Naz. Sc. LL. AA.*, Napoli, s. 4, 26.
- Perri, F., Borrelli, L., Muto, F., Gullà, G., Critelli, S., Conforti, M., Filomena, L., Rago, V. (2013) Weathering processes as predisposing factors of the landscape evolution along plutono-metamorphic profiles of the Sila Massif, Calabria, southern Italy. *Geophysical Research Abstracts Vol. 15, EGU2013-11584, EGU General Assembly 2013*.
- Petrucci, O., Chiodo G., Caloiero, D. (1996) Eventi alluvionali in Calabria nel decennio 1971-1980. Rubbettino Arti Grafiche, Soveria Mannelli (Italy). GNDICI N.1374.
- Petrucci, O. e Versace, P. (2005) Frane e alluvioni in provincia di Cosenza agli inizi del '900: ricerche storiche nella documentazione del Genio Civile. I Quaderno dell'Osservatorio di Documentazione Ambientale, UNICAL.
- Petrucci, O. e Versace, P. (2007) Frane e alluvioni in provincia di Cosenza tra il 1930 e il 1950: ricerche storiche nella documentazione del Genio Civile. II Quaderno

- dell'Osservatorio di Documentazione Ambientale, UNICAL. Pubbl. GNDCI N. 2913.
- Petrucci, O., Versace, P., Pasqua, A.A. (2009) Frane e alluvioni in provincia di Cosenza fra il 1951 ed il 1960: ricerche storiche nella documentazione del Genio Civile. III Quaderno dell'Osservatorio di Documentazione Ambientale, UNICAL).
- Pike, R.J. 1988. The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from digital elevation models. *Mathematical Geology* 20 (5), 491–511.
- Polloni, G., Aleotti, P., Presbitero, M. (1998) Terraced slope in mountain areas: sliding risk and protective measures in Valtellina (Italy). Proc. of the 8<sup>th</sup> Congress of the International Association of Engineering Geology, Vancouver – Canada, 21/25 September 1998.
- Popescu, M.E. (1996) From landslide causes to landslide remediation. In: Senneset, K. (Ed.): *Landslides – Proc. 7<sup>th</sup> Internat. Symp. Landslides*, Trondheim, 75-96, Rotterdam.
- Puorghasemi, H.R., Pradhan, B., Gokceoglu, C., Deylami Moezzi, K. (2012) Landslide Susceptibility Mapping Using a Spatial Multi Criteria Evaluation Model at Haraz Watershed, Iran. In: B. Pradhan and M. Buchroithner (eds.), *Terrigenous Mass Movements*, DOI: 10.1007/978-3-642-25495-6\_2, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012.
- QTRP (2009) Quadro Territoriale Regionale a valenza Paesaggistica. Quadro conoscitivo 5: difesa del suolo e prevenzione dei rischi. Regione Calabria, Assessorato Urbanistica e Governo del Territorio.
- Radbruch-Hall, D.H. e Varnes, D.J. (1976) Landslides: causes and effect. *International Association Engineering Geologist Bulletin*, 14: 205-216.
- Rago, V. (2012) Carta inventario e caratterizzazione dei movimenti franosi dell'Alto Jonio cosentino. Tesi di Laurea Magistrale, Unical.
- Rago, V., Conforti, M., Muto, F., Critelli, S. (2013a) Landslide susceptibility assessment in the Ferro Torrent (Calabria, south Italy) using GIS-based Conditional analysis method. IX Convegno Nazionale dei Giovani Ricercatori di Geologia Applicata, Napoli, 14-15 Febbraio 2013. *Rend. Online Soc. Geol. It., Nuova serie*, 2013, Vol. 24, pp. 257-259.

- Rago, V., Conforti, M., Muto, F., Critelli, S. (2013b) Analysis of landslide susceptibility in the Alto Jonio area (northern Ionian Calabria) by means of statistical GIS - based approach. IX Forum di Scienze della Terra, FIST. Pisa, 16-18 Settembre 2013. *Epitome*, 5, p. 160.
- Rago, V., Conforti, M., Muto, F., Versace, P. (2014) Modelling of landslide spatial hazard along a section of motorway of the Calabria region (Southern Italy) using a GIS-based statistical method.” DAMES 2014 - the 4th International Conference on Data Analysis and Modeling in Earth Sciences, 6-8 Ottobre 2014, Milano. Abstract book, pp. 24-25.
- Rago, V., Muto, F., Armaş, I., Conforti, M. (2015a) Landslide susceptibility mapping using a spatial multi-criteria methodology in Amendolara town (Southern Italy). “La geologia dell’Italia meridionale: un convegno in memoria di Antonino Ietto”. Cosenza, 11 Dicembre 2015. Accettato per la pubblicazione sui Rendiconti Online della Società Geologica Italiana.
- Rago, V., Muto, F., Armaş, I., Conforti, M., Gheorghe, D. (2015b) A comparison of GIS-based landslide susceptibility methods in Amendolara town (southern Italy). Proceedings of the International Conference: Geo-Risks in the Mediterranean and their Mitigation, 20-21 Luglio 2015, Malta, p. 325.
- Rautela, P. e Lakhera, R.C. (2000) Landslide risk analysis between Giri and Ton Rivers in Himalaya (India). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 2, 153– 160.
- Regmi, N.R., Giardino, J.R., Vitek, J.D. (2010) Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA. *Geomorphology*, 115, 172–187.
- Rehault, J.P., Moussat, E., Fabbri, A. (1987) Structural evolution of the Tyrrhenian back-arc basin. *Mar. Geol.*, 74, 123-150.
- Reichenbach, P., Guzzetti, F., Cardinali, M. (1998) Map of sites historically affected by landslides and floods in Italy, 2nd edition. CNR Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche Publication n. 1786, scale 1:1,200,000.
- Reichenbach, P., Guzzetti, F., Carrara, A. (2002) Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards. Abstracts. Volume, CNR-IRPI, Perugia, 140 pp.
- Reid, L.M., Page, M.J. (2003) Magnitude and frequency of landsliding in a large New Zealand catchment. *Geomorphology* 49:71–88.

- Remondo, J., Bonachea, J., Cendrero, A. (2004) Probabilistic landslide hazard and risk mapping on the basis of occurrence and damages in recent past. In: Lacerda, W., Ehrlich, M., Fontoura, S., Sayão, A. (Eds.), *Landslides: Evaluation and Stabilization*. Taylor & Francis Group, London, pp. 125–130.
- Renard, K., Foster, G., Weesies, G., McCool, D., Yoder, D. (1997) Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA Agriculture Handbook #703, 384 p.
- Rib, H.T. e Liang, T. (1978) Recognition and identification. In: Schuster, R.L., Krizek, R.J. (Eds.), *Landslide Analysis and Control. : Transportation Research Board Special Report, 176*. National Academy of Sciences, Washington, pp. 34–80.
- Ricchetti, G. (1980) Contributo alla conoscenza strutturale della Fossa Bradanica e delle Murge. *Boll. Soc. Geol. It.*, 90, 421-430.
- Ricchetti, G., Ciaranfi, N., Luperto Sinni, E., Mongelli, F., Pieri P. (1988) Geodinamica ed evoluzione sedimentaria e tettonica dell'Avampaese Apulo. *Mem. Soc. Geol. It.*, 41, 57-82.
- Remondo, J., González-Díez, A., Díazde Teran, J.R., Cendrero, A., Fabbri, A., Chung, C.F. (2003) Validation of Landslide Susceptibility Maps; Examples and Applications from a Case Study in Northern Spain. *Nat Hazards* 30(3):437– 449.
- Robustelli, G., Lucà, F., Muto, F., Corbi, F., Fubelli, G., Scarciglia, F., Dramis, F. (2008) Pleistocene tectonics inferred from fluvial terraces of the Ionian coast of northern Calabria (Southern Italy), *GNGTS*, pp 168–170.
- Saaty, T. (1980) *The analytical hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.
- Saaty, T.L. e Vargas, L.G. (2001) *Models, Methods, Concepts, and Applications of the Analytic Hierarchy Process*. Kluwer Dordrecht. 333 pp.
- Saha, A.K., Gupta, R.P., Arora, M.K. (2002) GIS-based landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) valley, Himalayas. *Int J Remote Sensing* 23, 57–369.
- Saha, A.K., Gupta, R.P., Sarkar, I., Arora, M.K., Csaplovics, E. (2005) An approach for GIS-based statistical landslide susceptibility zonation with a case study in the Himalayas. *Landslides* 2:61–69.
- Salvati, P., Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M. e Stark, C.P. (2003) Map of landslides and floods with human consequences in Italy. CNR Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche Publication n. 2822, scale 1:1,200,000.

- Scandone, P. (1972) Studi di geologia lucana: Carta dei terreni della serie calcareo-silico-marnosa e note illustrative. *Boll. Soc. Naturalistica in Napoli*, 81, 255-300.
- Scandone, P. (1979) Origin of the Tyrrhenian Sea and Calabrian Arc. *Boll. Soc. Geol. It.*, 98, 27-34.
- Scandone, P. (1982) Structure and evolution of the Calabrian Arc. *Earth Evolution Sciences*, 3, 172-180.
- Scandone, P., Giunta, G., Liguori, V., (1977) The connection between the Apulia and Sahara continental margins in the Southern Apennines and Sicily. *Mem. Soc. Geol. It.*, 13, 317-323.
- Scarciglia, F., Le Pera, E., Critelli, S. (2005) Weathering and pedogenesis in the Sila Grande Massif (Calabria, South Italy): from field scale to micromorphology. *Catena*, 61(1), 1-29.
- Selli, R. (1962) Il Paleogene nel quadro della geologia dell'Italia centro-meridionale. *Mem. Soc. Geol. It.*, 3, 737-789.
- Singhroy, V. (2005) Remote sensing of landslides. In: Glade, T., Anderson, M.G. and Crozier, M.J. (eds.) *Landslide risk assessment*. John Wiley, 469-492.
- Simoni, S., Zanotti, F., Bertoldi, G., Rigon, R. (2008) Modelling the probability of occurrence of shallow landslides and channelized debris flows using GEOtop-FS. *Hydrol Process* 22:532–545.
- Soeters, R., van Westen, C.J. (1996) Slope instability recognition, analysis and zonation. In: Turner AK, Schuster RL (eds) *Landslides investigation and mitigation*. TRB Special Report 247. National Academy Press, Washington, DC, pp 129–177.
- Sorriso-Valvo, M. (1985) Mass movement and slope evolution in Calabria. *Proc. IVth Int. Conf. and Field Worksh.*, Tokyo, 23-30.
- Sorriso – Valvo, M. (1993) The Geomorphology of Calabria a sketch. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.* 16 pp. 75-80.
- Sorriso-Valvo, M. e Sylvester, A.G. (1993) The relationship between geology and landforms along a coastal mountain front, northern Calabria, Italy. *Earth Surf. Proc. Landforms* 18, 257–273.
- Sorriso-Valvo, M., Tansi, C., Antronico, L. (1996) Relazione tra frane, forme del rilievo e strutture tettoniche nella media valle del fiume Crati (Calabria). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria* (19), pp. 107 – 117.

- Spadea, P., Tortorici, L., Lanzafame, G. (1976) Serie ofiolitifera nell'area fra Tarsia e Spezzano Albanese (Calabria): Stratigrafia, Petrografia, rapporti strutturali. Mem. Soc. Geol. It., 17, 135-174, 22ff., 5 tabb.
- Stark, C.P. e Hovius, N. (2001) The characterization of landslide size distributions. *Geophysics Research Letters* 28 (6), 1091– 1094.
- Stevenson, P.C. (1977) An empirical method for the evaluation of relative landslide risk. *Bull. Int. Ass. Eng. Geol.*, 16, 69-72.
- Süzen, M.L. e Doyuran, V. (2004) Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. *Engineering Geology* 71, 303–32.
- Swets, J.A. (1988) Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science* 240(4857):1285–1293.
- Tansi, C., Iovine, G., Folino, Gallo, M. (2005) Tettonica attiva e recente, e manifestazioni gravitative profonde, lungo il bordo orientale del graben del Fiume Crati. *Bollettino della Società Geologica Italiana* 124 (3), 563–578.
- Tapsell, S., McCarthy, S., Faulkner, H., Alexander, M. (2010) Social vulnerability to natural hazards. CapHaz-Net WP4 Report. Flood Hazard Research Centre—FHRC, Middlesex University, London. Available at: [http://caphaz-net.org/outcomes-results/CapHaz-Net\\_WP4\\_Social-Vulnerability2.pdf](http://caphaz-net.org/outcomes-results/CapHaz-Net_WP4_Social-Vulnerability2.pdf).
- Thiery, Y., Malet, J.P., Sterlacchini, S., Piussant, A., Maquaire, O. (2007) Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: Application to a complex mountainous environment. *Geomorphology*, 92 (1-2), 38-59.
- Thywissen, K. (2006) Core terminology of disaster reduction . Measuring vulnerability to Natural Hazards Towards disaster resilient societies. J. Birkmann, UN University Press.
- Tortorici, L. (1981) Analisi delle deformazioni fragili dei sedimenti postorogenici della Calabria Settentrionale. *Boll. Soc. Geol. It.* , 100, 291-308, 11 ff., 1 tav.
- Tortorici, L. (1982) Analisi delle deformazioni fragili dei sedimenti postorogeni della Calabria settentrionale. *Boll. Soc. Geol. It.*, 100, 291-308.
- Triantaphyllou, E. (2000) Multi-criteria decision making methods: a comparative study. Kluwer, The Netherlands, p 288.

- Turner, A.K. e Schuster, R.L. (eds.) (1996) *Landslides: Investigation and Mitigation*. Washington, D.C., National Research Council, Transportation Research Board Special Report 247, 673 p.
- UN (2004). *Living with Risk*, United Nation.
- UNDP (2004) *Reducing Disaster Risk a challenge for development. A Global Report*. United Nations Development Programme Bureau for Crisis Prevention and Recovery.
- United Nations-International Strategy for Disaster Reduction (UN-ISDR) (2005) *United Nations. Bureau for Crisis Prevention and Recovery. Reducing Disaster Risk: A Challenge for Development*.
- USGS (2004) USGS fact sheet. Accessed at <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/fs-2004-3072.html> In: *Landslides and Processes*.
- Uzielli, M., Nadim, F., Lacasse, S., Kaynia, A.M. (2008) A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides. *Eng Geol* 102(3-4):251–256.
- Van Den Eeckhaut, M., Hervás, J. (2012) State of the art of national landslide databases in Europe and their potential for hazard and risk assessment. *Geomorphology* 139–140:545–558.
- Van Den Eeckhaut, M., Jaedicke, C., Hervás, J., Malet, J.P., Nadim, F. (2012) Statistical modelling of Europe-wide landslide susceptibility using limited landslide inventory data. *Landslides* 9:357–369.
- Van Dijk, J.P., Bello, M., Brancaleoni, G.P., Cantarella, G., Costa, V., Frixia, A., Golfetto, F., Merlini, S., Riva, M., Torricelli, S., Toscano, C., Zerilli, A. (2000) A regional structural model for the northern sector of the Calabrian Arc (southern Italy). *Tectonophysics* (324) 267–320.
- Van Dijk J.P. e Okkes M. (1991) Neogene tectonostartigraphy and kinematics of the Calabrian basins; implications for the geodynamics of the central Mediterranean. *Tectonophysics*, 196, 23-60.
- Van Westen, C.J. (1993) *Application of geographic information systems to landslide hazard zonation*. Ph.D. dissertation. ITC publ. no. 15. ITC, Enschede, p 245.
- Van Westen, C.J. (1997) *Statistical landslide hazard analysis, ILWIS 2.1 for Windows application guide*, ITC publication, Enschede, The Netherlands, pp 73.84.



- Van Westen, C.J., Alkema, D., Damen, M.C.J., Kerle, N., Kingma N.C. (2011) Multi-hazard risk Assessment. Distance education course. Guide book. United Nations University - ITC School on Disaster Geoinformation Management (UNU-ITC DGIM).
- Van Westen, C.J., Van Asch, T.W.J., Soeters, R. (2005) Landslide hazard and risk zonation; why is it still so difficult? *Bull Eng Geol Environ* 65(2):167–184.
- Varnes, D.J. (1958) Landslide types and processes, in “Landslides and Engineering Practice”, a cura di Ekel E.B., Highway Research Board Spec. Rep., 29, 20-47.
- Varnes, D.J. (1978) Slope movements, type and processes. In: Schuster R.L. & Krizek R.J. (Eds.), *Landslides analysis and control*. Washington Transportation Research Board, Special Report 176. National Academy of Sciences, WA, 11-33.
- Varnes, D.J. e IAEG Commission on Landslides and other Mass-Movements (1984) *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. The UNESCO Press, Paris, 63 pp.
- Versace, P., Ferrari, E., Gabriele, S., Rossi F. (1989) *Valutazione delle piene in Calabria*. Geodata, n°30, Cosenza.
- Vezzani, L. (1967) Il bacino plio-pleistocenico di S.Arcangelo (Lucania). *Atti Acc. Gioienia Sci. Nat. Catania*, 6 (18), Suppl. Sc. Geol., 207-227.
- Villagrán de León, J. C. (2006) *Vulnerability A Conceptual and Methodological Review*. UNU-EHS. UNU. No 4/2006.
- Voogd, H.: *Multi Criteria Evaluation for Urban and Regional Planning*, Pion Limited London, 367 pp., 1983.
- Wang, K.L., Lin, M.I. (2010) Development of shallow seismic landslide potential map based on Newmark’s displacement: the case study of Chi–Chi earthquake, Taiwan. *Environ Earth Sci* 60:775–785.
- Wang, W., Xie, C., Du, X. (2009) Landslides susceptibility mapping based on geographical information system, GuiZhou, south-west China. *Environmental Geology*, 58(1), 33-43.
- Westaway, R. (1993) Quaternary uplift of Southern Italy. *J. Geophys. Res.* 98B, 21741–21772.
- White, I.D., Mottershead, D.N., Harrison, J.J. (1996) *Environmental Systems*, 2nd Edition. London: Chapman & Hall, 616 pp.

- Wieczorek, G.F. (1984) Preparing a detailed landslide-inventory map for hazard evaluation and reduction. *Bulletin Association Engineering Geologists*, 21:3 337-342.
- Wieczorek, G.F., Gori, P.L., Jager, S., Kappel, W.M., Negussey, D. (1996) Assessment and management of landslide hazards near Tully Valley landslide, Syracuse, New York, USA. *Proc VII Int Symp Landslides, Trondheim, June 1996*, 1 : 411–416.
- Wischmeier, W.H. e Smith, D.D. (1978) *Predicting Rainfall Erosion Losses—A Guide to Conservation*. Agricultural Handbook 537. US Department of Agriculture: Washington, DC.
- Wong, H.N., Ho, K.K.S., Chan, Y.C. (1997b) Assessment of consequence of landslides. In: Cruden D, Fell R (eds) *Landslide risk assessment*. A.A. Balkema, Rotterdam, pp 111–149.
- Wood, J.D. (1996) *The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Model*, PhD Thesis, University of Leicester.
- Woodcock, N.H. e Fisher, M. (1986) Strike-slip duplexes. *J. Struct. Geol.*, 8, 725-735.
- WP/WLI - International Geotechnical societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory (1993) A suggested method for describing the activity of a landslide. *International Association Engineering Geology Bulletin*, 47: 53-57.
- Wright, R.H., Campbell, R.H., Nilsen, T.H. (1974) Preparation and use of isopleth maps of landslide deposits. *Geology*, 2: 483-485.
- Yalçın, A. (2007) The Use of Analytical Hierarchy Process and GIS in Production of Landslide Susceptibility Maps, *J. Faculty Eng. Archit. Selcuk Univ.*, 22(3): 1-14.
- Yalçın, A. (2008) GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparison of results and confirmations. *Catena* 72:1–12.
- Yesilnacar, E. e Topal, T. (2005) Landslide susceptibility mapping: a comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey). *Eng Geol* 79(3–4):251–266.
- Yevjevich, V. (1972) *Probability and Statistics in Hydrology*. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado. 302 pp.
- Yilmaz, I. (2009) Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: a case study from Kat landslides (Tokat-Turkey). *Comput Geosci*, 35 (6): 1125–1138

- Yilmaz, I. (2010) Comparison of landslide susceptibility mapping methodologies for Koyulhisar, Turkey: conditional probability, logistic regression, artificial neural networks, and support vector machine. *Environ Earth Sci* 61(4):821–836.
- Yin, K.J., Yan, T.Z. (1988) Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks. In: *Proc 5th Int Symp on Landslides*, vol 2, Lausanne, Switzerland, 10–15 July 1988, 2:1269–1272.
- Yoshimatsu, H. e 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.
- Zêzere, J.L., Garcia, R.A.C., Oliveira, S.C., Reis, E. (2008) Probabilistic landslide risk analysis considering direct costs in the area north of Lisbon (Portugal). *Geomorphology*, 94, 467-495.
- Zêzere, J.L., Oliveira, S.C., Garcia, R.A.C., Reis, E. (2007) Landslide risk analysis in the area North of Lisbon (Portugal): evaluation of direct and indirect costs resulting from a motorway disruption by slope movements. *Landslides* 4(2):123–136. doi:10.1007/s10346-006-0070-z.
- Zêzere, J.L., Reis, E., Garcia, R., Oliveira, S., Rodrigues, M.L., Vieira, G., Ferreira, A.B. (2004) Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Haz. Earth Sys Science* 4, 133–146.
- Zevenbergen, L.W. e Thorne, C.R. (1987) Quantitative analysis of land surface topography, *Earth Surface processes and Landforms*, 12:47–56.
- Zinck, J.A., López, J., Metternicht, G.I., Shrestha, D.P., Vázquez-Selem, L. (2001) Mapping and modelling mass movements and gullies in mountainous areas using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 3:1 43-53.

## **SITOGRAFIA**

Aree Storicamente Inondate in Calabria [www.camilab.unical.it/Banche\\_Dati/cerca\\_in\\_asical](http://www.camilab.unical.it/Banche_Dati/cerca_in_asical)

Associazione Italiana Bitume Asfalto Strade [www.siteb.it](http://www.siteb.it)

Autorità di Bacino dell'Arno <http://www.adbarno.it>

Autorità di Bacino della Calabria <http://www.regione.calabria.it/abr/>  
 Autorità di Bacino del Po <http://www.adbpo.it>  
 Catasto Provincia di Cosenza [www.catasto.provincia.it](http://www.catasto.provincia.it)  
 Inventario Fenomeni Franosi in Italia <http://www.progettoiffi.isprambiente.it>  
 Intergovernmental Panel on Climate Change [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)  
 Piano Territoriale Coordinamento Provinciale prov.Cosenza  
<http://web.provincia.cs.it/ptcp/ptcp.htm>  
 Progetto AVI <http://avi.gndci.cnr.it/>  
 Provention Consortium <http://www.proventionconsortium.org/>  
 Studio Centri Abitati Instabili <http://www.gndci.cnr.it/it/scai>  
 UN – ISDR <http://www.unisdr.org/eng/library/lib-terminology-eng%20home.html>

## **Elenco delle figure**

<b>2.1</b> Nomenclatura delle parti di un movimento franoso (da Carrara et al., 1985).....	12
<b>2.2</b> Nomenclatura su un movimento franoso nel comune di Amendolara (CS).....	12
<b>2.3</b> Classificazione dei movimenti franosi (da Cruden e Varnes, 1996, mod.).....	13
<b>2.4</b> a: frana complessa quiescente (C.le Careto); b: colata attiva (T.te Ferro); c: crolli ripetuti (versante nord-ovest M.te Sellaro); d: scorrimento traslativo (Cerchiara di Calabria).....	14
<b>2.5</b> Stato di attività, stile di attività e tipo di distribuzione delle frane (da Cruden e Varnes, 1996).....	15
<b>2.6</b> Esempio di carta inventario delle frane: geomorfologica e a media scala. Dettaglio dell'area nord-orientale della Calabria, in scala 1:50000 (da Conforti et al., 2014, mod.).....	18
<b>2.7</b> Aspetti caratterizzanti di un evento franoso potenzialmente pericoloso (da van Westen, 2011; mod.).....	19
<b>2.8</b> Metodi per la valutazione della suscettibilità da frana (da Corominas et al., 2014; mod.)....	21
<b>2.9</b> Schema delle metodologie per la valutazione della suscettibilità da frana: vantaggi e svantaggi, scala di applicabilità (P= piccola; M= media; D= dettaglio; R= ridotta; S= soddisfacente) (da Aleotti e Polloni, 2005; mod.).....	24
<b>2.10</b> a) Curvatura planare: divergenza e convergenza del flusso in base alla disposizione delle isoipse; b) Curvatura di profilo (da Linee Guida Progetto PON 01_01503).....	28
<b>2.11</b> Sintesi dei tipi di perdite (da van Westen, 2011; mod.).....	37
<b>4.1</b> Ubicazione dell'area di studio.....	51
<b>4.2</b> Schema neotettonico dell'Arco Calabro Peloritano (da Ghisetti, 1979).....	53
<b>4.3</b> Carta geologico-strutturale del settore settentrionale dell'Arco Calabro. Da Tortorici (1982).....	55
<b>4.4</b> Principali strutture tettoniche della Calabria settentrionale (Van Dijk et al., 2000).....	57
<b>4.5</b> Unità litologiche dell'area di studio.....	59
<b>4.6</b> Unità scistoso-gneissica.....	58
<b>4.7</b> Unità scistoso-filladica.....	60
<b>4.8</b> Unità calcareo-arenacea e unità arenaceo-sabbiosa.....	61
<b>4.9</b> Unità conglomeratica, unità sabbiosa e unità argillosa.....	62
<b>4.10</b> Unità granitoide e unità calcareo – marmorea.....	63
<b>4.11</b> Unità alluvionale e unità eluvio-detritico-colluviale.....	63
<b>4.12</b> Carta geologica dell'area di studio.....	64
<b>4.13</b> Panoramica dell'area di studio.....	68
<b>4.14</b> Discontinuità altimetriche e planimetriche di crinale.....	69

4.15	Carta dell'energia del rilievo dell'area di studio.....	70
4.16	Valle dalla tipica forma a "V".....	71
4.17	Erosione idrica lineare.....	71
4.18	Conoide alluvionale allo sbocco di una valle.....	71
4.19	Reticolo idrografico dell'area di studio.....	72
4.20	Carta geomorfologica dell'area di studio.....	73
4.21	Stazioni di monitoraggio considerate per l'area di studio.....	76
4.22	Precipitazioni medie mensili delle stazioni analizzate.....	77
4.23	Distribuzione media mensile dei giorni piovosi delle stazioni analizzate.....	77
4.24	Temperature medie mensili delle stazioni termometriche considerate.....	77
4.25	Schema metodologico dell'approccio applicato.....	78
4.26	Carte inventario dei fenomeni franosi, relative al 1954 e al 2014.....	82
4.27	Distribuzione area-frequenza delle frane profonde cartografate nell'area di studio.....	83
4.28	Carta dell'indice di franosità nell'area di studio.....	83
4.29	Percentuali delle tipologie e dello stato di attività dei fenomeni franosi per le carte inventario relative agli anni 1954 e 2014.....	84
4.30	Frana attiva sul lato a monte dell'autostrada.....	85
4.31	Estese fratture longitudinali e trasversali all'intero di una frana attiva localizzata a monte del tracciato autostradale.....	85
4.32	Carta inventario delle frane superficiali.....	86
4.33	Schema logico di sintesi dell'analisi statistica bivariata.....	88
4.34	Schema logico di sintesi dell'analisi statistica multivariata.....	90
4.35	Fattori predisponenti utilizzati nell'analisi di suscettibilità delle frane profonde.....	91
4.36	Fattori predisponenti utilizzati nell'analisi di suscettibilità delle frane superficiali.....	91
4.37	Schema del metodo <i>Hazard Index</i> per la valutazione della suscettibilità da frana.....	93
4.38	Istogrammi della distribuzione dei pesi relativi agli scorrimenti, alle frane complesse e alle frane totali per ogni classe dei fattori predisponenti.....	96
4.39	Realizzazione della carta di suscettibilità.....	97
4.40	Carte della suscettibilità da frana per a) scorrimenti, b) frane complesse (scorrimenti-colate), c) totale delle frane dell'area di studio.....	97
4.41	Distribuzione areale dei valori di suscettibilità per a) scorrimenti, b) frane complesse (scorrimenti-colate), c) totale delle frane.....	98
4.42	Schema del modello di analisi condizionale per la valutazione della suscettibilità da frana.....	98
4.43	Schema del procedimento per la definizione delle UCUs.....	99
4.44	Calcolo delle UCUs.....	101
4.45	Esempio delle UCUs ottenute nell'area di studio.....	101
4.46	Carte della suscettibilità da frana per a) scorrimenti, b) frane complesse (scorrimenti-colate), c) totale delle frane dell'area di studio.....	102
4.47	Distribuzione areale dei valori di suscettibilità per a) scorrimenti, b) frane complesse (scorrimenti-colate), c) totale delle frane.....	102
4.48	Schema del metodo <i>Weight of Evidence</i> per la valutazione della suscettibilità da frana.....	104
4.49	Carta della suscettibilità da frane superficiali.....	106
4.50	Curve <i>success rate</i> per il modello di suscettibilità degli scorrimenti, delle frane complesse e delle frane totali.....	109
4.51	Curve <i>success rate</i> per il modello di suscettibilità degli scorrimenti, delle frane complesse e delle frane totali.....	110
4.52	Classi di suscettibilità calcolate con i metodi <i>Hazard Index</i> e Analisi Condizionale, applicati agli scorrimenti, alle frane complesse e alle frane totali.....	112
4.53	Confronto delle curve <i>prediction rate</i> e del valore AUC per i metodi Analisi Condizionale e <i>Hazard Index</i> .....	113
4.54	a) Curva <i>success rate</i> ; b) Curva <i>prediction rate</i> .....	114
4.55	Restringimenti di carreggiata a causa di movimenti franosi sul tratto di autostrada considerato.....	116
4.56	Rischio spaziale da frane profonde per il tratto di autostrada considerato.....	118

<b>4.57</b> Rischio spaziale da frane superficiali per il tratto di autostrada considerato.....	118
<b>5.1</b> Ubicazione dell'area di studio.....	120
<b>5.2</b> Area di studio nel comune di Amendolara.....	121
<b>5.3</b> Schema cinematico del Mediterraneo centrale. Sono evidenziati i principali domini strutturali e le aree di deformazione marcanti la zona di collisione tra Africa e Europa (da Ben Avraham et al., 1990).....	122
<b>2.4</b> Arco Calabro - Peloritano nell'orogene appenninico – maghrebide (da Amodio- Morelli <i>et al.</i> , 1976).....	124
<b>5.5</b> Sezione geologica schematica attraverso l'Appennino calabro-lucano (da Cello et al., 1989).....	125
<b>5.6</b> Foglio 535 “Trebisacce”, in scala 1:50000 della Carta Geologica d'Italia (Monaco e Tortorici, 2008).....	127
<b>5.7</b> Schema strutturale della zona trascorrente pleistocenica su terreni carbonatici (da Catalano et al., 1993).....	129
<b>5.8</b> Schema strutturale della zona trascorrente pleistocenica su terreni alloctoni (da Catalano et al., 1993).....	130
<b>5.9</b> Carta litologica dell'area di studio.....	132
<b>5.10</b> Alternanza arenaceo-pelitica, Formazione di Albidona (Burdigaliano-Langhiano).....	133
<b>5.11</b> Sabbie di Amendolara (Pleistocene Inf.).....	133
<b>5.12</b> Argille marnose del T.te Straface (Pleistocene Inf.).....	134
<b>5.13</b> Conglomerati dei terrazzi marini (Pleistocene medio-superiore).....	135
<b>5.14</b> Modello digitale del terreno del settore nord-orientale della Calabria.....	136
<b>5.15</b> Visione tridimensionale dell'area di studio.....	139
<b>5.16</b> a)morfologia dolce su depositi argillosi; b)versante acclive in un'area interessata da frane ed erosione areale.....	140
<b>5.17</b> Carta geomorfologica dell'area di studio.....	141
<b>5.18</b> Terrazzo sul quale è ubicato il centro abitato di Amendolara.....	142
<b>5.19</b> Incisioni con caratteristiche forme a “V”.....	143
<b>5.20</b> Forme calanchive.....	143
<b>5.21</b> Porzione terminale del T.te Straface.....	144
<b>5.22</b> a) scorrimenti; b) colate.....	145
<b>5.23</b> Zona d'intensa erosione sul versante sud-ovest del terrazzo.....	146
<b>5.24</b> Precipitazione totale annuale.....	148
<b>5.25</b> Precipitazione totale rispetto agli anni idrologici.....	150
<b>5.26</b> Piogge giornaliere massime negli anni idrologici.....	149
<b>5.27</b> Schema metodologico dell'approccio applicato.....	151
<b>5.28</b> Carta inventario dei fenomeni franosi, anno 2014.....	154
<b>5.29</b> Percentuali delle tipologie e dello stato di attività dei fenomeni franosi.....	155
<b>5.30</b> Densità di frana nell'area di studio.....	156
<b>5.31</b> Procedura schematica per la valutazione spaziale multi-criteriale basata sul processo gerarchico analitico (da van Westen et al., 2011).....	161
<b>5.32</b> Componenti del processo di analisi euristica della suscettibilità da frana.....	162
<b>5.33</b> “Criteria tree” nel modulo SMCE di Ilwis.....	165
<b>5.34</b> Mappa dei pesi finale ed il corrispondente istogramma, che mostra la statistica del valore dei pixels.....	166
<b>5.35</b> Mappa della suscettibilità da frana, realizzata mediante il metodo euristico.....	167
<b>5.36</b> Diagramma di flusso delle fasi del metodo <i>Hazard Index</i> .....	168
<b>5.37</b> Mappa della suscettibilità da frane profonde, realizzata mediante il metodo <i>Hazard Index</i> .....	170
<b>5.38</b> Mappa della suscettibilità da frane superficiali, realizzata mediante il metodo <i>Hazard Index</i> .....	172
<b>5.39</b> Diagramma di flusso delle fasi del metodo <i>Weight of Evidence</i> .....	173
<b>5.40</b> Mappa della suscettibilità da frane profonde, realizzata mediante il metodo <i>Weight of Evidence</i> .....	177

<b>5.41</b> Mappa della suscettibilità da frane superficiali, realizzata mediante il metodo <i>Weight of Evidence</i> .....	180
<b>5.42</b> Curva ROC per il metodo spaziale multi-criteriale.....	181
<b>5.43</b> Curve <i>prediction</i> e <i>success rate</i> e valore dell'AUC per il modello di suscettibilità da frane profonde (a) e da frane superficiali (b).....	182
<b>5.44</b> Curve <i>prediction</i> e <i>success rate</i> e valore dell'AUC per il modello di suscettibilità da frane profonde (a) e da frane superficiali (b).....	183
<b>5.45</b> <i>Exceedance probability</i> dell'occorrenza delle frane ottenuta dal calcolo dell'intervallo di ricorrenza media degli eventi di frana del passato, assumendo che resterà uguale in futuro.....	188
<b>5.46</b> Distribuzione delle aree in frana.....	190
<b>5.47</b> Mappe di pericolosità per le frane profonde.....	192
<b>5.48</b> Mappe di pericolosità per le frane superficiali.....	192
<b>5.49</b> Abitazioni distrutte a causa delle frane innescatesi durante l'evento alluvionale dell'inverno 1973-'72.....	194
<b>5.50</b> Danni alle strade causati da movimenti gravitativi.....	195
<b>5.51</b> Dati sugli edifici nell'area di studio.....	196
<b>5.52</b> Dati sulle strade nell'area di studio.....	196
<b>5.53</b> Distribuzione spaziale della vulnerabilità degli edifici e delle strade esposti a frane profonde (a) e a frane superficiali (b).....	198
<b>5.54</b> Mappe del rischio da frana (costi diretti in euro) per gli edifici, considerando le frane profonde.....	200
<b>5.55</b> Mappe del rischio da frana (costi diretti in euro) per gli edifici, considerando le frane superficiali.....	200
<b>5.56</b> Rischio da frana (costi diretti in Euro) per gli edifici, considerando tutte le magnitudo delle frane in tre scenari di pericolosità: a) 1 anno; b) 3 anni; c) 5 anni.....	201
<b>5.57</b> Mappe del rischio da frana (costi diretti in euro) per le strade, considerando le frane profonde.....	202
<b>5.58</b> Mappe del rischio da frana (costi diretti in euro) per le strade, considerando le frane superficiali.....	202
<b>5.59</b> Rischio da frana (costi diretti in Euro) per le strade, considerando tutte le magnitudo delle frane in tre scenari di pericolosità: a) 1 anno; b) 3 anni; c) 5 anni.....	204

## **Elenco delle tabelle**

<b>4.2</b> Quote caratteristiche dell'area di studio (m s.l.m.).....	50
<b>4.2</b> Caratteristiche climatiche del bacino del Fiume Savuto.....	75
<b>4.3</b> Caratteristiche delle stazioni di misura.....	76
<b>4.4</b> Dati utilizzati e loro fonti.....	78
<b>4.5</b> Incremento della franosità tra il 1954 e il 2014.....	81
<b>4.6</b> Area in frana nel 1954 e nel 2014.....	81
<b>4.7</b> Fattori predisponenti la franosità.....	90
<b>4.8</b> Valori dei pesi calcolati per i fattori predisponenti utilizzati nell'analisi di suscettibilità per gli scorrimenti ("scorr."), per le frane complesse ("compl") e per la totalità delle frane (tot.). In grassetto i pesi delle classi maggiormente influenti, in corsivo quelli che influiscono meno.....	95
<b>4.9</b> Esempio di possibili combinazioni di UCU.....	100
<b>4.10</b> Valori dei pesi, $W^+$ e $W^-$ , e dei contrasti C calcolati per i fattori predisponenti scelti. In grassetto i pesi $W^+$ delle classi maggiormente influenti, in corsivo quelli che influiscono meno.....	105
<b>4.11</b> Pesi finali delle classi dei fattori predisponenti. In grassetto i pesi delle classi maggiormente influenti, in corsivo quelli che influiscono meno.....	107
<b>4.12</b> Distribuzione delle frane nelle diverse classi di suscettibilità.....	109
<b>4.13</b> Distribuzione delle frane nelle diverse classi di suscettibilità.....	110

4.14 Percentuale delle classi di suscettibilità nella mappa e delle frane che ricadono all'interno di esse.....	113
5.1 Caratteristiche della stazione pluviometrica considerata. Valori calcolati sul periodo 1921-1980 (da Iovine e Merenda, 1996; mod.).....	147
5.2 Dati utilizzati e loro fonti.....	152
5.3 Fattori predisponenti la franosità.....	159
5.4 Matrice decisionale multi-criteriale (da Castellanos Abella e van Westen, 2007, mod.)....	160
5.5 Variabili del modello euristico.....	162
5.6 Valori standardizzati assegnati alle classi di tutte le variabili.....	164
5.7 Pesì assegnati ai criteri attraverso il metodo “Rank Ordering”.....	165
5.8 Area e percentuale delle classi di suscettibilità.....	167
5.9 Valori dei pesì calcolati per i fattori predisponenti utilizzati nell'analisi di suscettibilità per le frane profonde. In grassetto i pesì delle classi maggiormente influenti, in corsivo quelli che influiscono meno.....	169
5.10 Area e percentuale delle classi di suscettibilità.....	170
5.11 Valori dei pesì calcolati per i fattori predisponenti utilizzati nell'analisi di suscettibilità per le frane superficiali. In grassetto i pesì delle classi maggiormente influenti, in corsivo quelli che influiscono meno.....	171
5.12 Area e percentuale delle classi di suscettibilità.....	172
5.13 Valori dei pesì, $W^+$ e $W^-$ , e dei contrasti C calcolati per i fattori predisponenti scelti. In grassetto è indicato il valore del contrasto maggiore, in corsivo quello minore.....	174
5.14 Pesì finali delle classi dei fattori predisponenti. In grassetto i pesì delle classi maggiormente influenti, in corsivo quelli che influiscono meno.....	176
5.15 Area e percentuale delle classi di suscettibilità.....	177
5.16 Valori dei pesì, $W^+$ e $W^-$ , e dei contrasti C calcolati per i fattori predisponenti scelti. In grassetto il valore del contrasto maggiore, in corsivo quello che influisce meno.....	178
5.17 Pesì finali delle classi dei fattori predisponenti. In grassetto i pesì delle classi maggiormente influenti, in corsivo quelli che influiscono meno.....	179
5.18 Area e percentuale delle classi di suscettibilità.....	180
5.19 Valori dell'AUC per il metodo <i>Hazard Index</i> e <i>Weight of Evidence</i> .....	184
5.20 Numero degli eventi di frane profonde e di frane superficiali.....	187
5.21 Classificazione delle aree in frana (magnitudo) sulla base dei rilievi sul campo.....	190
5.22 Dati per il calcolo della pericolosità.....	191
5.23 Valori di vulnerabilità considerando l'esposizione a frane superficiali e a frane profonde nell'area di studio.....	197
5.24 Valore cumulato del rischio da frana espresso in costi diretti (Euro) per gli elementi esposti (edifici e strade) considerando gli scenari 1 anno, 3 anni e 5 anni. In grassetto il valore del rischio totale per i tre scenari.....	203

## PUBBLICAZIONI

### Articoli su riviste nazionali e internazionali

- Conforti M., **Rago V.**, Muto F., Critelli S. – Landslide spatio-temporal distribution and risk zoning for Amendolara urban area (northern Calabria, Italy). In preparazione.
- Conforti M., **Rago V.**, Muto F., Critelli S. - GIS-based landslide susceptibility assessment for the north-eastern Calabria (South Italy). In preparazione.
- Conforti M., Buttafuoco G., **Rago V.**, Aucelli P.P.C., Robustelli G., Scarciglia F. (2015) - “Soil loss map of the Turbolo catchment 1 (Calabria, Italy)”. *Journal of Maps*, <http://dx.doi.org/10.1080/17445647.2015.1077168>.
- Conforti M., **Rago V.**, Muto F., Critelli S. (2014) – “Caratterizzazione della franosità nel settore ionico della Calabria settentrionale”. *Geologia Tecnica e Ambientale*, 2: 9-25, 07/2014.
- Formetta G., **Rago V.**, Capparelli G., Rigon R., Muto F., Versace P. (2014) – “Integrated Physically based system for modeling landslide susceptibility”. *Procedia Earth and Planetary Science*, 9: 74-82.



- Conforti M., Muto F., **Rago V.**, Critelli S. (2014) - "Landslide inventory map of north-eastern Calabria (South Italy)". *Journal of maps* Vol.10, 1, pp. 90-102.

#### **Articoli pubblicati su atti di convegno**

- **Rago V.**, Muto F., Armaş I., Conforti M. – "Landslide susceptibility mapping using a spatial multi-criteria methodology in Amendolara town (Southern Italy)". "La geologia dell'Italia meridionale: un convegno in memoria di Antonino Ietto". Cosenza, 11 Dicembre 2015. Accettato per la pubblicazione sui Rendiconti Online della Società Geologica Italiana.

- **Rago V.**, Muto F., Armaş I., Conforti M., Gheorghe D. – "A comparison of GIS-based landslide susceptibility methods in Amendolara town (southern Italy)". *Proceedings of the International Conference: Geo-Risks in the Mediterranean and their Mitigation*, 20-21 Luglio 2015, Malta, p. 325.

- Conforti M., Rago V., Muto F., Versace P. – "Landslide spatial risk assessment along the highway in Calabria, (southern Italy)". *Proceedings of the International Conference: Geo-Risks in the Mediterranean and their Mitigation*, 20-21 Luglio 2015, Malta, p. 297.

- Muto F., Conforti M., **Rago V.**, "Landslide susceptibility assessment". In: "Sistemi integrati per il monitoraggio, l'early warning e la mitigazione del rischio idrogeologico lungo le grandi vie di comunicazione". *Libro dei Sommari delle Giornate dell'Idrologia 2014 della Società Idrologica Italiana*, Cosenza, 26-28 Novembre, 2014, pp. 12-18.

- Muto F., Conforti M., **Rago V.**, "Landslide susceptibility assessment". In: "Integrated Systems for Hydrogeological Risk Monitoring, Early Warning and Mitigation along the main lifelines". *Quaderni del CamiLab*, a cura di Versace P., Anno 4, Numero 6, Novembre 2014, pp. 6-12.

- Muto F., Conforti M., **Rago V.**, "Landslide susceptibility assessment". In: "Aspetti idrologici e idraulici per il controllo dei movimenti franosi". A cura di Capparelli G. e Greco R., XXXIV Convegno Nazionale di idraulica e Costruzioni Idrauliche, Bari, 7-10 Settembre, 2014, pp. 6-12.

- **Rago V.**, Conforti M., Muto F., Critelli S., "Landslide susceptibility assessment in the Ferro Torrent (Calabria, south Italy) using GIS-based Conditional analysis method". IX Convegno Nazionale dei Giovani Ricercatori di Geologia Applicata, Napoli, 14-15 Febbraio 2013. *Rend. Online Soc. Geol. It., Nuova serie*, 2013, Vol. 24, pp. 257-259.

#### **Abstracts convegni**

- Scarciglia F., Morrone F., Pelle T., Buttafuoco G., Conforti M., Muto F., Critelli S., Fabbriatore D., Filomena L., **Rago V.**, Robustelli G., Tripodi V., Versace P. – "Soil discontinuities as potential factors of shallow landslides: a case study from Calabria, southern Italy". *Atti del convegno "European Geosciences Union General Assembly"*, Vienna, Austria, 12 - 17 Aprile 2015, Vol. 17, p. 13407.

- Iovine G.G.R., **Rago V.**, Frustaci F., Bruno C., Giordano S., Muto F., Gariano S.L., Pellegrino A.D., Conforti M., Pascale S., Distilo D., Basile V., Soleri S., Terranova O.G. – "Improving accuracy in shallow-landslide susceptibility analyses at regional scale". *Atti del convegno "European Geosciences Union General Assembly"*, Vienna, Austria, 12 - 17 Aprile 2015, Vol. 17, p. 2079.

- Scarciglia F., Morrone F., Pelle T., Buttafuoco G., Conforti M., Muto F., Critelli S., Fabbriatore D., Filomena L., **Rago V.**, Robustelli G., Tripodi V., Versace P. – "Pedological discontinuities as potential factors of shallow landslides". *Workshop World Soil Day 2014 - Il Suolo nella Pianificazione Territoriale*, Alghero, 6 Dicembre 2014. *Abstract book*, p. 58.

- **Rago V.**, Conforti M., Muto F., Versace P. – "Modelling of landslide spatial hazard along a section of motorway of the Calabria region (Southern Italy) using a GIS-based statistical method." *DAMES 2014 - the 4th International Conference on Data Analysis and Modeling in Earth Sciences*, 6-8 Ottobre 2014, Milano. *Abstract book*, pp. 24-25.

- Conforti M., **Rago V.**, Muto F., Versace P. – "Preliminary analysis of spatial landslide risk along the highway in Calabria, (southern Italy)". *17th Joint Geomorphological Meeting* 30 Giugno - 3 Luglio 2014, Liegi, Belgio. *Abstract book*, pp. 50-51.

- Muto F., Conforti M., Critelli S., Fabbriatore D., Filomena L., **Rago V.**, Robustelli G., Scarciglia F., Versace P. – "Multidisciplinary approach to evaluate landslide susceptibility

along highway in northern Calabria, Italy". Atti del convegno "European Geosciences Union General Assembly", Vienna, Austria 27 Aprile - 2 Maggio 2014, Vol. 16, p. 15281.

- **Rago V.**, Conforti M., Muto F., Critelli S., "Analysis of landslide susceptibility in the Alto Jonio area (northern Ionian Calabria) by means of statistical GIS - based approach.". IX Forum di Scienze della Terra, FIST. Pisa, 16-18 Settembre 2013. Epitome, 5, p. 160.

- Conforti M., Muto F., **Rago V.**, Critelli S., "Landslide susceptibility mapping in a catchment of the southern Calabria (Southern Italy) using bivariate statistic method and GIS". IX Forum di Scienze della Terra, FIST. Pisa, 16-18 Settembre 2013. Epitome, 5, p. 157.

- Perri F., Borrelli L., Muto F., Gullà G., Critelli S., Conforti M., Filomena L., **Rago V.**, "Weathering processes as predisposing factors of the landscape evolution along plutono-metamorphic profiles of the Sila Massif, Calabria, southern Italy.". Atti del convegno "European Geosciences Union General Assembly", Vienna, Austria, 07-12 Aprile 2013, Vol.15, p. 11584.

### **Premi e riconoscimenti**

- Il lavoro dal titolo: "Pedological discontinuities as potential factors of shallow landslides" (autori: Scarciglia F., Morrone F., Pelle T., Buttafuoco G. Conforti M., Muto F., Critelli S., Fabbriatore D., Filomena L., **Rago V.**, Robustelli G., Tripodi V., Versace P.), presentato al "Workshop World Soil Day 2014 - Il Suolo nella Pianificazione Territoriale, Alghero, 6 Dicembre 2014", è stato premiato come poster migliore.

**SCUOLA DI DOTTORATO ARCHIMEDE**  
**Indirizzo in "Scienze e Tecnologie dei Sistemi Complessi"**  
**XXVIII Ciclo**

**Relazione finale del Collegio dei Docenti relativa al**  
**Dott.ssa Valeria Rago**

Durante i tre anni della Scuola di Dottorato “Archimede”, curriculum in **Scienze e Tecnologie dei Sistemi Complessi**, XXVIII Ciclo, la candidata **Valeria Rago** ha approfondito le diverse aree tematiche previste dal corso di studi, dedicandosi, proficuamente, a ricerche che hanno prodotto risultati originali di pregevole interesse scientifico.

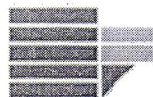
Durante i tre anni, la candidata ha partecipato attivamente a corsi di formazione avanzata tenuti dai membri del Collegio dei Docenti, a seminari e cicli di seminari, a convegni, approfondendo la sua formazione di base anche con lo studio di testi specialistici e di articoli scientifici pubblicati su riviste internazionali.

Pur non trascurando l’interdisciplinarietà che caratterizza il dottorato, il candidato ha rivolto il suo interesse scientifico verso uno specifico campo di ricerca che ha scelto come settore di interesse primario: **Valutazione del rischio da frana con parametrizzazione e combinazione di una serie di fattori di natura geologica ambientale e socio-economica per l’analisi degli aspetti spazio – temporali e delle variazioni della vulnerabilità degli elementi fisici e antropici esposti a rischio.**

In considerazione di quanto detto sopra, il Collegio dei Docenti ritiene estremamente positivo sia il livello di competenze e di conoscenze acquisite, sia la capacità di sfruttare tale bagaglio culturale nello svolgimento di ricerche originali, come testimoniano le pubblicazioni, nazionali e internazionali, che il candidato ha prodotto nel corso dei tre anni.

La tesi finale di dottorato presentata dalla candidata costituisce, a parere del Collegio dei Docenti, una significativa sintesi organica del percorso di ricerca e di studio e dei risultati ottenuti.

Il Coordinatore del Curriculum  
Prof.ssa Eleonora Bilotta



Università della Calabria

**DICHIARAZIONE PER IL DEPOSITO DELLE TESI DI DOTTORATO  
NELL'ARCHIVIO ISTITUZIONALE DI ATENEO**

Al Magnifico Rettore  
Università della Calabria

Io sottoscritta RAGO VALERIA  
nata a CASSANO ALLO JONIO il 15-12-1985  
titolo della tesi: VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ E DEGLI SCENARI DI PERICOLOSITÀ E DI RISCHIO DA FRANA IN AREE DI INTERESSE SOCIO-ECONOMICO (CALABRIA SETTENTRIONALE)  
soggetto della tesi: VALUTAZIONE DEL RISCHIO DA FRANA  
parole chiave (indicarne 5) FRANE - VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ - ANALISI DEL RISCHIO - GIS - CALABRIA  
denominazione del corso di dottorato: SCIENZE E TECNOLOGIE DEI SISTEMI COMPLESSI  
dipartimento: DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO E INGEGNERIA CHIMICA  
tutor: PROF. GAUJARDO PIERO  
coordinatore: PROFESSA BILOTTA ELEONORA

dichiaro, sotto la mia responsabilità,

di essere a conoscenza:

- del fatto che in caso di dichiarazioni mendaci, oltre alle sanzioni previste dal codice penale e dalle Leggi speciali per l'ipotesi di falsità in atti ed uso di atti falsi, decado fin dall'inizio e senza necessità di nessuna formalità dai benefici conseguenti al provvedimento emanato sulla base di tali dichiarazioni;
- dell'obbligo per l'Università di provvedere, per via telematica, al deposito di legge delle tesi di dottorato al fine di assicurarne la conservazione e la consultabilità da parte di terzi;
- del fatto che l'Università della Calabria ha aderito in data 4 novembre 2004 alla "Dichiarazione di Berlino per l'accesso aperto alla letteratura scientifica";<sup>1</sup>
- del fatto che l'Università della Calabria, sulla base dei dati forniti, archiverà e renderà consultabile in rete il testo completo della tesi di dottorato di cui alla presente dichiarazione attraverso l'Archivio istituzionale ad accesso aperto su piattaforma DSpace, oltre che attraverso i Cataloghi delle Biblioteche Nazionali Centrali di Roma e Firenze;

dichiaro altresì

<sup>1</sup> Vedi il documento all'indirizzo <[http://www.sssup.it/UploadDocs/7109\\_Dichiarazione\\_di\\_Messina.pdf](http://www.sssup.it/UploadDocs/7109_Dichiarazione_di_Messina.pdf)>, ultimo accesso 19/10/2012.

Inoltre, si veda la Dichiarazione di Berlino all'indirizzo <[http://www.zim.mpg.de/openaccessberlin/BerlinDeclaration\\_it.pdf](http://www.zim.mpg.de/openaccessberlin/BerlinDeclaration_it.pdf)>, ultimo accesso 19/10/2012.

- che la copia della tesi depositata in DSpace in forma elettronica è del tutto identica a quelle consegnate/inviate in formato cartaceo ai membri della Commissione dell'Esame Finale e che di conseguenza va esclusa qualsiasi responsabilità dell'Ateneo stesso per quanto riguarda eventuali errori, imprecisioni o omissioni nei contenuti della tesi;
- di prendere atto che la copia depositata in DSpace è l'unica alla quale farà riferimento l'Università per rilasciare, a mia richiesta, la dichiarazione di conformità di eventuali copie;
- che il contenuto e l'organizzazione della tesi è opera originale da me realizzata e non compromette in alcun modo i diritti di terzi, e che pertanto l'Università della Calabria è in ogni caso esente da qualsiasi responsabilità di qualsivoglia natura, civile, amministrativa o penale e sarà da me tenuta indenne da qualsiasi richiesta o rivendicazione da parte di terzi;
- che la tesi di dottorato non è il risultato di attività rientranti nella normativa sulla proprietà industriale, non è stata prodotta nell'ambito di progetti finanziati da soggetti pubblici o privati con vincoli alla divulgazione dei risultati, non è oggetto di eventuali registrazioni di tipo brevettuale o di tutela, oppure, **qualora la tesi sia oggetto di registrazione di tipo brevettuale o di tutela (barrare una delle caselle di interesse):**
  - che il contenuto della tesi è in corso di pubblicazione (la tesi non sarà consultabile per un periodo di 12 mesi a partire dalla data di conseguimento del titolo di dottore di ricerca);
  - che la tesi è oggetto di registrazioni di tipo brevettuale o di tutela (la tesi non sarà consultabile per un periodo di 24 mesi a partire dalla data di conseguimento del titolo di dottore di ricerca);
  - che la tesi include informazioni ottenute sotto promessa di confidenzialità (l'accesso al testo completo della tesi sarà limitato ai soli utenti istituzionali dell'Università).

Si allega una copia della presentazione del Collegio dei Docenti, firmata dal Coordinatore.

Data 27/11/2015

Valeria Pajo  
(Firma del dottorando)

DEI DECA UTIONE

IL COORDINATORE DEL CORSO

Pietro Sento

I dati inseriti saranno trattati unicamente per finalità istituzionali dell'Università della Calabria (Codice in materia di protezione dei dati personali – d.lg. 30/6/2003, N. 196).