

Università degli Studi di Napoli Federico II
Scuola Politecnica e delle Scienze di Base
Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse



tesi di dottorato in Scienze della Terra

***Analisi della qualità delle carte della suscettività da frana
a grande scala topografica implementando algoritmi ad
apprendimento automatico e l'analisi spaziale***

Tutor:
Professor Giuseppe Nardi

Candidato:
dott. Andrea Genito

Cotutor:
Professor Domenico Calcaterra

Napoli 2016

index

absract	1
1 introduzione	2
1.1 scopi	2
1.2 metodologie	5
1.2.1 tipologie di algoritmi	6
1.2.2 algoritmi	8
2 fenomeni franosi	10
2.1 definizione del fenomeno	10
2.2 suscettibilità, pericolosità e rischio	17
2.3 autorità di bacino	19
2.4 piani stralcio per l'assetto idrogeologico	20
3 ottimizzazione dei P.S.A.I.	22
4 trattamento quantitativo	26
4.1 metodi	26
4.1.1 metodo euristico	26
4.1.2 metodo statistico	27
4.1.3 metodo deterministico	28
4.2 approccio algoritmico	29
4.3 apprendimento automatico (Machine Learning Approach)	30
4.3.1 apprendimento supervisionato	32
4.3.1.a - albero decisionale C4.5	35
4.3.1.b - support vector machine (SVM)	39
5 inquadramento geologico regionale	43
5.1 le unità tettono-stratigrafiche della Catena sudappenninica	43
6 il caso dell'ex Autorità di Bacino Interregionale del Fiume Sele	50
6.1 P.S.A.I. 2009	52
6.2 procedura adottata per la definizione del rischio da frana	56

6.3 descrizione dettagliata dei prodotti	64
6.3.1 Carta delle UTR e dei distretti litologici	64
6.3.2 Carta degli Scenari di Franosità	72
6.3.3 Carta degli Scenari del Rischio	77
6.3.4 Carta della Pericolosità	83
6.3.5 Carta del Rischio	91
7 metodologie	98
7.1 premessa	98
7.2 metodologia <i>Geo-S.Co.Ma.L.</i>	102
7.3 tecnologia gis	105
7.4 scienze computazionali e analisi spaziale	106
8 elaborazioni	108
8.1 input data	110
8.2 training data	113
8.3 output data	117
9 discussione e conclusioni	121
10 bibliografia	125

PhD Thesis:

Analisi della qualità delle carte della suscettività da frana a grande scala topografica implementando algoritmi ad apprendimento automatico e l'analisi spaziale

Tutor: Professor Giuseppe Nardi

PhD candidate: dott. Andrea Genito

Cotutor: Professor Domenico Calcaterra

key word: Geoinformatica, Machine Learning, SVM, GIS, Geologia Applicata, Suscettività da frana, Carte del Rischio.

Abstract

The *Autorità di Bacino* is the Italian agency in charge of landslides prevention. It is responsible for redacting the P.S.A.I. (*Piani Stralcio per L'Assetto Idrogeologico*) and to guarantee its updates through landslide reshaping survey. This is undertaken through reporting submitted from the local authorities within the relevant drainage basin. The objective of this research is to optimize the landslide susceptibility assessment in the P.S.A.I. redacting and their updates. The *Autorità di Bacino* implement the susceptibility assessment of landslide events through GIS technologies, employing spatial analysis techniques based on Boolean algebra (overlay). This study proposes a new methodology to improve the resolution (quality) of the landslide susceptibility, based upon the **Machine Learning Approach**. This new methodology has been labelled **Geo-S.Co.Ma.L.** and was realised using the **SVM** algorithm, on which geological constraints) were applied by means of geoprocessing techniques. Through the comparisons of different releases of the ex AbiSele P.S.A.I., the *Geo-S.Co.Ma.L.* methodology appears to be capable to foresee a higher number of landslide events than the Boolean algebra, and thus to calculate the landslide susceptibility with greater detail.

1 introduzione

Il presente lavoro di tesi ha lo scopo di evidenziare i limiti dei criteri fin qui utilizzati per la redazione di *Piani Stralcio per l'Assetto Idrogeologico*, e di proporre dei criteri di ottimizzazione sfruttando la tecnologia GIS.

Tale ricerca è iniziata durante la partecipazione allo sviluppo del P.S.A.I. 2009 dell'ex Autorità di Bacino Interregionale del Fiume Sele (AbiSele). L'analisi (monitoraggio delle realizzazioni) degli aggiornamenti dei P.S.A.I. fino al 2014 ha permesso di individuare i principali limiti e di definire, dopo aver testato differenti metodologie, nuovi criteri di ottimizzazione basati sull'utilizzo di algoritmi del **Machine Learning** (apprendimento automatico). I risultati raggiunti in questa tesi sono stati confrontati con il P.S.A.I. 2014, mettendo così in luce la validità delle innovazioni apportate.

1.1 scopi

La presente tesi si colloca in un contesto di difesa del suolo rispetto al dissesto di natura idrogeologica. Da un punto di vista istituzionale (legge 183/89), l'Autorità di Bacino è l'ente italiano preposto al coordinamento di una pianificazione territoriale relativa alla pericolosità e al rischio idrogeologico (capitolo 2.3). La ricerca oggetto di questo progetto di dottorato propone una metodologia di ottimizzazione della valutazione della suscettività da frana che possa essere utilizzata dagli enti preposti alla difesa del suolo. Per le Autorità di Bacino ad esempio, tale metodologia può costituire un valido strumento di supporto e validazione durante la redazione di *Piani Stralcio per l'Assetto Idrogeologico* (P.S.A.I.). Questi Piani sono oggi realizzati attraverso l'uso della tecnologia GIS, sfruttando processi di analisi spaziali di

overlay/intersect, utilizzando quindi i principi della logica Booleana¹, tra differenti strati informativi di natura vettoriale.

Lo scopo di questa tesi è stato di aumentare la risoluzione (qualità) della suscettività da frana, attraverso una nuova metodologia definita **Geo-S.Co.MaL**², basata sulle *analisi spaziali* come vincoli per le tecniche di **Machine Learning**, e attraverso un successivo confronto quantitativo e qualitativo con i dati in possesso dalle Autorità di Bacino.

La metodologia **Geo-S.Co.MaL** ha mostrato un'elevata risoluzione nella definizione di scenari di suscettività, pur lavorando ad una scala di dettaglio di 1:10.000. Essa si adatta quindi perfettamente alle esigenze delle Autorità di Bacino, impegnate nella realizzazione di uno strumento di pianificazione redatto a scala comunale (1:10.000) e derivato a scale inferiori per l'intero bacino (1:25.000 e 1:100.000). La metodologia realizzata si rivela pertanto estremamente utile nella gestione degli aspetti economici e sociali connessi ad un rischio di natura idrogeologica.

La ricerca è stata condotta su dati messi a disposizione dell'Autorità di Bacino del fiume Sele, ed in particolare su quelli relativi all'ex Autorità di Bacino Interregionale AbiSele (Campania Basilicata). Le banche dati utilizzate sono quelle relative alle edizioni dei P.S.A.I. 2009 e 2014.

Sfruttando le definizioni di Rischio e Pericolosità di frana ($R=P \times V \times E$), le Autorità di Bacino attualmente realizzano una serie di layer che vengono intersecati tra di loro per ricavare gli strati informativi di P e R attraverso una serie di elaborazioni che l'operatore ripete svariate volte, seguendo uno schema predefinito.

La proposta oggetto di questa ricerca è di raggiungere la definizione delle aree ad alta suscettività da frana realizzando un procedimento automatizzato attraverso

¹ In matematica e logica matematica l'algebra di Boole, anche detta algebra Booleana o reticolo Booleano, è il ramo dell'algebra in cui le variabili possono assumere solamente i valori vero e falso (valori di verità), generalmente denotati come 1 e 0 rispettivamente; le operazioni fondamentali non sono addizione e sottrazione ma operatori logici: la congiunzione (o prodotto logico) è indicata con \wedge oppure AND; la disgiunzione (o somma logica) con \vee oppure OR; la negazione (o complementazione) con \neg oppure NOT. Con tale formalismo si possono descrivere le relazioni logiche in modo simile a quanto fa l'algebra ordinaria con le relazioni numeriche: la combinazione di AND, OR e NOT permette di sviluppare qualsiasi funzione Booleana e i tre operatori logici formano pertanto un insieme funzionalmente completo. In analisi spaziale, agli operatori AND, OR e NOT corrispondono rispettivamente le operazioni di *overlay* di UNION, INTERSECT e IDENTITY.

² **Geo-Spatial Constricted Machine Learning**. La metodologia sviluppata in questa ricerca è basata sull'utilizzo di tecniche di apprendimento automatico alle quali, attraverso l'analisi spaziale, vengono applicati dei vincoli geologici imposti dalla cartografia geotematica di base.

l'uso del *Model Builder*, e cioè un ambiente di *programmazione orientata agli oggetti* e finalizzato a creare flussi di analisi spaziale al cui interno saranno implementati algoritmi di apprendimento automatico che si basano quindi su *osservazioni come dati per la sintesi di nuova conoscenza*. L'apprendimento avviene pertanto catturando caratteristiche di interesse provenienti da dati campione analizzati per valutarne le relazioni.

L'apprendimento automatico (noto in letteratura come ***Machine Learning***) è, di per sé, un campo multidisciplinare. Esso si basa sui risultati di intelligenza artificiale, probabilità e statistica, teoria della complessità computazionale, teoria di controllo, teoria dell'informazione, filosofia, psicologia, neurobiologia e di altri campi. Rappresenta una delle aree fondamentali dell'intelligenza artificiale, il cui obiettivo principale è quello di imparare a riconoscere automaticamente modelli complessi e prendere decisioni intelligenti basate su dati.

Esistono in bibliografia differenti tipologie di algoritmi ad apprendimento automatico, che possono essere utilizzati con differenti approcci.

1.2 metodologie

L'**apprendimento automatico** (noto in letteratura come ***Machine Learning***) è una metodologia usata per costruire *modelli previsionali* estraendo modelli da grandi insiemi di dati. Questa metodologia è utilizzata in applicazioni di *analisi predittiva* di dati, tra cui la previsione dei prezzi, la previsione del comportamento della clientela, la valutazione dei rischi, la previsione di fenomeni naturali, e la classificazione dei documenti.

L'apprendimento può avvenire catturando caratteristiche di interesse provenienti da esempi, strutture dati o sensori, per analizzare e valutare le relazioni tra le variabili osservate.

Uno degli obiettivi principali della ricerca sull'apprendimento automatico è quello di imparare a riconoscere automaticamente modelli complessi e prendere decisioni intelligenti basate su dati; la difficoltà risiede nel fatto che, l'insieme di tutti i possibili comportamenti, dati tutti gli input possibili, è troppo grande per essere coperto da insiemi di esempi osservati (dati di allenamento). Da qui scaturisce la necessità di utilizzare tecniche in grado di generalizzare gli esempi citati, in modo da essere in grado di produrre un rendimento utile per casi nuovi.

In realtà siamo ben lontani da riprodurre sistemi di apprendimento automatico che simulano l'apprendimento umano. Sono stati tuttavia realizzati efficaci algoritmi per compiti di apprendimento, che sono utilizzati soprattutto in contesti commerciali.

Ad esempio, gli algoritmi basati sull'apprendimento automatico mostrano i migliori risultati per problemi come il riconoscimento vocale. Nel campo conosciuto come *data mining*³, questi algoritmi sono utilizzati di routine per acquisire preziose conoscenze a partire da grandi basi di dati commerciali contenenti un grande numero di informazioni.

³ Insieme di tecniche e metodologie che hanno per oggetto l'estrazione di un sapere o di una conoscenza a partire da grandi quantità di dati (attraverso metodi automatici o semi-automatici) e l'utilizzo scientifico, industriale o operativo di questo sapere.

L'apprendimento automatico è di per sé un campo multidisciplinare. Tom M. Mitchell (1997) ha fornito una definizione che include qualsiasi programma per computer che migliora le sue prestazioni per un certo compito attraverso l'esperienza. Più precisamente:

« un programma apprende da una certa esperienza E se: nel rispetto di una classe di compiti T , con una misura di prestazione P , la prestazione P misurata nello svolgere il compito T è migliorata dall'esperienza E .»

1.2.1 tipologie di algoritmi

Apprendimento supervisionato

Nell'apprendimento supervisionato il *training data*⁴ è composto da una coppia di esempi determinata da un oggetto di input (tipicamente un vettore) e da un valore di output desiderato (anche chiamato *supervisory signal*). Un algoritmo di apprendimento supervisionato genera una funzione di inferenza (classificatore) che dovrebbe essere in grado di predire il corretto valore di output per ogni input valido.

Apprendimento non supervisionato

Nell'apprendimento non supervisionato gli algoritmi trovano relazioni nascoste in strutture di dati non classificati, e di cui non è possibile valutare una soluzione. L'apprendimento non supervisionato è strettamente collegato al problema di stima di densità in statistica.

Esperienza con apprendimento continuo

Questi algoritmi partono dal presupposto di disporre di un meccanismo semplice in grado di valutare le scelte dell'algoritmo e quindi premiare o punire l'algoritmo a seconda del risultato. Essi sono in grado di adattarsi anche a modifiche sostanziali dell'ambiente; un esempio di questi algoritmi è identificabile nei

⁴ Porzione di dati utilizzati per addestrare l'algoritmo a compiere previsioni su ulteriori porzione di dati.

programmi di riconoscimento vocale o nei programmi di OCR⁵ che, con un progressivo utilizzo, migliorano le loro prestazioni.

Esperienza con addestramento preventivo

Questi algoritmi partono dalla constatazione che valutare costantemente le azioni dell'algoritmo può essere un procedimento non automatizzabile oppure molto costoso e, in questo caso, si applica una prima fase in cui si istruisce l'algoritmo e quando il sistema viene ritenuto affidabile viene "cristallizzato" e reso non più modificabile. Molti componenti elettronici usano le reti neurali, i cui pesi sinaptici non sono modificabili in quanto sono fissati durante la realizzazione del circuito.

⁵ I sistemi di riconoscimento ottico dei caratteri (*Optical character recognition*), sono programmi dedicati alla conversione di un'immagine contenente testo, in un testo digitale e editabile.

1.2.2 algoritmi

Albero di Decisione

L'albero di decisione è un metodo di apprendimento, per approssimazione, di una funzione discreta in cui l'elemento che apprende è rappresentato da un albero di decisione. Gli alberi di decisione possono essere rappresentati da un insieme di regole *if-else* per migliorare la leggibilità umana.

Rete neurale artificiale

Una rete neurale artificiale è un sistema adattivo che cambia la sua struttura basata su informazioni, esterne o interne, che scorrono attraverso la rete durante la fase di apprendimento. In termini pratici, le reti neurali sono strutture non-lineari di dati statistici organizzate come strumenti di modellazione. Esse possono essere utilizzate per simulare relazioni complesse tra ingressi e uscite, che altre funzioni analitiche non riescono a rappresentare. Inoltre, esse sono resistenti agli errori presenti nel *training data*.

Programmazione Genetica

Gli algoritmi genetici forniscono un approccio all'apprendimento che è liberamente ispirato all'evoluzione simulata. La ricerca di una soluzione del problema comincia con una popolazione di soluzioni iniziali. I membri di tale popolazione danno luogo a una popolazione di nuova generazione per mezzo di operazioni quali la mutazione casuale e *crossover*, che sono modellati sui processi di evoluzione biologica. Ad ogni passo, le soluzioni della popolazione attuale sono valutate rispetto a una determinata misura di *fitness*, in base alle ipotesi ritenute più adatte e quindi selezionate (probabilisticamente) come "semi" per la produzione della prossima generazione. Gli algoritmi genetici sono stati applicati con successo a una varietà di compiti di apprendimento e di altri problemi di ottimizzazione. Ad esempio, essi sono stati usati per imparare raccolte di norme per il controllo di robot e per ottimizzare la topologia dei parametri di apprendimento per reti neurali.

Macchine a vettori di supporto

Le Macchine a vettori di supporto (**SVM**) consistono in un insieme di metodi di apprendimento supervisionato, usati per la classificazione e la regressione di *pattern*. Dato un insieme di esempi di addestramento, ciascuno contrassegnato come appartenente a due possibili categorie, un algoritmo di addestramento **SVM** costruisce un modello in grado di prevedere a quale categoria deve appartenere un nuovo esempio di input.

Clustering

La *cluster analysis*, o *clustering*, è l'assegnazione di un insieme di osservazioni in sottogruppi (*clusters*) tale che le osservazioni appartenenti allo stesso *cluster* sono simili in certe caratteristiche. Il *clustering* è un metodo di apprendimento non supervisionato, e una tecnica comune per l'analisi statistica dei dati.

Reti Bayesiane

Il *ragionamento bayesiano* fornisce un approccio probabilistico di inferenza. Esso si basa sul presupposto che le quantità di interesse sono disciplinate da distribuzioni di probabilità e che le decisioni ottimali possono essere prese a seguito dell'analisi di queste probabilità insieme ai dati osservati. Nell'ambito dell'apprendimento automatico, la teoria Bayesiana è importante perché fornisce un approccio quantitativo per valutare le prove a sostegno dell'ipotesi alternativa. Il *ragionamento bayesiano* fornisce la base per l'apprendimento negli algoritmi che manipolano direttamente le probabilità.

2 fenomeni franosi

Le frane costituiscono da sempre un male cronico che affligge tutto il territorio italiano: l'Italia condivide con USA, India e Giappone il primato delle maggiori perdite economiche dovute alle frane. Per ognuno di questi Paesi i "costi delle frane" (diretti e indiretti) ammontano ad una cifra tra 1 e 5 mld di dollari all'anno (Schuster, 1996).

Secondo una ricerca del Servizio Geologico Nazionale (Catenacci, 1992), gli stanziamenti per le emergenze idrogeologiche dal dopoguerra al 1990 ammontano a ben 33.300 miliardi di lire (ben 5.925 solo per il quadriennio 1986-1990). Anche il costo in termini di vite umane è disarmante: il dissesto idrogeologico in Italia ha ucciso poco meno dei terremoti; dal dopoguerra al 1990 circa 3.500 vittime contro le 4.200 causate dai terremoti.

2.1 definizione del fenomeno

Prima di presentare la problematica oggetto di questa tesi, si ritiene quanto mai opportuno fornire un quadro delle conoscenze teoriche di base della fenomenologia frana, la comprensione della quale non può prescindere da considerazioni inerenti la tipologia del movimento.

Con il termine di frana o fenomeno franoso (movimenti di versante) si intende il movimento di materiale (roccia, detriti o terra) che avviene lungo i versanti. La frana appartiene dunque alla categoria dei movimenti di massa, ovvero ai processi morfogenetici caratterizzati dal movimento di materiale lungo i versanti ad opera della forza di gravità.

Esistono *cause innescanti* e *fattori predisponenti* che determinano questi processi morfogenetici, solitamente molteplici, complessi e spesso combinati tra loro.

Tra le *cause innescanti*:

- scalzamento al piede di un versante a opera di acque fluviali o litorali;
- processi di disgregazione meteorica;
- precipitazioni meteoriche particolari;
- attività sismica;

- attività antropica.

Tra i *fattori predisponenti*:

- presenza di intercalazioni argillose;
- elevata fratturazione;
- incoerenza del materiale;
- presenza di stratificazione, fessurazione, laminazione o scistosità (con giacitura a franappoggio);
- attività antropica.

Come in molti casi di dispute terminologiche, il concetto di frana ha subito svariate interpretazioni, così come le discipline scientifiche che trattano tale fenomenologia sono cambiate e si sono sviluppate nel tempo. Con il termine “frana” si può designare un singolo fenomeno o riferirsi, in maniera più generale, ad un insieme di più fenomeni che interessano una porzione di territorio. Di seguito è riportata una semplificazione di una delle più ampie definizioni e classificazioni approvate dalle comunità scientifiche (Fig. 2.1) e ad oggi la più utilizzata anche in contesti di gestione e mitigazione del rischio da frana, secondo questa definizione semplificata, la frana è *“un movimento controllato dalla gravità, superficiale o profondo, rapido o lento, in roccia o in terra”* (Varnes, 1984).

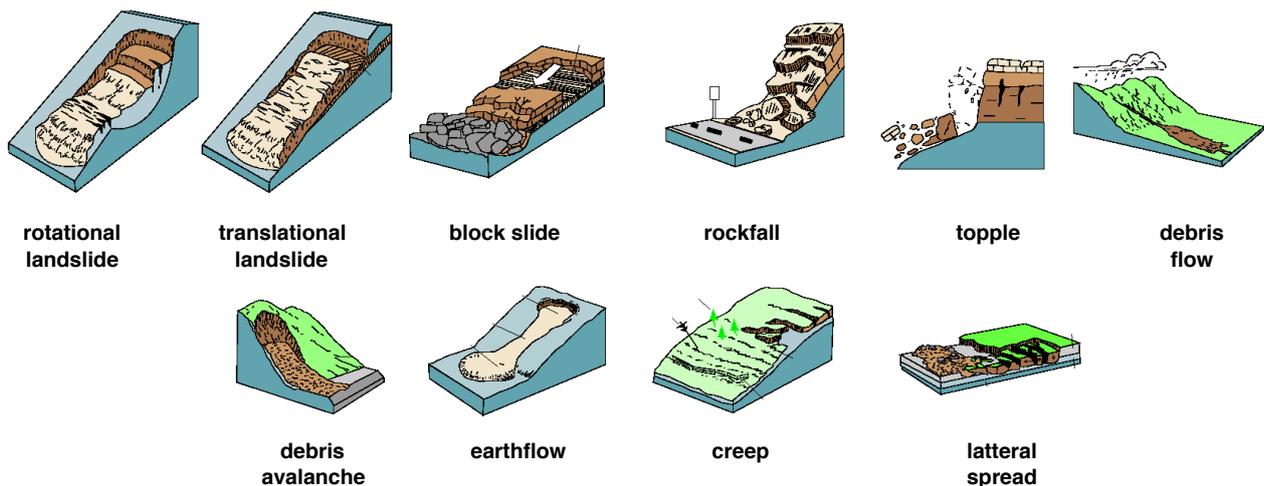


Figura 2.1. Classificazione semplificata di Varnes (Lynn et Bobrowsky 2008).

Varnes distingue cinque classi fondamentali di fenomeni:

1. crolli;
2. ribaltamenti;
3. scivolamenti (rotazionali e traslativi);
4. espansioni laterali;
5. colate;
6. complessi.

Ognuna di queste classi è quindi suddivisa ulteriormente, sulla base del tipo di materiale coinvolto nel fenomeno franoso in tre sottoclassi: roccia, detrito, terra (arrivando così ad un totale di circa 20 tipologie).

Segue una breve descrizione dei principali termini e principi della fenomenologia frana, al fine di introdurre la problematica principale di questa tesi.

Le frane sono movimenti verso il basso di roccia, detriti o masse di terreno, che di solito si sviluppano lungo superfici di discontinuità predefinite. Quest'ultime sono chiamate *superfici di rottura* e si propagano nella massa separando il materiale roccioso intatto dal sovrastante materiale in movimento. Ulteriori elementi di una frana sono il *coronamento* e la *testa*, separati da una *scarpata*; il *corpo principale*, canalizzato da fianchi; il *piede*, alla cui terminazione si distingue un'*unghia*; una *zona di accumulo* che racchiude le porzioni superiori di una frana; e una zona di accumulo che racchiude invece le porzioni inferiori di una frana (Fig. 2.2).

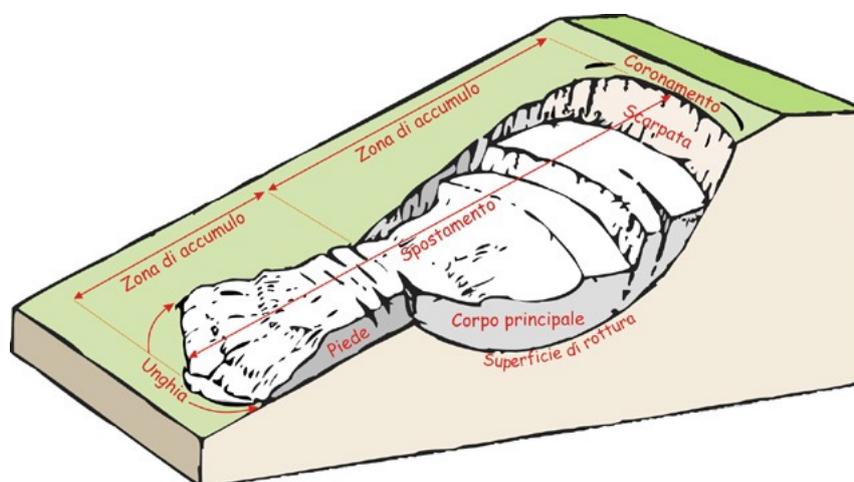


Figura 2.2. Schema di una frana.

Indipendentemente dagli elementi che le costituiscono, le frane possono drasticamente variare in dimensioni ed estensione, nonché in volumi coinvolti, velocità del movimento e ulteriori parametri (Fig. 2.3), risultando così un fenomeno molto vario e complesso da affrontare. Possono svilupparsi in pendii naturali o artificiali, e rappresentano di conseguenza un tema studiato in diversi settori scientifici, che vanno dalla geologia e geomorfologia, alla geotecnica e all'ingegneria civile, (Varnes 1984; Lee & Jones 2004).

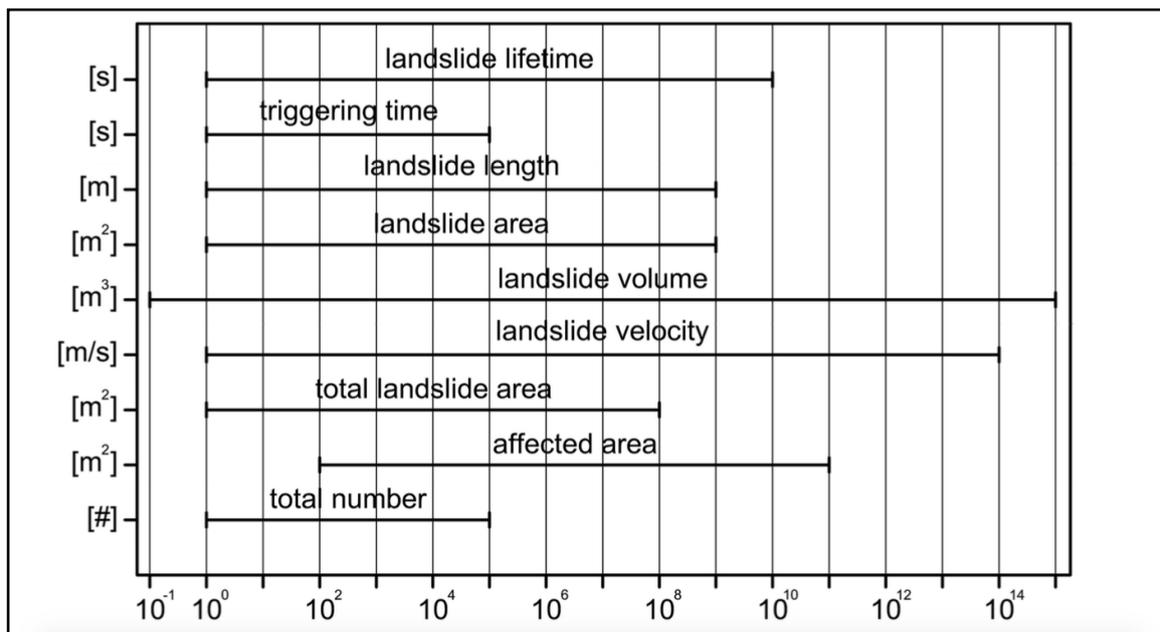


Figura 2.3. Possibili variazioni dei fenomeni franosi.

La stabilità del versante è legata all'equilibrio tra le forze che agiscono su un pendio. Il dislocamento si verifica quando le forze di resistenza cedono dalle forze gravitative, generando a sua volta il cambiamento irreversibile del pendio. Le prime, le forze di resistenza, sono rappresentate dalla resistenza al taglio e dal grado di coesione del materiale, nonché dall'attrito lungo una superficie di scorrimento. Altri fattori sono la natura e le condizioni dei materiali che costituiscono il versante (presenza di giunti e fessure, eterogeneità, contrasti di permeabilità, deformabilità, presenza/assenza di vegetazione), nonché la morfologia del versante (pendenza, altitudine, curvatura ecc). Le forze gravitative sono generalmente legate ad un aumento del peso o della sollecitazione al taglio (tramite saturazione d'acqua, aggiunta di carico, variazioni della geometria del versante), ad una perdita di sostegno (tramite erosione e variazioni della geometria del versante) o ad influenze dinamiche. Le caratteristiche che influenzano le forze gravitative e di resistenza, e soprattutto il loro equilibrio, sono comunemente chiamati *fattori di condizionamento*. A piccola scala questi possono essere rappresentati da diversi aspetti geologici, geomorfologici e ambientali. I *fattori di condizionamento* sono responsabili del

verificarsi di una frana. In seguito, il processo si svolge sotto l'influenza di diversi fattori scatenanti o anche attraverso una combinazione delle due tipologie di fattori. I fattori scatenanti più tipici sono: terremoti, eruzioni vulcaniche, piogge intense, brusco cambiamento di regime delle acque sotterranee, inondazione, rapido scioglimento della neve, erosioni successive e l'intervento antropico (Lee et Jones 2004).

Lo **stato di attività** di una frana è un altro parametro di notevole importanza, e che richiede una particolare attenzione al fine di una più corretta interpretazione del fenomeno. Una volta innescato il processo, le frane si sviluppano progressivamente e ciclicamente. Identificarne lo stato di attività è quanto mai necessario per valutare i tassi di spostamento futuri. In particolare, gli spostamenti relativi sono più frequenti durante l'attivazione iniziale e diminuiscono per ogni ciclo di riattivazione, ma la frequenza degli eventi aumenta durante la progressione verso una fase attiva. La fase del primo cedimento è seguita dalla fase di riattivazione e queste fasi sono intervallate dalle quelle fasi di sospensione e di quiescenza. Questo avvicendamento può ripetersi per ogni ciclo fino al raggiungimento della fase attiva (Fig. 2.4).

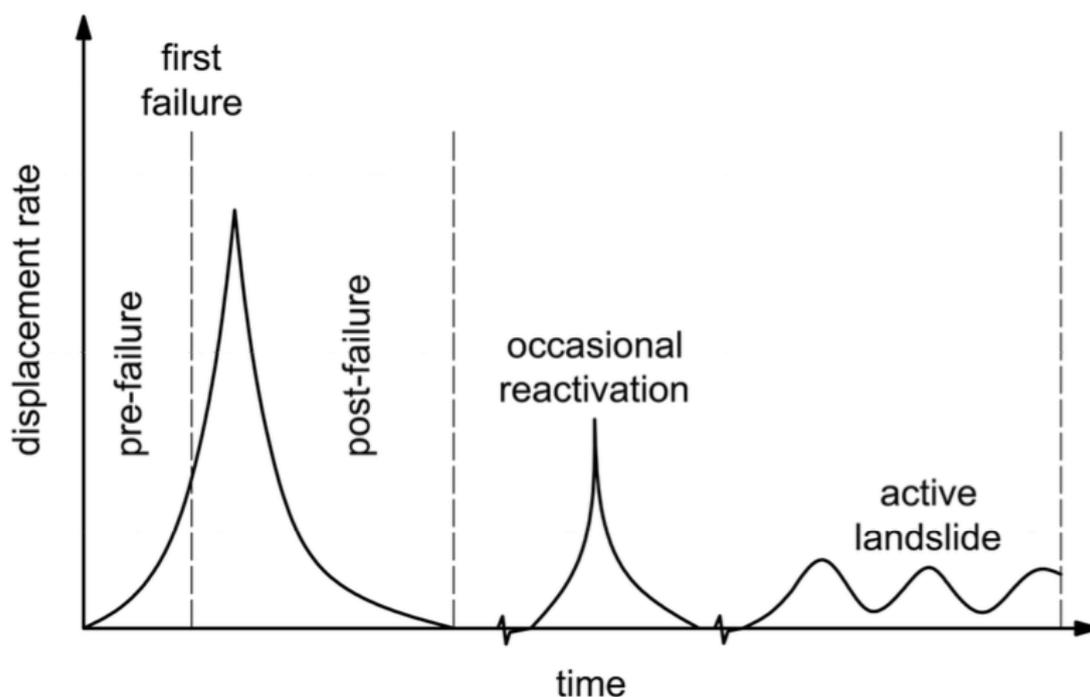


Figura 2.4. Stato di attività di una frana (ciclicità).

I **meccanismi di spostamento** possono caratterizzare ulteriormente il movimento franoso: crolli, ribaltamenti, scivolamenti, colate, espansioni laterali e complessi e creep. Unitamente alle informazioni sul tipo di materiale spostato, questi meccanismi di

spostamento costituiscono le basi per una classificazione del movimento franoso. A questi va inoltre aggiunta la velocità del fenomeno (a sua volta influenzato dalla tipologia del materiale e dal meccanismo di movimento), che può variare da estremamente lenta (mm all'anno per fenomeni quali gli scorrimenti) a estremamente rapida (metri al secondo nel caso di colate). I meccanismi di spostamento rappresentano le basi sulle quali è fondata la classificazione di Varnes (1978), adottata ancora oggi dalla comunità internazionale, e i suoi successivi sviluppi (Hungry et al. 2012).

Ogni tipo di frana può essere classificata tenendo conto principalmente della tipologia di materiale, del tipo di movimento, e attraverso considerazioni sullo stato di attività e sulla velocità del movimento. La fenomenologia in questione risulta tuttavia molto articolata, ricca di eccezioni che rendono molto complesso stilare una accurata sistematica. Come ogni classificazione, anche quella basata sullo schema di Varnes (1978) potrebbe soffrire di una certa semplificazione e soggettività, ma, considerata la complessità del fenomeno, può offrire continui spunti per ulteriori perfezionamenti (Guzzetti et al. 2012).

Nell'ottica di un continuo aggiornamento legato ad un fenomeno la cui definizione risulta estremamente complessa, di seguito è riportata la classificazione di Varnes (1978) così come appare in seguito ai più recenti sviluppi (Hungry et al. 2012), (Tab. 2.1, Fig. 2.5).

type of movement	rock	soil
fall	1 [*] rock fall	2 [*] boulder/debris/silt fall
topple	3 [*] rock block topple 4 [*] rock flexural topple	5 [*] gravel/sand/silt topple
slide	6 [*] rock rotational slide 7 [*] rock translational slide 8 [*] wedge slide 9 [*] rock compound slide 10 [*] rock collapse	11 [*] clay/silt rotational slide 12 [*] clay/silt translational slide 13 [*] gravel/sand/debris slide 14 [*] clay/silt compound slide
spread	15 [*] rock slope spread	16 [*] sand/silt liquefaction spread 17 [*] sensitive clay spread
flow	18 [*] rock avalanche	19 [*] sand/silt/debris dry flow 20 [*] sand/silt/debris flow slide 21 [*] sensitive clay flow slide 22 [*] debris flow 23 [*] mud flow 24 [*] debris flood 25 [*] debris avalanche 26 [*] earth flow 27 [*] peat flow
slope deformation	28 [*] mountain slope deformation 29 [*] rock slope deformation	30 [*] soil slope deformation 31 [*] soil creep 32 [*] solifluction

Tabella 2.1. Classificazione di Varnes (1978) / Hungry et al. 2012.

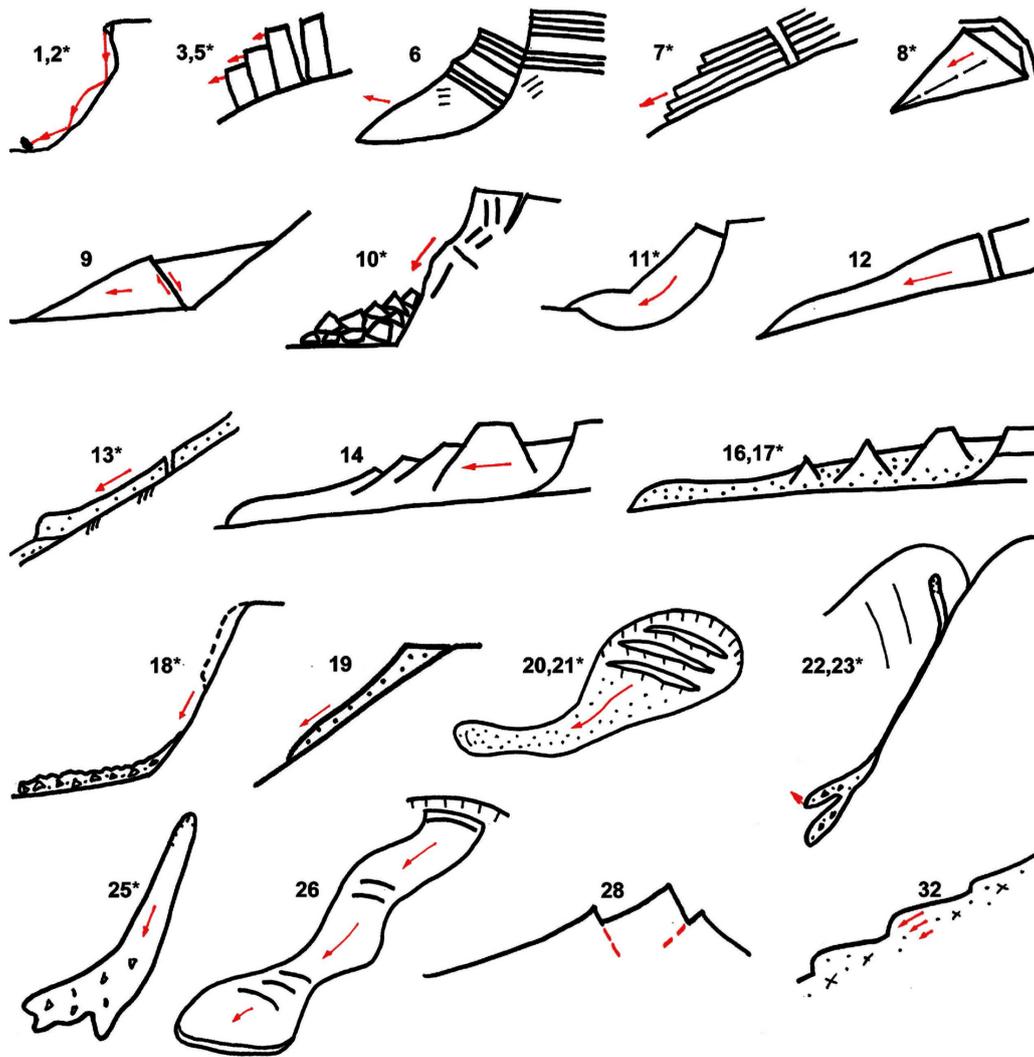


Figura 2.5. Classificazione di Varnes (1978); Hungr et al. 2012.

2.2 suscettibilità, pericolosità e rischio

I termini di *pericolo* e *rischio* vengono frequentemente utilizzati, con un ampio e intuitivo significato, con riferimento a ciò che spesso rappresenta un pericolo legato ad un determinato fenomeno naturale. I paragrafi che seguono sono dedicati ad un'articolazione del significato di questi concetti in un più dettagliato quadro quantitativo analitico, coerente con la terminologia approvata a livello internazionale dalle comunità geologiche-ingegneristiche. A partire da questo capitolo, tali termini saranno utilizzati esclusivamente in quest'ottica.

La **suscettibilità da frana** (*M*) è la stima della grandezza e della distribuzione spaziale di frane esistenti o di quelle che possono potenzialmente verificarsi su una superficie. Viene spesso anche considerata come una probabilità (prettamente spaziale) di accadimento del fenomeno franoso (Fell et al . 2008). Il concetto di grandezza di una frana può essere espresso attraverso la superficie totale, il suo volume o la sua velocità. Nonostante il fatto che i versanti con pendenze più accentuate saranno colpiti più frequentemente rispetto a quelli con pendenze meno accentuate, quello della suscettibilità rimane esclusivamente un concetto spaziale, senza alcuna considerazione temporale. Erroneamente, al concetto di suscettibilità sono spesso associati i termini *franosità potenziale*, *pericolo relativo*, e *densità totale da frana* (Lee & Jones 2004; Chacón et al . 2006).

La **pericolosità da frana** (*H*) rappresenta la probabilità del verificarsi di una frana su una determinata area, entro un determinato periodo di tempo (probabilità temporale - *p_t*). La pericolosità può essere considerata come una estensione temporale del concetto di suscettibilità. Frequentemente i due termini sono confusi, ma è sufficiente soffermarsi sull'aspetto temporale per farne una precisa distinzione. In realtà, la suscettibilità potrebbe essere considerata come un caso speciale di pericolo che ha un solo punto di vista temporale, invece di una serie storica (Einstein 1988; Lee & Jones 2004). In senso più ampio, il concetto di pericolo si fonda sulle stime dell'ordine di grandezza di un evento franoso (area o volume), e sulla probabilità di una sua ricorrenza (Eq. 1) (Fell 1994).

$$H = M \cdot p_t M \quad (1)$$

Gli **elementi a rischio** (ER) sono entità (corrispondenti a qualsiasi componente del territorio) potenzialmente colpite da un fenomeno dannoso. Possono essere elementi a rischio: la popolazione, i beni personali (immobiliari e non), le opere ingegneristiche e le

infrastrutture, le attività economiche, i servizi pubblici e i beni di valore ambientale. Contrariamente alla suscettibilità e alla pericolosità, il rischio frana è influenzato dalla presenza di elementi a rischio, e può essere diviso in diverse categorie a seconda della tipologia di elemento considerato (Lee & Jones 2004; Fell et al. 2008).

La **vulnerabilità** ($V(ER)$), indica il grado di perdita di un elemento a rischio. Può essere interpretata come una misura dell'esposizione verso il rischio, o come il potenziale danno subito. Inoltre, può variare spazialmente, temporalmente ed anche individualmente, generando tre diversi sottotipi di vulnerabilità. A titolo di esempio, un ospedale o una casa di riposo per anziani avrebbero una maggiore vulnerabilità totale rispetto a una fabbrica con lavoratori (l'esposizione temporale dei lavoratori è ridotta alle sole ore lavorative; i lavoratori hanno una capacità individuale di sopravvivere ad un evento dannoso maggiore rispetto a quella dei pazienti di un ospedale o di una clinica di riposo per anziani; di conseguenza la vulnerabilità individuale è inferiore), (Fell 1994; Lee & Jones 2004; Fell et al. 2008).

Il **rischio** (R) (Eq. 2) è l'indice della probabilità di accadimento di un fenomeno franoso e della gravità dei suoi effetti. La comprensione del concetto di rischio non è così scontata, a causa della flessibilità linguistica del termine stesso (come ad esempio le intuitive ma erranee analogie con i termini di suscettibilità, di pericolosità e di vulnerabilità) e soprattutto perché si tratta di un concetto legato al futuro. Come già anticipato, è possibile calcolare diverse categorie di rischio, considerando diverse tipologie di elementi a rischio (rischio sociale, rischio individuale, rischio di gruppo), ma anche diverse categorie legate al processo decisionale, quali il rischio accettabile e tollerabile (Fell del 1994; Lee & Jones 2004).

$$R = H \cdot V(ER) \quad (2)$$

2.3 autorità di bacino

L'**Autorità di Bacino** è un ente istituito con dalla legge 18 maggio 1989 n.183 (*Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo*).

È un organismo misto, costituito tra stato e regioni, operante sui bacini idrografici, considerati come sistemi unitari e ambiti ottimali per le azioni di difesa del suolo e del sottosuolo, il risanamento delle acque, la fruizione e la gestione del patrimonio idrico e la tutela degli aspetti ambientali ad essi connessi, indipendentemente dalle suddivisioni amministrative.

Questa innovazione legislativa nel settore della difesa suolo è da ricollegare ai lavori della Commissione De Marchi (1966), presieduta dal prof. Giulio De Marchi che ha creato i presupposti per una visione più ampia ed integrata dei problemi dell'assetto del territorio a scala di bacino. Infatti, la legge 183/89 individua il bacino idrografico come "l'unità fisica inscindibile" su cui operare con azioni finalizzate alla tutela, difesa e valorizzazione delle risorse esistenti.

Le Autorità di Bacino sono state istituite con lo scopo di superare le frammentazioni di competenza e istituzionali che non consentono una pianificazione unitaria e integrata, secondo un'impostazione ormai propria di tutti i maggiori bacini europei.

L'Autorità è il luogo di intesa e concertazione delle scelte di pianificazione tra le istituzioni interessate alla difesa e alla tutela, all'uso e al governo delle risorse del sistema territoriale, in linea con lo sviluppo sostenibile sociale, economico e ambientale. Essa costituisce il miglior strumento per la risoluzione di problemi di competenze e per una razionale ed unitaria pianificazione e programmazione fisico-ambientale e socio-economica. Il bacino idrografico, quindi, viene inteso come un ambito fisico di pianificazione che supera le frammentazioni finora prodotte dall'adozione di aree di riferimento aventi confini esclusivamente amministrativi. Da qui nasce la necessità di dar vita ad un Ente, *l'Autorità di Bacino*, che assicuri il coordinamento di tutte le azioni sul territorio.

In base alla legge 183/89, tutto il territorio nazionale è stato suddiviso in bacini idrografici, che hanno tre gradi di rilievo territoriale:

- bacini di rilievo nazionale;

- bacini di rilievo interregionale;
- bacini di rilievo regionale.

2.4 piani stralcio per l'assetto idrogeologico (P.S.A.I.)

Il *Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico* (P.S.A.I.) rappresenta lo stralcio di settore funzionale del Piano di Bacino relativo alla pericolosità e al rischio sia da frana, sia idraulico e contenente, in particolare, sia l'individuazione e la perimetrazione delle aree a rischio idrogeologico, sia le relative norme di attuazione.

Il P.S.A.I. ha come obiettivo un assetto del bacino che tenda a minimizzare i possibili danni connessi ai rischi idrogeologici, costituendo un quadro di conoscenze e di regole atte a dare sicurezza alle popolazioni, agli insediamenti, alle infrastrutture, alle attese di sviluppo economico e, in generale, agli investimenti nei territori del bacino.

In quanto premessa alle scelte di pianificazione territoriale, esso individua i meccanismi di azione, l'intensità e la localizzazione dei fenomeni estremi, così come la loro interazione con il territorio classificato in livelli di pericolosità e di rischio.

Il P.S.A.I. si configura, pertanto, come lo strumento di pianificazione territoriale attraverso il quale le Autorità di Bacino si propongono di determinare un assetto territoriale che assicuri condizioni di equilibrio e compatibilità tra le dinamiche idrogeologiche e la crescente antropizzazione del territorio, e di ottenere la messa in sicurezza degli insediamenti ed infrastrutture esistenti, e lo sviluppo compatibile delle attività future. Secondo l'iter previsto dalla L.365/00, il confronto in sede di incontri e conferenze programmatiche con le amministrazioni dei vari comuni ricadenti nel bacino, ha permesso poi di tarare le soluzioni proposte rispetto alle attese di sviluppo delle popolazioni del bacino.

Un P.S.A.I. persegue il miglioramento dell'assetto idrogeologico del bacino attraverso interventi strutturali (a carattere preventivo e per la riduzione del rischio) e disposizioni normative per la corretta gestione del territorio, per la prevenzione di nuove situazioni di rischio, per l'applicazione di misure di salvaguardia in casi di rischio accertato. Ciò accade secondo tre linee di attività:

- il rischio idraulico (aree inondabili delle piane alluvionali);
- il rischio geologico (dissesti di versante e movimenti gravitativi);
- l'efficienza dei bacini montani in termini di difesa idrogeologica.

Il Piano è stato infatti sviluppato sulle seguenti linee di attività:

- l'individuazione della pericolosità da frana e la perimetrazione delle situazioni di maggior rischio;
- l'individuazione della pericolosità e del rischio idraulico con riferimento al reticolo principale, secondario e minore, attraverso la perimetrazione delle aree inondabili per diversi tempi di ritorno, e la valutazione del rischio degli elementi esposti;
- la valutazione dell'efficienza idrogeologica dei versanti del bacino, con riferimento a 181 sottobacini considerati come unità territoriali di riferimento;
- l'analisi dei trend delle dinamiche idrogeologiche e dell'antropizzazione del territorio onde individuare le maggiori criticità e delineare le priorità di intervento;
- la definizione di un complesso di interventi a carattere strutturale e normativo.

3 ottimizzazione dei P.S.A.I.

La ricerca di una metodologia di ottimizzazione dei P.S.A.I. è stata incentrata sulle variazioni temporali dei fenomeni franosi. Il *problem solving* di questa tesi è stato quindi l'ottimizzazione della valutazione della suscettività da frana nella redazione dei piani di bacino.

Una valutazione di qualità della suscettività in un processo di aggiornamento continuo del Piano di Bacino presupporrebbe un periodico rifacimento totale delle cartografie di base, e delle relative cartografie derivate, al fine di ottenere una visione chiara dell'impatto del singolo evento franoso sulle variazioni territoriali a grande scala.

Un'operazione di questa portata richiederebbe tempi più lunghi nella redazione dei P.S.A.I. producendo, quindi, dei gap temporali, andando in contraddizione col ruolo originario dei P.S.A.I.

Gli attuali aggiornamenti dei P.S.A.I. sono realizzati attraverso interventi di ripermimetrazione degli eventi franosi sulla base delle segnalazioni dei vari comuni ricadenti nel bacino idrografico. Nel tentare di migliorare l'efficienza di tali piani di bacino, intervenendo sui criteri di individuazione della suscettività a franare per singola porzione di territorio, in questa tesi sono stati presi in considerazione e testati differenti approcci e metodologie avvalendosi del supporto informatico della tecnologia GIS.

Inizialmente è stata perseguita la strada dell'ottimizzazione procedurale, tentando di realizzare dei *flussi automatizzati e reiteranti di analisi spaziale* finalizzati al calcolo della suscettività da frana e alla gestione di sistemi di monitoraggio basati su sensori accelerometrici.

Al fine di ottenere per ogni sensore un quadro conoscitivo geologico completo, la gestione del sistema di monitoraggio è stata realizzata mediante una rappresentazione geo-grafica dei punti in cui sono stati posizionati i vari sensori (georeferenziati), e una correlazione di carattere spaziale sia con gli elaborati ricavati dai modelli digitali del terreno, quali *slope* e *aspect*, sia con i tematismi del P.S.A.I.

È stato in tal modo possibile interfacciare i sensori accelerometrici tanto con le banche dati del P.S.A.I. quanto con i modelli digitali del terreno ricavati dalla cartografia tecnica regionale. Questo ha consentito di conoscere, per ogni sensore installato, le condizioni del terreno, la direzione di massima pendenza, la litologia, la morfologia, la tipologia di frana e

l'intensità del movimento oltre ai valori di spostamento normalmente ricavati dai sensori.
(Fig. 3.1).

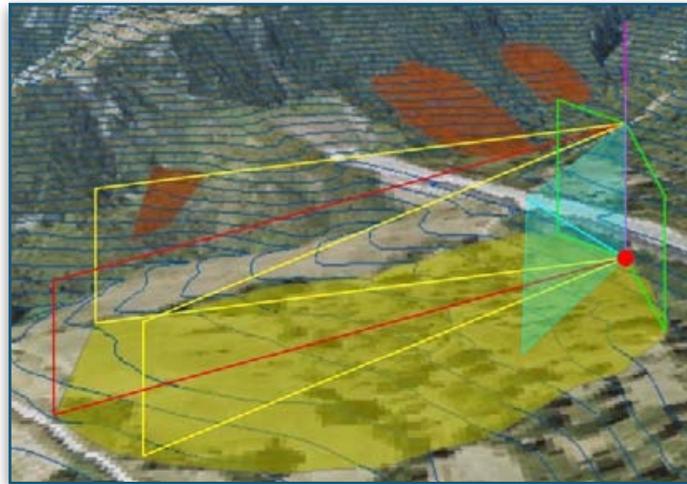


Figura 3.1. Rappresentazione del sistema di monitoraggio sulla cartografia del P.S.A.I.

Queste conoscenze hanno dunque permesso di contestualizzare le letture fornite dalla rete di sensori ed avere indicazioni più precise sulla configurazione delle soglie di allarme, consentendo, inoltre, di discriminare i falsi allarmi dovuti a spostamenti accidentali dei sensori. Questo maggior dettaglio nella configurazione delle soglie scaturisce dalla possibilità di effettuare dei confronti tra gli angoli e le direzioni ricavate dagli spostamenti dei sensori e i valori di inclinazione e di pendenza estrapolate dai DTM. Inoltre, la possibilità di conoscere, per ogni sensore le condizioni litologiche, morfologiche e quelle dei fenomeni franosi, ove presenti, ha permesso di effettuare una distinzione dettagliata fra i singoli casi presi in esame e di stabilire, quindi, la condizione totale di allarme del sistema non soltanto attraverso un rapporto numerico, ma anche in base alla considerazione delle variabili geologico tematiche di ogni singolo caso preso in esame.

Pur rilevandosi estremamente efficiente nella sua applicazione, tale approccio ha però mostrato gli stessi limiti dei criteri in uso per la realizzazione dei P.S.A.I., in quanto non interviene, di fatto, nelle procedure di definizione di pericolosità e rischio frana, ma esclusivamente nell'applicazione delle metodologie di differenti analisi spaziali, e nella gestione del sistema di monitoraggio. Inoltre, le eventuali variazioni dei fenomeni franosi, pur venendo opportunamente registrate dai sensori e riportate sulla cartografia del Piano di Bacino, necessitano di tempi estremamente lunghi prima di poter costituire un reale supporto all'aggiornamento del P.S.A.I.

Successivamente, è stato pertanto perseguito un differente approccio, e si è tentato di integrare i criteri per la definizione di suscettività da frana attraverso l'utilizzo di modellazioni numeriche georeferenziate (su dati georeferenzati), basate sulla *matematica frattale*. Questo tipo di matematica è ampiamente utilizzato nelle scienze della terra (M. Cieplak, et alii, 1998; M. Tararbra, et al, 2009; K. Arakawa, E. Krotkov, 1998), ed è stata, in questo caso, applicata alle variazioni di pendenza dei versanti soggetti a frana, sfruttando la metodologia *Minkowski-Bouligand Dimension*, detta anche "Metodologia del *Counting Box*" (Schroeder 1991) (Fig.3.2).

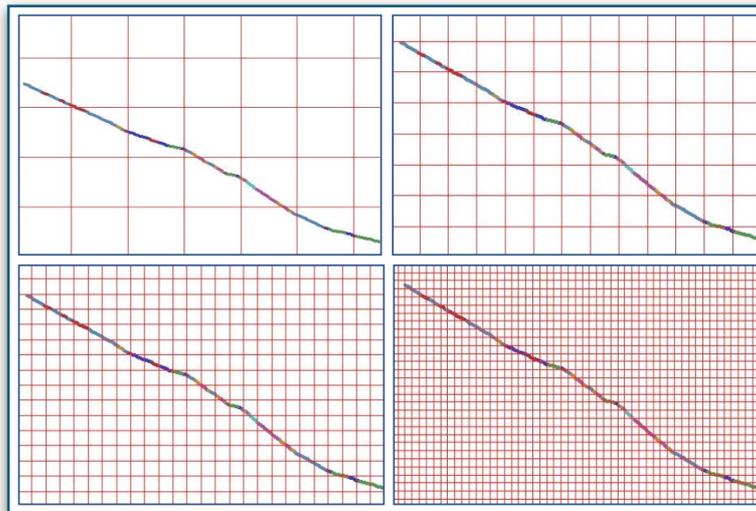


Figura 3.2. Metodologia del *Countign Box* applicato al profilo longitudinale di un versante.

Questa metodologia si articola in diverse fasi:

- sovrapporre all'elemento di cui si vuole effettuare un'analisi frattale (in questo caso il profilo di un versante, valutando le discontinuità della pendenza) una griglia quadratica regolare;
- contare il numero di box nel quale ricade almeno un elemento intero dell'oggetto in questione con lo stesso valore di pendenza;
- misurare le dimensioni di tali elementi;
- reiterare questi passaggi più volte, ridimensionando le celle con valori progressivamente inferiori;
- posizionare su un diagramma cartesiano le coppie di valori (numero di box/dimensioni degli elementi) per ottenere una retta di regressione il cui coefficiente angolare definisce la dimensione frattale.

Al fine di costruire uno scenario di previsione da confrontare con le modificazioni reali in atto, è stata successivamente effettuata una correlazione tra le dimensioni frattali ottenute per i diversi profili delle sezioni di un versante, e le diverse tipologie di frana. Tale metodologia si è tuttavia rivelata estremamente complessa per una valutazione di suscettività da frana di ogni singolo versante su ampie porzioni di territorio, e non è stata, di conseguenza, ritenuta adatta ad un contesto di bacino idrografico.

È stato quindi deciso di utilizzare un approccio basato sul trattamento quantitativo dei dati. In seguito ad un approfondito studio dei differenti tipi di approcci quantitativi (capitolo 4), quello che è stato ritenuto adeguato agli scopi di questa ricerca è stato l'approccio algoritmico del ***Machine Learning*** (apprendimento automatico), (capitolo 4.3). Come ampiamente discusso nel capitolo successivo, tale approccio si è infatti mostrato più idoneo al *problem solving* dichiarato, in quanto utilizza di fatto una metodologia differente da quella attualmente in uso per la redazione dei P.S.A.I. ma, soprattutto, perché consente di effettuare un confronto diretto, non più qualitativo, bensì quantitativo, con i diversi dati di suscettività provenienti da ciascuna edizione del P.S.A.I.

4 trattamento quantitativo

Uno studio dei fenomeni franosi non può prescindere da una trattazione quantitativa dei dati. Lo sviluppo tecnologico ed informatico ha reso possibile la creazione algoritmi in grado di utilizzare contemporaneamente differenti metodologie di trattamento quantitativo dei dati. Da ciò deriva la difficoltà a categorizzare gli approcci algoritmici (capitolo 4.2) come appartenenti ad un settore disciplinare piuttosto che ad un altro. In questo capitolo si intende mostrare un'ampia panoramica delle principali metodologie di approccio utilizzate nello studio dei fenomeni franosi. Ad una prima parte nella quale saranno esposte le principali discipline scientifiche, seguirà una seconda in cui ci si soffermerà su approcci più tecnologici (informatici) e multidisciplinari.

4.1 metodi

Le metodologie di trattamento quantitativo dei dati, quali l'euristica, la statistica e il determinismo, descritte nei prossimi paragrafi, vengono utilizzate per affrontare lo studio dei fenomeni franosi spaziando all'interno di distinte discipline.

4.1.1 metodo euristico

Il compito di un metodo euristico è quello di favorire l'accesso a nuovi sviluppi teorici o a scoperte empiriche. Si definisce, infatti, *procedimento euristico* un metodo di approccio alla soluzione dei problemi che non segue un chiaro percorso, ma che si affida all'intuito e allo stato temporaneo delle circostanze, al fine di generare nuova conoscenza. In particolare, l'euristica di una teoria dovrebbe indicare le strade e le possibilità da approfondire nel tentativo di rendere una teoria progressiva, e cioè in grado di garantirsi uno sviluppo empirico tale da prevedere fatti nuovi non noti al momento dell'elaborazione del nocciolo della teoria.

Un metodo euristico implica una soluzione *experience-based*. L'uso del metodo euristico per la problematica frana è una questione piuttosto controversa (Barredo et al., 2000,

Ercanoglu et al. 2008), ma è generalmente accettato che l'euristica potrebbe e dovrebbe essere utilizzata nelle fasi preliminari della ricerca. Tale metodologia può essere usata per fasi più dettagliate della ricerca se affiancata da ulteriori approcci, generalmente più precisi. All'interno del metodo euristico si distinguono diverse tecniche, che vanno dalla modellazione di opinioni, alla quantificazione del giudizio dalla logica fuzzy¹ al riconoscimento di pattern.

4.1.2 metodo statistico

A differenza di una metodologia basata sull'opinione e sul giudizio di esperti (basato quindi su esperienze e conoscenze del processo), o di un approccio deterministico descritto più avanti (che inizia con condizioni teoriche del limite di equilibrio sul versante franoso colpito), il metodo statistico si basa esclusivamente sui dati già disponibili (*fattori di condizionamento*). Si tratta di una metodologia che relaziona i dati (sotto forma di valori, di distribuzioni, di aggregazioni) con il fenomeno che ne scaturisce, in questo caso, un evento frana. Un approccio statistico estrae quindi relazioni esistenti, fornendo alle previsioni una dimensione più oggettiva. Va sottolineato che si tratta di previsioni esclusivamente spaziali e assolutamente non temporali.

Tra le differenti tecniche basate su metodi statistici per lo studio delle frane si utilizzano l'analisi statistica *bivariata* e quella *multivariata*

In particolare, le tecniche bivariate analizzano l'effetto di un singolo fattore sullo sviluppo del fenomeno franoso esistente, indipendentemente dal resto dei fattori; le tecniche multivariate studiano l'effetto simultaneo di tutti i fattori in campo sullo sviluppo del fenomeno franoso esistente (Bonham-Carter 1994).

¹ La **logica fuzzy** o **logica sfumata** o **logica sfocata** è una logica polivalente, e pertanto un'estensione della logica Booleana. Si tratta di una logica in cui si può attribuire a ciascuna proposizione un grado di verità compreso tra 0 e 1. Con *grado di verità* o *valore di appartenenza* si intende quanto è vera una proprietà: questa può essere, oltre che vera (= a valore 1) o falsa (= a valore 0) come nella logica classica, anche pari a valori intermedi.

4.1.3 metodo deterministico

Si tratta di una metodologia completamente diversa da quelle fin qui trattate. Essa è basata sul concetto del determinismo, secondo il quale esiste una spiegazione di tipo fisico per tutti i fenomeni, riconducendo il tutto alla catena delle relazioni causa-effetto (principio di causalità). La principale conseguenza è che date delle condizioni iniziali tutto quel che accadrà è determinato dalle proprietà fisiche che sovrintendono al fenomeno.

Una modellazione deterministica dei fenomeni franosi sviluppata attraverso sistemi GIS (tecnologia che si applica generalmente ad una scala regionale), necessita definizioni quantitative delle proprietà fisiche che sottendono al fenomeno, attraverso misurazioni dirette in aree campione. Tali proprietà possono essere generalizzate in seguito su aree più ampie con caratteristiche presumibilmente simili. Per determinare le proprietà di un fenomeno franoso attraverso l'utilizzo della metodologia deterministica, ha quindi un peso sostanziale la conoscenza delle caratteristiche geotecniche.

Un'analisi deterministica può, quindi, essere ridotta ad un insieme di analisi di stabilità dei singoli versanti, utilizzando semplici modelli quali: *The Infinite Slope Model*²; il modello del deflusso delle acque sotterranee³; oppure il *metodo dell'equilibrio limite*⁴ (LEM).

Non utilizzando tali modelli di semplificazione, l'analisi di stabilità dei versanti potrebbe risultare difficilmente realizzabile ed estremamente onerosa per l'elevata densità di dati necessari. Si tratterebbe di una modellazione molto elaborata, basata su valutazioni dello

² Il pendio è ritenuto indefinito quando la profondità della superficie piana di rottura è piccola rispetto alla sua lunghezza, che pertanto può essere di assunta come infinita. I casi nei quali ci si imbatte più frequentemente in tale tipologia sono: a) materiali incoerenti; b) materiali coesivi di modesto spessore, al di sopra di una superficie rocciosa; c) argille sovraconsolidate in cui sia presente uno strato profondo alterato; d) spessori di terreno roccioso poggianti su strati di minor resistenza. Questo metodo viene utilizzato quando si assume che la frana sia di forma prevalentemente allungata, nella quale gli effetti della testa e di unghia siano trascurabili. Si assume anche che la superficie di rottura sia parallela al livello del suolo.

³ Si ipotizza la presenza un bedrock impermeabile e di un terreno poroso, in modo che tutta l'acqua precipitata filtri attraverso il terreno senza perdite laterali e senza un deflusso superficiale. Inoltre, il flusso sotterraneo sia parallelo alla pendenza topografica e in condizioni stazionarie (flusso stazionario).

⁴ Il principio generale di qualsiasi tipologia di metodo LEM implica l'equilibrio delle forze agenti e resistenti che agiscono su una particolare superficie di scorrimento nel corpo di un pendio. Il rapporto di tali forze è rappresentato dal Fattore di sicurezza (Fs) o indice di stabilità (SI).

stato tensionale che è possibile definire con una computazione agli *elementi finiti* o alle *differenze finite*⁵.

4.2 approccio algoritmico

Un approccio algoritmico risolve un determinato problema attraverso un numero finito di passi elementari. L'algoritmo è un concetto alla base della nozione teorica di calcolabilità: un problema è calcolabile quando è risolvibile mediante un algoritmo, mediante cioè un numero definito di passi elementari. L'algoritmo è inoltre un concetto cardine della fase di programmazione dello sviluppo di un software. Inizialmente un algoritmo può essere descritto attraverso l'uso di un diagramma di flusso o ricorrendo ad un pseudo codice⁶. Successivamente, nella fase di programmazione l'algoritmo così scritto verrà tradotto in linguaggio di programmazione ad opera di un programmatore sotto forma di codice sorgente dando vita al programma che sarà eseguito dal calcolatore (eventualmente dopo un'ulteriore traduzione in linguaggio macchina). Particolare rilevanza teorica in tale ambito assume il teorema di Böhm-Jacopini che afferma che qualunque algoritmo può essere implementato utilizzando tre sole strutture: la sequenza, la selezione e il ciclo (iterazione), da applicare ricorsivamente alla composizione di istruzioni elementari. Nella pratica corrente, il programmatore professionista svolge automaticamente questo processo di traduzione scrivendo direttamente il codice sorgente necessario nelle suddette modalità avendo già trovato la soluzione al problema dato.

⁵ L'approccio continuo e quello discontinuo sui quali si basano i metodi delle tensioni sono sviluppati principalmente nei seguenti metodi numerici : F.E.M. e F.D.M.

Il metodo degli elementi finiti (F.E.M.) è una tecnica numerica atta a cercare soluzioni approssimate di problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali riducendo queste ultime ad un sistema di equazioni algebriche. Il Metodo si applica a corpi fisici suscettibili di essere suddivisi in un certo numero, anche molto grande, di elementi di forma definita e dimensioni contenute. Nel continuum, ogni singolo elemento finito viene considerato un campo di integrazione numerica di caratteristiche omogenee.

Il metodo delle differenze finite (F.D.M.) è una strategia utilizzata per risolvere numericamente equazioni differenziali che si basa sull'approssimazione delle derivate con equazioni alle differenze finite. Viene utilizzato prevalentemente per equazioni differenziali ordinarie, anche se il metodo viene sfruttato come schema di avanzamento nel tempo per problemi alle derivate parziali.

⁶ In informatica, nell'ambito della programmazione, per pseudocodice si intende un linguaggio il cui scopo è la rappresentazione di algoritmi in alternativa al classico diagramma di flusso e non soggetto a molte limitazioni intrinseche di quest'ultimo tipo di rappresentazione. La stesura della pseudocodifica può precedere la codifica del programma scritto in un linguaggio di programmazione essendo spesso un linguaggio a metà tra la logica proposizionale e il linguaggio di programmazione vero e proprio.

Sono di seguito elencate alcune proprietà necessarie, senza le quali un algoritmo non può essere definito tale:

- i passi costituenti devono essere "elementari", ovvero non ulteriormente scomponibili (*atomicità*);
- i passi costituenti devono essere interpretabili in modo diretto e univoco dall'*esecutore*, sia esso umano o artificiale (*non ambiguità*);
- l'algoritmo deve essere composto da un numero finito di passi e richiedere una quantità finita di dati in ingresso (*finitezza*);
- l'esecuzione deve avere termine dopo un tempo finito (*terminazione*); l'esecuzione deve portare a un risultato univoco (*effettività*).

Essendo il concetto di algoritmo inevitabilmente legato a contesti informatici e tecnologici, è opportuno sottolineare che il funzionamento di un tale approccio possa essere facilmente descritto in termini matematici, facendo uso di concetti come insieme, relazione e funzione. È altresì vero che per la stessa ragione una categorizzazione di tali approcci può risultare estremamente complicata.

Scopo di questa ricerca è stato quello di verificare le potenzialità dell'approccio algoritmico dell'apprendimento automatico, o ***Machine Learning Approach***, ed in particolare quello degli algoritmi ad *Apprendimento Supervisionato*, applicato alla valutazione della suscettività da frana.

4.3 apprendimento automatico (Machine Learning Approach)

Sebbene possa risultare estremamente complesso elencare, descrivere e soprattutto categorizzare gli approcci algoritmici, data la loro natura multidisciplinare, esistono innumerevoli tipologie di algoritmi. In questa tesi sono state approfondite le tecniche del ***Machine Learning Approach***.

L'*apprendimento automatico* (***Machine Learning***) rappresenta un settore emergente dell'informatica che studia algoritmi informatici che migliorano automaticamente l'esperienza (Mitchell 1997 Kanevski et al 2009, Witten et al 2011). Questo concetto di

apprendimento è quindi differente rispetto a qualsiasi altro approccio già menzionato, e amplia il concetto di prevedibilità, contestualizzandolo in un dominio spaziale.

Rappresenta una miscela di molteplici discipline diverse, il che rende difficile una sub-categorizzazione con un approccio più generale. Appartiene ad un campo interdisciplinare, nel quale convergono molti concetti diversi, come ad esempio l'analisi probabilistica e statistica, l'intelligenza artificiale, la teoria dell'informazione, la filosofia, la psicologia, la neurobiologia (Mitchell 1997 Kanevski et al 2009, Witten et. al., 2011).

All'interno del ***Machine Learning Approach*** esistono diversi algoritmi, che sfruttano funzionalità differenti per diversi compiti di apprendimento, come ad esempio il clustering, la classificazione e la regressione. In questa ricerca sono stati presi in considerazione esclusivamente gli algoritmi di classificazione in quanto, lo scopo della tesi è stato caratterizzare (classificare) il territorio in termini di suscettività da frana.

Di seguito viene presa in esame una particolare tipologia di apprendimento automatico, definita *apprendimento supervisionato*, ritenuta la più idonea per un **prolem solving** relativo alla fenomenologia da frana. Infatti, come esposto nel paragrafo successivo, tale tipologia di algoritmi necessita delle competenze di un esperto, in questo caso un geologo con competenze informatiche ed è stata pertanto scelta per la valutazione della suscettività da frana.

Contrariamente ad altre metodologie precedentemente esposte, dove giocano un ruolo fondamentale competenze prettamente geologiche (metodo euristico), competenze matematiche (metodo statistico) e competente geotecniche (metodo deterministico), nel caso dell'*apprendimento automatico supervisionato* è necessaria una competenza geologico-informatica, in grado cioè di addestrare gli algoritmi attraverso nozioni e vincoli geologici. Attraverso questa metodologia, la figura del geologo dotato di preparazione informatica gioca un ruolo fondamentale durante e prima del processamento dei dati, realizzando "manualmente" la regola utilizzata dalla metodologia informatica (capitolo 4.3.1). Contrariamente, attraverso differenti metodologie informatiche, come ad esempio l'overlay basato sulla logica Booleana (metodologia ad oggi utilizzata per la valutazione della suscettività da frana), la figura del geologo interviene indipendentemente dal processamento, realizzando a valle e/o a monte delle elaborazioni, matrici di confronto e assegnazione di classi di pesi.

4.3.1 apprendimento supervisionato

L'obiettivo principale di questa tesi è quello di automatizzare il procedimento di mappatura della suscettibilità da frana, ed effettuare quindi una previsione della distribuzione spaziale delle frane, utilizzando tecniche di *apprendimento automatico*, in particolare quelle di *apprendimento supervisionato*.

L'efficacia di tale previsione è stata successivamente verificata attraverso confronti temporali con dati di suscettività precedenti e successivi a quelli realizzati in questa tesi.

Nell'apprendimento (automatico) supervisionato, ad una fase iniziale di acquisizione dei dati spaziali, segue una fase di verifica che deve essere realizzata da parte di un esperto su una (possibilmente piccola) porzione del territorio indagato (*porzione di training*), considerata rappresentativa per l'intero territorio. L'esperto realizza, quindi, con questo criterio, la mappatura di tale porzione. L'algoritmo utilizza successivamente tale mappatura per il *training: apprende* dalla mappa relazionando una serie di fattori condizionanti (stabiliti dall'esperto).

Dopo aver "appreso" (assunto) la regola alla base della mappatura proposta dall'esperto, l'algoritmo estrapola la regola, applicandola al resto della zona indagata (*porzione di testing*), fornendo quindi una previsione automatica della distribuzione spaziale delle frane.

Il funzionamento di tali algoritmi è basato sull'utilizzo di dati raster bidimensionali. Tali raster devono rappresentare sia i fattori di condizionamento (stabiliti dall'esperto), sia l'attuale porzione di territorio in frana.

I raster di input devono essere organizzati in modo che ogni elemento di base della griglia (pixel) rappresenti un valore del parametro considerato in quella porzione di territorio. Ciò presuppone la presenza di una classificazione dei fattori dei condizionamento stabiliti. Lo scopo è quello di associare ogni porzione del territorio (ogni pixel) ad un'appropriata categoria di frana attraverso la corrispondenza tra i raster dei *Fattori di Condizionamento* (geologico, geomorfologico, ambientale), e il raster dell'*Inventario dei Fenomeni Franosi* (I.F.F.I.).

La suddivisione del territorio indagato in porzioni di *Training* e di *Testing* è sicuramente un'operazione molto delicata, che richiede particolari attenzioni. Un modello previsionale di fenomeni franosi sufficientemente efficiente è quello realizzato con un minor numero di *training* riducendo di fatto la manipolazione dell'esperto. D'altra parte, la validità di un

modello è costituita dal suo potere previsionale, il che implica un'adeguata strategia di suddivisione dell'area indagata. Al fine di rendere valida l'attività di *training*, è dunque preferibile avere una separazione netta delle due porzioni di territorio (Fig. 4.1). Esistono tuttavia, alcuni algoritmi ad apprendimento automatico (non oggetto di questa ricerca) che richiedono strategie di suddivisione *training/testing* completamente differenti, talvolta randomatiche.

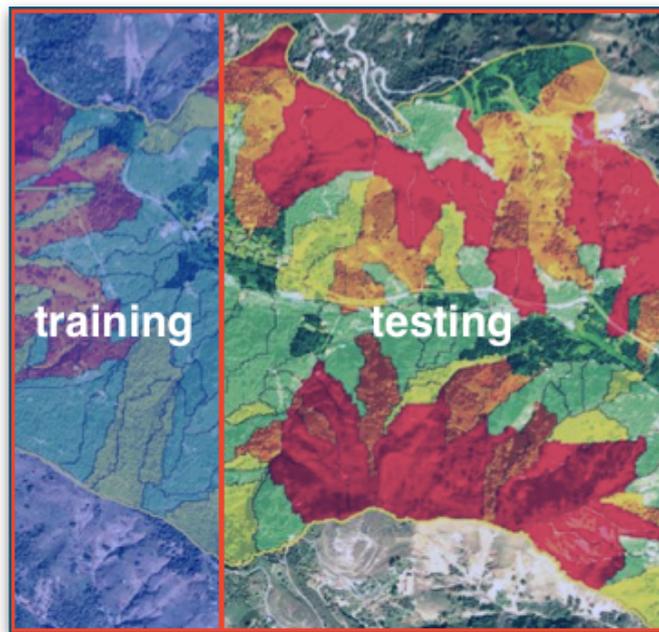


Figura 4.1. Esempio di una suddivisione in porzione di training e porzione di *testing* (33-67%).

Una problematica comune a tutti gli algoritmi ad apprendimento automatico, è l'*overfit*, noto anche come *errore casuale* o *rumore di fondo*. Esso rappresenta un "fallimento" della fase di *testing*, pur essendo in presenza di elevate prestazioni nella fase di *training* (Fig. 4.2).

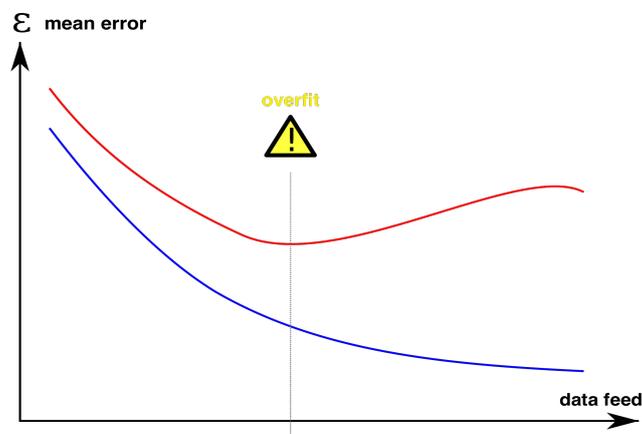


Figura 4.2. Il problema dell'*overfit*. Linea grigia rappresenta il campione di addestramento. Le funzioni mostrano un aumento evidente degli errori in modalità di test, nonostante l'aumento della quantità di dati.

Tale problematica è principalmente legata alle caratteristiche del *data set* del *training* e soprattutto al grado di generalizzazione della classificazione (Mitchell 1997). In altre parole si tratta di un ridotto grado di affidabilità previsionale del modello pur avendo un elevato grado di complessità (un'elevata quantità di dati), nella porzione di *training*. L'algoritmo sarà quindi portato ad "apprendere" il rumore, estendendolo (trasferendolo) sulla restante area di *testing*, e rendendo di fatto la classificazione dei pixel non veritiera (il *training* diventa estremamente specializzato e l'algoritmo non riesce ad estendere correttamente la classificazione nella porzione di *testing*).

Un modo per limitare l'*overfit* è incrementare il grado di *generalizzazione* della classificazione dell'algoritmo. In alternativa è possibile effettuare suddivisioni di *training* e *testing* con un'equilibrata distribuzione di *classi* (ad esempio le tipologie di frana). Sebbene quest'ultima rappresenti una delle migliori soluzioni al problema dell'*overfit*, un'equilibrata distribuzione di *classi* all'interno delle porzioni di *training* e *testing*, non è sempre realizzabile quando si ha a che fare con una modellazione di tipo spaziale (come ad esempio nel caso della distribuzione dei fenomeni franosi). In queste circostanze accade frequentemente che talune *classi* risultino più estese a discapito di altre classi. Ciò diventa particolarmente evidente se la strategia di suddivisione delle porzioni *training* - *testing* si riduce a una fisica separazione manuale come accennato in precedenza (Fig. 4.1) e non il frutto di una analisi ragionata delle caratteristiche geologiche del territorio. Una tecnica che impedisce parzialmente l'*overfit* e coinvolge specifiche strategie di ottimizzazione durante la fase di *training* è la *Cross-Validation* (Mitchell 1997 Kanevski et al. 2009). Questa tecnica risulta probabilmente il modo più efficiente per limitare l'effetto dell'*overfit*, effettuando una sottodivisione della porzione di *training* e una sua reiterata convalida. Il tutto può essere ripetuto *k* volte, dove *k* indica il numero di suddivisioni di *training* e, soprattutto, anche il numero di iterazioni.

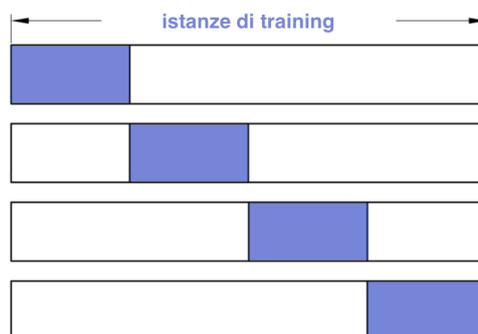


Figura 4.3. Schema di una Cross Validation a 4 iterazioni. I rettangoli schematizzano una porzione di training. In questi le parti bianche rappresentano le sottodivisioni del *training*, le parti scure le suddivisioni di convalida.

Nel primo intervallo, una prima suddivisione viene utilizzata per la convalida, mentre le ulteriori partizioni k-1 si fondono insieme per il *training*. Durante ogni successiva iterazione, una diversa suddivisione assume il ruolo di convalida, mentre i restanti k-1 assumono il ruolo di *training*, fino a quando tutte le iterazioni k sono portate a termine (Fig. 4.3). A sua volta, tale metodologia si traduce in un utile supporto per la configurazione dei parametri dell'algoritmo. Tenendo sempre presente che la scelta di parametri ottimali dell'algoritmo (fattori di condizionamento), è ciò che fornisce lo schema di generalizzazione (classificazione dei pixel) all'algoritmo, il *Cross- Validation* deve essere ripetuto per ogni parametro scelto. È quindi preferibile non abbondare nella scelta dei vari fattori di condizionamento.

4.3.1.a - albero decisionale C4.5

I classificatori ad *Albero Decisionale* sono algoritmi con una struttura ramificata dall'alto verso il basso (Fig. 4.4), in cui ogni gruppo di ramiroviene da un nodo comune e si estende gerarchicamente verso ulteriori nodi e rami. Questi ultimi alla fine terminano nei nodi finali, chiamati *foglie* di un *albero decisionale*.

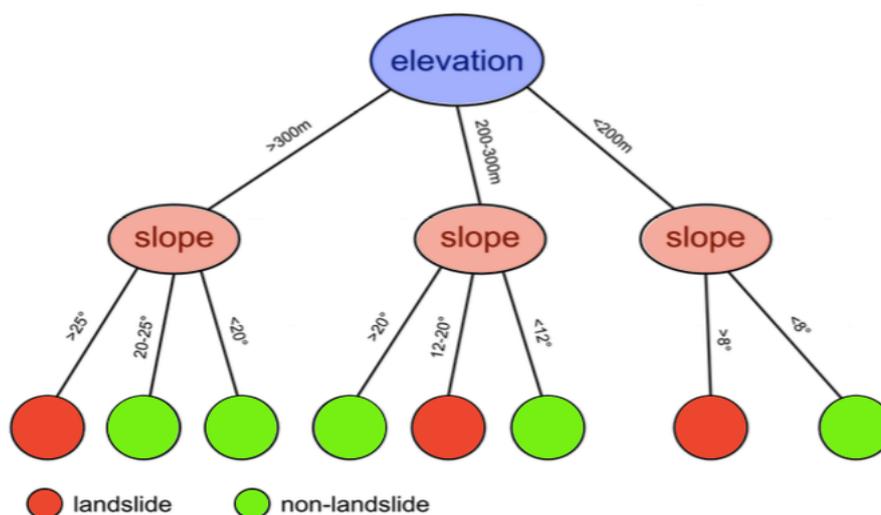


Figura 4.4. Esempio di una struttura ad albero decisionale per la valutazione del fenomeno franoso a seconda di due fattori condizionanti, elevazione e pendenza.

Il C4.5 è un noto algoritmo classificatore ad albero decisionale univariato (Quinlan 1993). In questo contesto (valutazione di fenomeni franosi), l'elemento pixel è descritto con un

insieme di n valori di fattori condizionanti, e viene classificato testando il valore di un particolare fattore, ad ogni nodo, a partire dalla radice dell'albero. Il pixel "segue" poi un certo percorso nella struttura ad albero a seconda delle valutazioni fatte in corrispondenza dei nodi precedenti e raggiunge infine uno dei nodi finali (foglia) etichettati con un classe c_j (valori frana / non-frana nel caso binomiale con $j = 2$; o valori di classi frana nel caso polinomiale con $j = l$ classi). L'insieme dei percorsi che si diramano dalla radice ad un certo nodo foglia (etichettato con una classe di frana) possono essere interpretati come congiunzioni dei test sui fattori condizionanti. Dal momento che ci potrebbero essere più nodi foglia con le stesse etichette di classe, si potrebbe interpretare ogni classe come una disgiunzione di congiunzioni di vincoli sui valori degli x fattori di condizionamento di un dataset ($\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$).

Segue una breve descrizione e di come l'albero decisionale possa derivare dai dati di *training* (x_q, c_j), con $q = 1, \dots, g$, e c_j una delle classi disgiuntive l ($j = 1, \dots, l$). L'algoritmo C4.5 può lavorare sia con attributi numerici, sia con quelli categorici, ma per ragioni di semplicità si assuma che tutti i fattori di condizionamento siano categorici. Il processo di costruzione dell'albero decisionale esegue una ricerca nello spazio di tutti i possibili percorsi aggiungendo nuovi nodi per aumentare la precisione di classificazione sul set di dati di *training*. Ogni nuovo nodo (fattore di condizionamento candidato) viene testato e quindi aggiunto sotto un determinato ramo della struttura ad albero soltanto nel caso in cui le istanze successive risultino ulteriormente ramificate. In questo modo la distinzione tra le classi diventa più evidente. Se il test sul fattore di condizionamento F suddivide i casi in sottoinsiemi in cui tutti gli elementi hanno le stesse etichette di classe frana, si tratta di un'ottima scelta per un nuovo nodo (il fattore risulta condizionante). Tali sottoinsiemi diventano quindi nodi foglia. D'altra parte, se le istanze sono distribuite in modo che in ogni sottoinsieme c'è stato uguale numero di elementi appartenenti a diverse classi frana (tale fattore non risulta realmente condizionante), il fattore F in questione risulterebbe la peggiore scelta per un nuovo nodo.

L'algoritmo C4.5 utilizza una misura di *Gain Ratio* (GR) (Quinlan 1993) per scegliere fra i F s disponibili ed è fortemente legato al concetto di entropia. La figura 4.5. illustra il calcolo del *Gain Ratio*.

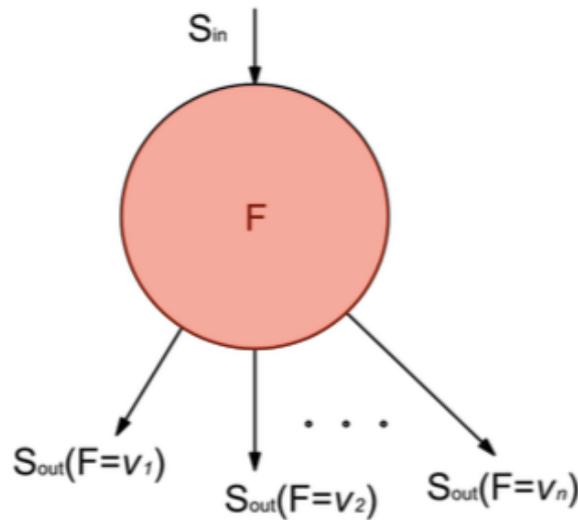


Figura 4.5. Rappresentazione della *Gain Ratio* sui nodi della struttura decisionale.

Sia S_{in} l'insieme di N istanze trasmesse dal test precedente sul nodo padre, al nodo corrente. Sia n_j il numero di istanze di S_{in} che appartengono alla classe c_j , $j = 1, \dots, l$.

L'entropia $E(S_{in})$ è definita come una misura di impurità (rispetto alle classi) del set di S_{in} come:

$$E(S_{in}) = - \sum_{i=1}^l \frac{n_i}{N} \log_2 \frac{n_i}{N} \quad (1)$$

Se tutte le istanze appartengono alla stessa classe, l'entropia è uguale a zero. D'altro canto, se sono ugualmente presenti tutte le classi, l'entropia è massima ($\log_2 l$). Si ricorda che F indica l'attributo candidato di un'istanza x a diventare nodo della struttura ad albero. Avendo inoltre assunto che F è categorica e può assumere m diversi valori v_1, v_2, \dots, v_m , esisteranno m diversi rami che portano al nodo corrente. Ogni $S_{out}(F = v_i)$ rappresenta l'insieme di istanze per cui F assume un valore v_i .

La capacità informativa di F (quanto sia un realmente condizionante) relativa alla classificazione in l classi predefinite di frana può essere espresso utilizzando la nozione di informazione *Gain* (IG):

$$IG(S_{in}, F) = E(S_{in}) - \sum_{v \in \{v_1, \dots, v_m\}} \frac{|S_{out}(F = v)|}{N} E(S_{out}(F = v)) \quad (2)$$

Nell'equazione 2 $|S_{out}(F = v)|$ rappresenta il numero di istanze nel set $S_{out}(F = v)$ ed $E(S_{out}(F = v))$ è il suo valore di entropia calcolata con l'equazione 1.

Maggiore è IG , più informativa sarà F per la classificazione nel nodo corrente, e viceversa (Mitchell 1997).

Lo svantaggio principale del valore IG è che favorisce i fattori con tanti valori (m) maggiore a discapito di quelli con meno valori (valore di m inferiore). Ciò comporta strutture ad albero molto ampie, con un elevato numero di rami partire dai nodi corrispondenti. Se la struttura è complessa ed è caratterizzata da un elevato numero di nodi foglia, allora si corre il rischio che il modello vada in *overfit* (imparerà le anomalie dei dati di addestramento e la sua capacità di generalizzazione, ossia l'accuratezza della classificazione sarà diminuita). Allo scopo di ridurre l'effetto di *overfit* l'algoritmo C4.5 effettua una normalizzazione di IG rispetto all'entropia calcolandola rispetto ai valori del fattore di condizionamento piuttosto che alle classi frange. Si ottiene in questo modo il *Gain Ratio* (GR):

$$SI(S_{in}, F) = - \sum_{v \in \{v_1, \dots, v_n\}} \frac{|S_{out}(F = v)|}{N} \log_2 \frac{|S_{out}(F = v)|}{N} \quad (3)$$

$$GR(S_{in}, F) = \frac{IG(S_{in}, F)}{SI(S_{in}, F)} \quad (4)$$

Infine, l'algoritmo C4.5 utilizza la cosiddetta tecnica *post-potatura* per ridurre la dimensione della struttura dell'albero decisionale (complessità del modello). L'albero viene convertito in un insieme di regole equivalenti per ogni nodo foglia (di uguale dimensione nodo radice / nodo foglia). Successivamente *pota* le regole rimuovendo ogni condizione che non ne pregiudichi il risultato previsto.

4.3.1.b - support vector machines (SVM)

La modellazione spaziale nelle Scienze della Terra viene comunemente utilizzata per affrontare il problema della non linearità o della multidimensionalità dei dati di input (ad esempio la distribuzione delle perturbazioni atmosferiche, l'analisi dei gradienti termici, l'andamento dei moti ondosi, etc.), lasciando poi agli ordinari strumenti statistici e probabilistici il compito di ricavarne un modello interpretativo. Il potenziale degli algoritmi ad apprendimento automatico per la risoluzione di questi problemi è stato solo recentemente sfruttato. Una **SVM** è un modello di apprendimento supervisionato che analizza i dati, ne riconosce i pattern per utilizzarli per classificazioni e analisi di regressione. Si tratta di un classificatore binario che apprende il confine fra esempi appartenenti a due diverse classi. Dato un insieme di dati di *training*, appartenenti a due categorie, un algoritmo **SVM** costruisce un modello che assegna nuovi dati ad una categoria o l'altra, comportandosi quindi come un classificatore lineare⁷ binario non-probabilistico. Un modello **SVM** è una rappresentazione di punti nello spazio, mappati in modo che i dati appartenenti a diverse categorie siano divisi da un gap spaziale (che identifica un iperpiano di separazione), che sia il più ampio possibile, e che viene ricavato attraverso un prodotto scalare. I punti più vicini all'iperpiano si chiamano *support vector*.

Il margine u dell'iperpiano di separazione è la distanza minima fra le due classi, il che implica che solo alcuni dati sono realmente importanti per l'apprendimento, definiti appunto *support vector*, ulteriori dati possono essere trascurati

⁷ Un classificatore lineare usa le caratteristiche degli oggetti per identificare a quale classe (o gruppo) appartengono, valutando una combinazione lineare di caratteristiche. Le caratteristiche di un oggetto sono anche conosciute come valori-caratteristica, rappresentati solitamente come un vettore chiamato vettore delle caratteristiche.

Nuovi dati vengono quindi mappati in quello stesso spazio e assegnati a una categoria o un'altra in base a quale porzione del gap occupano (Fig. 4.6).

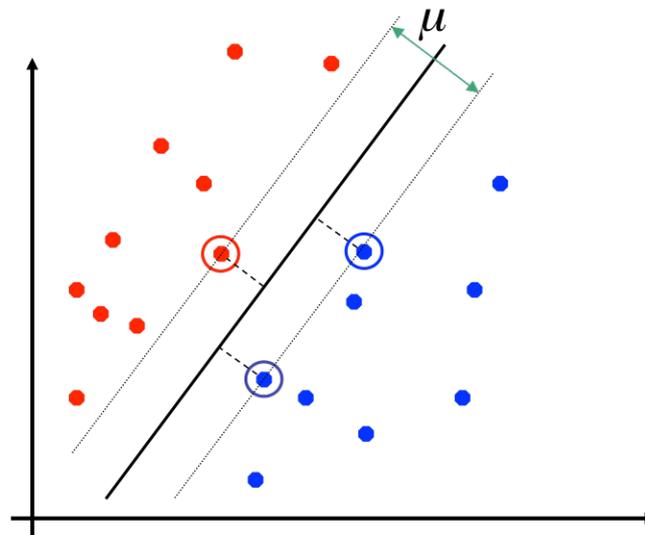


Figura 4.6. Schema di una SVM; essa agisce come un classificatore binario: tramite un iperpiano separa elementi appartenenti a due differenti classi. Il margine μ indica la distanza minima tra le due classi. Essa è identificata dalla distanza minima di punti di classi differenti più vicini all'iperpiano.

Le *Macchine a Vettori di Supporto SVM* appartengono alla famiglia dei classificatori lineari generalizzati e sono anche noti come classificatori a massimo margine, poiché allo stesso tempo minimizzano l'errore classificazione e massimizzano il margine geometrico

Oltre ad eseguire classificazioni lineari, una **SVM** può efficacemente svolgere una classificazione non lineare utilizzando un'implicita mappatura dei dati in spazi multidimensionali al cui interno viene determinato l'iperpiano di separazione in grado di massimizzare la distanza (il margine) dai dati di *training* più vicini.

Nella valutazione suscettibilità, alcune tecniche di classificazione frequentemente utilizzate si basano su funzioni lineari, come le logiche di regressione o le analisi discriminanti. Tuttavia per la maggior parte dei dati del mondo reale, il modello lineare può essere considerato al più come un'approssimazione. L'approccio delle **SVM** è piuttosto differente.

Come già detto, l'iperpiano deriva da un prodotto scalare, è tuttavia possibile utilizzare un prodotto scalare in grado di proiettare le coppie dei dati all'interno di uno spazio multidimensionale in cui le classi siano separabili.

Tale Procedura è nota come il *trucco del kernel* (Scholkopf et al 2001) (Fig.4.7)

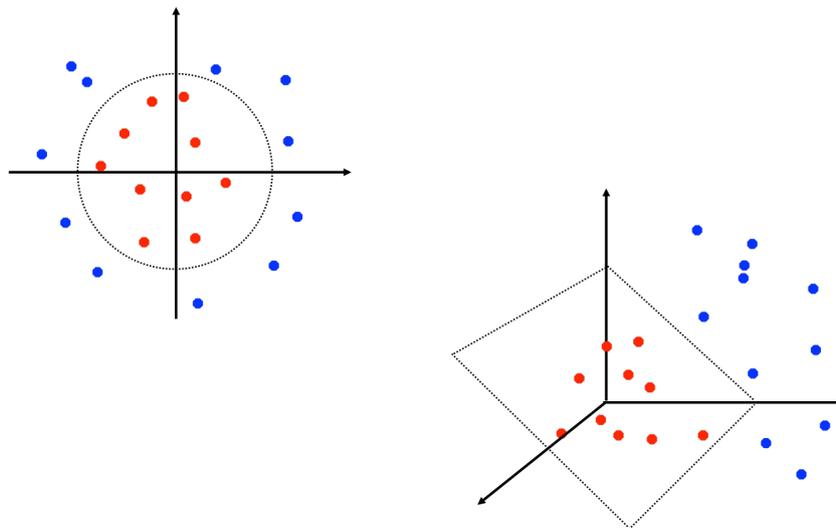


Fig 4.7. Trucco del Kernel: proiezione nello spazio di punti che altrimenti non risulterebbero separabili.

Le *macchine a vettori di supporto (SVM)*, dette anche *macchine kernel* sono state sviluppate negli *AT&T Bell Laboratories* da Vapnik e vari colleghi (Boser et al., 1992, Guyon et al., 1993, Cortes and Vapnik, 1995, Schölkopf et al., 1995, Vapnik 1997). Dato il contesto industriale, la ricerca sulle **SVM** ha finora avuto una decisa inclinazione applicativa. Tra in principali utilizzi si possono trovare:

- elaborazione del linguaggio naturale, ad esempio riconoscimento di cifre, campo in cui le **SVM** sono diventate in breve tempo competitive con i migliori metodi *OCR* utilizzati;
- identificazione facciale all'interno di immagini;
- identificazione di pedoni;
- ricerca bioinformatica;
- classificazione di testi.

L'apprendimento automatico di una **SVM** può essere accostato ai metodi di inferenze statistica e sistemi delle reti neurali artificiali (ANN), ma con significative differenze riguardanti principalmente la distribuzione dei dati e l'ottimizzazione del modello.

L'approccio di una **SVM** non richiede che il set di dati abbia una distribuzione regolare, e non utilizza parametri predefiniti (da cui il nome di modellazione non parametrica). Una **SVM** utilizza i parametri in funzione della capacità di apprendimento e della complessità dei dati. Al contrario delle ANN, dei sistemi statistici, o dei sistemi *Fuzzy*, dove la riduzione

dell'errore iniziale del set di dati di *training* si protrae fino al raggiungimento di una soglia stabilita; una **SVM** minimizza il numero di errori sui dati di *training* attraverso un'opportuna riduzione dello spazio di apprendimento che non comprometta l'accuratezza del modello (principio di Minimizzazione del Rischio, Burges 1998, Cristiani et Shawe-Taylor 2000).

Nella definizione degli iperpiani di una **SVM** è possibile infatti incorrere in alcuni dati erroneamente classificati. L'obiettivo è quindi regolare l'ampiezza del margine di separazione in base alle istanze erroneamente classificate, trovando un nuovo iperpiano che riduca al minimo gli errori di errata classificazione, e quindi la distanza ϵ dai punti mal classificati dall'iperpiano originale (Fig. 4.8).

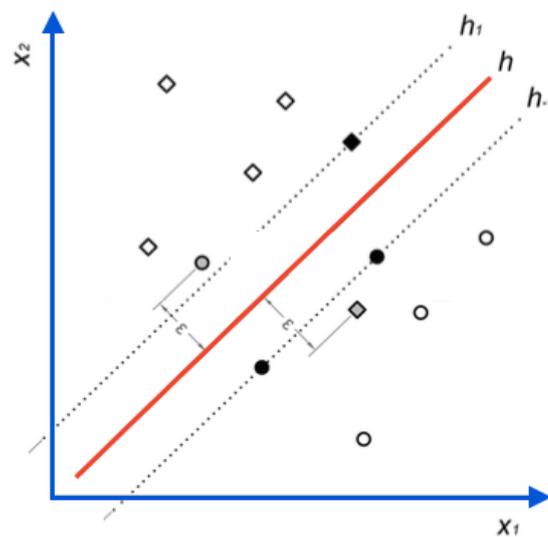


Figura 4.8. Esempio generico di classificazione binaria. Separazione di classi di *frana* (cerchi) da classi di *non frana* (quadrati) in un semplice spazio 2D (due fattori condizionanti/coordinate - x_1 vs x_2). I punti ombreggiati rappresentano le istanze che sono state classificate erroneamente. I punti con riempimento rappresentano invece i vettori di supporto.

È opportuno sottolineare che in origine una **SVM** è un classificatore binario lineare. In un contesto di fenomeni franosi, i dati possono quindi essere classificati in una di due classi (ad esempio *frana* e *non frana*). Tuttavia una **SVM** può facilmente essere usata per affrontare problemi di classificazione multinomiali (diverse classi di frana), attraverso iterazioni di sequenze binarie, nelle quali, una delle due classi subisce un ulteriore procedimento di classificazione.

5 inquadramento geologico regionale

L'Appennino meridionale è un segmento del sistema di Catene circum-mediterranee compreso tra l'Appennino centro-settentrionale e l'Arco calabro-peloritano e limitato rispettivamente dalle linee tettoniche Ortona-Roccamonfina verso nord e Sangineto verso sud. L'attuale assetto strutturale dell'Appennino meridionale è dovuto ad un insieme di eventi essenzialmente compressivi (ma anche distensivi e trascorrenti), controllati dall'arretramento dell'avampaese adriatico in flessurazione, cui si accompagna, a partire dal Tortoniano superiore, la distensione indotta dall'ampliarsi del bacino di retroarco tirrenico (Malinverno & Ryan, 1986; Patacca & Scandone, 1989; Sartori, 1989). La propagazione spazio-temporale dell'onda di compressione-estensione, iniziata non prima del Miocene inferiore, è continuata fino al raggiungimento dell'attuale configurazione, che mostra la Catena appenninica compresa tra l'area tirrenica in distensione ad occidente e l'avampaese apulo-adriatico poco deformato ad oriente.

5.1 le unità tettono-stratigrafiche della Catena sudappenninica

Nell'ambito della Catena centro-sud-appenninica sono presenti numerose successioni stratigrafiche, che derivano dalla deformazione di differenti domini paleogeografici. Tali successioni sono delimitate a letto da superfici di sovrascorrimento di rilevanza regionale e devono essere intese come Unità tettono-stratigrafiche. Queste ultime sono formate da successioni pre-orogene, continue o caratterizzate da discontinuità concordanti, su cui poggiano in discordanza successioni sinorogene, spesso a loro volta limitate a tetto da superfici di natura tettonica (piani di sovrascorrimenti fuori-sequenza) o stratigrafiche discordanti (appoggio di ulteriori successioni sinorogene).

Di seguito sono schematicamente descritte le Unità tettono-stratigrafiche della Catena presenti nel territorio dell'Autorità di Bacino, partendo dalle Unità di provenienza paleogeografica interna fino a quelle più esterne. Sono altresì descritte le principali successioni sinorogene, indicando le formazioni in esse individuate ed i principali caratteri lito-stratigrafici.

Le successioni pre-orogene

- *Unità di origine interna*

Le Unità originatesi in posizione interna sono suddivise in Liguridi e Sicilidi, alle quali si aggiunge un complesso di terreni bacinali (Parasicilide) interposti tra questi due domini.

Nell'ambito delle Unità Liguridi (Bonardi et al., 1988b) si distinguono l'Unità nord-calabrese, il *Melange* di Episcopia - S. Severino e l'Unità del Frido.

Di queste unità, nell'area di studio, sono rappresentate soltanto la parte alta dell'Unità nord-calabrese (Malm-Aquitano), composta, nella porzione inferiore, da brandelli del basamento oceanico neotetideo (Ofioliti di Timpa delle Murge) e da depositi bacinali (Formazione di Timpa delle Murge), affioranti solo al confine calabro-lucano. La serie evolve con argilliti grigio scure con intercalazioni di calcareniti e litareniti ed intervalli di *black shales* (Formazione delle Crete Nere) per chiudersi con una successione costituita da calcareniti, brecciole, marne ed, alla sommità, arenarie, fittamente stratificate, con intercalazioni di argilliti grigio-verdognole (Formazione del Saraceno).

Il Complesso Sicilide (Ogniben, 1969) è formato da una successione del Cretacico superiore - Burdigaliano con alla base prevalenti argilliti grigio-rossastre della Formazione delle Argille scagliose *Auctt.*, da calcilutiti chiare con intercalazioni di arenarie, siltiti e marne del Membro Sant'Arcangelo (Ogniben, 1969) e da argille varicolori con alternanze di calcari marnosi (Formazione delle Argille Varicolori *Auctt.*). La successione è "sigillata" da arenarie talvolta tufitiche del Burdigaliano (Arenarie di Corleto e Tufiti di Tusa, Zuppetta et al., 1984).

Il Complesso dei "terreni ad affinità sicilide" o Unità Parasicilide (Bonardi et al., 1988b, Ciarcia et al., 2003) è formato alla base da alternanze, talvolta in assetto caotico, di argille grigio scure con arenarie micacee e calcilutiti silicifere. Seguono marne e calcari marnosi con caratteristico clivaggio (tipo "pietra paesina") del tipo Membro Sant'Arcangelo (Ogniben, 1969), seguite da alternanze fittamente stratificate di marne e calcari marnosi bianchi, a volte rosati, talora silicizzati e mangesiferi, ed argilliti grigio scure e nere. Localmente si rinvengono alternanze di brecciole poligeniche e calcareniti, gradate, a luoghi ricche di macroforaminiferi, calcilutiti, diaspri ed argilliti rosse e

verdi.

Nella Valle del F. Calore e del T. Pietra affiorano arenarie quarzo-feldspatiche gradate, con intercalazioni di marne e calcari marnosi, in strati e banchi (Arenarie di Albanella, Amore et al., 1988), il sinorogeno di avanfossa di questa Unità. L'età è riferibile al Cretacico superiore – Miocene inferiore.

- *Unità della piattaforma Campano-Lucana-Calabrese*

Le successioni pre-orogeniche del Trias superiore – Miocene inferiore della piattaforma Campano-Lucana-Calabrese e suoi margini (piattaforma interna o Campano-Lucana *Auctt. p.p.*) sono comprese nell'Unità Alburno-Cervati-Pollino, inclusa la Formazione di Cerchiara, e nell'Unità Monte Bulgheria

L'Unità Monte Bulgheria (Scandone et al., 1964) è formata alla base da dolomie grigio-scure, calcari e calcari dolomitici, a luoghi massicci, in *facies* sia di piattaforma che di scarpata e bacino, cui seguono risedimenti calcarei con intercalazioni di marne ad ammoniti (Lias inferiore - Cretacico inferiore). Si passa quindi a calcareniti e brecciole gradate a macroforaminiferi con intercalazioni di argilliti e marne rosse e grigio-verdognole ed ancora calcari marnosi e marne rosse e grige ("scaglia") (Cretacico superiore - Aquitaniano). Infine si rinvengono argilliti grigio scure con intercalazioni di brecciole a macroforaminiferi, quarzareniti e litareniti (Burdigaliano ? – Langhiano; Sgrosso, 1998).

L'Unità Alburno - Cervati - Pollino (Bonardi et al., 1988a) debutta con depositi supatriassici calcareo-dolomitici, passanti a litotipi più francamente calcarei a molluschi, foraminiferi, alghe, e talvolta con risedimenti calcarei fino al Cretacico superiore. In appoggio trasgressivo concordante si rinvengono calcilutiti, calcareniti in *facies* di retroscogliera con occasionali livelli conglomeratici a matrice marnosa del Paleocene - Eocene (Formazione di Trentinara).

Al di sopra di questi depositi poggiano, con contatto concordante, evidenziato da livelli discontinui di argilliti residuali rossastre, calcareniti grigio-scure, ad alghe e macroforaminiferi dell'Aquitano-Burdigaliano (Formazione di Cerchiara) ed argilliti brune con intercalazioni di brecciole gradate a macroforaminiferi e quarzareniti giallastre in banchi del Burdigaliano superiore-Langhiano (Formazione del Bifurto, Selli, 1957).

- *Unità della piattaforma Laziale-Campano-Lucana*

Le successioni pre-orogeniche del Trias superiore-Langhiano, riferite sia alla Piattaforma Laziale-Campano-Lucana ed ai suoi margini (Piattaforma interna o Campano-Lucana *Auctt. p.p.*), sia al Bacino del M. Foraporta, sono rappresentate dalle Unità Capri - M. Monna - M. Foraporta, Picentini – Penisola Sorrentina, Taburno - M. Marzano - Monti della Maddalena.

In particolare, l'Unità Picentini - Penisola Sorrentina è formata da depositi carbonatici con *facies* di piattaforma e, più raramente, di scarpata e bacino; marne e calcareniti, scisti bituminosi (Trias superiore). Verso l'alto si passa a marne e calcari ad Orbitoline, e risedimenti carbonatici (Lias - Cretacico inferiore) e a calcari a rudiste, localmente con risedimenti carbonatici (Cretacico superiore – Eocene ?).

L'Unità Taburno - M. Marzano - Monti della Maddalena è invece composta da depositi calcareo-dolomitici di piattaforma e scarpata (Trias superiore-Lias inferiore), cui seguono breccie e calcareniti di scarpata (Lias medio-Eocene, Pescatore, 1965a; D'Argenio 1966; Scandone & Bonardi, 1968). La successione viene sigillata da calcareniti mioceniche (Selli, 1957), affioranti soltanto nei dintorni di Laviano e riferite al Serravalliano da Amore et al. (2005b).

- *Unità del Bacino Lagonegrese*

Le successioni pre-orogeniche del Trias inferiore – Miocene medio, riferibili al Bacino Lagonegrese e ai suoi bordi, sono afferenti alle Unità Lagonegro I e II ed all'Unità di M. Croce.

L'Unità Lagonegro II (Scandone, 1967, 1972) è costituita da una successione bacinale prossimale, che presenta una base prevalentemente argillitica con corpi di calcari massivi ad alghe, di età Trias inferiore – medio (Formazione di Monte Facito), passanti a litotipi calcareo-dolomitici con liste e noduli di selce del Trias superiore – Lias (?) (Calcari con selce) ed a radiolariti, diaspri, ed argilliti silicifere del Giurassico (Scisti silicei). Seguono argilliti e marne silicizzate del Cretacico inferiore (Galestri).

Nella parte alta della serie sono presenti risedimenti carbonatici lito- e bioclastici con frequenti intercalazioni di argille e marne grigie, rosse e verdi (Flysch Rosso

oppure Unità Toppo Camposanto) del Cretacico superiore – Burdigaliano.

Infine si rinvengono quarzareniti a cemento siliceo con clasti di quarzo arrotondato del Langhiano (Flysch Numidico) localmente passanti, verso l'alto, per alternanze, ad areniti arcose serravalliane, indicate generalmente come "sequenze post-numidiche" (Patacca et al., 1992a).

L'Unità Lagonegro I (Scandone, 1967, 1972) è formata alla base da una successione bacinale distale, che comprende calcari con liste e noduli di selce del Trias superiore – Lias (?) (Calcari con selce) e radiolariti del Giurassico (Scisti silicei). Seguono argilliti e marne silicizzate del Cretacico inferiore (Galestri). Alla sommità della successione sono presenti calcari bacinali con intercalazioni di marne e argilliti silicifere rosse del Cretacico superiore – Paleocene (Scisti di Pecorone).

Nei Monti Picentini, in corrispondenza della finestra tettonica di Campagna, affiora l'Unità di Monte Croce (Scandone & Sgrosso, 1974; Turco, 1977), costituita da depositi di scarpata mesozoico-terziari che gradualmente aumentano in frazione silicoclastica. Chiudono i Calcari ed Arenarie della Vallimala (Scandone & Sgrosso, 1974) dati da arenarie torbiditiche con intercalazioni calcareo-marnose ed olistoliti calcarei, di età Serravalliano – Tortoniano inf. ? (Sgrosso, 1998).

- *Unità di incerta attribuzione paleogeografica*

L'Unità del Fortore (Dazzaro et al., 1988) è costituita da una successione bacinale del Cretacico superiore – Miocene inferiore (Formazione delle Argille Varicolori del Fortore, Pescatore et al., 2000; Formazione di Corleto Perticara, Selli, 1962).

Verso l'alto vi sono intercalazioni di calcareniti bioclastiche ed arenarie anche vulcanoclastiche, della Formazione Paola Doce (Pescatore et al., 1988) oppure di un'unità tipo "Tufiti di Tusa" (Burdigaliano), sovrastate dalle quarzoareniti del Flysch Numidico (Burdigaliano superiore - Langhiano), e dai depositi silicoclastici serravalliani del Flysch di San Giorgio (Selli, 1962).

La letteratura recente riferisce l'interpretazione di questi terreni come derivati dal dominio lagonegrese (Pescatore et al., 2000; Di Nocera et al., 2005), oppure di

provenienza interna riferibili al bacino sicilide (Castellano & Sgrosso, 2002).

I depositi discordanti di thrust-top

In discordanza sulle successioni pre-orogene delle Unità tettono-stratigrafiche precedentemente descritte, poggiano depositi sinorogeni prevalentemente silico-clastici di età compresa tra il Langhiano ed il Pliocene che si sono depositi in bacini di tipo *thrust-top*. Le successioni in esame poggiano in discordanza sulle Unità sottostanti e sempre in discordanza sono sottoposte ai depositi sinorogeni più recenti; esse pertanto possono essere interpretate come "*Unconformity Bounded Stratigraphic Units*" (Salvador, 1994). Sono state riconosciute le seguenti successioni sinorogene che si elencano a partire da quelle che poggiano sui domini più interni.

Il Gruppo del Cilento (Burdigaliano/Langhiano-Serravalliano, Amore et al., 1988; Bonardi et al., 1988b), in discordanza angolare sulle Unità "interne", comprende la Formazione di Pollica (letto et al., 1965), data da torbiditi arenacee, la Formazione di S. Mauro (letto et al., 1965), composta da torbiditi silicoclastiche e calciclastiche ("fogliarina" *Auctt.*), rimpiazzate lateralmente dalla Formazione di Torrente Bruca (Amore et al., 1988) mentre al confine calabro-lucano è presente la Formazione di Albidona (Selli, 1962).

La Formazione di M. Sacro (Selli, 1962), costituita da conglomerati e subordinate arenarie, in *facies* di conoide sottomarina, affiora soltanto in Cilento, al M. Sacro ed al M. Centaurino, in discordanza angolare sulla Formazione di Torrente Bruca.

Le Breccie ed Arenarie di Piaggine e le Breccie o Ruditi degli Alburni (Santo, 1988), del Tortoniano medio-superiore, sono composte da breccie carbonatiche con passaggi latero-verticali a torbiditi arenaceo-calcaree, con vari olistoliti in discordanza sui carbonati del Cilento.

La Formazione di Monte Sierio (Castellano & Sgrosso, 1996), del Tortoniano superiore, comprende breccie carbonatiche che passano verso l'alto a depositi pelitici ed arenacei con frequenti olistoliti.

Il Flysch di Castelvete (Pescatore et al., 1970), del Tortoniano superiore-Messiniano inferiore, è formato da depositi silicoclastici con intercalazioni argilloso-marnose, localmente conglomeratiche, talvolta con olistostromi di argille varicolori ed olistoliti carbonatici.

L'Unità di Altavilla (Ippolito et al., 1973), del Messiniano superiore – Pliocene inferiore p.p., è costituita da depositi clastici, talora con risedimenti di argille varicolori e, localmente, con sedimenti della serie evaporitica supramessiniana.

L'Unità di Ariano (Ippolito et al., 1973) comprende successioni clastiche dei bacini intra-appenninici, di ambiente alluvionale-deltizio fino a marino di piattaforma neritica, di età Pliocene inferiore e medio (Amore et al., 1998; Ciarcia et al., 2003).

I depositi del Quaternario

I depositi quaternari, in formazione o formati, sono diffusi in modo ubiquitario, al di sopra dei terreni del substrato carbonatico e silicoclastico, indistinti rispetto al settore di bacino di appartenenza.

Tra questi depositi, si segnalano i Conglomerati di Eboli (Brancaccio et al., 1987), del Pleistocene inferiore (età radiometrica: 1,5-0,9 Ma - Cinque et al., 1988). L'ambiente deposizionale è continentale, con dominanti *facies* di conoide e di piana alluvionale, affioranti lungo tutto il piedimonte meridionale dei Monti Picentini. La successione è interessata da almeno due eventi deformativi a carattere distensivo e trascorrente (Hyppolite, 1992).

Depositati clastici, prevalentemente sabbioso-pelitici ma anche conglomeratici, di ambiente fluvio-lacustre si rinvencono, inoltre, nelle depressioni vallive che hanno ospitato durante il Quaternario i principali bacini intrappenninici (Vallo di Diano, Valle del Tanagro, Brienza, Satriano di Lucania, S. Gregorio M., Buccino, ecc.).

Nella bassa valle del Tanagro sono diffusi anche depositi sabbiosi di natura travertinosi, prevalentemente detritici (fitoclastici) e solo occasionalmente fitoermali di età Pleistocene medio (Buccino et al., 1978; Ascione et al., 1992); piuttosto frequenti risultano essere anche i depositi conglomeratici, generalmente alla base ed alla sommità dei travertini (Amato et al., 1991).

6 il caso dell'(ex)Autorità di Bacino Interregionale del Fiume Sele

La tesi in oggetto si concentra sul bacino idrografico del Fiume Sele, ricadente sotto la responsabilità amministrativa dell'ex Autorità di Bacino Interregionale ABISele (oggi inglobata nell'Autorità di Bacino Regionale Campania Sud)¹. Questa porzione di bacino, a cavallo della regione Campania e della regione Basilicata, si sviluppa per un'area di 3.355 kmq e comprende parte delle province di Avellino, Salerno, e Potenza, per un totale di 81 comuni. Il limite di ciascun comune è stato considerato con un buffer² di 100 m rispetto al limite amministrativo. Pertanto, la superficie dell'area di bacino considerata risulta essere di 3.645 kmq.

Come precedentemente accennato, l'oggetto di questa ricerca è costituito da un'implementazione metodologica del sistema informativo geografico realizzato per l'attuale revisione del P.S.A.I. (*Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico*) dell'ex Autorità di Bacino Interregionale del Fiume Sele.

Il "**Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico**" ha lo scopo di assicurare, attraverso la programmazione di opere strutturali, di vincoli e direttive, sia la difesa del suolo rispetto al dissesto di natura idraulica e idrogeologica, sia la tutela degli aspetti ambientali ad esso connessi, in coerenza con le finalità generali indicate dalla legge e con i contenuti del Piano di Bacino.

Il **PSAI** rappresenta l'atto di pianificazione a difesa del suolo dal rischio idraulico e idrogeologico. Prescrive, per l'intero bacino:

- il completamento del quadro degli interventi strutturali, a carattere intensivo, sui versanti e sui corsi d'acqua;
- l'individuazione del quadro degli interventi strutturali a carattere estensivo;
- la definizione degli interventi a carattere non strutturale, costituiti principalmente dagli indirizzi e dalle limitazioni d'uso del suolo nelle aree a rischio idraulico e idrogeologico.

¹ L'Autorità di Bacino Regionale Campania Sud ed Interregionale per il bacino idrografico del fiume Sele nasce dall'accorpamento delle Autorità di bacino Regionali Destra Sele e Sinistra Sele e dell'Autorità di Bacino Interregionale del Sele disposto nel 2011 nell'ambito di un quadro di razionalizzazione delle strutture di settore.

² La scelta, da parte dell'Autorità di Bacino, di utilizzare un'area *buffer* di 100 m rispetto al limite comunale è connessa alla necessità di creare una fascia di competenza tra i comuni appartenenti al Bacino Idrografico. In tale maniera si tenta di evitare che gli oneri e le responsabilità sulle misure di tutela e mitigazione da prendere nei confronti di quei fenomeni gravitativi, cominciati in un determinato territorio comunale e proseguiti anche oltre, possano terminare di netto con l'inizio del comune adiacente.

Il P.S.A.I. 2009 è stato realizzato con l'ausilio dei sistemi GIS e contiene la seguente documentazione:

- cartografie tematiche in formato cartaceo alle scale 1:25.000 e 1:10.000;
- cartografie tematiche in formato digitale alle scale 1:25.000 e 1:10.000;
- archivi digitali geografici;
- progetti GIS multi-scala e multi-tematici a livello comunale (un progetto per ogni comune, contenente tutti i tematismi analizzati nel PSAI);
- progetti GIS multi-scala monotematici a livello di Bacino (un progetto per l'intero Bacino Idrografico per ogni tematismo analizzato nel PSAI).

Tale sistema informativo territoriale è stato realizzato sulla base di carte tematiche generate da dati raccolti da una campagna di rilevamento geologico ad indirizzo applicativo, e alla scala 1:10.000, effettuata nel 2008 dall'Università degli Studi di Napoli Federico II e dall'Università degli Studi della Calabria. I dati raccolti hanno permesso di effettuare uno studio idrogeologico dell'area e di produrre la documentazione necessaria alla redazione del P.S.A.I.

Le carte tematiche di base del P.S.A.I. sono:

- Carta Geologica;
- Carta Geomorfologica;
- Carta dell'Inventario Fenomeni Franosi 1998 (foto-interpretazione);
- Carta dell'Inventario dei Fenomeni Franosi 2008;
- Carta dell'Intensità dei Fenomeni Franosi;
- Carta delle Unità Territoriali di Riferimento;
- Carta dell'Uso del Suolo;
- Carta della Vulnerabilità;
- Carta della Pericolosità da frana;
- Carta del Rischio da frana;

- Carta delle Fasce fluviali;
- Carta del Rischio inondazione.

L'attuale sistema informativo geografico dell'Autorità di Bacino Interregionale (edizione del 2014) si basa su un aggiornamento del P.S.A.I. realizzato nel 2009. L'aggiornamento è stato effettuato sulla base di rilievi condotti su segnalazioni dei vari fenomeni connessi alle tematiche del P.S.A.I. che i comuni ricadenti nella suddetta area hanno riportato all'Autorità di Bacino nel corso degli anni. Il cospicuo numero di segnalazioni ricevute ha obbligato l'Autorità di Bacino a riconsiderare gli scenari di pericolosità e rischio, utilizzando le ripermetrazioni dei rilievi condotti su gli eventi segnalati.

Le elaborazioni di questa tesi sono state eseguite pertanto sui dati dell'aggiornamento P.S.A.I. 2009, che costituisce di fatto il punto di partenza della ricerca, mentre la validazione della metodologia è stata realizzata sull'aggiornamento P.S.A.I. 2014.

6.1 P.S.A.I. 2009

Le caratteristiche della struttura del P.S.A.I. 2009 sono deducibili dalle relazioni tecniche redatte per le sezioni *G* e *H* (rispettivamente *cartografia geotematica*, e *suscettività e rischio da frana*, Autorità di Bacino Interregionale Sele 2009), che descrivono in dettaglio le attività svolte al fine di produrre tutti gli elaborati cartografici necessari alla definizione della pericolosità e del rischio da frana.

sezione Cartografia Geotematica:

Le attività relative alla *sezione G* sono basate essenzialmente su rilevamenti di campo, integrati dall'esame di foto stereoscopiche e di ortofoto. Gli esiti del rilevamento sono stati trasferiti sulla cartografia tecnica regionale in scala 1:5.000, edizione del 2004-2005, previa digitalizzazione ed informatizzazione in ambiente GIS nel sistema di riferimento spaziale Gauss Boaga-Roma 40 Fuso est.

Il rilevamento ha interessato:

- le aree R2, R3, R4 perimetrate nel Piano Stralcio vigente all'atto della presente rivisitazione (revisione del 2009);

- le aree in frana riportate sia dal Progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) che dal vigente Piano Stralcio, ma non ricomprese in aree R2-R3-R4.

Il rilevamento è stato peraltro di norma esteso ad un ambito significativo posto al contorno delle aree di cui sopra, quindi l'estensione totale delle aree rilevate è stata di oltre 1000 Km².

L'elenco degli elaborati prodotti è riportato nella seguente tabella (Tab. 6.1)

Elenco prodotti	Scala
Carta Geolitologica	1:25.000, 1:5.000
Carta Geomorfologica	1:25.000, 1:5.000
Carta Inventario delle Frane	1:25.000, 1:5.000
Carta delle Intensità dei Fenomeni Franosi	1:25.000, 1:5.000
Carta dell'Uso del Suolo	1:25.000
Carta della Permeabilità dei Terreni	1:25.000, 1:5.000

Tabella 6.1. Elenco dei prodotti della sezione cartografia geotematica, e relative scale.

La Carta Geolitologica è stata redatta tenendo in debito conto le indicazioni poste alla base della nuova Carta Geologica d'Italia. In tale elaborato, oltre alla rappresentazione dei terreni del "substrato", è stata privilegiata la cartografazione dei terreni di copertura, provvedendo a riportare anche i principali lineamenti tettonici. Su detta Carta sono state inoltre tracciate un numero significativo di sezioni geologiche.

La Carta Geomorfologica è stata redatta adottando una legenda basata su una combinazione fra vari approcci metodologici, privilegiando la rappresentazione (mediante simboli poligonali, lineari e puntuali) di processi e forme del rilievo ritenuti significativi ai fini della valutazione della pericolosità da frana.

La Carta Inventario delle Frane è stata redatta avvalendosi della procedura usata per il censimento dei fenomeni franosi (tale procedura comprende: analisi dei dati storici, interpretazione di foto aeree e di ortofoto, rilievi di campagna). Nel suo allestimento ciascuna frana è stata distinta in base alla tipologia ed allo stato di attività. In legenda è stato inoltre inserito, per le frane di maggiori dimensioni, uno schema di zonazione interna.

La Carta della intensità dei fenomeni franosi è stata redatta riclassificando ciascuna tipologia di frana riportata nella Carta Inventario, indipendentemente dal suo stato di attività, in funzione della velocità, parametro che, come ampiamente riconosciuto nella letteratura di settore (es.: Varnes, 1978; Hungr, 1981; Cruden & Varnes, 1996), permette

una immediata definizione dei possibili effetti prodotti sugli elementi esposti a rischio nei riguardi delle varie tipologie di frana.

La Carta dell'Uso del Suolo è stata redatta utilizzando lo standard CORINE, livello 3. Per il territorio campano, si è fatto inoltre riferimento alla "Carta dell'utilizzazione agricola dei suoli della Campania" (CUAS) predisposta dall'Assessorato all'Agricoltura della Regione Campania nell'anno 2004 in scala 1:50000.

La Carta della Permeabilità dei terreni è stata elaborata sulla base della Carta geolitologica, associando ad ogni Unità geolitologica un tipo ed un grado di permeabilità e pervenendo in tal modo all'individuazione di altrettanti complessi idrogeologici. Questi ultimi sono stati poi ridefiniti sotto forma di complessi idrologici.

sezione suscettività e rischio frana:

Nella *sezione H* sono esposti i criteri di realizzazione della cartografia derivata, finalizzata a descrivere le condizioni di pericolosità e rischio da frana in cui versa il territorio dell'Autorità di Bacino, utilizzando i principali risultati contenuti delle cartografie geotematiche di base. In particolare, si descrivono i procedimenti di analisi spaziale, applicati ai tematismi cartografici di base, per ottenere un nuovo insieme di carte geotematiche intermedie, indispensabili alla redazione delle Carte di sintesi (Pericolosità e Rischio da frana). I prodotti della sezione sono indicati nella tabella seguente (Tab 6.2):

Elenco prodotti	Scala
Carta delle UTR e dei distretti litologici	(1 : 10.000)
Carta degli Scenari di Franosità	(1:25.000, 1:5.000)
Carta degli Scenari del Rischio	(1:25.000, 1:5.000)
Carta della Pericolosità	(1:25.000, 1:5.000)
Carta del Rischio	(1:25.000, 1:5.000)

Tabella 6.2. Elenco dei prodotti della sezione *suscettività e rischio frana*, e relative scale.

In questa sezione sono state utilizzate le unità **UTR** (Unità Territoriali di Riferimento - De Vita et al., 1994), che rappresentano ambiti spaziali globalmente omogenei per particolari caratteristiche geologiche e geomorfologiche. Le **UTR** possono essere individuate in funzione delle scale cartografiche di rappresentazione, definendo specifiche "unità tassonomiche" geologiche e geomorfologiche). Tali unità sono state utilizzate per la redazione di P.S.A.I. di numerose autorità di bacino nazionali.

La Carta delle UTR è derivata dall'intersezione delle carte derivate di sintesi litologica e morfologica (rispettivamente "Carta distretti litologici" e Carta degli "ambiti morfologici"), da intendersi come entità territoriali omogenee, le prime per caratteri geostrutturali e stratigrafici, le seconde per caratteri morfogenetici e morfometrici.

La Carta degli Scenari di Franosità individua la suscettività "reale" delle frane, che si ottiene mediante l'intersezione tra gli attributi di tipologia, intensità ed attività assegnati a ciascuna frana.

La Carta degli Scenari del Rischio deriva dall'intersezione tra la Carta degli Scenari di Franosità e la Carta del Danno. Nel definire gli scenari di rischio si effettua una valutazione del rischio reale a cui sono esposti gli elementi antropici ed ambientali, in funzione delle diverse tipologie di frana.

La carta della Pericolosità ottenuta mediante un ulteriore passaggio, rappresentato dall'elaborazione della Carta della Suscettività delle UTR (con cui si definisce la propensione all'instabilità delle UTR) assegnando nella Carta delle UTR gli attributi di intensità e di stato di attività in funzione della distribuzione areale (densità) delle singole tipologie di frane ricadenti in ciascuna UTR. La carta della Pericolosità costituisce pertanto un documento che propone la rappresentazione globale della suscettività da frana, ottenuta mediante la sovrapposizione della suscettività "reale" delle frane (Carta degli Scenari di Franosità) alla suscettività "potenziale" delle UTR.

La Carta del Rischio è stata redatta secondo quanto previsto nell'Atto d'indirizzo e coordinamento (DPCM 29/9/98), che prevede quattro categorie di rischio (R1, R2, R3 ed R4), per le quali occorre adottare idonee misure di salvaguardia nonché sviluppare idonei programmi per la mitigazione del rischio, al fine di stabilire livelli di rischio accettabili.

Si è pervenuti a questa Carta mediante un ulteriore passaggio, rappresentato dall'elaborazione del Rischio sulla Carta delle UTR (Rutr1, Rutr2, Rutr3, Rutr4), a sua volta ottenuta mediante l'intersezione tra la Carta della Suscettività delle UTR e la Carta del Danno. La Carta del Rischio costituisce pertanto un documento che propone la rappresentazione globale del rischio da frana, ottenuta mediante la sovrapposizione del rischio "reale" delle frane (Rf1, Rf2, Rf3 ed Rf4 - Carta degli Scenari del Rischio) al rischio "potenziale" delle UTR (Rutr1, Rutr2, Rutr3, Rutr4).

6.2 procedura adottata per la definizione del rischio da frana

La procedura utilizzata nel P.S.A.I. 2009 (Fig. 6.1) è una metodologia “unificante”, che consente di trattare contestualmente la franosità delle formazioni lapidee e di quelle strutturalmente complesse, ovvero due “scenari di franosità” significativi su area vasta (Autorità di Bacino Interregionale Sele 2009).

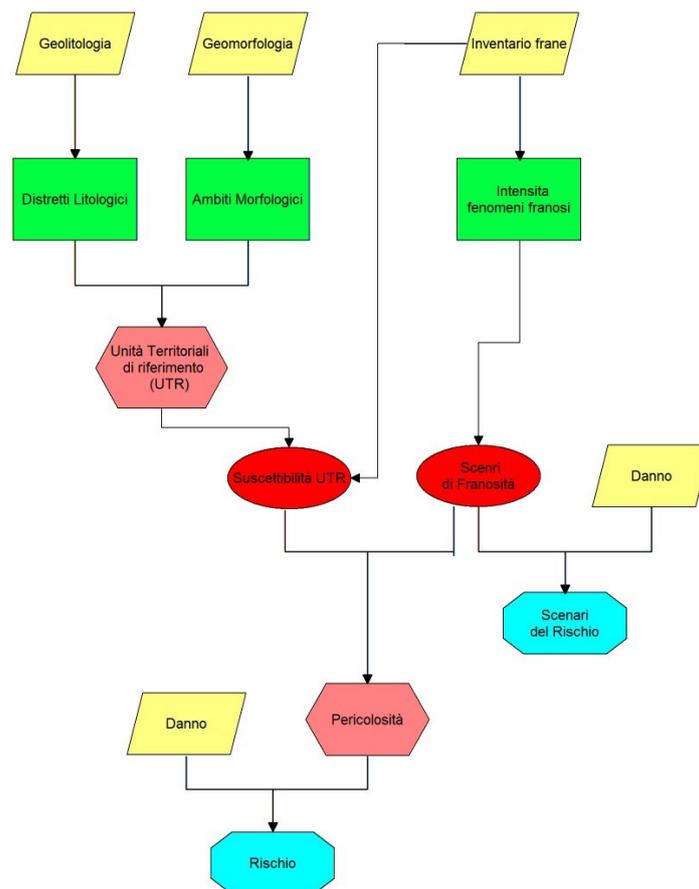


Figura 6.1. Schema concettuale adottato per la definizione del rischio da frana (Autorità di Bacino Interregionale Sele 2009).

La procedura ha preso l'avvio dalla rielaborazione della cartografia geotematica di base:

- **Carta Geolitologica;**
- **Carta Geomorfologica;**
- **Carta Inventario delle Frane.**

Previo accorpamento delle Unità identificate nella Carta Geolitologica, è stata definita la **Carta dei Distretti Litologici**. Mediante un'analoga semplificazione dalla Carta Geomorfologica si è pervenuti all'individuazione della **Carta degli Ambiti Morfologici**.

Dalla sovrapposizione delle carte dei Distretti Litologici e degli Ambiti Morfologici è stata definita la **Carta delle Unità Territoriali di Riferimento** (UTR).

Le informazioni contenute nella Carta Inventario delle Frane sono state invece utilizzate per allestire la **Carta delle Intensità dei Fenomeni Franosi**, in cui ciascuna tipologia di frana è riclassificata, indipendentemente dal suo stato di attività, in funzione della velocità. Pertanto, in funzione della velocità di movimento dei corpi di frana si è adottata la suddivisione in:

- Frane ad Intensità ALTA (velocità massima attesa da rapida a estremamente rapida);
- Frane ad Intensità MEDIA (velocità massima attesa da lenta a moderata);
- Frane ad Intensità BASSA (velocità massima attesa da estremamente lenta a molto lenta).

Le tre classi d'intensità sono state quindi associate alle tipologie di frana presenti sul territorio d'interesse aventi gradi di velocità corrispondenti:

- intensità ALTA: crolli/ribaltamenti; colamenti rapidi; frane complesse caratterizzate da velocità da rapida ad estremamente rapida; aree soggette a sprofondamenti, aree soggette a crolli e ribaltamenti diffusi
- intensità MEDIA: colamenti lenti; scivolamenti rotazionali/traslativi; frane complesse caratterizzate da velocità da lenta a moderata; aree interessate da deformazioni lente diffuse
- intensità BASSA: deformazioni gravitative profonde di versante; espansioni.

Si è quindi definita la **Carta della Pericolosità da Frana**, riferita rispettivamente alle frane censite ed alle UTR riconosciute. Si deve precisare al riguardo che, risultando impossibile ricostruire, per tempi sufficientemente lunghi, la franosità storica del territorio in esame, e non essendo pertanto possibile una previsione temporale dell'evento, la "pericolosità" da frana è da intendersi in senso relativo; con l'espressione "pericolosità relativa" o "susceptività" si intende (Canuti & Casagli 1996) la previsione spaziale, tipologica, dell'intensità e dell'evoluzione di un fenomeno franoso. Tale opzione è peraltro in perfetta sintonia con quanto sinora elaborato in ambito internazionale (Glade et al., 2005) e, soprattutto, sul territorio nazionale, come ben dimostrano le esperienze condotte dalle varie Autorità di Bacino in occasione della redazione dei propri Piani Stralcio.

La Carta degli Scenari di Franosità individua la suscettività “reale” delle frane, che si ottiene mediante l’intersezione tra gli attributi di tipologia, intensità ed attività assegnati a ciascuna frana (Tab. 6.3).

Scenari di franosità			
	I1	I2	I3
Inattivo	Pf1	Pf1	Pf2
Quiescente	Pf1	Pf2	Pf3
Attivo	Pf1	Pf2	Pf3

Tabella 6.3. Matrice della Suscettività delle frane (Pf) in funzione dell’intensità (I1, I2, I3) e dello stato di attività.

La classificazione in tre tipologie di suscettività: moderata, media ed elevata, è riportata di seguito:

- Pf1 = suscettività moderata, per frane da bassa a media intensità e stato da attivo ad inattivo;
- Pf2 = suscettività media, per frane da bassa ad alta intensità e stato da attivo ad inattivo;
- Pf3 = suscettività elevata, per frane di alta intensità e stato da attivo a quiescente.

Ai fini della successiva valutazione del rischio è stato necessario giungere alla realizzazione della **Carta del Danno**. La descrizione dettagliata della realizzazione di tale elaborato è parte della relazione tecnica redatta per la *sezione E* (valutazione degli elementi a rischio) del P.S.A.I. 2009.

Per la realizzazione di tale elaborato, è stata necessaria una valutazione per ciascun ambito territoriale, la vulnerabilità degli elementi a rischio per effetto di un potenziale fenomeno distruttivo di una certa entità. Il danno, inteso come aliquota del valore dell’elemento a rischio che può essere compromessa in seguito al verificarsi di un dissesto, viene rappresentato come prodotto del valore esposto per la vulnerabilità. Nella realizzazione del P.S.A.I 2009, è stato assunto il valore della vulnerabilità in sicurezza, pari a uno.

Di conseguenza, assumendo coincidenti le classi di valore esposto con quelle del danno, nella realizzazione di tale elaborato, gli elementi ricavati dalla Cartografia Tecnica Regionale alla scala 1:5.000 sono stati raggruppati per valore del danno,

ottenendo degli areali caratteristici del danno connesso alla presenza di insediamenti urbano in una scala via via crescente: **D1** Danno moderato; **D2** Danno medio; **D3** Danno elevato; **D4** Danno altissimo.

Agli elementi infrastrutturali, sono state attribuite le seguenti classi di danno:

- Autostrade e ferrovie **D4**;
- Strade principali **D3**;
- Strade secondarie **D2**;
- Elettrodotti **D3**;
- Metanodotti **D3**.

Relativamente alle attività produttive, i livelli di danno potenziale sono stati così attribuiti:

- Aree industriali **D4**;
- Dighe **D4**;
- Cave **D3**;
- Impianti di depurazione **D3**.

Dall'intersezione tra la Carta degli Scenari di Franosità e la Carta del Danno si è ottenuta la **Carta degli Scenari del Rischio**, che fornisce una prima indicazione sulle situazioni in cui sussiste una minaccia "reale" ad infrastrutture e/o insediamenti, derivante dall'effettiva presenza di frane (Tab.6.4).

Scenari del Rischio			
	Pf1	Pf2	Pf3
D1	Rf1	Rf2	Rf3
D2	Rf1	Rf2	Rf3
D3	Rf2	Rf3	Rf4
D4	Rf2	Rf3	Rf4

Tabella 6.4. Matrice degli Scenari del Rischio, definiti in funzione della suscettività da frana (Pf1, Pf2, Pf3) e del danno (D1, D2, D3, D4).

È stata quindi elaborata la **Carta della Suscettività delle UTR**, con cui si definisce la loro propensione all'instabilità, assegnandovi gli attributi di intensità e di stato di attività in funzione della distribuzione areale (densità) delle singole tipologie di frane ricadenti in ciascuna UTR.

Poiché le UTR possono essere interessate da diverse tipologie di frana, seguendo l'impostazione già adottata da altre Autorità di Bacino (Sinistra Sele 2002), le UTR sono state caratterizzate, in termini di propensione a franare, definendo un *indice di franosità* (IND).

Si è pervenuti a tale indice intersecando le aree delle singole UTR con le aree delle frane censite, ottenendo in tal modo un indice di franosità calcolato dividendo l'area delle frane di uguale tipologia all'interno della singola UTR per l'area delle singole UTR.

Gli indici così ottenuti sono stati quindi classificati per ottenere la **Carta della pericolosità delle UTR** per singola tipologia di frana.

Per ottenere una distribuzione in 4 classi, è stato utilizzato il metodo statistico della *distribuzione normale standardizzata*, che prevede i seguenti passaggi:

1. Calcolo del logaritmo naturale per ciascun indice (LN_IND);
2. Calcolo della media e della deviazione standard dei valori del passo 1: (M_LN_IND e DS_LN_IND);
3. Standardizzazione dell'indice secondo la formula: $STD = (LN_IND - M_LN_IND) / (DS_LN_IND)$;
4. Classificazione dei valori standardizzati secondo 4 classi e per i casi seguenti:

Se $STD < -1$	classe 1	moderato
Se $STD \geq -1 < 0$	classe 2	medio
Se $STD \geq 0 < 1$	classe 3	elevato
Se $STD \geq 1$	classe 4	molto elevato

Il metodo di classificazione degli indici di franosità esposto è stato applicato alle singole aree componenti le UTR; pertanto la classe di franosità per tipologia di frana di tali aree componenti può variare fra 1 e 4 in funzione degli indici di franosità.

Poiché le UTR possono contenere diverse tipologie di frana a differente intensità e con diverso stato di attività, al fine di pervenire all'individuazione di uno scenario unico di pericolosità per ciascuna UTR, si è proceduto con il calcolo di un indice di franosità complessivo, sommando i singoli indici di franosità, ciascuno dei quali è moltiplicato per un peso in funzione della propria intensità (1 = intensità alta; 0,75 = intensità media, 0,5 = intensità bassa).

Per la valutazione dell'indice dello stato di attività di ciascuna UTR, è stata eseguita la somma di tutti gli indici di franosità delle frane ad uguale stato di attività e si assegna come stato di attività dell'UTR quello massimo.

La valutazione della suscettività complessiva delle UTR è il risultato della combinazione delle classi di franosità complessiva con le classi di stato di attività (Tab. 6.5).

		Franosità complessiva			
		1	2	3	4
Stato di attività	1	Putr1	Putr1	Putr2	Putr2
	2	Putr1	Putr2	Putr2	Putr3
	3	Putr2	Putr2	Putr3	Putr4
	4	Putr2	Putr3	Putr4	Putr4

Tabella. 6.5. Matrice della Suscettività da frana delle UTR.

Il significato delle classi di suscettività da frana delle UTR è riconducibile alle seguenti definizioni:

- P_utr1: UTR con moderata propensione all'innescamento/transito/invasione per frane paragonabili a quelle che caratterizzano attualmente la stessa UTR
- P_utr2: UTR con media propensione all'innescamento/transito/invasione per frane paragonabili a quelle che caratterizzano attualmente la stessa UTR
- P_utr3: UTR con elevata propensione all'innescamento/transito/invasione per frane paragonabili a quelle che caratterizzano attualmente la stessa UTR
- P_utr4: UTR con molto elevata propensione all'innescamento/transito/invasione per frane paragonabili a quelle che caratterizzano attualmente la stessa UTR

Mediante sovrapposizione della Carta degli Scenari di Franosità con quella della suscettività da frana delle UTR si è pervenuti alla Carta della Pericolosità. Tale elaborato costituisce pertanto un documento di sintesi che propone la rappresentazione globale della suscettività da frana, contemplando la valutazione sia della propensione a franare delle UTR sia del pericolo incombente su insediamenti ed infrastrutture in virtù dell'effettiva presenza delle frane.

Si ribadisce al riguardo quanto già affermato in precedenza, ovvero che trattasi di pericolosità "relativa" o suscettività, non essendo stato possibile valutare un "tempo di ritorno" dei fenomeni franosi (Autorità di Bacino Interregionale Sele 2009).

Infine, dall'intersezione tra la Carta della Pericolosità e la Carta del Danno, è stata ottenuta la **Carta del Rischio**, contraddistinta da una legenda articolata su una duplice sequenza di livelli di rischio (Tab 6.6 e 6.7):

- la prima classificazione (R_{f1} , R_{f2} , R_{f3} , R_{f4}) individua il rischio “reale” connesso all’effettiva presenza dei fenomeni franosi;
- la seconda classificazione (R_{UTR1} , R_{UTR2} , R_{UTR3} , R_{UTR4}) individua un rischio “potenziale”, a sua volta definito dalla propensione a franare delle varie UTR.

Scenari del Rischio			
	Pf1	Pf2	Pf3
D1	Rf1	Rf2	Rf3
D2	Rf1	Rf2	Rf3
D3	Rf2	Rf3	Rf4
D4	Rf2	Rf3	Rf4

Rischio da frana UTR				
	Putr1	Putr2	Putr3	Putr4
D1	Rutr1	Rutr1	Rutr2	Rutr2
D2	Rutr1	Rutr2	Rutr2	Rutr3
D3	Rutr2	Rutr2	Rutr3	Rutr4
D4	Rutr2	Rutr3	Rutr4	Rutr4

Tabella 6.6 e 6.7. Matrici del Rischio da Frana connesso alla presenza di fenomeni franosi (sopra); ed alla propensione a franare delle UTR (sotto).

Alle 8 classi di rischio riportate nelle matrici di cui alle tabelle 6.6 e 6.7, è stata successivamente introdotta un’ulteriore classe di pericolosità “potenziale” ed una di rischio “potenziale”, rispettivamente denominate Putr5 e Rutr5 e definite come “Aree per le quali il livello di pericolosità e rischio sarà definito a seguito di uno studio di compatibilità geologica di dettaglio, secondo la procedura adottata per la redazione del presente Piano Stralcio” (Autorità di Bacino Interregionale Sele 2009)

6.3 descrizione dettagliata dei prodotti

Segue ora una descrizione dettagliata dei prodotti della sezione H (Suscettività e Rischio Frana) , finalizzata ad una completa comprensione della procedura adottata per la definizione del rischio da frana. Per una descrizione più sintetica di tali prodotti si rimanda al paragrafo precedente.

6.3.1 Carta delle UTR e dei distretti litologici

Per l'elaborazione della Carta in oggetto si sono dovute preliminarmente assemblare i seguenti tematismi:

Distretti Litologici: insieme ottenuto dall'accorpamento delle Unità identificate nella carta geolitologica:

1) Unità quaternarie di copertura, costituite da depositi prevalentemente sciolti

- deposito antropico (h)
- deposito di frana (a1a)
- deposito di versante (a)
- deposito alluvionale (b)
- coltre eluvio-colluviale (b2)
- detrito di falda (a3)
- deposito vulcanoclastico (l)
- deposito eolico (d)
- deposito alluvionale terrazzato (bn)
- deposito di frana antica (a1b)
- deposito lacustre (e2)

2) Unità quaternarie di copertura, costituite da depositi prevalentemente cementati o litoidi

- brecce di pendio (br)
- conglomerati e brecce a dominante carbonatica (cb)

3) Unità sabbioso-conglomeratiche plio-pleistoceniche

- conglomerati poligenici (Pc)
- depositi sabbiosi (Ps)
- Unità sabbioso-conglomeratica (USC)

4) Travertini

- travertino (f1)

5) Unità strutturalmente complesse a dominante arenacea

- Sub-Unità Pelitico-arenacea (UARa)
- Sub-Unità Arenaceo-conglomeratica (UARb)
- Sub-Unità Arenaceo-quarzosa (UARc)

6) Unità strutturalmente complesse a dominante calcareo-marnosa

- Sub-Unità Marnoso-calcareo (UCMa-a)
- Sub-Unità Calcareo-argillosa (UCMa-b)
- Sub-Unità Calcareo- marnosa (UCMb)
- Sub-Unità Calcareo-marnoso-arenacea (UCMc)

7) Unità strutturalmente complesse a dominante argillosa

- Sub-Unità Argilloso-siltitica (UASa)
- Sub-Unità Scagliosa (UASb)
- Sub-Unità Argillitica Silicifera (UASc)
- Sub-Unità Variegata (UAGa)
- Sub-Unità Policroma (UAGb)

8) Unità calcareo-dolomitiche

- Unità Calcarea-Silicifera (UCS)
- Unità Calcarea (UC)
- Unità Dolomitica (UD)

Ambiti Morfologici: mediante un'analoga semplificazione, dalla carta geomorfologica si è pervenuti all'individuazione dei seguenti ambiti:

- a) Versante strutturale (v. di faglia, v. di strato), faccetta di scarpata tettonica;
- b) Cornice sommitale o intermedia di versante a controllo strutturale o cornice di morfoselezione, versante o scarpata di degradazione soggetto a crolli con eventuale cornice (ingloba anche: orlo di scarpata di degradazione /o di frana, orlo di scarpata di cava, canalone in roccia e con scariche di detrito), solco in erosione, picco roccioso o torrione di roccia, scarpata di erosione fluviale, scarpata di terrazzo fluviale;
- c) Ripiano morfologico e crinale a debole pendenza, superficie di erosione carsica e/o fluvio-denudazionale, campo di doline, depressione carsica a controllo strutturale, *karren*, discarica e cava;
- d) Cono detritico, falda detritica, conoide detritico-alluvionale attivo, conoide detritico-alluvionale quiescente, relitto di conoide detritico-alluvionale, glacis di accumulo;
- e) Settore di versante regolare caratterizzato da poche incisioni, area di bacino caratterizzato da reticolo idrografico gerarchizzato, area in contropendenza, vallecola a conca, vallecola a fondo piatto, concavità morfologica di versante;
- f) Terrazzo, pianura alluvionale, alveo fluviale;
- g) Area calanchiva.

Si è quindi proceduto, mediante operazioni di *overlay* tra i tematismi su citati, all'elaborazione della Carta delle UTR e dei distretti litologici, che ha portato all'individuazione di 41 UTR differenti a fronte di un massimo teorico pari a 56, derivante dalla possibile intersezione di tutti i distretti (8) e gli ambiti (7).

Le UTR ottenute sono:

- a2 Versanti strutturali o faccette di scarpata tettonica su Unità quaternarie di

copertura, costituite da depositi prevalentemente cementati o litoidi;

- a4 Versanti strutturali o faccette di scarpata tettonica su travertini;
- a6 Versanti strutturali o faccette di scarpata tettonica su Unità strutturalmente complesse a dominante calcareo-marnosa;
- a8 Versanti strutturali o faccette di scarpata tettonica su Unità calcareo-dolomitiche;
- b1 Cornici a controllo strutturale o di morfoselezione, versanti o scarpate di degradazione soggetti a crolli con eventuale cornice (inglobano anche: orli di scarpate di degradazione e/o di frana; orli di scarpate di cava, canali in roccia e con scariche di detrito), solchi in erosione, picchi rocciosi o torrioni di roccia, scarpate di erosione fluviale o di terrazzo fluviale su Unità quaternarie di copertura, costituite da depositi prevalentemente sciolti;
- b2 Cornici a controllo strutturale o di morfoselezione, versanti o scarpate di degradazione soggetti a crolli con eventuale cornice (inglobano anche: orli di scarpate di degradazione e/o di frana; orli di scarpate di cava, canali in roccia e con scariche di detrito), solchi in erosione, picchi rocciosi o torrioni di roccia, scarpate di erosione fluviale o di terrazzo fluviale su Unità quaternarie di copertura, costituite da depositi prevalentemente cementati o litoidi;
- b3 Cornici a controllo strutturale o di morfoselezione, versanti o scarpate di degradazione soggetti a crolli con eventuale cornice (inglobano anche: orli di scarpate di degradazione e/o di frana; orli di scarpate di cava, canali in roccia e con scariche di detrito), solchi in erosione, picchi rocciosi o torrioni di roccia, scarpate di erosione fluviale o di terrazzo fluviale su Unità sabbioso-conglomeratiche plio-pleistoceniche;
- b4 Cornici a controllo strutturale o di morfoselezione, versanti o scarpate di degradazione soggetti a crolli con eventuale cornice (inglobano anche: orli di scarpate di degradazione e/o di frana; orli di scarpate di cava, canali in roccia e con scariche di detrito), solchi in erosione, picchi rocciosi o torrioni di roccia, scarpate di erosione fluviale o di terrazzo fluviale su travertini;
- b5 Cornici a controllo strutturale o di morfoselezione, versanti o scarpate di degradazione soggetti a crolli con eventuale cornice (inglobano anche: orli di scarpate di degradazione e/o di frana; orli di scarpate di cava, canali in roccia e

- con scariche di detrito), solchi in erosione, picchi rocciosi o torrioni di roccia, scarpate di erosione fluviale o di terrazzo fluviale su Unità strutturalmente complesse a dominante arenacea;
- b6 Cornici a controllo strutturale o di morfoselezione, versanti o scarpate di degradazione soggetti a crolli con eventuale cornice (inglobano anche: orli di scarpate di degradazione e/o di frana; orli di scarpate di cava, canali in roccia e con scariche di detrito), solchi in erosione, picchi rocciosi o torrioni di roccia, scarpate di erosione fluviale o di terrazzo fluviale su Unità strutturalmente complesse a dominante calcareo-marnosa;
 - b7 Cornici a controllo strutturale o di morfoselezione, versanti o scarpate di degradazione soggetti a crolli con eventuale cornice (inglobano anche: orli di scarpate di degradazione e/o di frana; orli di scarpate di cava, canali in roccia e con scariche di detrito), solchi in erosione, picchi rocciosi o torrioni di roccia, scarpate di erosione fluviale o di terrazzo fluviale su Unità strutturalmente complesse a dominante argillosa;
 - b8 Cornici a controllo strutturale o di morfoselezione, versanti o scarpate di degradazione soggetti a crolli con eventuale cornice (inglobano anche: orli di scarpate di degradazione e/o di frana; orli di scarpate di cava, canali in roccia e con scariche di detrito), solchi in erosione, picchi rocciosi o torrioni di roccia, scarpate di erosione fluviale o di terrazzo fluviale su Unità calcareo-dolomitiche;
 - c1 Ripiani morfologici e crinali a debole pendenza, superfici di erosione carsica e/o fluvio-denudazionale, campi di doline, depressioni carsiche a controllo strutturale, karren, discariche, cave su Unità quaternarie di copertura, costituite da depositi prevalentemente sciolti;
 - c2 Ripiani morfologici e crinali a debole pendenza, superfici di erosione carsica e/o fluvio-denudazionale, campi di doline, depressioni carsiche a controllo strutturale, karren, discariche, cave su Unità quaternarie di copertura, costituite da depositi prevalentemente cementati o litoidi;
 - c3 Ripiani morfologici e crinali a debole pendenza, superfici di erosione carsica e/o fluvio-denudazionale, campi di doline, depressioni carsiche a controllo strutturale, karren, discariche, cave su Unità sabbioso-conglomeratiche plio-pleistoceniche;

- c4 Ripiani morfologici e crinali a debole pendenza, superfici di erosione carsica e/o fluvio-denudazionale, campi di doline, depressioni carsiche a controllo strutturale, karren, discariche, cave su travertini;
- c5 Ripiani morfologici e crinali a debole pendenza, superfici di erosione carsica e/o fluvio-denudazionale, campi di doline, depressioni carsiche a controllo strutturale, karren, discariche, cave su Unità strutturalmente complesse a dominante arenacea;
- c6 Ripiani morfologici e crinali a debole pendenza, superfici di erosione carsica e/o fluvio-denudazionale, campi di doline, depressioni carsiche a controllo strutturale, karren, discariche, cave su Unità strutturalmente complesse a dominante calcareo-marnosa;
- c7 Ripiani morfologici e crinali a debole pendenza, superfici di erosione carsica e/o fluvio-denudazionale, campi di doline, depressioni carsiche a controllo strutturale, karren, discariche, cave su Unità strutturalmente complesse a dominante argillosa;
- c8 Ripiani morfologici e crinali a debole pendenza, superfici di erosione carsica e/o fluvio-denudazionale, campi di doline, depressioni carsiche a controllo strutturale, karren, discariche, cave su Unità calcareo-dolomitiche;
- d1 Coni detritici, conoidi detritico-alluvionali, falde detritiche, glacis di accumulo su Unità quaternarie di copertura, costituite da depositi prevalentemente sciolti;
- d2 Coni detritici, conoidi detritico-alluvionali, falde detritiche, glacis di accumulo su Unità quaternarie di copertura, costituite da depositi prevalentemente cementati o litoidi;
- e1 Settori di versanti regolari caratterizzati da poche incisioni, aree di bacino caratterizzate da reticolo idrografico gerarchizzato, aree in contropendenza, vallecule a conca o a fondo piatto, concavità morfologiche di versante su Unità quaternarie di copertura, costituite da depositi prevalentemente sciolti;
- e2 Settori di versanti regolari caratterizzati da poche incisioni, aree di bacino caratterizzate da reticolo idrografico gerarchizzato, aree in contropendenza, vallecule a conca o a fondo piatto, concavità morfologiche di versante su Unità quaternarie di copertura, costituite da depositi prevalentemente cementati o litoidi;
- e3 Settori di versanti regolari caratterizzati da poche incisioni, aree di bacino

- caratterizzate da reticolo idrografico gerarchizzato, aree in contropendenza, vallecole a conca o a fondo piatto, concavità morfologiche di versante su Unità sabbioso-conglomeratiche plio-pleistoceniche;
- e4 Settori di versanti regolari caratterizzati da poche incisioni, aree di bacino caratterizzate da reticolo idrografico gerarchizzato, aree in contropendenza, vallecole a conca o a fondo piatto, concavità morfologiche di versante su travertini;
 - e5 Settori di versanti regolari caratterizzati da poche incisioni, aree di bacino caratterizzate da reticolo idrografico gerarchizzato, aree in contropendenza, vallecole a conca o a fondo piatto, concavità morfologiche di versante su Unità strutturalmente complesse a dominante arenacea;
 - e6 Settori di versanti regolari caratterizzati da poche incisioni, aree di bacino caratterizzate da reticolo idrografico gerarchizzato, aree in contropendenza, vallecole a conca o a fondo piatto, concavità morfologiche di versante su Unità strutturalmente complesse a dominante calcareo-marnosa;
 - e7 Settori di versanti regolari caratterizzati da poche incisioni, aree di bacino caratterizzate da reticolo idrografico gerarchizzato, aree in contropendenza, vallecole a conca o a fondo piatto, concavità morfologiche di versante su Unità strutturalmente complesse a dominante argillosa;
 - e8 Settori di versanti regolari caratterizzati da poche incisioni, aree di bacino caratterizzate da reticolo idrografico gerarchizzato, aree in contropendenza, vallecole a conca o a fondo piatto, concavità morfologiche di versante su Unità calcareo-dolomitiche;
 - f1 Terrazzi, pianure alluvionali, alvei fluviali su Unità quaternarie di copertura, costituite da depositi prevalentemente sciolti;
 - f2 Terrazzi, pianure alluvionali, alvei fluviali su Unità quaternarie di copertura, costituite da depositi prevalentemente cementati o litoidi;
 - f3 Terrazzi, pianure alluvionali, alvei fluviali su Unità sabbioso-conglomeratiche plio-pleistoceniche;
 - f4 Terrazzi, pianure alluvionali, alvei fluviali su travertini;
 - f5 Terrazzi, pianure alluvionali, alvei fluviali su Unità strutturalmente complesse a

dominante arenacea;

- f6 Terrazzi, pianure alluvionali, alvei fluviali su Unità strutturalmente complesse a dominante calcareo-marnosa;
- f7 Terrazzi, pianure alluvionali, alvei fluviali su Unità strutturalmente complesse a dominante argillosa;
- f8 Terrazzi, pianure alluvionali, alvei fluviali su Unità calcareo-dolomitiche;
- g3 Aree calanchive su Unità sabbioso-conglomeratiche plio-pleistoceniche;
- g5 Aree calanchive su Unità strutturalmente complesse a dominante arenacea;
- g7 Aree calanchive su Unità strutturalmente complesse a dominante argillosa;

L'estensione complessiva dell'area cartografata è di circa 950 Km² ripartiti nelle varie UTR come riportato in Tabella 6.8. ed in Figura 6.2

UTR	Area (Km ²)								
a2	1.03	b6	4.24	c7	15.56	e6	100.3	f7	0.31
a4	0.09	b7	2.04	c8	23.80	e7	88.99	f8	0.19
a6	2.80	b8	26.94	d1	70.04	e8	62.84	g3	0.01
a8	67.32	c1	8.95	d2	4.64	f1	43.60	g5	0.02
b1	10.24	c2	3.07	e1	229.4	f2	0.03	g7	0.03
b2	1.78	c3	8.90	e2	6.50	f3	0.94		
b3	3.92	c4	0.48	e3	42.64	f4	0.11		
b4	2.72	c5	22.62	e4	0.70	f5	0.13		
b5	2.38	c6	29.41	e5	63.62	f6	0.83		

Tabella 6.8. Estensione areale delle UTR.

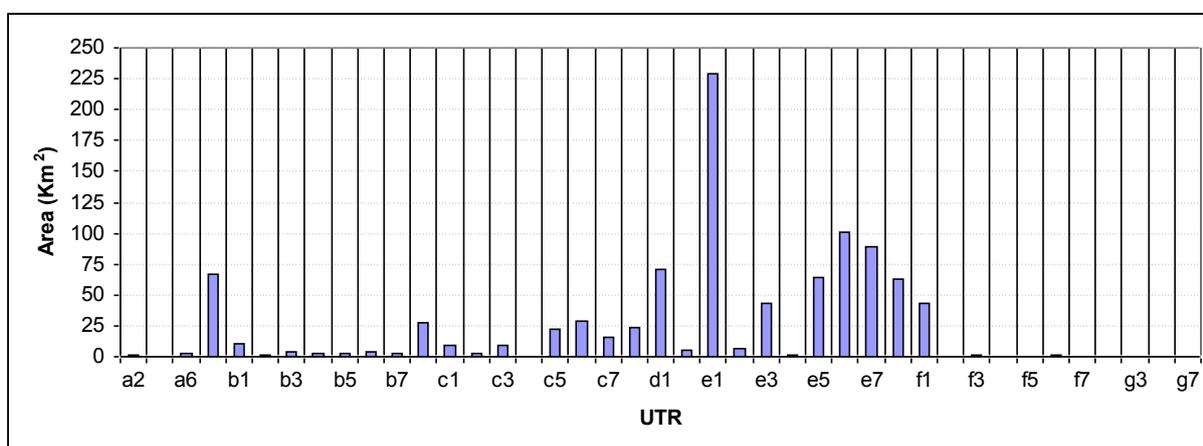


Figura 6.2. Estensione areale delle UTR.

6.3.2 Carta degli Scenari di Franosità

Per la definizione degli Scenari di Franosità è stato assegnato a ciascuna frana un attributo di intensità in funzione delle velocità massime attese per le diverse tipologie di frane (paragrafo 6.2.1). A ciascuna tipologia di frana sono stati pertanto assegnati degli intervalli di velocità, avendo cura, nel caso di frane di tipo misto e/o evolventi da una tipologia in un'altra (identificati nella Carta inventario delle frane come fenomeni "complessi") di attribuire la tipologia con il più alto grado di intensità e, quindi, il grado di velocità più elevato.

Il passo successivo è consistito nel caratterizzare le frane in ordine allo stato di attività secondo le seguenti classi:

- Attivo - Frane attive;
- Quiescente - Frane quiescenti;
- Inattivo - Frane relitte o stabilizzate.

Incrociando intensità e stato di attività si è quindi ricavato l'indice di pericolosità "reale" delle frane (Pf), come riportato in Tabella 6.9.

Scenari di franosità			
	I1	I2	I3
Inattivo	Pf1	Pf1	Pf2
Quiescente	Pf1	Pf2	Pf3
Attivo	Pf1	Pf2	Pf3

Tabella 6.9. Matrice della Suscettività delle frane (Pf) in funzione dell'intensità (I1, I2, I3) e dello stato di attività.

E' possibile osservare come fenomeni classificati con intensità **I3** (crolli, aree soggette a crolli, sprofondamenti, colamenti rapidi, frane complesse caratterizzate da velocità da rapida ad estremamente rapida, ecc.) possano dar luogo ad indici di pericolosità da Pf2 a Pf3 in funzione dello stato di attività assegnato. Analogamente, come fenomeni classificati con intensità **I2** (scivolamenti, colamenti lenti, aree soggette a deformazioni lente diffuse, frane complesse caratterizzate da velocità da lenta a moderata, ecc.) possano dar luogo a

indici di pericolosità da Pf1 a Pf2, mentre fenomeni di intensità I1 (DGPV ed espansioni) assumano unicamente l'indice di pericolosità Pf1.

In totale sono stati classificati circa 430 Km² di territorio, ripartiti nei tre livelli di pericolosità (Pf1=2%; Pf2=83%, Pf3=15%) (Fig. 6.3).

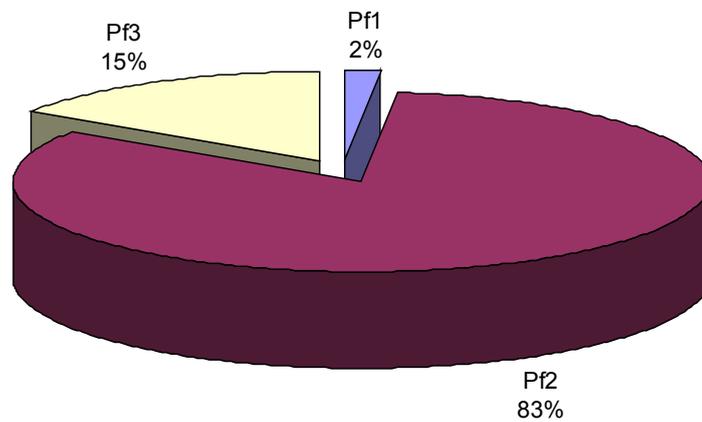


Figura 6.3. Classi di pericolosità "reale" (Pf1=2%; Pf2=83%, Pf3=15%).

Gli areali classificati in termini di Pf1, Pf2 e Pf3 sono riportati in Tabella 6.10, con riferimento a ciascun Comune studiato, ed in Tabella 6.11, in funzione delle diverse tipologie di frana.

Comune	Pf1	Pf2	Pf3	Totale (Km ²)
Albanella		4.509		4.509
Altavilla Silentina	0.130	5.219	0.010	5.359
Aquara	0.021	7.215	0.509	7.745
Atena Lucana		0.125		0.125
Auletta	0.219	4.301	0.152	4.672
Avigliano		3.607		3.607
Balvano		2.929	1.942	4.871
Baragiano	0.034	0.755	0.015	0.805
Bella	1.000	10.342	0.333	11.675
Bellosguardo		5.075		5.075
Brienza		0.675	0.285	0.959
Buccino		30.899	0.350	31.249
Buonabitacolo		0.107	0.070	0.177
Caggiano		12.626	1.679	14.304
Calabritto		7.851	0.073	7.924
Campagna	0.002	11.589	5.664	17.255
Campora	0.187	3.331	0.653	4.171
Capaccio	0.007	0.223	0.038	0.269
Caposele		21.736	0.356	22.092
Casalbuono			0.043	0.043
Castel San Lorenzo	0.320	3.147	0.000	3.467
Castelcivita	0.057	9.272	1.354	10.683
Castelgrande		2.177	0.338	2.515
Castelnuovo di Conza	0.136	7.762	0.102	8.000
Colliano		9.476	3.605	13.081
Controne		0.018	0.824	0.842
Contursi Terme		5.725	0.191	5.915
Corleto Monforte	0.370	2.544	0.533	3.447
Eboli		0.700	0.216	0.916
Felitto	0.313	8.738	0.036	9.087
Gioi		0.437		0.437
Lagonegro			0.009	0.009
Laurino	0.654	8.813	3.156	12.624
Laviano	0.036	7.526	0.442	8.004
Lioni		1.179	0.032	1.211

Comune	Pf1	Pf2	Pf3	Totale (Km ²)
Magliano Vetere		0.277	0.078	0.355
Marsico Nuovo		2.550		2.550
Moio della Civitella		1.073		1.073
Monte San Giacomo		5.335	1.030	6.365
Montesano sulla Marcellana		0.268	0.532	0.800
Muro Lucano	0.010	1.871	3.230	5.111
Oliveto Citra	0.770	11.840	1.294	13.904
Ottati	0.046	2.320	1.666	4.032
Padula		0.768	0.258	1.026
Palomonte		4.367	0.734	5.101
Pertosa		0.998	0.008	1.005
Pescopagano		0.478		0.478
Petina		0.405	1.423	1.828
Piaggine	0.187	2.092	0.244	2.522
Picerno	1.490	19.743	0.037	21.270
Polla		0.028	0.112	0.141
Postiglione		10.996	8.678	19.674
Ricigliano		1.280	0.451	1.731
Rocccaspide	0.111	10.246	1.121	11.478
Romagnano al Monte		0.993	2.140	3.134
Roscigno	0.490	6.803	0.028	7.321
Ruoti		4.508		4.508
Sacco		4.288	2.232	6.520
Sala Consilina			0.382	0.382
Salvitelle	0.007	1.688	1.681	3.377
San Gregorio Magno	0.025	3.506	1.138	4.670
San Pietro al Tanagro		0.049	0.284	0.332
San Rufo		0.033	1.191	1.224
Sant'Angelo a Fasanella		1.823	0.805	2.629
Sant'Angelo le Fratte		2.297	0.293	2.590
Sant'Arsenio			0.015	0.015
Santomenna		2.796	0.136	2.933
Sanza			0.070	0.070
Sassano		1.072	0.262	1.334
Sasso di Castalda	0.080	3.967	0.180	4.227
Satriano di Lucania	0.689	4.126	0.003	4.817
Savoia di Lucania		4.241	0.095	4.336
Senerchia		7.567	0.071	7.637
Serre	0.030	2.987	0.016	3.033
Sicignano degli Alburni	0.007	7.717	4.373	12.097

Comune	Pf1	Pf2	Pf3	Totale (Km ²)
Stio	0.215	1.303	0.000	1.518
Teggiano		4.161	1.020	5.180
Tito		1.323		1.323
Valle dell'Angelo		0.338	0.576	0.914
Valva	0.016	7.562	2.431	10.010
Vietri di Potenza		2.953	3.221	6.174
Totale complessivo	7.659	355.664	66.550	429.873

Tabella 6.10. Distribuzione delle classi di pericolosità per Comune.

Tipologia di frana	Pf1	Pf2	Pf3	Totale (Km ²)
AREA SOGGETTA A CROLLI/RIBALTAMENTI DIFFUSI		0.005	61.959	61.963
AREA SOGGETTA A DEFORMAZIONI LENTE DIFFUSE		196.557		196.557
COLAMENTO LENTO	0.424	29.073		29.496
COLAMENTO RAPIDO			0.476	0.476
CROLLO/RIBALTAMENTO			3.657	3.657
DGPV	0.734			0.734
ESPANSIONI	0.853			0.853
FRANA COMPLESSA CARATTERIZZATA DA VELOCITÀ DA LENTA A MODERATA	4.610	113.658		118.269
FRANA COMPLESSA CARATTERIZZATA DA VELOCITÀ DA RAPIDA AD ESTREMAMENTE RAPIDA		0.065	0.401	0.466
SCIVOLAMENTO ROTAZIONALE/TRASLATIVO	1.039	16.306		17.345
SPROFONDAMENTO			0.058	0.058
Totale complessivo	7.659	355.664	66.550	429.873

Tabella 6.11. Distribuzione delle classi di pericolosità per tipologia di frana.

6.3.3 Carta degli Scenari del Rischio

Nella Figura 6.4 è illustrato il processo di *overlay* tra la Carta degli Scenari di Franosità (Fig. 6.4a) e la Carta del Danno (Fig. 6.4b) che ha consentito la redazione della Carta degli Scenari del Rischio (Fig. 6.4c) (Autorità di Bacino Interregionale Sele 2009).

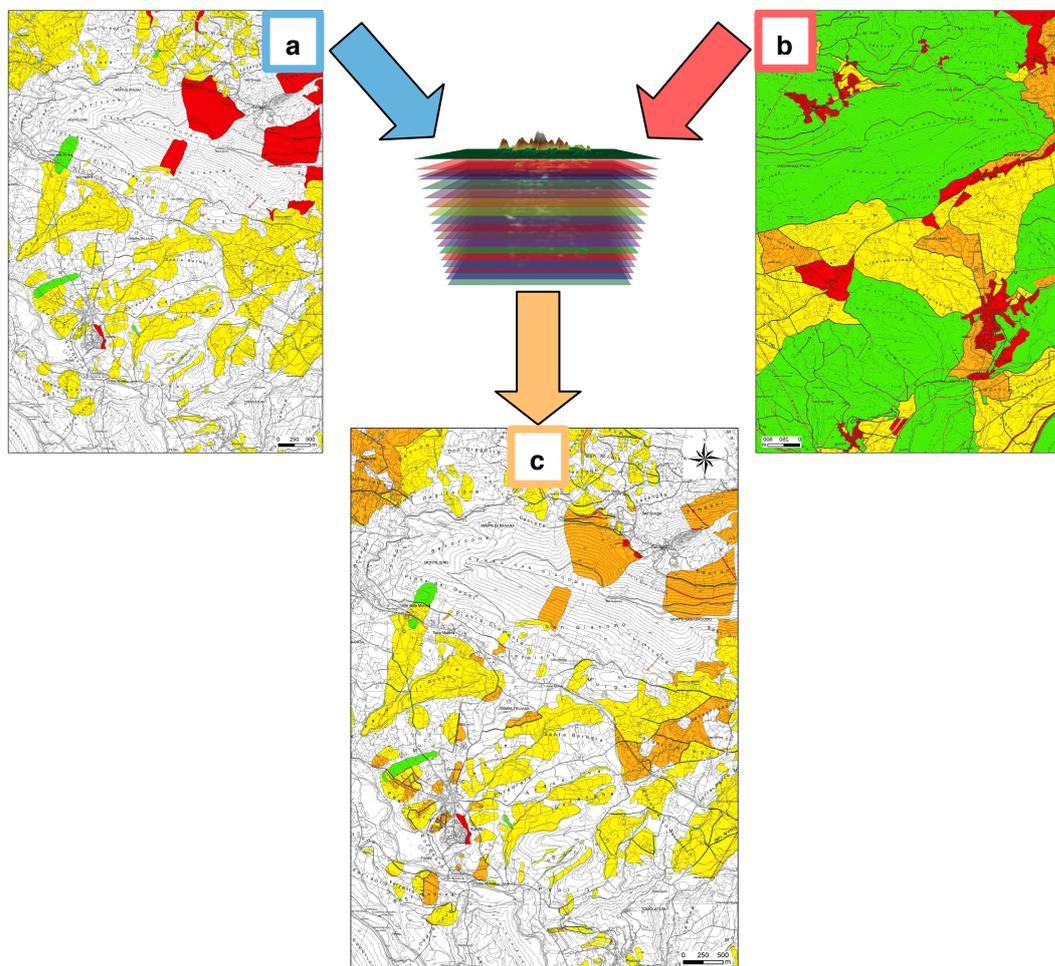


Figura 6.4. Procedura adottata per la definizione della Carta degli Scenari del Rischio. a) Carta degli Scenari di Franosità: Pf1 = verde; Pf2 = giallo; Pf3 = rosso; b) Carta del Danno: D1 = verde; D2 = giallo; D3 = arancio; D4 = rosso; c) Carta degli Scenari del Rischio: Rf1 = verde; Rf2 = giallo; Rf3 = arancio; Rf4 = rosso; (Autorità di Bacino Interregionale Sele 2009).

Partendo dalla Carta degli Scenari di Franosità, in cui a tutti gli areali censiti in frana è stato assegnato un indice di pericolosità (Pf1, Pf2 e Pf3), è stata effettuata un'operazione di *overlay* con la Carta del Danno (D1, D2, D3 e D4), che ha consentito di attribuire gli indici del rischio "reale" (Rf1, Rf2, Rf3 ed Rf4) a ciascuna porzione di territorio rilevato. secondo la matrice di seguito riportata (Tab. 6.12)

Scenari del Rischio			
	Pf1	Pf2	Pf3
D1	Rf1	Rf2	Rf3
D2	Rf1	Rf2	Rf3
D3	Rf2	Rf3	Rf4
D4	Rf2	Rf3	Rf4

Tabella 6.12. Matrice degli Scenari di Rischio, definiti in funzione della suscettività da frana (Pf1, Pf2, Pf3) e del danno (D1, D2, D3, D4).

E' possibile osservare che, in base alla matrice utilizzata per la definizione delle classi del rischio, fenomeni franosi classificati con indice di pericolosità Pf3 (crolli, aree soggette a crollo, sprofondamenti, colamenti rapidi, frane complesse caratterizzate da velocità da rapida ad estremamente rapida, ecc.), attivi e/o quiescenti, danno luogo ad aree classificate a rischio elevato (Rf3) e molto elevato (Rf4), in funzione dell'indice di danno che intersecano (rispettivamente D1-D2 e D3-D4). Allo stesso tempo, frane classificate con indice Pf3 ma inattive (stabilizzate o relitte) danno luogo ad areali a rischio medio ed elevato.

I fenomeni franosi classificati con indice di pericolosità Pf2 (scivolamenti, colamenti lenti, aree soggette a deformazioni lente diffuse, frane complesse caratterizzate da velocità da lenta a moderata, ecc.), attivi, quiescenti e/o inattivi, danno luogo ad indici di rischio da Rf2 a Rf3 in funzione della classe di danno che intersecano (rispettivamente D1-D2 e D3-D4).

Infine, fenomeni classificati con pericolosità Pf1 (DGPV ed espansioni), attivi, quiescenti e/o inattivi, possono assumere rispettivamente indici di rischio moderato e medio.

In Figura 6.5 è riportata la ripartizione del territorio classificato (circa 430 Km²) secondo i quattro livelli di rischio (Rf1=2%; Rf2=3%; Rf3=24%; Rf4=1%).

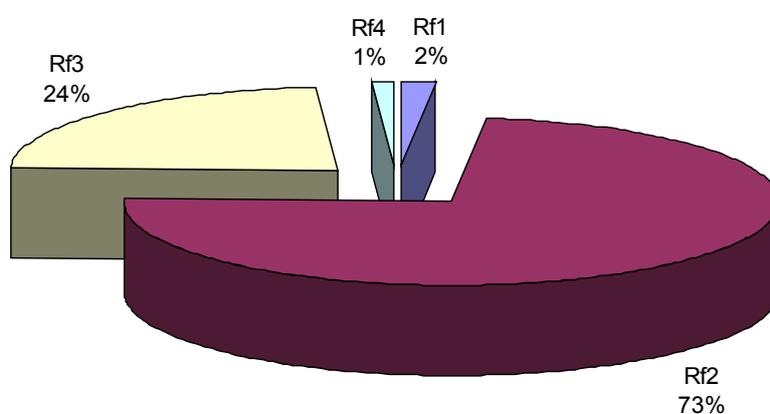


Figura 6.5. Classi di rischio "reale", (Rf1=2%; Rf2=3%; Rf3=24%; Rf4=1%).

Di seguito si riporta la distribuzione delle aree a diverso grado di rischio in relazione a ciascun Comune (Tab. 6.13) ed a ciascuna tipologia di frana (Tab. 6.14).

Comune	Rf1	Rf2	Rf3	Rf4	Totale (Km ²)
Albanella		3.600	0.909		4.509
Altavilla Silentina	0.130	4.810	0.419		5.359
Aquara	0.006	7.093	0.637	0.008	7.745
Atena Lucana		0.108	0.017		0.125
Auletta	0.155	3.735	0.759	0.024	4.672
Avigliano		3.221	0.386		3.607
Balvano		2.915	1.918	0.038	4.871
Baragiano	0.034	0.754	0.016	0.000	0.805
Bella	0.987	10.310	0.367	0.011	11.675
Bellosguardo		4.979	0.097		5.075
Brienza		0.669	0.290	0.000	0.959
Buccino		25.232	5.989	0.028	31.249
Buonabitacolo			0.176	0.001	0.177
Caggiano		9.561	4.679	0.064	14.304
Calabritto		6.557	1.353	0.014	7.924
Campagna	0.002	10.897	6.182	0.174	17.255
Campora	0.187	3.287	0.692	0.005	4.171
Capaccio	0.007	0.220	0.042		0.269
Caposele		19.386	2.687	0.019	22.092
Casalbuono			0.042	0.001	0.043
Castel San Lorenzo	0.316	3.045	0.106		3.467
Castelcivita	0.044	8.586	2.009	0.044	10.683
Castelgrande		2.175	0.338	0.002	2.515
Castelnuovo di Conza	0.136	6.701	1.152	0.011	8.000
Colliano		5.167	7.485	0.430	13.081
Controne		0.018	0.800	0.023	0.842
Contursi Terme		4.808	1.087	0.020	5.915
Corleto Monforte	0.363	2.514	0.571		3.447
Eboli		0.517	0.373	0.026	0.916
Felitto	0.313	8.658	0.115	0.001	9.087
Gioi		0.427	0.011		0.437
Lagonegro			0.009		0.009
Laurino	0.602	8.639	3.358	0.024	12.624
Laviano	0.036	7.242	0.721	0.005	8.004
Lioni		1.158	0.053	0.001	1.211
Magliano Vetere		0.247	0.103	0.005	0.355
Marsico Nuovo		2.528	0.021		2.550

Comune	Rf1	Rf2	Rf3	Rf4	Totale (Km ²)
Moio della Civitella		1.051	0.022		1.073
Monte San Giacomo		5.136	1.220	0.008	6.365
Montesano sulla Marcellana		0.244	0.521	0.035	0.800
Muro Lucano	0.010	1.787	3.294	0.021	5.111
Oliveto Citra	0.770	8.960	4.123	0.051	13.904
Ottati	0.046	2.306	1.505	0.175	4.032
Padula		0.735	0.260	0.032	1.026
Palomonte		3.432	1.564	0.105	5.101
Pertosa		0.969	0.036	0.000	1.005
Pescopagano		0.478			0.478
Petina		0.362	1.383	0.084	1.828
Piaggine	0.187	2.057	0.276	0.002	2.522
Picerno	1.243	19.655	0.372	0.000	21.270
Polla		0.028	0.104	0.009	0.141
Postiglione		10.176	8.463	1.034	19.674
Ricigliano		1.261	0.459	0.011	1.731
Roccadaspide	0.109	6.854	4.504	0.011	11.478
Romagnano al Monte		0.965	2.059	0.109	3.134
Roscigno	0.488	6.743	0.090	0.000	7.321
Ruoti		4.412	0.096		4.508
Sacco		3.006	2.761	0.754	6.520
Sala Consilina			0.362	0.020	0.382
Salvitelle	0.007	1.624	1.706	0.040	3.377
San Gregorio Magno	0.025	2.809	1.835	0.001	4.670
San Pietro al Tanagro		0.045	0.284	0.003	0.332
San Rufo		0.033	1.051	0.141	1.224
Sant'Angelo a Fasanella		1.810	0.750	0.069	2.629
Sant'Angelo le Fratte		2.145	0.407	0.037	2.590
Sant'Arsenio			0.011	0.005	0.015
Santomenna		2.427	0.475	0.030	2.933
Sanza			0.070		0.070
Sassano		1.069	0.253	0.012	1.334
Sasso di Castalda	0.080	3.907	0.237	0.003	4.227
Satriano di Lucania	0.689	4.086	0.042		4.817
Savoia di Lucania		4.222	0.114	0.000	4.336
Senerchia		6.535	1.102		7.637
Serre	0.030	2.828	0.175	0.000	3.034
Sicignano degli Alburni	0.007	7.522	4.421	0.147	12.097
Stio	0.215	1.257	0.046		1.518
Teggiano		4.141	1.028	0.011	5.180

Comune	Rf1	Rf2	Rf3	Rf4	Totale (Km ²)
Tito		1.259	0.064		1.323
Valle dell'Angelo		0.327	0.587		0.914
Valva		5.947	3.809	0.254	10.010
Vietri di Potenza		2.892	3.196	0.086	6.174
Totale complessivo	7.222	317.266	101.106	4.279	429.873

Tabella 6.13 Distribuzione delle classi di rischio per Comune.

Tipologia di frana	Rf1	Rf2	Rf3	Rf4	Totale (Km ²)
AREA SOGGETTA A CROLLI/RIBALTAMENTI DIFFUSI		0.003	57.753	4.207	61.963
AREA SOGGETTA A DEFORMAZIONI LENTE DIFFUSE		172.638	23.919		196.557
COLAMENTO LENTO	0.402	26.031	2.860		29.293
COLAMENTO RAPIDO			0.463	0.013	0.476
CROLLO/RIBALTAMENTO			3.633	0.024	3.657
ESPANSIONE	0.080				0.080
FRANA COMPLESSA CARATTERIZZATA DA VELOCITA DA LENTA A MODERATA	4.317	103.083	10.869		118.269
SCIVOLAMENTO ROTAZIONALE/TRASLATIVO	0.966	15.397	1.186		17.549
SPROFONDAMENTO			0.047	0.011	0.058
FRANA COMPLESSA CARATTERIZZATA DA VELOCITA DA RAPIDA AD ESTREMAMENTE RAPIDA		0.065	0.376	0.025	0.466
DGPV	0.685	0.049			0.734
ESPANSIONI	0.772	0.000			0.773
Totale complessivo	7.222	317.266	101.106	4.279	429.873

Tabella 6.14. Distribuzione delle classi di rischio per tipologia di frana.

6.3.4 Carta della Pericolosità

L'attività di censimento delle frane ha restituito un quadro di marcato dissesto quantificabile in circa il 38% del territorio studiato, per una superficie complessiva di circa 430 km². In particolare, poco meno dell'85% delle frane censite sono caratterizzate da un'intensità bassa e media ed il restante 15% da alta intensità.

Per la definizione della Pericolosità da frana si è utilizzata la metodologia secondo la quale, una volta identificata la pericolosità "reale" delle frane censite (Scenari di Franosità), si è passati alla definizione della pericolosità "potenziale" delle UTR.

Dall'intersezione della "Carta delle UTR e dei distretti litologici" con la "Carta inventario delle frane" si è ottenuta la distribuzione delle diverse tipologie di frana ricadenti nelle UTR individuate. Si è potuto così notare che quasi tutte le UTR (39 delle 41 censite) sono interessate da corpi di frana o loro parti, intendendosi in tal senso aree di distacco e/o transito e/o accumulo. Si è successivamente proceduto ad escludere i valori di intersezione tra UTR e tipologie di frana inferiori all'1%, in quanto ritenuti poco significativi. Percentuali così ridotte avrebbero infatti costituito "disturbi" nell'analisi statistica della frequenza, poiché in gran parte derivanti dal processo di sovrapposizione sia dei distretti litologici con le unità morfologiche, sia delle UTR con le frane. In tal modo si è pervenuti ad un numero di UTR pari a 17, mentre per tutte le altre UTR risulta assegnato un livello di pericolosità "potenziale" nullo (Putr0) .

Sono stati quindi calcolati gli indici di franosità, dividendo l'area di ciascuna tipologia di frana (A_{fi}) ricadente in ciascuna UTR (UTR_n) per l'area della stessa UTR (A_{UTR_n})

$$\text{Indice di franosità} = \frac{A_{fi,UTR_n}}{A_{UTR_n}}$$

Nella Tabella 6.15 si riportano gli indici delle UTR per ogni tipologia di frana. Gli indici calcolati sono stati poi classificati, secondo il metodo della distribuzione standardizzata (capitolo 6.2.1), per ottenere la pericolosità delle UTR per singola tipologia di frana.

UTR	Area soggetta a crolli/ribaltamenti diffusi	Crollo/Ribalamento	Frana complessa caratterizzata da velocità da rapide ad estremamente rapida	Colamento rapido	Sprofondamento	Area soggetta a sprofondamenti diffusi	Scivolamento rotazionale/traslativo	Frana complessa caratterizzata da velocità da lenta a moderata	Colamento lento	Area soggetta a deformazioni lente diffuse	DGPV	Espansione
a2	0.5102											
a8	0.1243	0.0023		0.0001								
b1	0.2038		0.0004	0.0014			0.0165	0.1257	0.0249			
b2	0.6261											0.0155
b6	0.1175											
b8	0.7880	0.0410										
c8	0.0235				0.0004	0.0002						
d1	0.1222	0.0029	0.0040	0.0001			0.0135	0.0226	0.0093	0.1010		
d2	0.1561											
e1	0.0024		0.0008	0.0020			0.0430	0.2400	0.0697	0.3939		0.0012
e2												0.0633
e3							0.0128		0.0095	0.1952		
e5				0.0005			0.0098	0.0556	0.0323	0.1591		
e6				0.0006			0.0149	0.0672	0.0420	0.1528	0.0070	0.0001
e7				0.0003			0.0132	0.0389	0.0245	0.2357		0.0006
e8	0.1571	0.0209			0.0002		0.0030					
f1		0.0011								0.0359		

**Tabella 6.15. Indici di franosità riferiti a ciascuna tipologia di frana,
(Autorità di Bacino Interregionale Sele 2009).**

Infine, per formulare uno scenario unico di pericolosità, si è calcolato un indice di franosità complessivo (per ciascuna UTR) sommando i singoli indici di franosità, ciascuno dei quali moltiplicato per un peso in funzione della propria intensità (1 = intensità alta; 0,75 = intensità media, 0,5 = intensità bassa). Si è quindi classificato tale indice secondo quanto riportato al capitolo 6.2 (4 classi). Per la valutazione dell'indice dello stato di attività di ciascuna UTR si è proceduto con la somma di tutti gli indici di franosità delle frane ad uguale stato di attività e si è assegnato come stato di attività dell'UTR quello che presenta l'indice con il valore assoluto più alto. Si è passati quindi alla classificazione di tale indice secondo quanto riportato al capitolo 6.2 (4 classi). La valutazione della pericolosità delle UTR è il risultato della combinazione delle classi di franosità complessiva con le classi dello stato di attività secondo la matrice riportata in Tabella 6.16.

		Franosità complessiva			
		1	2	3	4
Stato di attività	1	Putr1	Putr1	Putr2	Putr2
	2	Putr1	Putr2	Putr2	Putr3
	3	Putr2	Putr2	Putr3	Putr4
	4	Putr2	Putr3	Putr4	Putr4

Tabella 6.16. Matrice della Suscettività da frana delle UTR.

In definitiva, la “Carta della Pericolosità” (Fig. 9) è stata ottenuta mediante la sovrapposizione della “Carta degli Scenari di franosità” e di un elaborato “intermedio” derivato dalla “Carta delle UTR e dei distretti litologici”, a cui sono stati assegnati, come descritto in precedenza, i diversi gradi di pericolosità “potenziale” (Putr):

- Putr1: UTR con moderata propensione all'innescamento-transito-invasione per frane paragonabili a quelle che caratterizzano attualmente la stessa UTR
- Putr2: UTR con media propensione all'innescamento-transito-invasione per frane paragonabili a quelle che caratterizzano attualmente la stessa UTR
- Putr3: UTR con elevata propensione all'innescamento-transito-invasione per frane paragonabili a quelle che caratterizzano attualmente la stessa UTR
- Putr4: UTR con molto elevata propensione all'innescamento-transito-invasione per frane paragonabili a quelle che caratterizzano attualmente la stessa UTR.

Alle suddette classi, come già detto in precedenza, è stata aggiunta un'ulteriore classe di pericolosità "potenziale" (Putr5) a cui corrisponde la seguente definizione: "Aree per le quali il livello di pericolosità sarà definito a seguito di uno studio di compatibilità geologica di dettaglio, secondo la procedura adottata per la redazione del presente Piano Stralcio" (Autorità di Bacino Interregionale Sele 2009). Di seguito si riportano le distribuzioni areali (totali e per Comune) delle diverse classi di pericolosità "reale" e "potenziale" con cui sono stati classificati i territori studiati. (Tab. 6.17, 6.18 e 6.19). È da precisare che negli elaborati cartografici si è stabilito di non rappresentare le aree dotate di pericolosità "potenziale" nulla (Putr0).

Classe di Pericolosità	Km ²
Pf1	7.66
Pf2	355.60
Pf3	66.55
Putr0	99.78
Putr1	78.58
Putr2	203.66
Putr3	190.17
Putr4	30.82
Putr5	106.64

Tabella 6.17. Estensione areale complessiva delle diverse classi di Pericolosità "reale" e "potenziale".

Comune	Putr0	Putr1	Putr2	Putr3	Putr4	Putr5	Totale (Km ²)
Albanella	3.3202	2.4963	1.5438	5.8165	1.1178	0.0079	14.3025
Altavilla Silentina	3.5705	2.7752	0.7353	8.4299	0.3221		15.8330
Aquara	1.2700	1.1369	0.2086	3.6535	0.4207		6.6898
Atena Lucana	0.0579	0.4470	1.0352	0.0428	0.3381		1.9210
Auletta	0.9736	0.9577	8.3080	0.0700	0.3092	0.0334	10.6519
Avigliano	0.4274	0.0359	0.8538	1.2869	0.1567	0.7468	3.5073
Balvano	0.2700	0.1127	3.4443	7.6273	0.1056	1.9008	13.4202
Baragiano	0.2231	0.3226	2.7220	0.1050	0.1122		3.4848
Bella	3.1437	0.6068	12.3704	26.0772	1.9110	0.4114	44.5205
Bellosguardo	1.6036	0.9678	0.1784	3.1062	0.2424		6.0983
Brienza	2.3049	0.5570	2.1465	3.2356	0.2782	0.2690	8.7914
Buccino	2.1333	2.1101	4.5414	0.5472	0.5723	2.6558	12.5601
Buonabitacolo	0.0044	0.0353	0.6064	0.0016	0.0152	0.8485	1.5114
Caggiano	0.1985	0.0608	0.5949	0.0256	0.1190	1.4668	2.3875
Calabritto	0.3311	0.7310	3.3127	0.4585	0.0778	1.3831	6.2941
Campagna	3.2263	2.8241	14.0747	3.2496	1.4779	6.2539	31.1065
Campora	0.8814	0.3593	1.6130	3.2840	0.6782	0.0528	6.8687
Capaccio	0.1904	0.6395	4.1638	0.2429	0.3738	1.3565	6.9669
Caposele	1.9248	0.5451	1.9735	1.7029	0.0921	2.4435	8.6819
Casalbuono	0.0985	0.1279	1.2758	0.0094	0.0445	0.1718	1.7279
Castel San Lorenzo	0.7350	1.2188	0.0371	1.7636	0.1349		3.8894
Castelcivita	1.9742	2.8962	0.6450	2.4944	0.6828	0.0209	8.7134
Castelgrande	0.2637	0.0047	0.4565	2.3895	0.1078	0.0374	3.2597
Castelnuovo di Conza	1.1208	0.0450	0.3341	2.2204	0.1980		3.9184
Colliano	2.3722	1.7582	7.4315	0.0958	0.7167	7.7112	20.0856
Controne	0.0023	0.2356	0.1251	0.0004	0.0076	1.0637	1.4347
Contursi Terme	2.9974	2.9574	1.4976	6.2572	0.9167		14.6262
Corleto Monforte	0.5966	0.4934	1.3374	0.9419	0.1885		3.5577
Eboli	1.5354	3.2524	1.1894	0.1200	1.4472	0.4510	7.9954
Felitto	1.3774	0.7474	3.5514	6.5242	0.5515		12.7519
Gioi	0.2621			0.5811	0.2839	0.4469	1.5740
Lagonegro		0.0046	0.0712	0.1114	0.0055	1.9848	2.1776
Laurino	2.8295	1.4919	1.2676	7.3491	0.8610		13.7990
Laviano	3.3972	0.4649	6.4287	1.3228	0.7246	6.5831	18.8931
Lioni	0.0199	0.0010	0.0195	0.0104	0.0000		0.0509
Magliano Vetere	0.0629	0.0179	0.1848	0.4143	0.0032		0.6831
Marsico Nuovo	0.4555	0.0924	0.1315	0.9668	0.0013		1.6476
Moio della Civitella	0.3883	0.0668	0.0001	1.3158	0.2799	0.7496	2.8006
Monte San Giacomo	0.9594	2.4026	4.7514	0.7911	1.5374		10.4419
Montesano sulla Marcellana	0.1853	0.0471	1.0078	0.6240	0.3646	0.1508	2.3794
Muro Lucano	0.3080	0.4450	4.8835	1.7551	0.4391	7.4734	15.3041
Oliveto Citra	2.4740	0.8732	3.8376	6.1236	0.2201		13.5285

Comune	Putr0	Putr1	Putr2	Putr3	Putr4	Putr5	Totale (Km ²)
Ottati	1.0182	1.0381	2.1455	1.4439	0.2440	0.0080	5.8976
Padula	0.0446	8.2527	1.6005	1.9588	0.0091		11.8657
Palomonte	9.0051	1.7405	4.9039	5.6238	0.5153	0.0976	21.8862
Pertosa	0.2311	0.1150	0.4415	0.0090	0.1032	0.0014	0.9012
Pescopagano	0.0139			0.3002	0.0001		0.3142
Petina	0.4719	0.7049	5.6086	0.3811	0.2211	4.0743	11.4620
Piaggine	0.6779	0.4144	0.7496	1.3193	0.1969		3.3581
Picerno	3.3880	0.4725	3.5683	5.7746	0.0001	0.2645	13.4680
Polla	0.4626	0.0706	2.3873	0.1842	0.5468	3.1353	6.7867
Postiglione	4.8511	2.3085	0.1831	7.7316	0.6103		15.6847
Ricigliano	0.9832	0.2930	3.3896	0.0215	0.6393	1.5304	6.8232
Rocccadaspide	5.0145	5.7874	13.5849	12.1545	0.5246	2.0582	39.1240
Romagnano al Monte	0.6119	0.5347	0.8868	0.0280	0.3512	0.0004	2.4093
Roscigno	0.8617	0.1936	0.2189	2.4302	0.1080		3.8122
Ruoti	0.7656	0.0532	3.7429	2.8979	0.2800	4.0316	11.7712
Sacco	0.3683	0.2381	0.2346	1.4468	0.0349		2.3227
Sala Consilina	0.0013	0.9587	4.7875	2.7266	0.6336	3.4178	12.5254
Salvitelle	0.1000	0.6389	1.6027	0.0152	0.2626		2.6195
San Gregorio Magno	1.0336	2.7365	18.7381	0.2561	2.9105		25.6731
San Pietro al Tanagro	0.0432	0.0342	0.1862	0.2061	0.0000	1.4225	1.8923
San Rufo	1.1526	0.9726	2.7738	2.4272	0.0675		7.3937
Sant'Angelo a Fasanella	0.6042	1.0269	1.1931	2.6766	0.3804		5.8811
Sant'Angelo le Fratte	0.6274	0.3479	0.9729	1.8565	0.0179	2.6822	6.5049
Sant'Arsenio		0.0203	0.1235		0.0010	1.1776	1.3225
Santomenna	0.4327	0.2572	1.6475	0.2176	0.2342		2.7892
Sanza		0.0616	0.8582	0.0047	0.0571		0.9815
Sassano	0.0165	1.6298	2.0723	0.1315	0.2837	0.1465	4.2803
Sasso di Castalda	0.2851	0.0616	0.0988	1.5697	0.0294		2.0447
Satriano di Lucania	2.2207	0.3386	0.7814	3.1536	0.0036	0.0021	6.5000
Savoia di Lucania	1.7193	0.0438	0.3721	2.8549	0.0011	0.3358	5.3270
Senerchia	0.4483	0.3894	1.5484	0.6431	0.0219	4.4308	7.4819
Serre	2.2571	1.0738	0.0702	3.9057	0.1921		7.4989
Sicignano degli Alburni	4.6893	6.0639	4.4051	4.4581	1.5717	11.2352	32.4232
Stio	0.3713	0.0949	0.0509	1.1965	0.3095	5.0932	7.1163
Teggiano	0.1881	0.5369	7.3385	0.5972	0.5520		9.2127
Tito	0.9706	0.0759	0.3250	0.9894	0.0010	5.1173	7.4792
Valle dell'Angelo	0.0422	0.0401	0.0113	0.1427	0.0152		0.2516
Valva	1.9545	0.9849	1.3484	0.9882	0.4175	3.8598	9.5533
Vietri di Potenza	1.3798	0.6060	3.8210	2.3063	0.0390	5.7725	13.9246
Totale complessivo	99.78	78.58	203.66	190.17	30.82	106.57	709.40

Tabella 6.18. Estensione areale per Comune delle diverse classi di Pericolosità "potenziale".

Comune	Pf1	Pf2	Pf3	Totale (Km ²)
Albanella		4.509		4.509
Altavilla Silentina	0.130	5.219	0.010	5.359
Aquara	0.021	7.215	0.509	7.745
Atena Lucana		0.125		0.125
Auletta	0.219	4.301	0.152	4.672
Avigliano		3.607		3.607
Balvano		2.929	1.942	4.871
Baragiano	0.034	0.755	0.015	0.805
Bella	1.000	10.342	0.333	11.675
Bellosguardo		5.075		5.075
Brienza		0.675	0.285	0.959
Buccino		30.899	0.350	31.249
Buonabitacolo		0.107	0.070	0.177
Caggiano		12.626	1.679	14.304
Calabritto		7.851	0.073	7.924
Campagna	0.002	11.589	5.664	17.255
Campora	0.187	3.331	0.653	4.171
Capaccio	0.007	0.223	0.038	0.269
Caposele		21.736	0.356	22.092
Casalbuono			0.043	0.043
Castel San Lorenzo	0.320	3.147	0.000	3.467
Castelcivita	0.057	9.272	1.354	10.683
Castelgrande		2.177	0.338	2.515
Castelnuovo di Conza	0.136	7.762	0.102	8.000
Colliano		9.476	3.605	13.081
Controne		0.018	0.824	0.842
Contursi Terme		5.725	0.191	5.915
Corleto Monforte	0.370	2.544	0.533	3.447
Eboli		0.700	0.216	0.916
Felitto	0.313	8.738	0.036	9.087
Gioi		0.437		0.437
Lagonegro			0.009	0.009
Laurino	0.654	8.813	3.156	12.624
Laviano	0.036	7.526	0.442	8.004
Lioni		1.179	0.032	1.211
Magliano Vetere		0.277	0.078	0.355
Marsico Nuovo		2.550		2.550
Moio della Civitella		1.073		1.073
Monte San Giacomo		5.335	1.030	6.365
Montesano sulla Marcellana		0.268	0.532	0.800

Comune	Pf1	Pf2	Pf3	Totale (Km ²)
Muro Lucano	0.010	1.871	3.230	5.111
Oliveto Citra	0.770	11.840	1.294	13.904
Ottati	0.046	2.320	1.666	4.032
Padula		0.768	0.258	1.026
Palomonte		4.367	0.734	5.101
Pertosa		0.998	0.008	1.005
Pescopagano		0.478		0.478
Petina		0.405	1.423	1.828
Piaggine	0.187	2.092	0.244	2.522
Picerno	1.490	19.743	0.037	21.270
Polla		0.028	0.112	0.141
Postiglione		10.996	8.678	19.674
Ricigliano		1.280	0.451	1.731
Roccadaspide	0.111	10.246	1.121	11.478
Romagnano al Monte		0.993	2.140	3.134
Roscigno	0.490	6.803	0.028	7.321
Ruoti		4.508		4.508
Sacco		4.288	2.232	6.520
Sala Consilina			0.382	0.382
Salvitelle	0.007	1.688	1.681	3.377
San Gregorio Magno	0.025	3.506	1.138	4.670
San Pietro al Tanagro		0.049	0.284	0.332
San Rufo		0.033	1.191	1.224
Sant'Angelo a Fasanella		1.823	0.805	2.629
Sant'Angelo le Fratte		2.297	0.293	2.590
Sant'Arsenio			0.015	0.015
Santomenna		2.796	0.136	2.933
Sanza			0.070	0.070
Sassano		1.072	0.262	1.334
Sasso di Castalda	0.080	3.967	0.180	4.227
Satriano di Lucania	0.689	4.126	0.003	4.817
Savoia di Lucania		4.241	0.095	4.336
Senerchia		7.567	0.071	7.637
Serre	0.030	2.987	0.016	3.033
Sicignano degli Alburni	0.007	7.717	4.373	12.097
Stio	0.215	1.303	0.000	1.518
Teggiano		4.161	1.020	5.180
Tito		1.323		1.323
Valle dell'Angelo		0.338	0.576	0.914
Valva	0.016	7.562	2.431	10.010

Comune	Pf1	Pf2	Pf3	Totale (Km ²)
Vietri di Potenza		2.953	3.221	6.174
Totale complessivo	7.659	355.664	66.550	429.873

Tabella 6.19. Estensione areale per Comune delle diverse classi di Pericolosità "reale".

6.3.5. Carta del Rischio

Nella Figura 6.6 è illustrato il processo di *overlay* tra la Carta della Pericolosità (Fig. 6.6a) e la Carta del Danno (Fig. 6.6b) che ha consentito la redazione della Carta del Rischio (Fig. 6.6c) (Autorità di Bacino Interregionale Sele 2009).

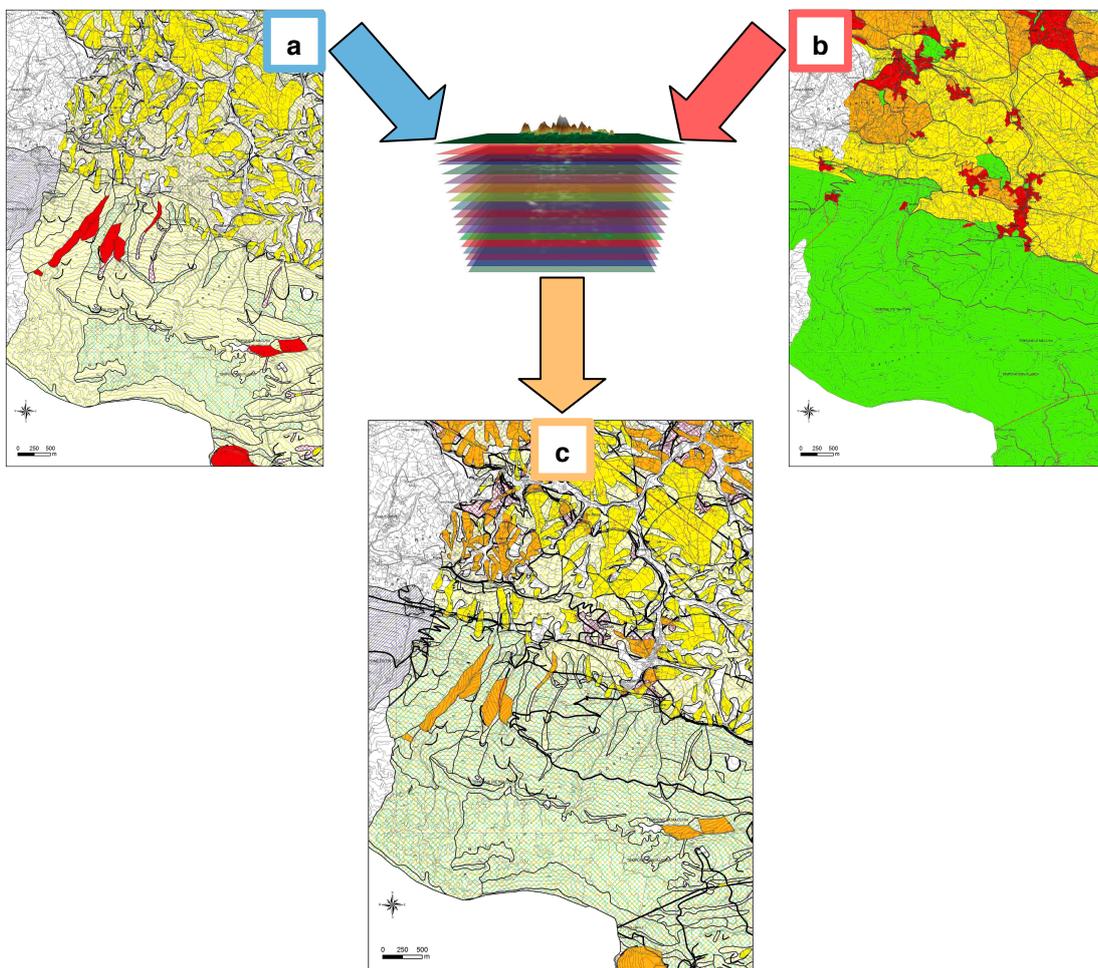


Figura 6.6. Procedura adottata per definire la Carta del Rischio. a) Carta della Pericolosità: Pf1=verde; Pf2=giallo; Pf3=rosso; Putr1=verde quadrettato; Putr2=giallo quadrettato; Putr3=arancio quadrettato; Putr4=rosso quadrettato; Putr5=blu rigato; b) Carta del Danno: D1=verde; D2=giallo; D3=arancio; D4=rosso; c) Carta del Rischio: Rf1=verde; Rf2=giallo; Rf3=arancio; Rf4=rosso; Rutr1=verde quadrettato; Rutr2=giallo quadrettato; Rutr3=arancio quadrettato; Rutr4=rosso quadrettato; Rutr5=blu rigato; (Autorità di Bacino Interregionale Sele 2009).

Le diverse classi di rischio (Moderato, Medio, Elevato e Molto Elevato), “reale” e “potenziale”, si ottengono dalle matrici di seguito riportate (Tab. 6.20).

Scenari del Rischio				
	Pf1	Pf2	Pf3	
D1	Rf1	Rf2	Rf3	
D2	Rf1	Rf2	Rf3	
D3	Rf2	Rf3	Rf4	
D4	Rf2	Rf3	Rf4	

Rischio da frana utr				
	Putr1	Putr2	Putr3	Putr4
D1	Rutr1	Rutr1	Rutr2	Rutr2
D2	Rutr1	Rutr2	Rutr2	Rutr3
D3	Rutr2	Rutr2	Rutr3	Rutr4
D4	Rutr2	Rutr3	Rutr4	Rutr4

Tabella 6.20. Matrici del Rischio da Frana connesso alla presenza di fenomeni franosi (in alto) ed alla propensione a franare delle UTR (in basso).

Alle suddette classi, come già detto in precedenza, è stata aggiunta un'ulteriore classe di rischio “potenziale” (Rutr5) a cui corrisponde la seguente definizione: “Aree per le quali il livello di rischio sarà definito a seguito di uno studio di compatibilità geologica di dettaglio, secondo la procedura adottata per la redazione del presente Piano Stralcio” (Autorità di Bacino Interregionale Sele 2009). La classe Rutr5 si riferisce ad areali non rientranti nell'esecuzione del progetto di rivisitazione.

Analogamente a quanto detto per la pericolosità “potenziale”, anche nella Carta del Rischio si ritenuto opportuno non rappresentare graficamente le aree dotate di rischio “potenziale” nullo (Rutr0).

Di seguito si riportano le distribuzioni areali (totali e per Comune) delle diverse classi di rischio “reale” e “potenziale” con cui sono stati classificati i territori studiati (Tab. 6.21, 6.22 e 6.23).
Sommando tutti gli areali studiati si ottiene un’estensione complessiva pari a circa 1140 Km².

Classi di Rischio	Km ²	Classi di Rischio	Km ²	Classi di Rischio	Km ²
Rf1	7.22	Rutr0	99.78	Rutr3	30.46
Rf2	317.21	Rutr1	215.57	Rutr4	14.87
Rf3	101.09	Rutr2	242.34	Rutr5	106.6428
Rf4	4.28				

Tabella. 6.21. Estensione areale complessiva delle diverse classi di rischio “reale” e “potenziale”.

Comune	Rutr0	Rutr1	Rutr2	Rutr3	Rutr4	Rutr5	Totale (Km ²)
Albanella	3.3202	1.5258	6.9734	1.7246	0.7506	0.0079	14.3025
Altavilla Silentina	3.5705	3.0626	8.0006	0.9266	0.2728		15.8330
Aquara	1.2700	1.3172	4.0025	0.0918	0.0082		6.6898
Atena Lucana	0.0579	0.2964	0.5278	0.8900	0.1489		1.9210
Auletta	0.9736	5.8850	3.0192	0.6683	0.0724	0.0334	10.6519
Avigliano	0.4274	0.7016	1.3751	0.1777	0.0788	0.7468	3.5073
Balvano	0.2700	3.4514	7.7458	0.0911	0.0017	1.9008	13.4608
Baragiano	0.2231	2.9448	0.2647	0.0519	0.0004		3.4848
Bella	3.1437	12.6717	27.7553	0.2094	0.3291	0.4114	44.5207
Bellosguardo	1.6036	1.1294	3.1334	0.0830	0.1490		6.0983
Brienza	2.3050	2.6358	3.4462	0.0702	0.0652	0.2690	8.7914
Buccino	2.1333	2.8508	3.9980	0.8550	0.0672	2.6558	12.5601
Buonabitacolo	0.0044	0.6237	0.0345	0.0001	0.0002	0.8485	1.5114
Caggiano	0.1985	0.5148	0.1653	0.1193	0.0010	1.4668	2.4657
Calabritto	0.3311	3.0310	1.2227	0.3159	0.0103	1.3831	6.2941
Campagna	3.2262	14.8633	5.2851	1.0410	0.4369	6.2539	31.1064
Campora	0.8814	1.8804	3.8791	0.0666	0.1084	0.0528	6.8686
Capaccio	0.1904	4.1177	1.2489	0.0511	0.0023	1.3565	6.9669
Caposele	1.9249	1.8681	2.2872	0.1526	0.0057	2.4435	8.6819
Casalbuono	0.0985	1.3148	0.1087	0.0339	0.0003	0.1718	1.7279
Castel San Lorenzo	0.7350	1.1896	1.7742	0.1683	0.0222		3.8894
Castelcivita	1.9742	3.3700	2.7679	0.4688	0.1117	0.0209	8.7134
Castelgrande	0.2637	0.3999	2.4280	0.0551	0.0755	0.0374	3.2597
Castelnuovo di Conza	1.1208	0.1335	0.9042	0.2230	1.5370		3.9184
Colliano	2.3722	5.5113	3.2116	0.9819	0.2974	7.7112	20.0856
Controne	0.0023	0.2794	0.0830	0.0062		1.0637	1.4347
Contursi Terme	2.9974	2.9839	6.6399	1.4544	0.5506		14.6262
Corleto Monforte	0.5966	1.7155	1.1005	0.1202	0.0249		3.5578
Eboli	1.5354	2.9858	1.1605	1.8009	0.0618	0.4510	7.9954

Comune	Rutr0	Rutr1	Rutr2	Rutr3	Rutr4	Rutr5	Totale (Km ²)
Felitto	1.3774	4.1636	6.9867	0.1826	0.0417		12.7519
Gioi	0.2621		0.8497	0.0063	0.0090	0.4469	1.5740
Lagonegro		0.0561	0.1167	0.0198	0.0002	1.9848	2.1776
Laurino	2.8295	2.6258	8.0519	0.1715	0.1204		13.7990
Laviano	3.3972	6.4459	2.3515	0.1369	0.0066	6.5831	18.9213
Lioni	0.0199	0.0204	0.0104	0.0001	0.0000		0.0509
Magliano Vetere	0.0629	0.1989	0.3670	0.0374	0.0169		0.6831
Marsico Nuovo	0.4555	0.1987	0.9770	0.0046	0.0118		1.6476
Moio della Civitella	0.3883	0.0670	1.5868	0.0089		0.7496	2.8006
Monte San Giacomo	0.9594	6.6100	2.4100	0.3559	0.1067		10.4419
Montesano sulla Marcellana	0.1853	0.8522	0.8095	0.2511	0.1307	0.1508	2.3795
Muro Lucano	0.3080	5.1608	2.3075	0.0483	0.0060	7.4734	15.3041
Oliveto Citra	2.4740	0.6318	5.7010	3.0719	1.6498		13.5285
Ottati	1.0182	3.0852	1.7515	0.0329	0.0018	0.0080	5.8976
Padula	0.0446	5.4093	6.1931	0.1621	0.0566		11.8657
Palomonte	9.0051	1.1140	9.0726	1.5470	1.0499	0.0976	21.8862
Pertosa	0.2311	0.5171	0.1419	0.0002	0.0095	0.0014	0.9012
Pescopagano	0.0139		0.3000	0.0003			0.3142
Petina	0.4719	5.6365	1.1942	0.0764	0.0088	4.0743	11.4620
Piaggine	0.6779	1.1634	1.4985	0.0173	0.0010		3.3581
Picerno	3.3880	2.5557	6.7820	0.4168	0.0611	0.2645	13.4680
Polla	0.4626	2.2544	0.8268	0.0367	0.0710	3.1353	6.7867
Postiglione	4.8511	1.9740	8.5071	0.2779	0.0746		15.6847
Ricigliano	0.9832	1.2585	2.5226	0.5600	0.0023	1.5304	6.8569
Roccadaspide	5.0145	17.0715	11.1688	2.8464	0.9647	2.0582	39.1240
Romagnano al Monte	0.6119	1.3049	0.4300	0.0440	0.0218	0.0004	2.4129
Roscigno	0.8617	0.4093	2.3383	0.0170	0.1860		3.8122
Ruoti	0.7656	3.0124	3.4704	0.4704	0.0208	4.0316	11.7712
Sacco	0.3683	0.3945	1.4239	0.0880	0.0481		2.3227
Sala Consilina	0.0013	3.0238	2.7696	1.5900	1.7230	3.4178	12.5255
Salvitelle	0.1000	2.0437	0.3991	0.0685	0.0081		2.6195
San Gregorio Magno	1.0336	14.1796	7.3886	1.8787	1.2006		25.6811
San Pietro al Tanagro	0.0433	0.0988	0.2635	0.0556	0.0087	1.4225	1.8923
San Rufo	1.1526	3.3961	2.2179	0.3482	0.2789		7.3937
Sant'Angelo a Fasanella	0.6042	1.9748	3.1692	0.1300	0.0030		5.8811
Sant'Angelo le Fratte	0.6274	1.3004	1.6533	0.0153	0.2263	2.6822	6.5049
Sant'Arsenio		0.0635	0.0183	0.0628	0.0002	1.1776	1.3225
Santomenna	0.4327	1.8088	0.4670	0.0639	0.0168		2.7892
Sanza		0.9198	0.0618				0.9815
Sassano	0.0165	3.3793	0.6180	0.0465	0.0735	0.1465	4.2803
Sasso di Castalda	0.2851	0.1602	1.4709		0.1286		2.0447
Satriano di Lucania	2.2207	1.0522	3.1510	0.0236	0.0504	0.0021	6.5000

Comune	Rutr0	Rutr1	Rutr2	Rutr3	Rutr4	Rutr5	Totale (Km ²)
Savoia di Lucania	1.7193	0.3560	2.8539	0.0007	0.0613	0.3358	5.3270
Senerchia	0.4483	0.3962	1.3700	0.5962	0.2403	4.4308	7.4819
Serre	2.2571	0.8829	3.7602	0.2648	0.3340		7.4989
Sicignano degli Alburni	4.6893	8.9784	7.0024	0.3410	0.1770	11.2352	32.4232
Stio	0.3713	0.1424	1.4533	0.0444	0.0116	5.0932	7.1163
Teggiano	0.1881	7.2756	1.3886	0.3270	0.0334		9.2127
Tito	0.9706	0.0803	1.1195	0.1540	0.0375	5.1173	7.4792
Valle dell'Angelo	0.0422	0.0514	0.1579				0.2516
Valva	1.9545	1.6374	1.2597	0.5238	0.3182	3.8598	9.5533
Vietri di Potenza	1.3798	2.9302	3.6395	0.1369	0.0656	5.7725	13.9246
Totale complessivo	99.78	215.58	242.34	30.46	14.87	106.57	709.59

Tabella 6.22. Estensione areale per Comune delle diverse classi di rischio "potenziale".

Comune	Rf1	Rf2	Rf3	Rf4	Totale (Km ²)
Albanella		3.600	0.909		4.509
Altavilla Silentina	0.130	4.810	0.419		5.359
Aquara	0.006	7.093	0.637	0.008	7.745
Atena Lucana		0.108	0.017		0.125
Auletta	0.155	3.735	0.759	0.024	4.672
Avigliano		3.221	0.386		3.607
Balvano		2.915	1.918	0.038	4.871
Baragiano	0.034	0.754	0.016	0.000	0.805
Bella	0.987	10.310	0.367	0.011	11.675
Bellosguardo		4.979	0.097		5.075
Brienza		0.669	0.290	0.000	0.959
Buccino		25.232	5.989	0.028	31.249
Buonabitacolo			0.176	0.001	0.177
Caggiano		9.561	4.679	0.064	14.304
Calabritto		6.557	1.353	0.014	7.924
Campagna	0.002	10.897	6.182	0.174	17.255
Campora	0.187	3.287	0.692	0.005	4.171
Capaccio	0.007	0.220	0.042		0.269
Caposele		19.386	2.687	0.019	22.092
Casalbuono			0.042	0.001	0.043
Castel San Lorenzo	0.316	3.045	0.106		3.467
Castelcivita	0.044	8.586	2.009	0.044	10.683
Castelgrande		2.175	0.338	0.002	2.515
Castelnuovo di Conza	0.136	6.701	1.152	0.011	8.000
Colliano		5.167	7.485	0.430	13.081
Controne		0.018	0.800	0.023	0.842

Comune	Rf1	Rf2	Rf3	Rf4	Totale (Km ²)
Contursi Terme		4.808	1.087	0.020	5.915
Corleto Monforte	0.363	2.514	0.571		3.447
Eboli		0.517	0.373	0.026	0.916
Felitto	0.313	8.658	0.115	0.001	9.087
Gioi		0.427	0.011		0.437
Lagonegro			0.009		0.009
Laurino	0.602	8.639	3.358	0.024	12.624
Laviano	0.036	7.242	0.721	0.005	8.004
Lioni		1.158	0.053	0.001	1.211
Magliano Vetere		0.247	0.103	0.005	0.355
Marsico Nuovo		2.528	0.021		2.550
Moio della Civitella		1.051	0.022		1.073
Monte San Giacomo		5.136	1.220	0.008	6.365
Montesano sulla Marcellana		0.244	0.521	0.035	0.800
Muro Lucano	0.010	1.787	3.294	0.021	5.111
Oliveto Citra	0.770	8.960	4.123	0.051	13.904
Ottati	0.046	2.306	1.505	0.175	4.032
Padula		0.735	0.260	0.032	1.026
Palomonte		3.432	1.564	0.105	5.101
Pertosa		0.969	0.036	0.000	1.005
Pescopagano		0.478			0.478
Petina		0.362	1.383	0.084	1.828
Piaggine	0.187	2.057	0.276	0.002	2.522
Picerno	1.243	19.655	0.372	0.000	21.270
Polla		0.028	0.104	0.009	0.141
Postiglione		10.176	8.463	1.034	19.674
Ricigliano		1.261	0.459	0.011	1.731
Roccadaspide	0.109	6.854	4.504	0.011	11.478
Romagnano al Monte		0.965	2.059	0.109	3.134
Roscigno	0.488	6.743	0.090	0.000	7.321
Ruoti		4.412	0.096		4.508
Sacco		3.006	2.761	0.754	6.520
Sala Consilina			0.362	0.020	0.382
Salvitelle	0.007	1.624	1.706	0.040	3.377
San Gregorio Magno	0.025	2.809	1.835	0.001	4.670
San Pietro al Tanagro		0.045	0.284	0.003	0.332
San Rufo		0.033	1.051	0.141	1.224
Sant'Angelo a Fasanella		1.810	0.750	0.069	2.629
Sant'Angelo le Fratte		2.145	0.407	0.037	2.590
Sant'Arsenio			0.011	0.005	0.015

Comune	Rf1	Rf2	Rf3	Rf4	Totale (Km ²)
Santomenna		2.427	0.475	0.030	2.933
Sanza			0.070		0.070
Sassano		1.069	0.253	0.012	1.334
Sasso di Castalda	0.080	3.907	0.237	0.003	4.227
Satriano di Lucania	0.689	4.086	0.042		4.817
Savoia di Lucania		4.222	0.114	0.000	4.336
Senerchia		6.535	1.102		7.637
Serre	0.030	2.828	0.175	0.000	3.034
Sicignano degli Alburni	0.007	7.522	4.421	0.147	12.097
Stio	0.215	1.257	0.046		1.518
Teggiano		4.141	1.028	0.011	5.180
Tito		1.259	0.064		1.323
Valle dell'Angelo		0.327	0.587		0.914
Valva		5.947	3.809	0.254	10.010
Vietri di Potenza		2.892	3.196	0.086	6.174
Totale complessivo	7.222	317.266	101.106	4.279	429.873

Tabella 6.23. Estensione areale per Comune delle diverse classi di rischio "potenziale".

7 metodologie

In un contesto di pianificazione territoriale, la difesa del suolo in termini di mitigazione e di gestione del rischio rispetto al dissesto di natura idrogeologica, in Italia è affidato alle Autorità di Bacino, che hanno la responsabilità della redazione di *Piani Stralcio per l'Assetto Idrogeologico* (capitolo 2.4). Questi Piani delineano un assetto territoriale in cui vi sia equilibrio e compatibilità tra le dinamiche idrogeologiche e la crescente antropizzazione del territorio, in modo da garantire la messa in sicurezza degli insediamenti e delle infrastrutture esistenti.

Alla luce di quanto fin qui esposto, l'obiettivo di questa ricerca è stato quello di implementare la metodologia di analisi del potenziale dissesto da frana, sfruttando le tecniche del **Machine Learning** (apprendimento automatico) come supporto alla redazione di dei *Piani Stralcio per l'Assetto Idrogeologico*. Tale metodologia è stata denominata **Geo-S.Co.Ma.L.**

7.1 premessa

I metodi di apprendimento automatico sono stati sviluppati nell'ambito informatico dell'intelligenza computazionale (cioè dell'intelligenza artificiale). Questi metodi sono fortemente presenti in diversi ambiti delle Scienze della Terra. Il loro sviluppo inizia nei primi anni '90, e, grazie alla loro potente capacità di modellazione non lineare, trovano oggi utilissime applicazioni in moltissimi settori di studio delle fenomenologie del nostro pianeta. I campi delle scienze della terra nei quali tali metodi, secondo Hsieh W. W 2009, risultano più diffusi sono:

Il telerilevamento, per la valutazione delle interferenze atmosferiche che alterano la ricezione delle frequenze dei parametri ambientali rilevati.

L'oceanografia, per lo studio dei livelli marini, la modellazione del moto ondoso, la temperatura degli oceani.

Lo studio dell'atmosfera, per i cambiamenti climatici, i modelli di radiazione, la qualità dell'aria;

L'idrologia, per lo studio dei rapporti tra deflusso, ruscellamento e precipitazione.

L'ecologia, per la previsione della fioritura delle alghe nei laghi e nei fiumi, o per la previsione della presenza/assenza di alcune specie di pesci in relazione alle temperature delle acque.

La geologia applicata, per lo sviluppo di modelli previsionali di scenari di pericolosità/rischio.

Questa tesi di dottorato sviluppa un modello previsionale nell'ambito di scenari di pericolosità e rischio da frana utilizzando i metodi di apprendimento automatico.

Esiste già un'ampia bibliografia riguardante l'utilizzo di questa metodologia ricorrendo a diversi tipi di algoritmi ad apprendimento automatico:

Chien-Min C. et alii, 2009; Nefeslioglu H. A. et alii, 2009; Saito H. et alii, 2009; Chandra Prakash P. 2012; Dieu Tien B. et alii 2012; Alkhasawneh M.S. et alii, 2013; Micheletti N. et alii, 2013; Althuwaynee O. F. et alii, 2014; Anbalagan P. et al, 2015.

In particolare, durante questa ricerca, sono state prese in considerazione ricerche condotte utilizzando l'algoritmo **SVM**:

Bird C. et alii, 1994; Huan X. et al, 1997; Belousov A. I. et alii, 2002; Kim H. et al 2008; Assilzadeh H. et alii, 2010; Carfagna E. et alii, 2012; Forzieri G. et alii; 2012; Mashari eshghabad S. et alii, 2012; Matei D. 2012.

Si vuole, inoltre, porre l'attenzione su due esempi di utilizzo dell'algoritmo **SVM** ritenuti particolarmente significativi per la meticolosità delle descrizioni e soprattutto per le considerazioni riguardo alla validità delle tesi postulate, e di conseguenza estremamente utili per gli scopi di questa ricerca:

- Ballabio C. et al 2011, *Support Vector Machines for Landslide Susceptibility Mapping: the Staffora River Basin Case Study, Italy*;
- Marjanović 2013, *Advanced methods for landslide assessment using GIS* .

Nel primo esempio riportato, parte dello studio è stato dedicato al confronto delle prestazioni delle **SVM** con tecniche di trattamento dei dati più frequentemente usate in contesto di suscettibilità e rischio frana. Gli autori confrontano le **SVM** con tecniche di regressione logistica, analisi discriminante lineare, e classificatori bayesiani, e cioè con

classificatori non lineari e tecniche statistiche largamente utilizzate tra geomorfologi ed esperti di pericolo. Gli autori ritengono la procedura delle **SVM** più efficiente in termini di precisione e capacità di generalizzazione, rispetto alle altre tecniche citate. Attraverso dei *cross validation* test, realizzati sul 20% delle aree più suscettibili, le prestazioni di una **SVM** sono superiori di circa il 18% rispetto alle altre tecniche. Tali prestazioni risultano superiori anche quando si considera un gruppo di eventi indipendenti dal fattore temporale, rimarcando così la capacità di una **SVM** di prevedere la posizione dei possibili eventi futuri. Un altro aspetto interessante di una **SVM** è il ridotto tasso di falsi positivi durante i *cross validation* test. Inoltre, le **SVM** dimostrano la loro efficacia anche in condizioni di un ridotto set di dati, contenenti ad esempio, solo fattori morfometrici. Questo è sicuramente un ulteriore aspetto vantaggioso delle **SVM** rispetto ad altre tecniche in quanto rende la loro applicazione più efficace in aree in cui le mappe geo-ambientali sono mancanti o non sufficientemente aggiornate. Gli autori suggeriscono che le mappe della suscettibilità da frana prodotte da **SVM** appaiono avere una ridotta variabilità spaziale rispetto a quelle prodotte con altre tecniche. Gli autori confrontano poi le loro mappe di suscettibilità con quelle precedentemente realizzate per la stessa porzione di territorio (Carrara et al., 2003; Sterlacchini et al., 2004; Poli e Sterlacchini, 2007). Dal confronto emerge che le loro mappe di suscettibilità appaiono di gran lunga più precise nella delimitazione spaziale delle aree potenzialmente pericolose. Gli autori si soffermano sulla considerazione che i costi di gestione e di mitigazione da frana sono direttamente connessi con l'estensione spaziale delle aree potenzialmente pericolose e che, conseguentemente, le mappe di pericolosità realizzate con questa tecnica saranno utili nella riduzione di costi economici e sociali.

La metodologia proposta dagli autori risulta quindi essere più dettagliata nella definizione della suscettibilità da frana, e viene inoltre collocata in un contesto di migliore efficienza nella difesa del suolo e nella mitigazione del rischio.

Nel secondo esempio citato l'autore si esprime in termini di supremazia delle tecniche di apprendimento automatico rispetto agli approcci più comuni (euristica, statistica, etc). Tali tecniche risultano molto efficienti in contesti di modelli interpretativi, quale la suscettibilità da frana. Questo risulta vero sia per modelli probabilistici a due classi (*frana, non frana*), sia in contesti multinomiali, quali diverse classi di frana. In tale situazione l'autore fa notare quanto un approccio con **SVM** risulti più valido rispetto ai tradizionali approcci, soprattutto nella capacità di generalizzazione (e quindi classificazione). L'autore si concentra anche su alcuni aspetti cruciali della gestione della problematica frana tramite **SVM**, e cioè la

scelta delle porzioni di *training* e il problema dell'*overfitting*, individuando un'importante relazione in base al numero di casi (istanze) prese in esame.

Nella scelta della suddivisione in porzione di *training/testing* delle aree campione:

- il versante NW del Monte Fruška Gora (Serbia);
- il Bacino del Starča (Croatia);
- Halenkovice Area (Czech Republic);

l'autore verifica che dei diversi modelli applicati, il model-7a-33% (con suddivisione *training* 33%, *testing* 67%) risulta essere quello meno influenzato da fenomeni di *overfitting*. Nel cercare relazioni di causa-effetto per l'*overfitting* di alcuni modelli predittivi realizzati con le **SVM**, l'autore individua, come possibili cause, principalmente la dimensione della porzione di *training*, oltre che, ovviamente, l'eventuale abbondanza di porzioni di territorio classificate come *non frana*. In base alle sue ricerche l'autore consiglia che le istanze *frana* occupino almeno il 10% dei casi, purché il numero totale di istanze venga mantenuto intorno ai 10⁶ casi.

L'autore mette anche in evidenza la necessità di trovare la scala ottimale (la risoluzione o livello di dettaglio) del modello e, quindi, dei dati di input (raster dei *fattori di condizionamento* e raster dell'inventario fenomeni franosi). L'autore riporta infatti che, dove le frane sono più piccole, le prestazioni di tutti i modelli proposti hanno subito un declino evidente. Egli sostiene pertanto che una suddivisione in diverse sottoporzioni del territorio possa costituire una valida soluzione al fine di trovare un buon dettaglio per il modello, a patto di disporre di una buona omogeneità nella distribuzione dei dati di input e, soprattutto, dei dati di inventario frane.

Nell'identificare una sorta di linea guida per la formulazione di modelli predittivi realizzati attraverso **SVM**, l'autore identifica nel *range* di punti (pixel) compreso tra 1.000.000 e 100.000. un buon compromesso, a patto di disporre delle adeguate risorse di calcolo.

7.2 metodologia **Geo-S.Co.Ma.L.**

Durante l'utilizzo degli algoritmi **SVM** sui dati del P.S.A.I. 2009, come proposto da Ballabio e Sterlacchini 2011, e da Miloš Marjanović 2013, è emersa un'oggettiva difficoltà per quanto riguarda la scelta della dimensione dell'area da investigare. Come già riportato, utilizzare porzioni estremamente grandi di territorio può portare a fenomeni di *overfit* (cap. 3.3.1); utilizzare invece suddivisioni in porzioni più piccole può portare ad una incompleta distribuzione dei *fattori di condizionamento*. Questa situazione è estremamente evidente quando, durante l'apprendimento supervisionato, il territorio indagato viene suddiviso nelle zone di *training/testing*.

Per superare queste due limitazioni si è qui cercato di realizzare una metodologia di supporto alla redazione di *Piani Stralcio per l'Assetto Idrogeologico*, denominata **Geo-S.Co.Ma.L.** (*Geo-Spatial Constricted Machine Learning*), basata sull'utilizzo di tecniche di apprendimento automatico alle quali, attraverso l'analisi spaziale, vengono applicati dei vincoli geologici imposti dalla cartografia geotematica di base. Inoltre, è stato necessario trovare una soluzione per superare i limiti connessi ai criteri di sintesi cartografica di un P.S.A.I. Tali Piani nascono infatti da un'attività di rilievo geologico al 10.000, e tutti gli elaborati digitali e cartacei a scale inferiori quali (25.000 e 100.000) non derivano da un processo di generalizzazione cartografica, ma esclusivamente da un adattamento automatico di scala. Nello sviluppo della metodologia si è scelto di utilizzare la *programmazione orientata agli oggetti*¹, tipica della tecnologia GIS, in modo da utilizzare gli strumenti di analisi spaziale per vincolare l'algoritmo **SVM** durante la fase di *training*, eseguendo un controllo sulla percentuale dei fattori di condizionamento presenti nelle aree di *training* rispetto a quelli presenti nell'intero comune investigato. Attraverso questi ambienti di *programmazione orientata agli oggetti* si è in grado di creare un flusso

¹ La programmazione orientata agli oggetti (OOP, Object Oriented Programming) è un paradigma di programmazione che permette di definire oggetti software in grado di interagire gli uni con gli altri attraverso lo scambio di messaggi. È particolarmente adatta nei contesti in cui si possono definire delle relazioni di interdipendenza tra i concetti da modellare (contenimento, uso, specializzazione). Un ambito che più di altri riesce a sfruttare i vantaggi della programmazione ad oggetti è quello delle interfacce grafiche.

In un contesto GIS gli **oggetti** possono essere costituiti da dati, condizioni, e strumenti di analisi (*tools*) già esistenti. La programmazione orientata agli oggetti degli ambienti GIS è incentrata sulla logica **input-analisi-output**, secondo la quale ogni **output** può divenire nuovo **input** per il successivo strumento di **analisi**.

Tale logica permette all'utente di creare quindi dei flussi di lavoro automatizzati. La possibilità di definire taluni **oggetti** (siano essi dati di input, tools, o dati di output) come parametrici consente all'utente di creare dei nuovi strumenti di analisi (modelli) riutilizzabili. Tali modelli sono inoltre esportabili come script nei più comuni e diffusi linguaggi di programmazione tradizionale (a codice).

Si tratta quindi di linguaggi di programmazione visuale per la costruzione di flussi di lavoro di *geoprocessing*, in grado di automatizzare e documentare i processi di analisi e di gestione dei dati spaziali. Tali linguaggi sono in genere rappresentati come diagramma di flusso nei quali sequenze di processi e strumenti di *geoprocessing*, elaborano dati fino al raggiungimento di un output finale.

automatizzato, ed eventualmente reiterante, combinando tra di loro differenti strumenti di analisi spaziale già esistenti, in grado di eseguire tutti gli step programmati al suo interno (Fig.7.1).

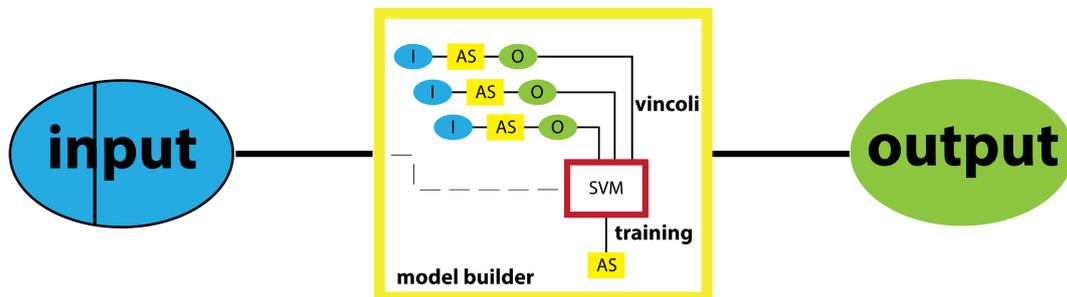


Figura 7.1. La metodologia *Geo-S.Co.Ma.L.*, schematizzazione dell'implementazione: l'algoritmo *SVM*, all'interno di un flusso di analisi spaziale diventa un nuovo strumento di analisi spaziale.

Nella figura 7.1 è schematizzato il procedimento utilizzato per la realizzazione della metodologia **Geo.S.Co.Ma.L.**, ed in particolare per l'implementazione dell'algoritmo **SVM** tramite la programmazione orientata agli oggetti. Tale schema può essere ulteriormente sintetizzato nei seguenti passaggi:

- le porzioni di territorio divise in *training/testing* costituiscono l'input del modello realizzato;
- l'algoritmo **SVM** costituisce il *core* del modello;
- all'interno del modello si trovano gli strumenti di analisi spaziali utilizzati per effettuare un controllo sulle percentuali dei fattori di condizionamento; tali strumenti costituiscono di fatto i vincoli sull'algoritmo **SVM**;
- le analisi spaziali usate per l'attuale redazione dei P.S.A.I. vengono utilizzate come *training* dell'algoritmo;
- l'output del modello è rappresentato da uno scenario di suscettibilità frana.

In sintesi, le analisi spaziali ad oggi utilizzate nella redazione di P.S.A.I. (basate principalmente su *overlay* ad algebra Booleana), sono state usate come *training* dell'algoritmo **SVM**; quest'ultimo è stato successivamente inserito all'interno di un flusso di lavoro automatizzato, realizzato attraverso la programmazione orientata ad oggetti. Tale flusso è stato arricchito con ulteriori strumenti di analisi spaziale (*selection by attributs*, *selection by location*, *fields calculator*) in grado di condizionarne l'esecuzione.

Come descritto nel capitolo precedente, i dati sui quali è stata sperimentata tale metodologia sono costituiti da:

- il P.S.A.I. dell'ex Autorità di Bacino Interregionale Sele revisione 2009;
- il P.S.A.I. dell'ex Autorità di Bacino Interregionale Sele revisione 2014.

Si fa pertanto presente che l'edizione 2014 è il risultato di aggiornamenti di specifiche situazioni di dissesto frane realizzati sulla base delle segnalazioni dei comuni che ricadono all'interno dell'area di bacino, riportati sulle carte tematiche dell'edizione del 2009, (realizzata nell'ambito di questa ricerca²).

La metodologia **Geo-S.Co.Ma.L.** è stata testata sui tematismi del P.S.A.I. 2009. Al fine di verificarne l'affidabilità, risultati di tali analisi sono stati confrontati con i più recenti tematismi del P.S.A.I. 2014. Come verrà descritto in seguito (capitolo 7), per ogni comune dell'Autorità di Bacino su cui è stato testata la metodologia **Geo-S.Co.Ma.L.**, sono stati effettuati dei confronti con i tematismi delle due edizioni del P.S.A.I. (Fig.7.2). Le differenti quantità di fenomeni franosi riscontrati durante i confronti saranno descritte nel capitolo 7.

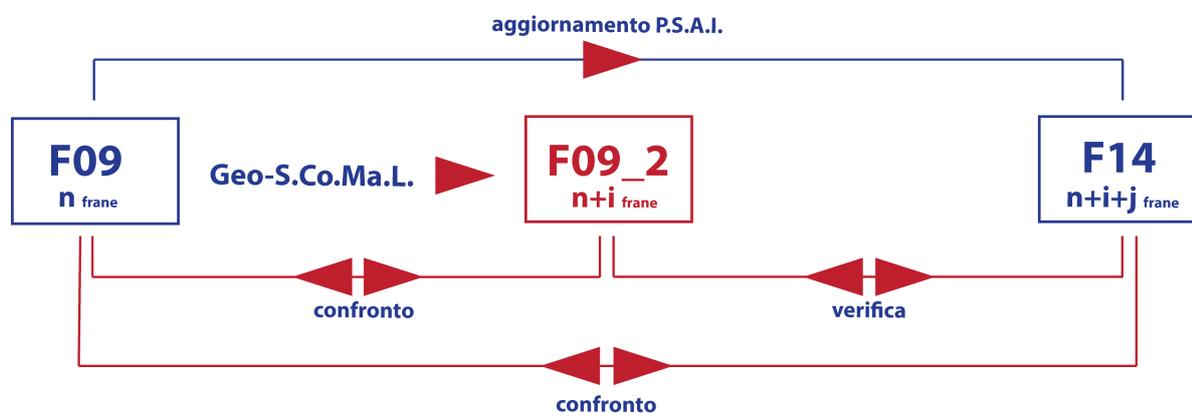


Figura 7.2. Metodologia **Geo-S.Co.Ma.L.**, confronti tra i tematismi: i confronti sono stati realizzati tra i tematismi P.S.A.I. 2009 (F09), i tematismi elaborati dalla metodologia **Geo-S.Co.Ma.L.** (F09_2), e i tematismi P.S.A.I. 2014 (F14). Tali confronti evidenziano differenze nel numero di fenomeni franosi riscontrati.

² La ricerca di questa tesi di dottorato nasce sulla base di un'esperienza professionale iniziata nel 2008, e condotta presso la società appaltatrice per il progetto di rivisitazione del P.S.A.I del 2009. In seguito alla stipula di un accordo di collaborazione con la suddetta Autorità di Bacino, la realizzazione di tale sistema informativo geografico (ampiamente descritta nel capitolo 6) è stata l'oggetto di questa ricerca, finalizzata allo sviluppo di una metodologia di supporto alla redazione degli strumenti di pianificazione territoriale redatti da tali organi.

7.3 tecnologia GIS

I sistemi informativi territoriali, per la caratteristica di lavorare con dati georeferiti, hanno sin dal principio richiamato l'attenzione di diverse figure professionali, tra i quali gli specialisti di geoinformatica. Considerata inoltre la loro natura geo-spaziale ed anche geo-temporale, i sistemi GIS hanno trovato un ampio campo di applicazioni nelle scienze della terra.

In particolare, nelle Scienze Geologiche, i percorsi didattici sui sistemi GIS spaziano dall'insegnamento dei comandi e della struttura, fino ad arrivare alla costruzione e realizzazione progettuale. Da un punto di vista professionale, è invece opportuno distinguere fra le diverse figure che operano con i sistemi GIS in base alle loro finalità (Nardi 1996). L'importanza di effettuare tale distinzione è stata più volte discussa nei Congressi del GIAST (Gruppo di Informatica Applicata alle Scienze della Terra) durante i quali si è giunti all'identificazione dei diversi contesti professionali:

- contesti in cui operano gli informatici – nei quali si affrontano sinteticamente questioni di architettura GIS;
- contesti in cui operano i geologi (con una discreta conoscenza dei sistemi GIS) – nei quali, attraverso i sistemi GIS, si produce Cartografia Geologica o Cartografia Tematica riguardante le Scienze della Terra;
- contesti in cui operano i geoinformatici o i geomatematici – nei quali si utilizzano e gestiscono modelli matematici applicati alla risoluzioni di problematiche delle Scienze della Terra, sfruttando la tecnologia GIS.

Sempre per la loro natura spaziale, i sistemi GIS trovano largo impiego anche nella pianificazione territoriale. Da diversi anni la redazione di Piani Urbanistici, Piani Regolatori, Piani di Recupero e di molti altri strumenti di progettazione avviene, infatti, attraverso l'uso dei GIS. Con tale strumento vengono create sia le rappresentazioni cartografiche, sia le banche dati associate, sia gli strumenti di analisi spaziale utili ai fini della pianificazione territoriale. Ulteriori applicazioni si possono trovare anche nelle elaborazioni e nella gestione del rischio.

In questo quadro, la redazione di *Piani Stralcio per l'Assetto Idrogeologico* attraverso l'utilizzo dei sistemi GIS può essere considerato un valido esempio di come sfruttare gli strumenti dei sistemi informativi territoriali per gestire problematiche di definizione e

rappresentazione di aree a rischio, e di strutturazione degli interventi atti al monitoraggio e alla mitigazione.

Per la realizzazione della metodologia **Geo-S.Co.Ma.L.** è stato quindi fatto un largo impiego della tecnologia GIS, utilizzando in particolare modo gli strumenti e le procedure di seguito elencate:

- strumenti di analisi spaziale;
- modellazione numerico/matematica;
- programmazione orientata agli oggetti.

7.4 scienze computazionali e analisi spaziale

La gestione del rischio da frana, negli aspetti scientifico - metodologici, nel trattamento quantitativo dei dati, così come nella realizzazione di supporti alle attività decisionali, mostra evidenti vantaggi se affrontata con tecniche di elaborazione GIS. Le estremamente vaste possibilità di integrazione georeferenziata tra la modellazione matematica e le complesse tecniche di analisi spaziali, permettono di produrre e implementare svariati modelli di suscettività adeguati alle diverse esigenze di pianificazione territoriale degli enti preposti alla gestione del rischio da frana. La ricerca di questa tesi è stata quindi impostata secondo i concetti delle scienze computazionali, e cioè di quei rami delle scienze matematiche, fisiche, chimiche e naturali che utilizzano le potenze di calcolo dei più recenti calcolatori al fine di risolvere problemi inaccessibili per i tempi e le modalità di calcolo umani. Lo sviluppo dei metodi computazionali ha dato un notevole slancio alla ricerca negli ultimi anni, questo anche grazie allo sviluppo delle tecnologie informatiche in grado di offrire calcolatori sempre più potenti.

L'apprendimento automatico è uno tra i rami delle scienze computazionali più utilizzato nei contesti delle Scienze Naturali (capitolo 7.1). L'approccio algoritmico delle Macchine a Vettori di Supporto, costituisce appunto lo strumento di modellazione matematica inserito in un contesto GIS con il quale è stato sviluppato il modello di suscettibilità di questa ricerca.

Si delinea quindi uno scenario nel quale l'uso della tecnologia GIS nell'affrontare la problematica frana, non risulta finalizzato soltanto ad una produzione grafica (elaborati digitali

e/o cartografici), seppur basata sulle avanzate tecniche di analisi spaziale e gestione georeferenziata, ma viene invece coadiuvato da una forte base computazionale di trattamento numerico dei dati. Notevole importanza assume infatti la possibilità di trasformare complessi modelli matematici in strumenti e *tools* all'interno di software GIS (attraverso la scrittura di *script* e/o *plugin* esterni), permettendogli di svolgere i propri compiti computazionali (siano essi statistici o di classificazione) direttamente sul dato geografico. Contrariamente, una gestione separata, attraverso una computazione matematica dei dati al di fuori di software GIS, e una successiva e conseguente manipolazione del dato da un punto di vista geografico, può facilmente diventare causa di alcuni errori sistematici o di errori di comunicazione tra i software di trattamento dati e i software GIS, o più banalmente può rappresentare un improduttivo impiego di risorse e tempo.

Numerosissimi sono ormai i software di classificazione basati su Macchine a Vettori di supporto³. La maggior parte di questi programmi è stata sviluppata come *script* per le più diffuse piattaforme di linguaggio tecnico o statistico come *Matlab* o *R*, alcuni sono dotati di proprie interfacce grafiche e quindi utilizzabili in *stand alone*, altri ancora sono stringe di codice utilizzabili esclusivamente tramite riga di comando. Per quanto detto in precedenza si è ritenuto più opportuno utilizzare una soluzione totalmente integrabile all'interno di un software GIS.

È stato quindi utilizzato ***SVM Tools for ArcGIS 10.1+, v1.3*** (Wehmann, A. 2013), plugin distribuito con licenza freeware realizzato per il software GIS della ESRI Inc. ArcGis Desktop 10.1. Per interfacciare un algoritmo ***SVM*** con ArcGIS, questo progetto si avvale della libreria LIBSVM (Chang, C-C., Lin, C-J. 2011) sviluppata dal *Machine Learning e Data Mining Group della National Taiwan University*.

³ Tra i più noti software di classificazione basati su ***SVM*** si vuole ricordare: SVM light, SVM struct, my SVM, my SVM DB, LIBSVM, looms, BSVM, SVM Torch, Weka, SVM in R, M-SVM, Gist, Matlab SVM Toolbox, Tiny SVM, SmartLab, Gini SVM, GDPT, HeroSVM, Spider, Java applets, LEARNSC, Tree Kernels, LS-SVMLabs, SVM/Loo, SVM Sequel, LSVM, ASVM, PSVM, R-SVM, jSVM, Py ML.

8 elaborazioni

Come esposto nei capitoli precedenti, in questa ricerca è stata sviluppata una metodologia di supporto all'elaborazione di strumenti di pianificazione territoriale per la mitigazione del rischio rispetto al dissesto di natura idrogeologica. Tale metodologia, denominata **Geo-S.Co.MaL.** (capitolo 7) è stata realizzata sfruttando la tecnologia GIS; essa si basa sull'utilizzo delle macchine a vettori di supporto vincolate da flussi di analisi spaziale. Utilizzando tale metodologia, sono stati generati alcuni scenari di suscettività da frana relativi a differenti edizioni del P.S.A.I. dell'ex Autorità di Bacino Interregionale del Fiume Sele. Prima di discutere le differenze/analogie evidenziate dai confronti di tali scenari, è quanto mai opportuno tener presente che:

- la ricerca si è concentrata sull'elaborazione delle carte della suscettività da frana basate sulla distribuzione spaziale del fenomeno. Non sono state pertanto affrontate le problematiche di pericolosità da frana o del rischio da frana, essendo quest'ultimi due aspetti legati rispettivamente ad una probabilità temporale, e alla presenza/assenza di valore esposto;
- al fine di realizzare nuovi tematismi di suscettività da frana, le elaborazioni sono state condotte sui tematismi di base utilizzati per la redazione dei P.S.A.I. del 2009. Tali tematismi costituiscono di fatto il set di *fattori di condizionamento* per il *training/testing* delle **SVM**;
- gli scenari di suscettività da frana elaborati in questa tesi sono stati realizzati utilizzando una classificazione bivalente¹ (frana/non frana); essi non rispecchiano quindi la classificazione degli scenari di pericolosità utilizzata nei P.S.A.I.(capitolo 6.3.4);
- gli scenari di suscettività da frana elaborati sono stati confrontati con i tematismi sviluppati nell'edizione del 2009 e 2014. I confronti sono stati realizzati sulla base della superficie di territorio esposto a suscettività da frana, e quindi non sulla tipologia del fenomeno.

¹ Come descritto nel capitolo 4, le SVM sono classificatori lineari bivalenti. Possono essere utilizzati anche come classificatori polivalenti mediante progressive e reiterate classificazioni bivalenti sugli stessi fattori di condizionamento. In questo contesto è stato ritenuto più opportuno utilizzare tale algoritmo nella sua forma originale per cercare di garantire una maggiore affidabilità dei suoi risultati in un contesto nel quale la non omogenea distribuzione dei fattori di condizionamento (tematismi di base del P.S.A.I.), tenderebbe a contrastare la buona riuscita di una classificazione polivalente. Gli scenari di suscettività da frana realizzati sono pertanto da considerare come una suddivisione del territorio in porzioni di frana/non frana.

La ricerca è stata condotta su una parte dell'ex Autorità di Bacino Interregionale Abisele, ed in particolare su una porzione campione costituita da 14 comuni delle province di Avellino e Salerno (Tab 8.1).

comuni	superficie totale (Km ²)	superficie investigata (Km ²)
Albenella	39,986391	18,371687
Auletta	35,363718	14,839312
Calabritto	52,093879	12,441159
Castel San Lorenzo	14,199818	6,258623
Castelcivita	56,742591	18,890214
Colliano	54,120642	25,530521
Contursi terme	28,847138	22,177795
Corleto Monforte	58,437069	6,493785
Eboli	131,85461	8,460259
Oliveto Citra	31,412206	30,929956
Roscigno	15,091841	10,628502
Sant'Angelo a Fasanella	32,388732	8,225194
Senerchia	35,937679	8,094364
Sicignano degli Alburni	80,550563	33,850528
TOTAL	667,026877	225,191899

Tabella 8.1. Estensione areale totale e investigata dei 14 comuni campione.

Come si può osservare in tabella, la superficie investigata (circa 225 Km²) risulta inferiore alla reale estensione del territorio amministrativo comunale (circa 667 Km²). Nell'ottica di un confronto tra la pericolosità da frana emersa nelle varie edizioni del P.S.A.I, la metodologia in oggetto è stata sviluppata sulla base dei tematismi redatti in occasione dell'edizione 2009. L'estensione delle zone investigate ricade pertanto esclusivamente nel territorio considerato dalla suddetta revisione del Piano di Bacino, che, per i 14 comuni considerati, risulta pertanto 225 Km² circa.

8.1 input data

Come descritto nel capitolo 4, il funzionamento delle **SVM** avviene in due fasi:

una prima fase di apprendimento supervisionato (fase di *training*), che è realizzata su una porzione ampia circa il 33% (Fig. 8.1) dell'intero territorio investigato e nella quale l'operatore attribuisce a ciascuna porzione di territorio un valore secondo una classificazione (in questo caso frana/non frana) stabilita sulla base della corrispondenza tra i pixel del raster IFFI e i pixel dei raster dei *fattori di condizionamento* (geologia, geomorfologia, pendenza);

una seconda fase di elaborazione non supervisionata (fase di *testing*), realizzata sul restante 66% del territorio investigato e in cui l'algoritmo elabora la classificazione sulla base di quanto "appreso" durante il *training*, lavorando esclusivamente sulle corrispondenze dei pixel dei raster dei fattori di condizionamento (geologia, geomorfologia, pendenza).

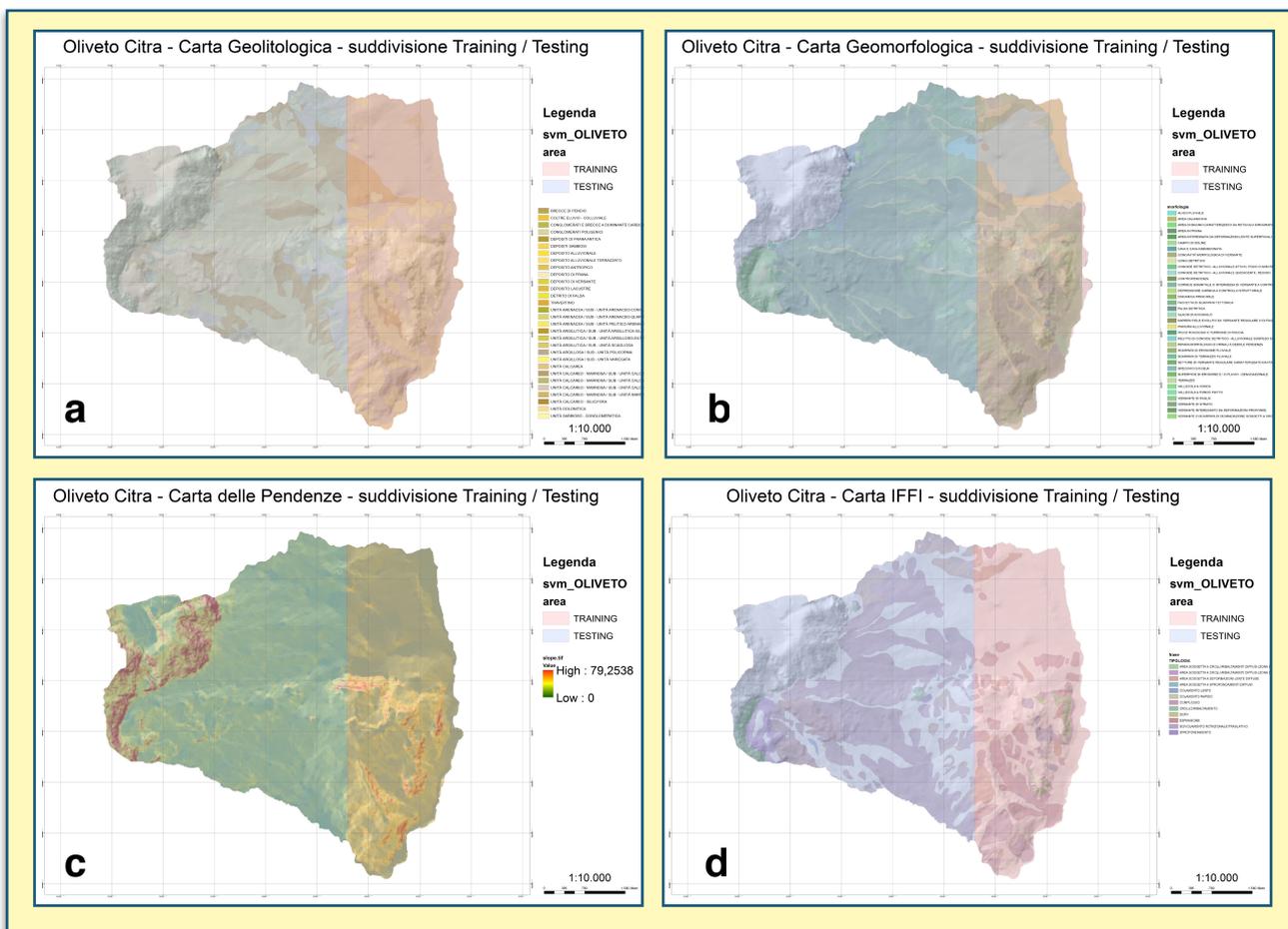


Figura 8.1. Identificazione della porzione di *training* (rosso) delle carte dei fattori di condizionamento (a=geolitologia, b=geomorfologia e c=pendenza) e della carta dell'IFFI (d) del comune di Oliveto Citra.

Durante la fase di *training* sono quindi stati utilizzati i raster dei *fattori di condizionamento* e il raster dell'IFFI, mentre durante la fase di *testing* sono stati utilizzati esclusivamente i raster dei

fattori di condizionamento. Fatta eccezione per la Carta delle Pendenze (realizzata in formato raster), i restanti raster sono stati ottenuti realizzando una conversione degli strati informativi vettoriali (dal formato .shp, al formato .tif) redatti in occasione della stesura del P.S.A.I. 2009:

- il tematismo geolitologia, realizzato sulla base di attività di rilevamento (capitolo 6);
- il tematismo geomorfologia, realizzato sulla base di attività di rilevamento (capitolo 6);
- il tematismo pendenza, realizzato sulla base di analisi di superfici a partire dalla cartografia tecnica regionale in scala 1:500 (edizione 2004);
- il tematismo IFFI, realizzato secondo un procedura integrata di censimento che comprende analisi dei dati storici, interpretazione di foto aeree e di ortofoto, rilievi di campagna.

Attraverso questi raster di partenza, si è proceduto ad una classificazione della porzione di *training* (33% del territorio esaminato), in termini di *frana/non frana*, sulla base dei valori dei pixel dei fattori di condizionamento (geologia, geomorfologia e pendenza) in corrispondenza geografica con i pixel dei raster dell'IFFI. È stato quindi generato un nuovo raster (raster di *training*) che costituisce, di fatto, l'addestramento dell'algoritmo. Tale dato sarà in seguito utilizzato dall'algoritmo come "schema di riferimento" per la classificazione dei pixel del raster di output sulla base della corrispondenza dei pixel dei soli raster dei fattori di condizionamento ricadenti nella rimanente porzione di *testing* (66% del territorio esaminato) (Fig.8.2).

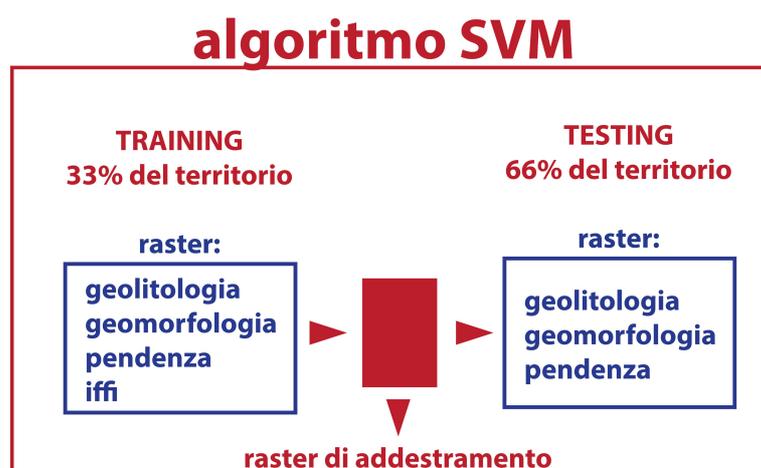


Figura 8.2. Schema del funzionamento di una SVM: durante una prima fase (*training*), l'algoritmo viene addestrato con i raster delle carte *geolitologica*, *geomorfologica*, *pendenze*, *IFFI*, generando un raster di *addestramento*. Durante una seconda fase (*testing*) l'algoritmo utilizza tale dato per classificare il territorio.

Durante la conversione degli strati informativi, particolare cura è stata rivolta a parametri quali *extent*, *cell size*, *pixel depth* dei vari raster realizzati. Come riportato dallo sviluppatore dell'algoritmo ***SVM Tools For ArcGis 10.1+, V.1.3*** (Wehmann, A. 2013), è di fondamentale importanza per una corretta esecuzione dell'algoritmo, che i raster di *training* e *testing* abbiano la stessa risoluzione, estensione, e profondità di pixel. Nello specifico l'autore suggerisce di utilizzare una profondità di almeno 8 bits: in caso contrario le istanze di classificazione dei pixel verrebbero interpretate dall'algoritmo come valori Booleani, influenzando negativamente la classificazione del raster di *training*.

Va inoltre sottolineato che, a causa di una campitura discontinua dei fattori di condizionamento, e quindi di una loro distribuzione irregolare all'interno dei territori comunali campioni (le aree indagate dal P.S.A.I. 2009 non coprono l'intero territorio comunale), nella trasformazione degli strati informativi dal formato vector a quello raster, i file risultanti saranno caratterizzati dalla presenza, più o meno abbondante, di pixel con valore *NoData*, in aggiunta ovviamente ai valori della classificazione del corrispondente fattore di condizionamento (Fig. 8.3 a e b).

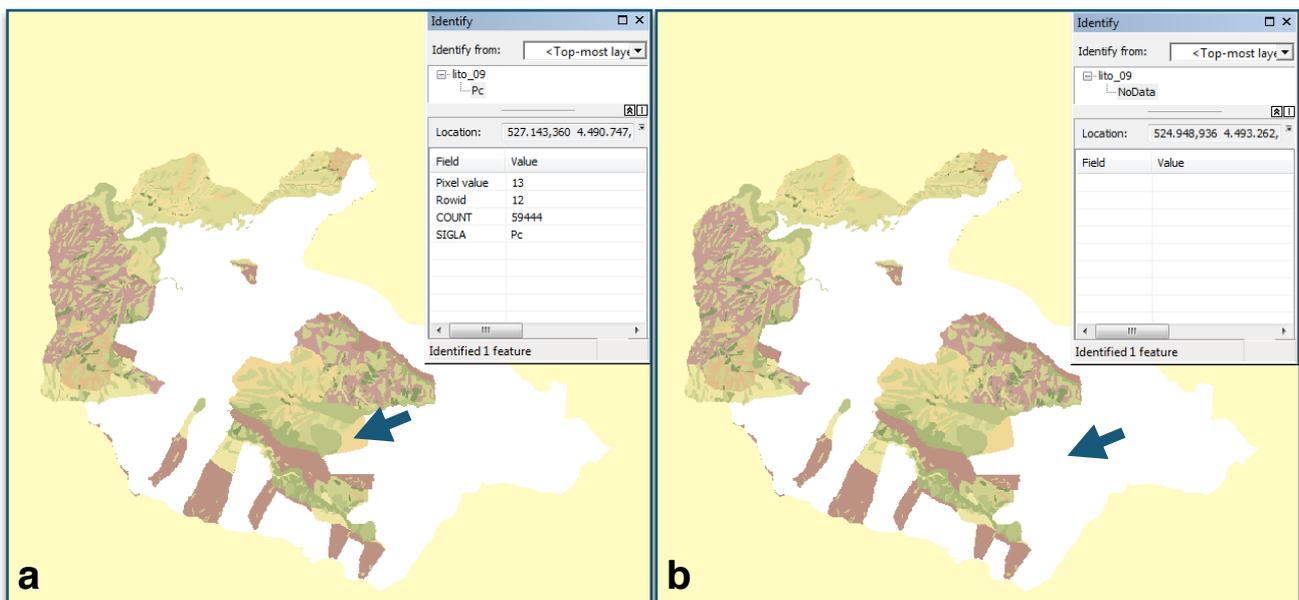


Figura 8.3. Stralcio della carta geolitologica del comune di Sicignano degli Alburni. A causa di una campitura non completa dei tematismi di base del P.S.A.I. 2009, i raster dei fattori di condizionamento (geolitologia, geomorfologia e pendenza) avranno alcuni pixel relativi alla classificazione del tematismo, altri invece avranno valore “NoData”.

Nella figura 8.3a è evidenziato uno dei pixel corrispondente alla sigla “Pc” (conglomerati poligenici).

Nella figura 8.3b è evidenziato uno dei pixel con valore “NoData”.

8.2 training data

La metodologia utilizzata per creare il raster di *training*, e quindi per addestrare l'algoritmo, consiste nel generare una distribuzione casuale di punti vettoriali che copra il raster dell'IFFI e quelli dei fattori di condizionamento (Fig. 8.4). Tale dato va poi compilato nella sua tabella di attributi, popolando i record di un campo numerico di tipo *integer*, con un'assegnazione manuale, per ogni punto ispezionato, di un valore che, rispetto alla classificazione utilizzata (ad esempio 1 per il valore *frana*, 0 per il valore *non frana*) si basi sulle corrispondenze dei pixel dei vari raster utilizzati. La procedura di classificazione deve inoltre coprire un numero sufficientemente elevato di punti per ognuna delle due classi considerate (capitolo 7.1).

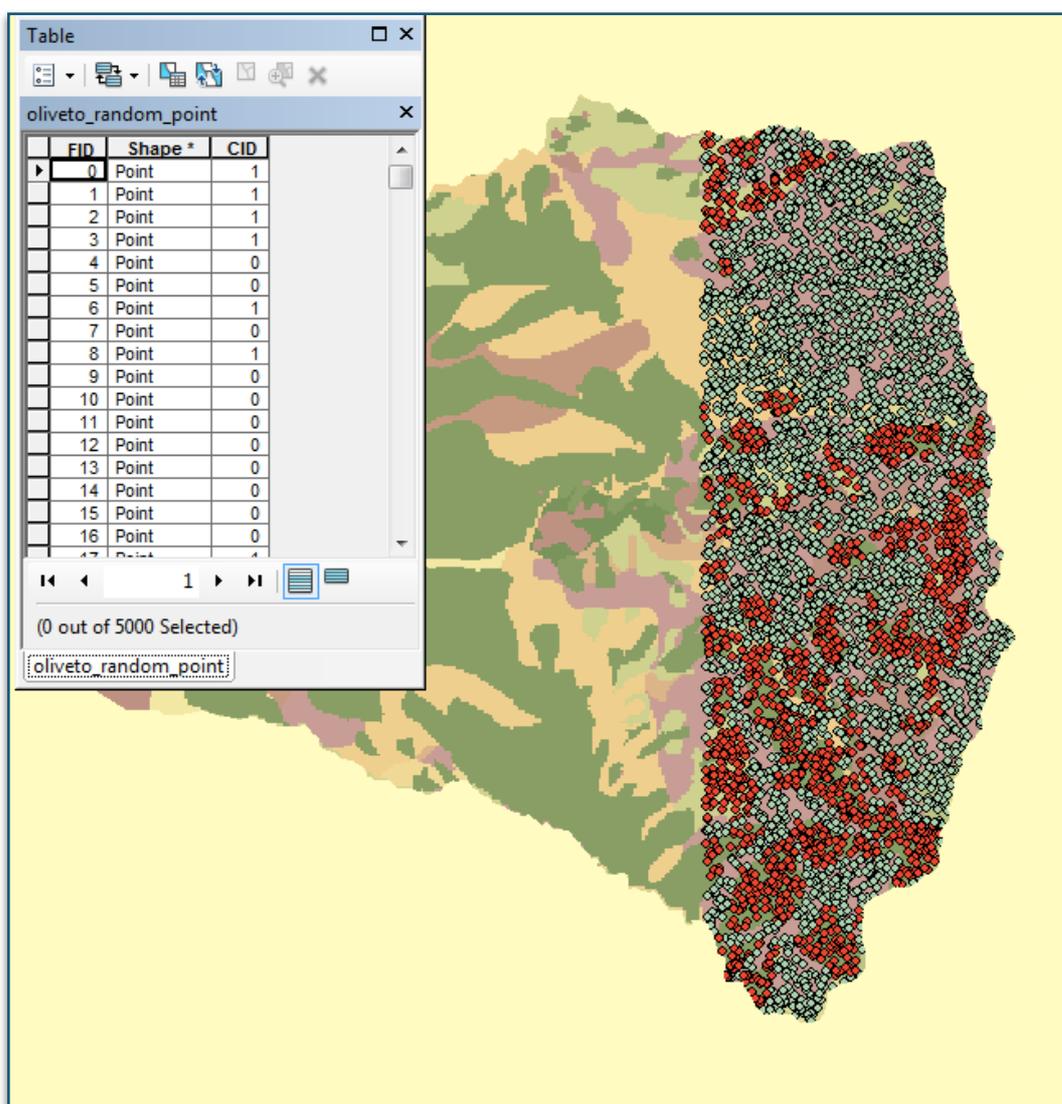


Figura 8.4 Processo di creazione del raster di *training* per l'addestramento dell'algoritmo. Viene creata una distribuzione casuale di punti (in formato vettoriale), ad ognuno dei quali viene assegnato un valore numerico intero (1 *frana* / 2 *non frana*) sulla base della corrispondenza dei pixel dei raster *fattori di condizionamento* (geolitologia, geomorfologia, pendenze) con il raster IFFI. Nell'esempio in figura la distribuzione di punti è sovrapposta al raster di uno stralcio della Carta Geolitologica del comune di Oliveto Citra.

Attraverso un'opportuna conversione di tale dato vettoriale in formato raster, e avendo cura di rispettare le specifiche di cui sopra, si genera il raster di *training*, che è utilizzato in seguito dall'algoritmo per classificare la restante zona di *testing* (Fig. 8.5).

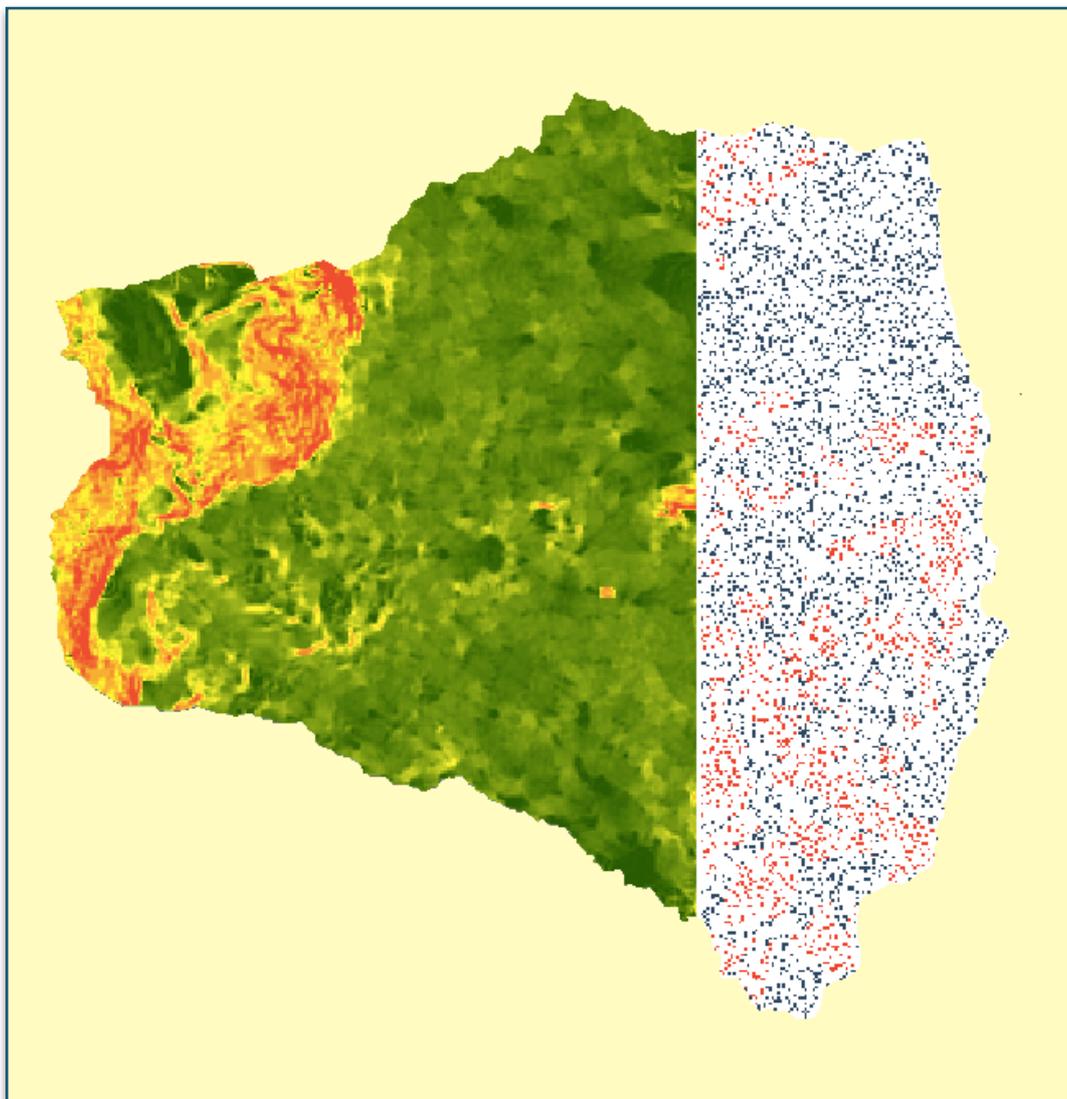


Figura 8.5. Processo di creazione del raster di *training* per l'addestramento dell'algoritmo. La distribuzione di punti viene convertita in formato raster. Nell'esempio in figura il raster di *training* è sovrapposto al raster di uno stralcio della Carta delle Pendenze del comune di Oliveto Citra.

Così come descritto nel paragrafo precedente relativamente ai raster dei fattori di condizionamento, la distribuzione discontinua dei fattori di condizionamento può influenzare la distribuzione delle istanze di classificazione; di conseguenza, anche il raster di *training* sarà caratterizzato da una più o meno ampia distribuzione di pixel con valore *no-data*, in aggiunta, ovviamente, ai valori della classificazione *frana/no frana*.

La suddivisione del territorio, per ognuno dei 14 comuni campioni, in porzioni di *training* e *testing* è stata sottoposta ad una verifica realizzata attraverso un flusso di analisi spaziale all'interno del quale è stato collocato l'algoritmo **SVM**. Come già descritto (capitolo 7),

sfruttando un ambiente di programmazione orientata agli oggetti, l'algoritmo è stato arricchito da strumenti di analisi spaziale che agiscono sugli strati informativi vettoriali prima ancora che essi siano convertiti in file raster. La già menzionata distribuzione discontinua dei tematismi di base del P.S.A.I. 2009 rende ancora più complicata la suddivisione del territorio in porzioni di *training/testing*. In alcune situazioni nelle quali tale distribuzione è assai frammentaria, come i casi dei comuni di Sicignano degli Alburni e Corleto Monforte (Fig. 8.6 a e b), la scelta della porzione di *training* diventa un aspetto estremamente cruciale, in quanto si corre facilmente il rischio di un addestramento non sufficientemente dettagliato a causa di una scarsa presenza dei fattori di condizionamento.

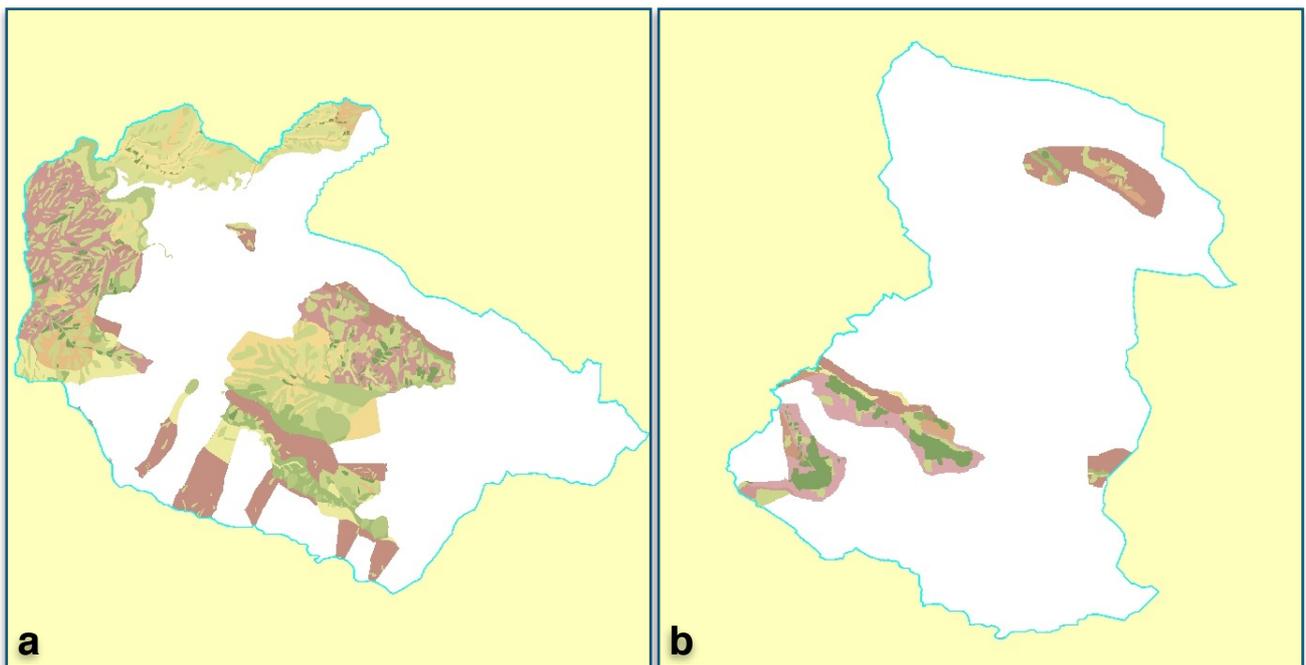


Figura 8.6. Distribuzione frammentaria dei tematismi di base del P.S.A.I. 2009 e quindi dei fattori di condizionamento. Nell'esempio in figura è mostrato il tematismo del P.S.A.I. 2009 utilizzato per allestire la Carta Geolitologica dei comuni di Sicignano degli Alburni (Fig. 8.6 a) e di Corleto Monforte (Fig. 8.6 b).

Per ovviare a questa situazione la suddivisione viene realizzata attraverso la creazione di file vettoriali poligonali che verranno inseriti nel flusso di analisi spaziale e confrontati quindi con i tematismi di base. La perimetrazione vettoriale in grado di soddisfare il calcolo eseguito dal flusso di analisi spaziale può quindi essere utilizzata per trasformare in raster le porzioni di territorio ricadenti al suo interno.

Il flusso di analisi spaziale risulta così realizzato:

1. *calculate geometry* - sullo strato informativo del *fattore di condizionamento*, per il calcolo della effettiva superficie di territorio da classificare;
2. *summary* - sullo stesso strato informativo, sul campo che distingue le tipologie del fattore di condizionamento investigato;
3. *field calculator* - sul campo calcolato al punto 1, per generare un indice che rappresenti il rapporto tra il numero di differenti tipologie del fattore di condizionamento calcolato al punto 2 e la superficie da classificare;
4. *intersect* - tra il tematismo del fattore di condizionamento e il file poligonale che delimita la porzione di *training*;
5. *calculate geometry* - sullo strato informativo risultato dal punto 4, per il calcolo della superficie della porzione di *training*;
6. *summary* - sullo stesso strato informativo, sul campo che distingue le tipologie del fattore di condizionamento investigato nella sola porzione di *training*;
7. *field calculator* - sul campo calcolato al punto 5, per generare un indice che rappresenti rapporto tra il numero di differenti tipologie del fattore di condizionamento calcolato al punto 6; e la superficie della porzione di *training*;
8. *field calculator* - per confrontare gli indici ottenuti al punto 3 e al punto 7.

Il flusso di analisi spaziale è quindi finalizzato a rapportare la presenza dei fattori di condizionamento (calcolati come numero di tipologie presenti) nella porzione di *training* ipotizzata, rispetto a quelli presenti nell'intero territorio comunale indagato. Una normalizzazione rispetto alle superfici evita che la già descritta frammentazione dei tematismi di base possa influenzare negativamente i comuni di dimensioni inferiori.

Se il rapporto tra l'indice della zona di *training* ipotizzata e quello dell'intero comune risulta inferiore a 80%, il modello rifiuta la suddivisione proposta.

8.3 output data

Durante le elaborazioni dei 14 comuni emerge che, nonostante le maggiori dimensioni rispetto ad altri comuni più piccoli, ma con una minore frammentazione dei fattori di condizionamento, nei casi di Sicignano degli Alburni, Corleto Monforte, e Castelvita, un'adeguata scelta per la porzione di *training* ha richiesto numerosi tentativi. Questo dato conferma quanto detto fino ad ora rispetto all'importanza di un'adeguata distribuzione dei *fattori di condizionamento*, al fine di ottenere una classificazione attendibile.

Dalle analisi dei raster di *testing* emerge un quadro interessante rispetto alle perimetrazioni delle zone soggette a pericolosità da frana che sono state realizzate in occasione del P.S.A.I. 2009. Su una superficie indagata² di circa 225 Km², il territorio classificato in *frana* ricopre una superficie di circa 102 Km², rispetto ai circa 123 Km² di territorio classificato come non soggetto a pericolosità da frana (Tab. 8.2)

comuni	territorio non in frana (Km ²)	territorio in frana (Km ²)
Albenella	13,816757	4,55493
Auletta	9,347517	5,491795
Calabritto	4,286872	8,154287
Castel San Lorenzo	2,790484	3,468139
Castelvita	8,090979	10,799235
Colliano	12,165696	13,364825
Contursi terme	16,153017	6,024778
Corleto Monforte	3,013139	3,480646
Eboli	7,321011	1,139248
Oliveto Citra	15,930737	14,999219
Roscigno	3,216072	7,41243
Sant'Angelo a Fasanella	5,71016	2,515034
Senerchia	0,259494	7,83487
Sicignano degli Alburni	21,457241	12,393287
TOTAL	123,559176	101,632723

Tabella. 8.2. Superfici delle aree in frana e non in frana emerse dalla metodologia *Geo-S.Co.Ma.L.*

Effettuando un *overlay* tra i risultati delle elaborazioni con la pericolosità da frana e l'IFFI del P.S.A.I. 2009 emerge un confronto molto interessante sia per quanto riguarda la veridicità

² Si ricorda che tale superficie è riferita solo alla porzione di territorio presa in esame dal P.S.A.I del 2009, e non alla dimensione totale dei territori comunali.

della metodologia **Geo-S.Co.Ma.L.**, sia per il suo grado di approfondimento. Tutte le perimetrazioni emerse nel P.S.A.I. 2009 appartenenti alle categorie di pericolosità reale e potenziale ricadono all'interno di porzioni di territorio classificate dalla metodolgia come zone in frana. Tale metodologia Inoltre restituisce delle porzioni di territorio (oltre a quelle già elaborate nella fase supervisionata) totalmente nuove, non classificate, cioè, come frane dall'IFFI 2009, o classificate con pericolosità potenziale dal P.S.A.I. 2009 (Fig. 8.7).

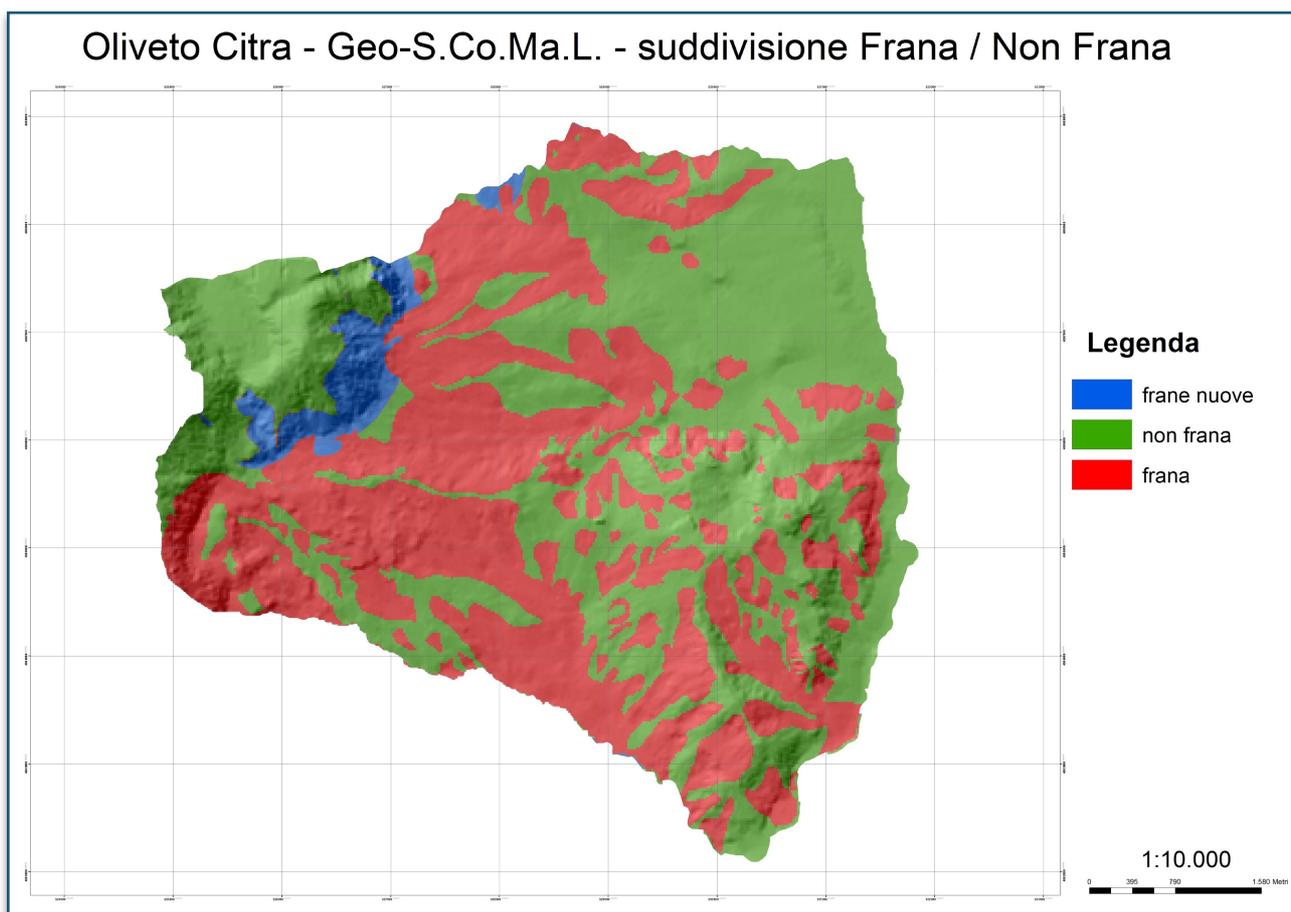


Figura 8.7. Risultati della metodologia **Geo-S.Co.Ma.L.** applicata al comune di Oliveto Citra. In figura è mostrata la suddivisione del territorio in porzioni di “*frana*” (in rosso) e “*non frana*” (in verde). Inoltre sono evidenziate le porzioni di territorio in frana che non rientrano in nessuna classificazione di suscettività del P.S.A.I. 2009 (in blu).

Come si evince dalla tabella 8.3, all'interno della porzione di territorio classificata come in *frana*, circa 97 Km² ricadono sia all'interno della suscettività frana e nell'IFFI del 2009 sia in porzioni di territorio classificate con valori di pericolosità reale (compresi tra Pf1 e Pf3) e di pericolosità potenziale (compresi tra Putr1 e Putr4) (capitolo 6.2).

comuni	territorio in frana (Km ²)	frane presenti nel P.S.A.I. 2009 (Km ²)	nuove frane (Km ²)
Albenella	4,55493	4,509027	0,045903
Auletta	5,491795	4,672174	0,819621
Calabritto	8,154287	7,898399	0,255888
Castel San Lorenzo	3,468139	3,467041	0,001098
Castelcivita	10,799235	10,651975	0,14726
Colliano	13,364825	13,075782	0,289043
Contursi terme	6,024778	5,914139	0,110639
Corleto Monforte	3,480646	3,431185	0,049461
Eboli	1,139248	0,923389	0,215859
Oliveto Citra	14,999219	13,901425	1,097794
Roscigno	7,41243	7,307121	0,105309
Sant'Angelo a Fasanella	2,515034	2,486962	0,028072
Senerchia	7,83487	7,630143	0,204727
Sicignano degli Alburni	12,393287	12,073352	0,319935
TOTAL	101,632723	97,942114	3,690609

Tabella 8.3. Suddivisione delle frane elaborate con la metodologia *Geo-S.Co.Ma.L.* in "presenti nel P.S.A.I.2009" e "nuove frane".

I restanti nuovi 3,69 Km² ricadono, in parte (2,5 Km²), in porzioni di territorio non coperte dall'IFFI 2009 e classificate, dal P.S.A.I. 2009, con valori di pericolosità potenziale e, in parte (1,18 Km²), addirittura in porzioni che non ricadono in alcuna classificazione (Tab. 8.4).

classi di suscettività 2009	nuove frane (Km ²)
Putr1	0,112031
Putr2	1,811641
Putr3	0,29947
Putr4	0,284972
no Putr	1,182495
TOTALE	3,690609

Tab. 8.4. Confronto tra le nuove frane della metodologia *Geo-S.Co.Ma.L.* e la classificazione dello stesso territorio secondo il P.S.A.I. 2009

Realizzando invece un confronto incrociato tra i dati delle elaborazioni, quelli del P.S.A.I. 2009 e quelli del P.S.A.I. 2014 emerge invece che tutte le nuove frane emerse dalla metodologia **Geo-S.Co.Ma.L.** ricadono in zone classificate con pericolosità reale dal P.S.A.I. 2014, ma anche che ci sono circa 13 Km² di nuove frane nella revisione 2014 rispetto a quella del 2009. Il dato più rilevante ai fini di questa ricerca è costituito dal fatto che di questi nuovi 13 Km² circa del 2014, 8 Km² ricadono in porzioni di territorio non investigate dalla edizione del 2009 e, di conseguenza, nemmeno dalla ricerca di questa tesi. In altri termini, i circa 3 Km² di nuove (rispetto al 2009) frane emerse dalla metodologia **Geo-S.Co.Ma.L.** ricadono tutti in porzioni di territorio comuni a entrambe le edizioni del P.S.A.I., ma non “viste” dall’edizione 2009; mentre tutte le altre nuove frane non “viste” dal P.S.A.I. 2009, e risultate nell’edizione 2014, non potevano essere calcolate dalla metodolgia in quanto ricadono in zone che non sono state investigate (Tab. 8.5).

comuni	nuove frane 2014 (Km ²)	nuove frane 2014 in nuove aree (Km ²)
Albenella	0,066913	0,02009
Auletta	1,889638	1,050017
Calabritto	2,180567	1,824679
Castel San Lorenzo	0,009171	0,001073
Castelcivita	0,803896	0,556636
Colliano	0,312389	0,013346
Contursi terme	0,362468	0,151829
Corleto Monforte	0,131133	0,071672
Eboli	0,516825	0,200966
Oliveto Citra	1,108549	0,010755
Roscigno	0,26753	0,102221
Sant'Angelo a Fasanella	0,032147	0,004075
Senerchia	4,672823	4,068096
Sicignano degli Alburni	0,996976	0,677041
TOTAL	13,351025	8,752496

Tabella 8.5. Le nuove frane emerse nel P.S.A.I. del 2014 ricadono in zone non investigate dal precedente P.S.A.I.e quindi non investigate dalla metodologia **Geo-S.Co.Ma.L.**

9 discussione e conclusioni

Lo scopo di questa tesi è stato quello di sviluppare una metodologia in grado di effettuare un'accurata valutazione della suscettività da frana al fine di migliorare la redazione dei P.S.A.I. (*Piani Stralcio d'Assetto Idrogeologico*). Tale metodologia è stata elaborata utilizzando le tecniche e i metodi del **Machine Learning** (apprendimento automatico) e, in particolare, l'algoritmo **SVM** (*Support Vector Machines*). Su questo algoritmo è stata realizzata un'implementazione attraverso la tecnologia GIS. La metodologia così sviluppata è stata denominata **Geo-S.Co.Ma.L.** (*Geo-Spatial Constricted Machine Learning*).

La metodologia proposta è stata verificata confrontandone i risultati con i dati relativi a diverse edizioni dei Piani Stralcio d'Assetto Idrogeologico redatti dall'ex Autorità di Bacino Interregionale del Fiume Sele. Il confronto è stato condotto su un campione spaziale costituito da un comprensorio di 14 comuni ricadenti nel suddetto Bacino Idrografico.

La possibilità di produrre svariati modelli di suscettività da frana utilizzando la tecnologia GIS, che permette l'integrazione georeferenziata tra la Computazione Matematica e le complesse tecniche di analisi spaziale, favorisce la gestione del rischio da frana da parte degli Enti preposti. In questa maniera si amplia l'utilizzo della tecnologia GIS, non più finalizzata esclusivamente ad una produzione grafica (seppur basata sulle avanzate tecniche di analisi spaziale e gestione georeferenziata), ma integrata con una forte base computazionale di trattamento numerico dei dati.

Una gestione della Computazione Matematica esterna al software GIS, (sviluppo in ambiente non geografico, con georeferenziazione solo a monte delle computazioni), potrebbe generare errori sistematici legati a conflitti di comunicazione tra i software di trattamento dati e i software GIS, o potrebbe, più banalmente, può rappresentare un impiego improduttivo di risorse e tempo.

In questa ricerca ha pertanto assunto una grande importanza la possibilità di trasformare complessi modelli matematici in strumenti e tools all'interno di software GIS, permettendogli di svolgere i propri compiti computazionali (siano essi statistici o di classificazione) direttamente sul dato geografico.

Per lo sviluppo della metodologia proposta è stato utilizzato l'algoritmo *SVM Tools* per *ArcGis 10.1+,v1.3* (Wehmann, A. 2013), un plugin distribuito con licenza freeware e

e realizzato per il software GIS della ESRI Inc. *ArcGis Desktop 10.1.*; un algoritmo, quindi, totalmente integrabile all'interno di un software GIS. Per interfacciare l'algoritmo **SVM** con il software *ArcGIS*, questo progetto si avvale della libreria *LIBSVM* (Chang, C-C., Lin, C-J. 2011), sviluppata dal Machine Learning e Data Mining Group della National Taiwan University.

Come descritto nel capitolo 7, l'integrazione col software ArcGis ha permesso di implementare ulteriormente l'algoritmo **SVM**, inserendolo in un ambiente di *programmazione orientata agli oggetti* finalizzata allo sviluppo di flussi di analisi spaziale (Model Builder).

È stato quindi possibile applicare i vantaggi di una classificazione ad apprendimento automatico direttamente sui dati geografici, cioè sui raster dei *fattori di condizionamento* (geolitologia, geomorfologia, pendenza), ottenendo una definizione di suscettività da frana, intesa come classificazione binaria (*frana/non frana*). Contestualmente, sfruttando gli strumenti di analisi spaziale, è stato possibile implementare il modello attraverso dei controlli sui dati di input rispetto alla distribuzione dei *fattori di condizionamento*.

La metodologia è stata testata sugli stessi *fattori di condizionamento* (geolitologia, geomorfologia, pendenza) con i quali è stata redatta l'edizione 2009 del Piano Stralcio d'Assetto Idrogeologico. Il risultato ottenuto (in termini di quantità e distribuzione spaziale delle frane) è stato confrontato con la suscettività da frana elaborata nelle edizioni 2009 e 2014 di tale Piano. Questo confronto ha messo in luce una corretta classificazione del territorio (in termini di presenza/assenza di frane) elaborata dalla metodologia **Geo-S.Co.Ma.L.**: tutte le porzioni di territorio classificate come *in frana* ricadono, infatti, in zone classificate dal P.S.A.I. 2014 con pericolosità reale (Pf), e pericolosità potenziale (Putr).

Inoltre, i risultati di questa tesi hanno rivelato un approfondimento del grado previsionale rispetto al P.S.A.I. 2009. Infatti, alcune delle porzioni di territorio classificate *in frana*, rientrano in aree che in precedenza erano state classificate con valori di pericolosità potenziale (da Putr1 a Putr4) e non di pericolosità reale. Altre porzioni di territorio classificate *in frana*, ricadono in aree non classificate come soggette ad alcun grado pericolosità potenziale o reale.

Infine, alcune porzioni di territorio classificate dal P.S.A.I. 2014 come *aree soggette a pericolosità da frana reale o potenziale* (Pf o Putr) non erano state segnalate dal P.S.A.I. 2009 perché le elaborazioni erano state condotte sugli stessi tematismi di base, ma con

campiture spazialmente inferiori.

In altri termini, a parità di campitura dei tematismi di base, tutte le porzioni di territorio classificate come aree soggette a pericolosità da frana (reale o potenziale) dal P.S.A.I. 2014 (campitura 2014), e non “viste” dalla precedente edizione del 2009 (campitura 2009), sono state classificate come aree *in frana* dalla metodologia **Geo-S.Co.Ma.L.** testata sulla campitura 2009.

Da quanto emerso in questa ricerca, la metodologia sviluppata si è dunque mostrata in grado di individuare con successo alcune aree critiche “sfuggite” ad altre metodologie applicate alla stessa campitura, contribuendo quindi ad un mappatura più efficiente.

Inoltre, basandosi su una suddivisione del territorio in frana/non frana, questa metodologia non tiene conto delle eventuali zone di distacco, transito o accumulo del fenomeno gravitativo. Pertanto, le presunte nuove frane emerse dalla metodologia potrebbero, ad esempio, ricadere in zone di transito o accumulo di frane già descritte nelle precedenti edizioni del P.S.A.I. e risultare quindi non un nuovo elemento franoso, ma l'evoluzione di un fenomeno già esistente. Questa metodologia risulta quindi efficiente in qualsiasi circostanza in quanto, riuscendo a prevedere l'innescio di una nuova frana o il cambiamento di stato di una frana non attiva, si rivela in grado di calcolare efficientemente la suscettività.

Un'ulteriore considerazione va inoltre fatta sul confronto tra le due edizioni del Piano di Bacino. Emerge, infatti, che i nuovi 13 Km² di frane censite nel P.S.A.I. 2014, ricadono in zone in cui è presente oggi una maggiore copertura della cartografia tematica di base rispetto al P.S.A.I. 2009 (capitolo 8.3). Tuttavia, la distribuzione di tali cartografie, sebbene più ampia rispetto all'edizione del 2009, non presenta una campitura completa delle porzioni investigate. Inoltre, gli aggiornamenti di tali Piani di Bacino vengono realizzati sulla base di segnalazioni di nuove frane e, conseguentemente, su un parziale adeguamento della cartografia di base. Questo iter è la causa di inevitabili incongruenze tra le nuove cartografie della suscettività, della pericolosità e del rischio, e tra i relativi tematismi di base da cui queste cartografie vengono ricavate (geologia, geomorfologia etc.).

Alla luce dei risultati di questa tesi, si può pertanto concludere che il supporto informatico basato sulla metodologia **Geo-S.Co.Ma.L.** riesce a sopperire ad alcuni limiti meglio dell'analisi Booleana, ma non a garantire un'adeguata carta della suscettività. L'unica strada percorribile al fine di ottenere un valido supporto cartografico della suscettività da frana (e

quindi della pericolosità e del rischio) potrebbe dunque essere il rifacimento periodico, a campitura totale, della cartografia di base, alla luce delle reali modifiche del territorio nel tempo.

10 bibliografia

- Alkhasawneh M., Ngah U.K., Tay L.T., Mat Isa N.A., Al-Batah M.S. (2013) *Modeling and Testing Landslide Hazard Using Decision Tree*. Hindawi Publishing Corporation Journal of Applied Mathematics Volume 2014.
- Althuwaynee O.F., Pradhan B., Ahmad N. (2014) *Landslide susceptibility mapping using decision-tree based CHI-squared automatic interaction detection (CHAID) and Logistic regression (LR) integration*. 7th IGRSM International Remote Sensing & GIS Conference and Exhibition IOP Publishing. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 20.
- Amato A., Ascione A., Cinque A., Lama A. (1991) *Morfoevoluzione, sedimentazione e tettonica recente dell'alta piana del Sele e delle sue valli tributarie (Campania)*. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 14(1), pp. 5-16.
- Amore O., Castellano M.C., Civile D., Morabito S., Pescatore E., Santini U., Sgrosso I. (2005b) *Three Miocene sedimentary cycles near Laviano (Salerno)*. Vol. Abstract Geoitalia 2005, Epitome, 1, pp. 293.
- Amore O., Basso C., Ciampo G., Ciarcia S., Di Donato V., Di Nocera S., Esposito P., Matano F., Staiti D., Torre M. (1998) *Nuovi dati stratigrafici sul Pliocene affiorante tra il fiume Ufita ed il torrente Cervaro (Irpinia, Appennino meridionale)*. Boll. Soc. Geol. It., 117, pp. 455-466.
- Amore O., Bonardi G., Ciampo G., De Capoa P., Perrone V., Sgrosso I. (1988) *Relazioni tra "flysch interni" e domini appenninici: reinterpretazione delle formazioni di Pollica, San Mauro e Albidona e il problema dell'evoluzione inframiocenica delle zone esterne appenniniche*. Mem. Soc. Geol. It., 41, pp. 285-299.
- Anbalagan P., Chandrasekaran R.M. (2015) *A Parallel Weighted Decision Tree Classifier for Complex Spatial Landslide Analysis: Big Data Computation Approach*. International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 124 – No.2, August 2015 .
- Arakawa K., Krotkov E. (1991) *Estimating Fractal Dimension from Range Images of Natural Terrain*, Pittsburgh.
- Assilzadeh H., Levy J. K., & Wang X. (2010) *Landslide catastrophes and disaster risk reduction: A GIS framework for landslide prevention and management*. Remote Sensing, 2(9), pp. 2259-2273.
- Autorità di Bacino Interregionale Sele (2009) *Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico Rischio Frane* .Relazione Tecnica Sezione E.
- Autorità di Bacino Interregionale Sele (2009) *Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico Rischio Frane* .Relazione Tecnica Sezione G, 32 pp.
- Autorità di Bacino Interregionale Sele (2009) *Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico Rischio Frane* .Relazione Tecnica Sezione H, 49 pp.
- Autorità di Bacino Sinistra Sele (2002) *Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico Rischio Frane*. Relazione Tecnica, 148 pp.
- Ballabio C., Sterlacchini S. (2011) *Support Vector Machines for Landslide Susceptibility Mapping: the Staffora River Basin Case Study, Italy*. International Association for Mathematical Geosciences.
- Barredo J.I., Benavides A., Hervás J., van Westen C.J. (2000) *Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 2000/1, pp. 9-23.
- Bell F.G. (1999) *Geological Hazards their assessment, avoidance and mitigation*. E & FN Spon, London, UK, pp. 648.
- Belousov A. I., Verzhakov S. A., Von Frese J. (2002) *A flexible classification approach with optimal generalisation performance: support vector machines*. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 64(1), pp. 15-25.
- Bird C., Peccol E., Taylor J., Brewer T., Keech M. (1994) *Monitoring landscape change—the role for GIS*. Landscape Research, 19(3), pp. 120-127.

- Bonardi G., D'Argenio B., Perrone V. (1988a) *Carta geologica dell'Appennino meridionale in scala 1: 250.000*. Mem. Soc. Geol. It., 41.
- Bonardi G., Amore F. O., Ciampo G., De Capoa P., Miconnet P., Perrone V. (1988b) *Il complesso Liguride Auct.: stato delle conoscenze e problemi aperti sulla sua evoluzione pre-appenninica ed i suoi rapporti con l'Arco Calabro*. Mem. Soc. Geol. It., 41, pp. 17-35.
- Bonham-Carter G. (1994) *Geographic information system for geosciences: Modeling with GIS*. Pergamon, New York, USA, pp. 398.
- Boser B.E., Guyon I.M., Vapnik V.N. (1992) *A Training Algorithm for Optimal Margin Classifiers*. Proceedings Of The 5Th Annual Acm Workshop On Computational Learning Theory.
- Brancaccio L., Cinque A., D'Angelo G., Russo F., Santangelo N., Sgrosso I. (1987) *Evoluzione tettonica e geomorfologica della Piana del Sele (Campania, Appennino meridionale)*. Geogr. Fis. Din. Quat. 10, pp. 47-55.
- Burges C.J.C. (1998) *A tutorial on support vector machines for pattern recognition*. Data Mining and Knowledge Discovery, vol. 2/1, pp. 121-167.
- Canuti P., Casagli N., (1996) *Considerazioni sulla valutazione del rischio frana*. Atti Convegno Fenomeni franosi e centri abitati, Bologna, 27 Maggio 1994.
- Carfagna E., Tassinari P., Zagoraiou M., Benni S., Torreggiani D. (2012) *Efficient statistical sample designs in a GIS for monitoring the landscape changes*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 399-407.
- Carrara A., Crosta G., Frattini P. (2003) *Geomorphological and historical data in assessing landslide hazard*. Earth Surf Processes, 28, pp. 1125-1142.
- Castellano M., Sgrosso I. (2002) *Complesso Sicilide, Unità Sannitiche e Argille Varicolori molisane nell'Appennino meridionale*. In: Cipollari P., Cosentino D. (eds.), Riassunti e Guida all'escursione, Convegno – escursione COFIN 1999 "Evoluzione cinematica del sistema orogenico dell'Appennino centro-meridionale: caratterizzazione stratigrafico-strutturale dei bacini sintettonici", Roma 17-20 aprile 2002, pp. 7-8.
- Castellano M.C., Sgrosso I. (1996) *Età e significato dei depositi miocenici della formazione di M. Sierio e possibile evoluzione cinematica dell'unità Monti della Maddalena nell'Appennino campano-lucano*. Mem. Soc. Geol. It., 51, pp. 239-249.
- Catenacci V. (1992) *Il dissesto geologico e geoambientale in Italia dal dopoguerra al 1990*, (Periodici tecnici) Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia, ISPRA Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma.
- Chacón J., Irigaray C., Fernández T., El Hamdouni R. (2006) *Engineering geology maps: landslides and geographical information systems*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, vol. 65, pp. 341-411.
- Chandra Prakash P. (2012) *Landslide susceptibility analysis using decision tree method, Phidim, Eastern Nepal*. Bulletin of the Department of Geology, Tribhuvan University, Kathmandu, Nepal, Vol. 15, 2012, pp. 69–76
- Chang C-C., Lin C-J. (2011) *LIBSVM: a library for support vector machine*. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2(27), pp. 1-27. Software available at: <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>
- Ciarcia S., Di Nocera S., Matano F., Torre M. (2003) *Evoluzione tettono-sedimentaria e paleogeografica dei depocentri "wedge-top" nell'ambito del "foreland basin system" pliocenico dell'Appennino meridionale (settore irpino-dauno)*. Boll. Soc. Geol. It., 122, pp. 117-137.
- Cinque A., Guida F., Russo F., Santangelo N. (1988) *Dati cronologici e stratigrafici su alcuni depositi continentali della piana del Sele (Campania): i "Conglomerati di Eboli"*. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 11(1), pp. 39-44.

- Chien-Min C., Bor-Wen T., Kang-Tsung C. (2009) *Integrating Decision Tree and Spatial Cluster Analysis for Landslide Susceptibility Zonation*. World Academy of Science, Engineering and Technology 35 2009, pp. 479-483.
- Cieplak M., Giacometti A., Maritan A., Rinaldo A., Rodriguez-Iturbe I., Banavan J. R. (1998) *Models of Fractal River Basins*, Journal of Statistical Physics, Vol.91, Nos.1/2.
- Cortes C., Vapnik V.N. (1995) *Support-Vector Networks*. Machine Learning, 20, pp. 273-297.
- Cristiani N., Shawe-Taylor J. (2000) *Support Vector Machines and other kernel-based learning methods*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 189.
- Cruden D.M., 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. National Academy Press, WA, pp. 36-75.
- D'Argenio B. (1966) *Zone isopiche e faglie trascorrenti nell'Appennino meridionale*. Mem. Soc. Geol. It., 4, pp. 279-299.
- Dazzaro L., Di Nocera S., Pescatore T., Rapisardi L., Romeo M., Russo B., Senatore M., Torre M. (1988) *Geologia del margine della catena appenninica tra il F. Fortore ed il T. Calaggio (Monti della Daunia - App. Merid.)*. Mem. Soc. Geol. It., 41, pp. 411-422.
- Di Nocera S., Matano F., Pescatore T. S., Pinto F., Boiano U., Civile D., Martino C., Quarantiello R. (2005) *Prime considerazioni sulla geologia del settore centrale dei monti del Sannio*. Giornata di studio in memoria di A. Jacobacci "Evoluzione delle conoscenze geologiche dell'Appennino apulo-campano e tosco-umbro-marchigiano", APAT, 7 novembre 2005, Roma, Volume Riassunti, 20-22.
- Dieu Tien, B., Biswajeet P., Owe L., Inge R. (2012) *Landslide Susceptibility Assessment in Vietnam Using Support Vector Machines, Decision Tree, and Naïve Bayes Models*. Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering Volume 2012.
- De Vita P., Guida M., Vallario A., Lanzara R., Guida D., Lauria M. (1994) *Proposte metodologiche e procedurali di pianificazione del territorio in aree protette: l'Unità Territoriale di Riferimento*. Geologia Tecnica ed Ambientale, 3/94, pp. 29-44.
- Einstein H.H. (1988) *Special lecture: landslide risk assessment procedure*. In: *Landslides – Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*, vol.2, 10-15 July, Lausanne, Switzerland, pp. 1075-1090.
- Ercanoglu M., Kasmer O., Temiz N. (2008) *Adaptation and comparison of expert opinion to analytical hierarchy process for landslide susceptibility mapping*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, vol. 67/4, pp. 565-578.
- Fell R. (1994) *Landslide risk assessment and acceptable risk*. Canadian Geotechnical Journal, vol. 31, pp. 261-272.
- Fell R., Corominas J., Bonnard C., Cascini L., Leroi E., Savage W. (2008) *Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning*. Engineering Geology, vol. 102, pp. 83- 84.
- Forzieri G., Battistini A., Catani F. (2012) *ES4LUCC: A GIS-tool for remotely monitoring landscape dynamics*. Computers & Geosciences, 49, pp. 72-80.
- Glade T., Anderson M., Crozier M. (Eds.) (2005) *Landslide hazard and risk*. Wiley & Sons. Chichester.
- Guzzetti F., Mondini A.C., Cardinali M., Fiorucci F., Santangelo M., Chang K.T. (2012) *Landslide inventory maps: New tools for an old problem*. Earth-Science Reviews, vol. 112, pp. 42–66.
- Huan X., Jensen J.R. (1997) *A Machine-Learning Approach to Automated Knowledge-Base Building for Remote Sensing Image Analysis with GIS Data*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 63, No. 10, pp. 1185-1194.
- Hungr O. (1981) *Dynamics of rock avalanches and other types of mass movements*. PhD Thesis. University of Alberta .

- Hungr O., Leroueil S., Picarelli L. (2012) *Varnes classification of landslide types, an update*. In: Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society through Improved Understanding, Eberhardt et al. (eds), Taylor & Francis Group, London, UK, pp. 47-58.
- Hippolyte J.-C. (1992) *Tectonique de l'Apennin meridional: structures et paléocontraintes d'un prisme d'accrétion continental*. These de Doctorat, Univ. P. & M. Curie, Paris, 245 p.
- Hsieh W. W. (2009) *Machine learning methods in the environmental sciences: Neural networks and kernels*. Cambridge university press.
- Ippolito F., D'Argenio B., Pescatore T., Scandone P. (1973) *Unità stratigrafico-strutturali e schema tettonico dell'Appennino meridionale*. Trad. da "The guide-book of Italy", pp. 134-155. Petroleum Exploration Society of Libya. Ist. Geol. Geof. Univ., pubbl. n. s., 15, Napoli.
- Kanevski M., Pozdnoukhov A., Timonin V. (2009) *Machine Learning for Spatial Environmental Data: Theory, Applications and Software*. EPFL Press, Lausanne, Switzerland, p. 368.
- Kim H., Ku C.Y. (2008) *A Machine Learning Approach for Knowledge Base Construction Incorporating GIS Data for Land Cover Classification of Landsat ETM+ Image*. Journal of the Korean Geographical Society, Vol. 43, No. 5, pp. 761-774.
- Lynn M., Bobrowsky P. (2008) *The landslide handbook – A guide to understanding landslides*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, USA, pp. 129.
- Lee E.M., Jones D.K.C. (2004) *Landslide risk assessment*. Thomas Telford Publishing, London, UK, pp. 454.
- Malinverno A., Ryan W.B.F. (1986) *Extension in the Tyrrhenian Sea and shortening in the Apennines as result of arc migration driven by sinking of the lithosphere*. Tectonics 5, pp. 227-245.
- Mashari eshghabad S., Solaimani K., Omidvar E. (2012) *Landslide Susceptibility Mapping Using Multiple Regression and GIS Tools in Tajan Basin, North of Iran*. Environment and Natural Resources Research; Vol. 2, No. 3; pp. 43-51.
- Marjanović, M. (2013) *Advanced methods for landslide assessment using GIS*. PhD Thesis. Palacký University Olomouc.
- Matei D. (2012) *Runoff modeling using GIS. Application in torrential basins in the Apuseni Mountains*. PhD Thesis. University Cluj-Napoca.
- Mitchell T.M. (1997) *Machine Learning*. McGraw Hill, New York, USA, pp. 414.
- Micheletti N., Foresti L., Robert S., Leuenberger M., Pedrazzini A., Jaboyedoff M., Kanevski M., (2013) *Machine Learning Feature Selection Methods for Landslide Susceptibility Mapping*. International Association for Mathematical Geosciences 2013.
- Nardi G., (1996) Personal Communication. Atti V Workshop, Informatica Applicata alle Scienze della Terra. San Sepolcro.
- Nefeslioglu H. A., Sezer E., Gokceoglu C., Bozkir A.S., Duman T.Y. (2009) *Assessment of Landslide Susceptibility by Decision Trees in the Metropolitan Area of Istanbul, Turkey*. Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering Volume 2010.
- Ogniben L. (1969) *Schema introduttivo alla geologia del confine calabro-lucano*. Mem. Soc. Geol. It., 8, pp. 453-763.
- Patacca E., Scandone P., Bellatalla M., Perilli N., Santini U. (1992a) *The Numidian-sand Event in the Southern Apennines*. Memorie di Scienze Geologiche, 43, pp. 297-337.
- Patacca E., Scandone P. (1989) *Post-Tortonian mountain building in the Apennines. The role of the passive sinking of a relict lithospheric slab*. In: A. Boriani, M. Bonafede, G.B. Piccardo G.B. & Vai (Eds.), The lithosphere in Italy. Advances in Earth Science Research. It. Nat. Comm. Int. Lith. Prog., Mid-term Conf. (Rome, 5-6 May 1987), Atti Conv. Lincei, 80, pp. 157-176

- Pescatore T. (1965a) *Le facies di transizione nel gruppo del Monte Marzano*. Boll. Soc. Natur. Napoli, 74, pp. 149-158.
- Pescatore T., Di Nocera S., Matano F., Pinto F. (2000) *L'unità del Fortore nel quadro della geologia del settore orientale dei Monti del Sannio (Appennino meridionale)*. Boll. Soc. Geol. It., 119, pp. 587-601.
- Pescatore T., Renda P., Tramutoli M. (1988) *Rapporti tra le Unità lagonegresi e le Unità sicilidi nella media valle del Basento*. Mem. Soc. Geol. It., 41, pp. 353-361.
- Pescatore T., Sgroso I., Torre M. (1970) *Lineamenti di tettonica e sedimentazione nel Miocene dell'Appennino campano-lucano*. Mem. Soc. Nat. in Napoli, 78, pp. 337-408.
- Poli S., Sterlacchini S., (2007) *Landslide representation strategies in susceptibility studies using Weights-of-Evidence modeling technique*. Nat Resour Res, 16 pp. 121-134.
- Quinlan J.R. (1993) *C4.5: Programs for Machine Learning*. Morgan-Caufman, San Mateo, USA, pp. 302.
- Saito H., Nakayama D., Matsuyama H. (2009) *Comparison of landslide susceptibility based on a decision-tree model and actual landslide occurrence: the Akaishi Mountains, Japan*. Geomorphology 2009 Vol. 109 No. 3/4 pp. 108-121.
- Salvador A. (Ed., 1994) *International Stratigraphic Guide*. I.U.G.S & Geol. Soc. of Am., 214 pp.
- Santo A. (1988) *Ricerche sul Terziario dei Monti Alburni (Campania)*. Atti 74° Congr. Soc. Geol. It. vol. A, pp. 481-485.
- Sartori R. (1989) *Evoluzione neogenico-recente del bacino tirrenico e suoi rapporti con la geologia delle aree circostanti*. Giorn. Geologia, ser. 3, 51/2, pp. 1-39.
- Scandone P. (1967) *Studi di geologia lucana: la serie calcareo-silico-marnosa e suoi rapporti con l'Appennino calcareo*. Boll. Soc. Nat. in Napoli, 76, 1-175.
- Scandone P. (1972) *Studi di Geologia lucana: carta dei terreni della serie calcareo-silico-marnosa e note illustrative*. Boll. Soc. Natur. in Napoli, 81, 225-300.
- Scandone P., Bonardi G. (1968) *Synsedimentary tectonics controlling deposition of mesozoic and tertiary carbonatic sequences of areas surrounding Vallo di Diano (southern Appennines)*. Mem. Soc. Geol. It., 7, 1, pp. 1-10.
- Scandone P., Sgroso I. (1974) *La successione miocenica dell'alta Vallimala nella finestra tettonica di Campagna (Monti Picentini)*. Boll. Soc. Geol. It., 93, pp. 1043-1047.
- Scandone P., Sgroso I., Bruno F. (1964) *Appunti di Geologia sul M. Bulgheria*. Boll. Soc. Natur. Napoli, 72, pp. 19-27.
- Scholkopf B., Smola A.J. (2001) *Learning with Kernels, Support Vector Machines, Regularization, Optimization, and Beyond*. MIT press.
- Schroeder M. (1991) *Fractals, Chaos, Power Laws: Minutes from an Infinite Paradise*. The Mathematical Gazette Vol. 76, No. 476 (1992), pp. 289-292
- Schuster R.L. (1996) *Socioeconomics signifiacnce of landslides*, in A.K. Turner and R.L. Schuster (eds), *Landslides: Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247 (Washington, DC: National Academy Press), 91-105.
- Selli R. (1962) *Il Paleogene nel quadro della geologia dell'Italia meridionale*. Mem. Soc. Geol. It., 3, pp. 737-790.
- Selli R. (1957) *Sulla trasgressione del Miocene nell'Italia meridionale*. Giornale Geologia, ser. II, 26, 1-54, Bologna.
- Sgroso I. (1998) *Possibile evoluzione cinematica miocenica nell'orogene centro-sud appenninico*. Boll. Soc. Geol. It., 117, pp. 679-724.

- Tararbra M., Nicolò G. (2009) *Definizione di un criterio per la distinzione tra ambiente alpino e pre-alpino nella valutazione dell'instabilità per frane superficiali*. Centro per le Ricerche Territoriali e Geologiche - Arpa Piemonte, Cagliari.
- Turco E. (1976) *La finestra tettonica di Campagna (M. Picentini, Salerno)*. Boll. Soc. Natur. Napoli 85, pp. 639-665.
- Vapnik, V.N. (1997) *The support vector method*. Artificial Neural Networks—ICANN'97, pp. 261-271.
- Varnes, D.J. (1984) *Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice*. International Association for Engineering Geology, Paris, France, pp. 63.
- Wehmann A., (2013) *SVM Tools for ArcGIS 10.1+*. Columbus, OH. Software available at: <http://www.adamwehmann.com/>
- Witten I.H., Frank E., Hall M.A. (2011) *Data Mining Practical Machine Learning Tools and Techniques*. Elsevier, Burlington, USA, pp. 929.
- Zupetta A., Russo M., Turco E. (1984) *Alcune osservazioni sulle Tufiti di Tusa nell'area compresa tra la Valsinni e Rocca Imperiale (confine calabro-lucano)*. Boll. Soc. Geol. It., 103, pp. 623-627.