



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DOTTORATO DI RICERCA IN
Scienze della Terra

CICLO XXXI

COORDINATORE Prof.ssa Francalanci Lorella

**GEOMORFOLOGIA APPLICATA ALL'INDIVIDUAZIONE DELLO STATO DI
ATTIVITÀ DEI MOVIMENTI GRAVITATIVI E ANALISI DI SUSCETTIBILITÀ DA
FRANA IN DIVERSI CONTESTI GEOLOGICO-STRUTTURALI**

Settore Scientifico Disciplinare GEO/04

Dottorando

Dott.ssa Tognaccini Sofia

Cotutore

Prof. Fantozzi Pier Lorenzo

Tutore

Prof. Coltorti Mauro

Cotutore

Prof. Aggr. Disperati Leonardo

Coordinatore

Prof.ssa Francalanci Lorella

Anni 2015/2019

Indice

Indice	1
1. Introduzione	5
2. Metodologia	7
2.1 Rilevamento geologico e geomorfologico, inventario delle frane e descrizione del geodatabase.....	10
2.2 Analisi multitemporale	16
2.2.1 Stato di attività e proposta di una nuova classificazione	20
2.3 Analisi statistica descrittiva e suscettibilità da frana	23
3. Definizione generale di frana	25
3.1 Terminologia e caratteristiche dei movimenti franosi	27
3.2 Dimensioni delle frane	30
3.3 Tipologia di movimento franoso	31
3.4 Deformazioni gravitative profonde di versante	35
3.5 Terminologia relativa all'attività di una frana	38
3.5.1 Stato di Attività.....	39
3.5.2 Distribuzione di attività	40
3.5.3 Stile di attività.....	41
3.6 Tasso di movimento.....	42
4. Aree di studio	43
4.1 Montespertoli.....	45
4.1.1 Inquadramento geologico	45
4.1.2 Inquadramento geomorfologico	51
4.1.3 Caratteristiche delle frane rilevate.....	53
4.1.4 Analisi multitemporale	56
4.1.5 Considerazioni finali.....	69
4.2 Figline	72

4.2.1	Inquadramento geologico	72
4.2.2	Inquadramento geomorfologico	77
4.2.3	Caratteristiche delle frane rilevate.....	79
4.2.4	Analisi multitemporale	83
4.2.5	Considerazioni finali.....	89
4.3	Corella.....	90
4.3.1	Inquadramento geologico	90
4.3.2	Inquadramento geomorfologico	99
4.3.3	Caratteristiche delle frane rilevate.....	101
4.3.4	Analisi multitemporale	106
4.3.5	Considerazioni finali.....	123
5	Analisi statistica descrittiva	127
5.1	Indice di Franosità (IF)	129
5.2	Definizione dei parametri predisponenti	130
5.2.1	Pendenza	130
5.2.2	Esposizione	131
5.2.3	Litologia.....	131
5.2.4	Uso del suolo	132
5.2.5	Elevazione	134
5.2.6	Area drenata	134
5.3	Montespertoli.....	135
5.3.1	Montespertoli area di studio	135
5.3.2	Montespertoli area sub-comunale	141
5.4	Figline Valdarno.....	144
5.4.1	Figline Valdarno area di studio.....	144
5.4.2	Figline Valdarno area sub-comunale.....	147
5.5	Corella.....	151

5.5.1	Corella area di studio.....	151
5.5.2	Corella area sub-comunale	153
5.6	Variabilità dei parametri predisponenti	156
6	Suscettibilità da frana	165
6.1	Analisi di suscettibilità	166
6.2	Approccio qualitativo: metodo euristico e metodo geomorfologico	168
6.3	Approccio quantitativo: metodo statistico e metodo deterministico.....	169
6.3.1	Metodi statistici	169
6.3.2	Metodi deterministici (o fisicamente basati)	171
6.4	Validazione dei modelli e Curva ROC.....	173
7	Modelli statistici bivariati (<i>Information Value Method</i>).....	176
7.1	Tematismi utilizzati	177
7.2	Metodo di Van Westen.....	178
7.3	Analisi dei risultati.....	185
7.3.1	Montespertoli (area di studio).....	185
7.3.2	Montespertoli (area comunale)	189
7.3.3	Figline Valdarno (area di studio).....	192
7.3.4	Figline Valdarno (area comunale)	196
7.3.5	Corella (area di studio).....	199
7.3.6	Corella (area comunale)	203
7.4	Python Script	206
7.5	Considerazioni finali	210
8	Modelli prevalentemente deterministici (<i>modulo r.slope.stability</i>)	213
8.1	Modulo r.slope.stability	213
8.2	Parametrizzazione del modello	219
8.3	Applicazione e risultati	222
8.4	Considerazioni finali	230

9	Discussione e conclusioni del lavoro.....	232
9.1	Discussioni	232
9.2	Conclusioni	241
10	Bibliografia.....	243
11	Sitografia	262
12	Pubblicazioni	262
	Ringraziamenti	263

Capitolo 1

1. Introduzione

L'ingente numero di movimenti di massa che caratterizzano i versanti della penisola italiana e i relativi effetti indotti sull'ambiente e sulla componente antropica, rappresenta una fonte di pericolosità geomorfologica che compromette buona parte del territorio nazionale italiano. La presenza di fattori che determinano la costante instabilità di alcuni settori ha stimolato la crescita di nuove metodologie atte alla previsione, prevenzione e monitoraggio dei fenomeni gravitativi.

Tra le tecniche che permettono di valutare nel tempo l'evoluzione del corpo franoso si è utilizzata, nel presente lavoro di tesi, l'analisi multitemporale, una tecnica che consente, attraverso l'osservazione di foto aeree realizzate in anni diversi, di identificare e valutare le modificazioni del territorio e le trasformazioni del paesaggio.

Il riconoscimento e la perimetrazione delle aree affette da instabilità è il primo passo verso la realizzazione di studi focalizzati sulla previsione spaziale di aree potenzialmente instabili e prone al franamento, campo di pertinenza delle analisi di suscettibilità. Svariati sono gli approcci proposti in letteratura, che spaziano da analisi qualitative, basate sul giudizio di esperti, ad approcci deterministici e statistici, che propongono risultati più oggettivi e replicabili.

Il presente lavoro di tesi si pone quindi come obiettivo quello di investigare, caratterizzare e cartografare i movimenti gravitativi e i processi morfogenetici che hanno generato il movimento franoso riconoscendo, durante il lavoro di campagna, le morfologie peculiari dei movimenti gravitativi (scarpate, trincee, ondulazioni del terreno, crepe del suolo e sugli edifici). I dati così ottenuti sono stati integrati con i risultati della fotointerpretazione, condotta mediante l'utilizzo di ortofoto e foto aeree di anni diversi (analisi multitemporale); tale metodo ha consentito l'applicazione di una nuova classificazione, relativa allo stato di attività dei movimenti gravitativi, proposta nel presente elaborato di tesi. Le procedure di

fotointerpretazione sono state scelte perché sono economicamente vantaggiose e consentono di analizzare in modo speditivo grandi porzioni di territorio.

Inoltre, si è cercato di definire una metodologia che consenta di valutare la suscettibilità da frana a partire dalla conoscenza dei parametri predisponenti che risultano correlati ai movimenti gravitativi. Tale metodologia è applicabile anche ad aree studio diverse da quelle in cui è stata testata, ovvero è ripetibile, e al contempo garantisce la gestione e l'aggiornamento continuo ed in tempo reale dei dati a disposizione.

Analisi statistiche e di suscettibilità sono state condotte sia a scala di area studio (con estensione di pochi Km²) sia a scala di bacino (prendendo in considerazione un areale prossimo per geometria ed estensione a quello comunale) al fine di comparare i diversi risultati ottenuti e valutare la possibilità di applicare le differenti metodologie sia su piccole aree che su aree di maggiore estensione.

Queste procedure, così come l'analisi geomorfologica e fotointerpretativa, possono essere effettuate con costi estremamente ridotti o addirittura nulli; i risultati ottenuti mostrano l'affidabilità dell'interpretazione passando da piccole aree di studio a zone più estese.

Indubbiamente la disponibilità di nuovi strumenti informatici di tipo GIS (*Geographic Information System*) consente un rapido censimento e una facile manipolazione dei dati, che possono così essere racchiusi all'interno di un *geodatabase* e trattati, in base alle diverse esigenze, con procedure di analisi spaziale. In questo modo è possibile applicare e replicare rapidamente la stessa procedura anche in aree di studio diverse da quella testata.

Le zone di studio presentate in questo lavoro di tesi sono collocate in tre diverse aree della Toscana centro-settentrionale. La scelta delle aree di studio è stata guidata dalla volontà di prendere in considerazione contesti geologico-strutturali diversi che hanno però come caratteristica comune quella di essere interessati dallo sviluppo di numerosi movimenti gravitativi, distinti per tipologia ed estensione. In particolare, si tratta delle città di Montespertoli (FI), Figline Valdarno (FI) e Corella (FI). Per ciascuna delle suddette aree è stata realizzata una carta geomorfologica in scala 1:10.000, è stato implementato un *Geodatabase*, che funge anche da inventario delle frane, e sono state prodotte le relative mappe della suscettibilità da frana, mediante uno script realizzato appositamente nel corso del presente lavoro di ricerca. Inoltre, tutte le procedure e *software* utilizzati nel presente lavoro sono disponibili *open-source* online.

Capitolo 2

2. Metodologia

Per il presente lavoro di tesi sono state analizzate nel dettaglio tre diverse aree studio che sono caratterizzate dallo sviluppo di movimenti gravitativi di varia tipologia ed estensione. La scelta delle aree di studio è stata guidata dall'intenzione di prendere in considerazione contesti geologico-strutturali diversi che hanno però come caratteristica comune quella di essere interessati dallo sviluppo di numerosi movimenti gravitativi distinti per tipologia ed estensione.

Per questo motivo è stato scelto di rivolgere l'attenzione alle situazioni e dinamiche geomorfologiche caratteristiche di un settore della Toscana centro-settentrionale. Le aree analizzate comprendono i centri abitati di: Montespertoli (FI), Figline Valdarno (FI) e Corella (FI).

In particolare, l'abitato di Montespertoli, che sorge all'interno del bacino della Valdelsa, è caratterizzato dalla presenza di depositi di ambiente continentale, di transizione e marino con assetto strutturale pseudo-orizzontale (Pascucci et al. 1999; Abbazzi et al. 2008; Benvenuti et al. 2014) che non risultano dislocati dalla presenza di lineamenti tettonici importanti.

Per quanto riguarda l'area di Figline Valdarno, collocata all'interno del Bacino del Valdarno Superiore, invece, si ha la predominanza di depositi di ambiente continentale (lacustre, fluviale e di conoide alluvionale; Merla & Abbate, 1967; Magi 1992). Tali depositi presentano un assetto strutturale prevalentemente orizzontale ma, a differenza dell'area di Montespertoli, negli affioramenti osservati durante il lavoro di campagna, si presentano poco cementati.

Nell'area di Corella, infine, affiorano depositi Oligocenici e Miocenici di ambiente marino (Bortolotti et alii, 2010) con un assetto strutturale caratterizzato da strati orientati prevalentemente verso SE con un'inclinazione che va mediamente dai 30 ai 70°. In carta Geologica (<http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/cartoteca.html>, CARG TIF - scala 1:10.000) l'assetto strutturale risulta complicato dalla presenza di lineamenti tettonici con carattere compressivo. Durante il rilevamento di campagna, lo spessore talvolta ridotto dei

banconi arenacei, ha suggerito, invece, una geometria comparabile a quella di corpi lenticolari. La presenza di movimenti gravitativi estesi, non consente di distinguere se i corpi arenacei siano delimitati da piani di taglio, simili a quelli che separano due unità tettoniche, o se il contatto avvenga mediante piani di scivolamento di ampia estensione; perciò l'assetto strutturale (relativo all'area studio di Corella) è stato interpretato come il risultato di processi di natura deposizionale.

L'obiettivo del presente lavoro è quello di analizzare le tipologie ed i meccanismi di movimenti gravitativi che si sviluppano in queste aree, evidenziandone differenze e peculiarità, in funzione della diversa composizione litologica dei terreni e del diverso assetto strutturale.

Il lavoro è stato realizzato attraverso un rilevamento di campagna volto ad individuare le principali frane e peculiarità geomorfologiche che interessano le diverse aree di studio. L'analisi geomorfologica ha consentito di distinguere e caratterizzare non solo la tipologia, ma anche lo stato di attività dei movimenti franosi investigati. In seguito, l'analisi multitemporale ha permesso, tramite l'osservazione e l'interpretazione di fotogrammi aerei di quattro anni diversi (1954, 1988, 1996 e 2013), di analizzare ed interpretare le trasformazioni del paesaggio per ciò che riguarda l'evoluzione dei movimenti franosi principali e la variazione di uso del suolo. Per ciascuna delle suddette aree è stata realizzata, dunque, una carta geomorfologica in scala 1:10.000. I dati raccolti in questa fase sono stati sintetizzati all'interno di un Geodatabase, che rappresenta l'inventario dei fenomeni franosi osservati.

In secondo luogo è stata condotta un'analisi statistica descrittiva dell'inventario al fine di caratterizzare i parametri ambientali e morfometrici predisponenti delle diverse aree di studio e valutare la relativa incisività sull'innescò dei movimenti gravitativi (mediante l'Indice di Franosità percentuale - IF%) e consentire di visualizzare la variabilità (e le eventuali differenze) dei parametri predisponenti le frane, sia all'interno di ciascuna area, sia nella sintesi di tutte le aree di studio (mediante *box plots*). I parametri predisponenti considerati in questa fase sono: litologia, uso e copertura del suolo, acclività, esposizione, elevazione e area drenata. Si è deciso di utilizzare questi parametri piuttosto che altri, sempre presenti in letteratura (es. distanza dal reticolo idrografico, dalle strade o dai lineamenti tettonici), poiché tali fattori sono comuni alle tre aree investigate e consentono di omogenizzare l'analisi nonostante le differenze di natura geologico-strutturale. Ad esempio, se si fosse considerata la distanza dai lineamenti tettonici per il territorio comunale di Corella, non sarebbe stato possibile fare lo stesso per Montespertoli o Figline, i cui abitati sorgono in aree prive di faglie e/o

sovrascorrimenti; dunque, non sarebbe stato possibile esportare la metodologia proposta ad aree di studio diverse rispetto a quelle testate.

I fattori predisponenti utilizzati nelle analisi statistiche sono, perciò, i medesimi presi in considerazione anche per le successive valutazioni sulla suscettibilità da frana, effettuate per le diverse aree di studio, con metodologie quantitative di tipo sia statistico sia deterministico-probabilistiche.

Per tutte le aree di studio è stata valutata la suscettibilità da frana partendo dall'*Information Value Method* (Van Westen, 1997), sviluppando una suddivisione omogenea delle classi di suscettibilità e realizzando un apposito codice, in linguaggio Python, in grado di velocizzare i processi di restituzione cartografica. Per la sola area studio di Montespertoli è stata valutata anche la suscettibilità da frana tramite l'approccio prevalentemente deterministico basato sull'impiego del codice *open source* "*r.slope.stability*", che ha permesso di valutare come questo approccio possa essere applicato anche in aree con estensione e assetto geologico diverso da quello per cui è stato creato.

Le fasi del lavoro sono quindi riassunte nel diagramma di flusso riportato in Fig. 2.1.

Nei paragrafi seguenti vengono descritte in dettaglio le varie fasi del lavoro, evidenziando per ciascuna i motivi che hanno condotto all'adozione di metodologie specifiche.

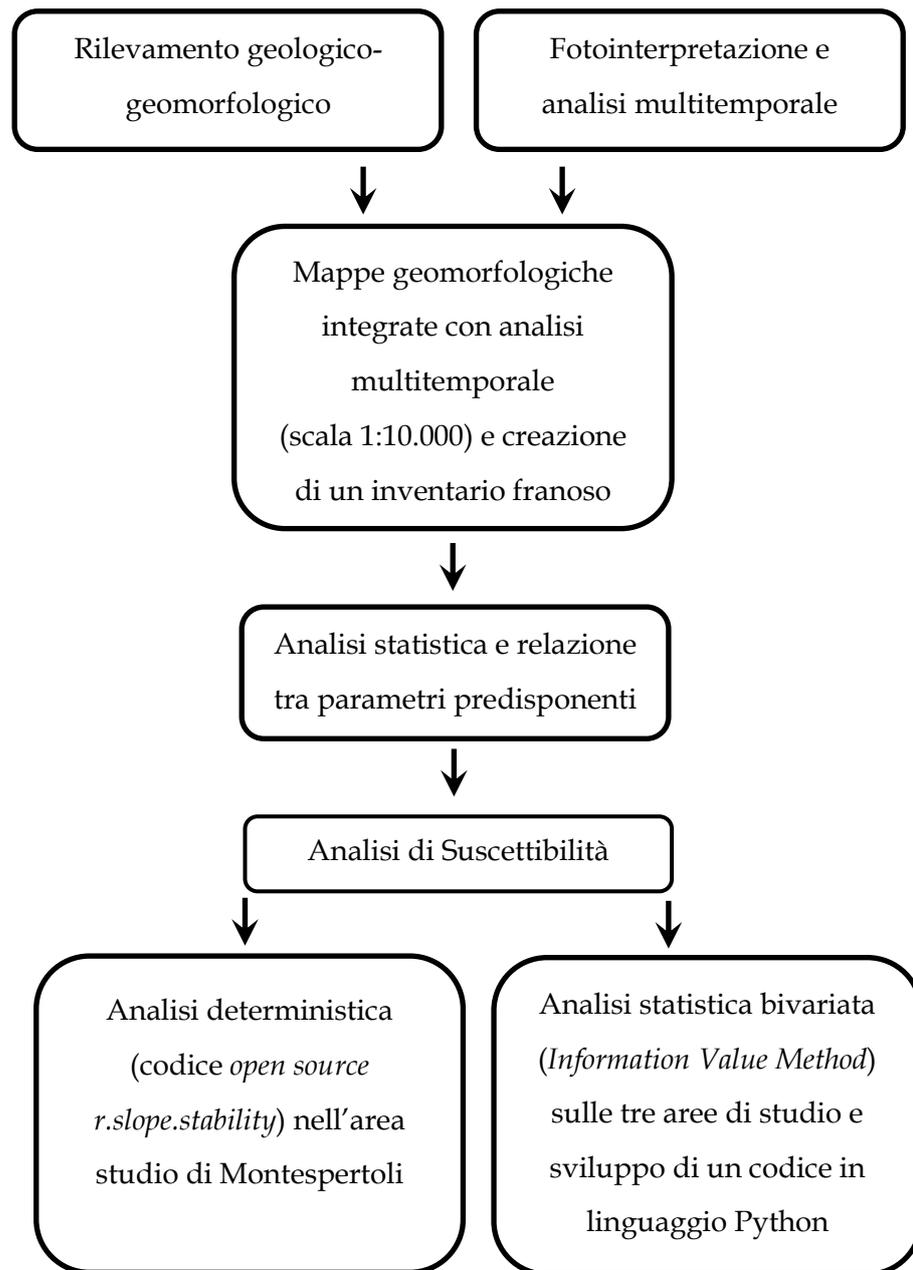


Fig. 2.1 Diagramma riassuntivo delle fasi di lavoro svolte.

2.1 Rilevamento geologico e geomorfologico, inventario delle frane e descrizione del geodatabase

La prima e più importante fase del lavoro di tesi è consistita in una campagna di rilevamento geologico e geomorfologico, portata a termine nel corso di tre anni, dal 2015 al 2017. Tale fase ha consentito di identificare le principali litologie affioranti nelle aree di studio e di caratterizzare le forme, processi e depositi di versante. Per ciascuna area si è realizzata

una nuova mappa geomorfologica, alla scala 1:10.000, che rappresenta un'integrazione e aggiornamento della cartografia pregressa esistente. Il tutto è stato eseguito seguendo i criteri riportati nelle linee guida APAT (1994), e tenendo in considerazione la nuova legenda della carta geomorfologica proposta dalla Regione Toscana (http://www.regione.toscana.it/bancadati/atti/Contenuto.xml?id=5144092&nomeFile=Decreto_n.4505_del_10-04-2017-Allegato-A).

La carta inventario delle frane utilizzata nel presente lavoro di tesi localizza geograficamente tutti i fenomeni franosi individuati durante il rilevamento di campagna nelle aree di studio e rappresenta uno strumento conoscitivo fondamentale per le successive analisi statistiche e di suscettibilità da frana, poiché consente di valutare le relazioni tra i fattori predisponenti le frane e le frane stesse.

Gli inventari sono generalmente preparati utilizzando tecniche diverse a seconda dello scopo del lavoro, dell'estensione dell'area di studio, delle scale delle mappe di base utilizzate, della qualità e del dettaglio delle informazioni accessibili e delle risorse disponibili per svolgere il lavoro (Guzzetti et al. 2000).

Nel presente elaborato di tesi, due diversi inventari sono stati utilizzati. Il primo è stato ottenuto interamente durante il rilevamento di campagna. La struttura del geodatabase, è stata ereditata, assieme ai suoi attributi, dal database Geomorfologico Regionale (scala 1:10.000) disponibile *open source* sul sito della Regione Toscana (<http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/cartoteca.html#>).

I campi presenti per ciascuna *feature* sono stati aggiornati e compilati tramite i dati ottenuti dalle analisi di fotointerpretazione condotte dalla scrivente. Questo nuovo inventario aggiornato è stato poi utilizzato per le analisi a grande scala e la produzione degli elaborati cartografici (carte geomorfologiche in scala 1:10.000) allegati al presente lavoro di tesi (Allegato A, B, C).

Il secondo inventario, utilizzato per le analisi a scala di bacino (area sub-comunale), è stato ricavato sempre a partire dal database Geomorfologico Regionale (<http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/cartoteca.html#>); in questo caso i poligoni delle frane presenti nel geodatabase sono stati parzialmente rivisti e reinterpretati alla luce delle analisi condotte per mezzo delle più recenti ortofoto disponibili (2013) e l'utilizzo di Google Earth.

Il lavoro di digitalizzazione della cartografia geomorfologica prodotta durante la fase di rilevamento di campagna è stato realizzato attraverso software specifici, ed in particolare

mediante Sistemi Informativi Geografici (GIS). Tutte le mappe cartografiche sono state prodotte attraverso l'utilizzo del *software* ArcGis 10.7 (ESRI). Tale *software* può essere utilizzato per la creazione di mappe, la compilazione e condivisione di informazioni geografiche e la gestione di banche dati, per analisi di tipo qualitativo e quantitativo di mappe.

I sistemi GIS hanno il vantaggio di consentire una semplice gestione e consultazione dei dati, così come una rapida visualizzazione degli elementi digitalizzati; inoltre consentono un aggiornamento quasi istantaneo e progressivo del database, man mano che nuove informazioni sono rese disponibili, come evidenziato anche da Fell et al. (2008).

Negli ultimi decenni la diffusione sempre maggiore della tecnologia GIS ha facilitato l'applicazione di tecniche quantitative così come lo sviluppo e l'uso di modelli statistici per la valutazione del rischio di frana (Carrara et al. 1991, Carrara et al. 1995, Carrara et al. 1999, Lee et al. 2003, Ohlmacher & Davis 2003, Süzen & Doyuran 2004, Ayalew & Yamagishi 2005).

Un'ampia varietà di fattori causali di instabilità (principalmente di natura morfologica e geologica) può essere acquisita, archiviata e analizzata in modo economico in forma digitale. In particolare, a partire da modelli digitali di elevazione, noti come DEM (*Digital Elevation Model*) è possibile generare nuovi parametri morfometrici che possono essere utilizzati come predittori di eventi franosi, anche per analisi a scala regionale (Carrara et al. 1995).

Il *geodatabase* realizzato nel presente lavoro di tesi (con sistema di riferimento Monte Mario Italy 1), la cui struttura è stata ereditata dal database Geomorfologico Regionale (scala 1:10.000), è frutto delle analisi e delle valutazioni condotte durante il lavoro di campagna dalla scrivente. Il database cartografico contiene le geometrie delle frane, e più in generale degli elementi geomorfologici, informatizzate su più livelli (*feature* puntuale, lineare, poligonale). Ciascuna *feature* è stata implementata, rispetto a quelle originarie dal database Geomorfologico Regionale, attraverso l'inserimento di ulteriori campi, utili al fine di meglio caratterizzare le peculiarità geomorfologiche degli elementi cartografati e necessarie per l'esecuzione delle successive procedure di analisi di suscettibilità. Tutti gli elementi geomorfologici individuati durante la fase di rilevamento (come forme, processi e depositi) sono stati quindi digitalizzati e attribuiti nel database alle rispettive "*features*" puntali, lineari e poligonali.

Le *features* puntuali denotano ogni tipo di informazione geologica che può essere rappresentata come un elemento puntuale come ad esempio le informazioni relativi alla giacitura degli strati, la presenza di frane non cartografabili, elementi strutturali quali faccette triangolari. Le *features* lineari identificano tutti quegli elementi che possono essere interpretati e rappresentati da delle linee, come ad esempio scarpate strutturali o di frana, trincee, fiumi,

tracce di paleoalvei. Le *features* poligonali, infine, individuano ogni elemento che può essere interpretato come un poligono come ad esempio i limiti delle formazioni geologiche, le frane, aree antropiche.

All'interno delle tabelle 2.1, 2.2 e 2.3 vengono mostrati solo gli attributi e i domini presenti all'interno di tali *features* che sono stati utilizzati durante la produzione degli elaborati cartografici.

L'attributo "Unità_lito" (Tab. 2.3), ad esempio, fa parte dei nuovi campi inseriti nel preesistente database della Regione Toscana (<http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/cartoteca.html#>), ed è stato compilato tenendo conto di una suddivisione litologica specificatamente realizzata per il presente elaborato di tesi. Le unità litologiche, infatti, sono state realizzate accorpendo all'interno della stessa unità tutti i depositi caratterizzati da litologie simili, comparabili per tessitura e granulometria, e non tiene conto, invece, dell'età o della classificazione geologica esistente adottata dalla Regione Toscana.

L'obiettivo è stato quello di unificare la classificazione litologica per le tre aree di studio, in modo tale da consentire la comparazione delle diverse zone, senza risentire delle differenze geologiche intrinseche.

Anche l'attributo "depth" (Tab. 2.3) è stato aggiunto al database con lo scopo specifico di identificare la profondità presunta della superficie di taglio delle frane mappate durante il rilevamento di campagna. Tale profondità è stata desunta attraverso considerazioni relative allo spessore della scarpata principale dei movimenti franosi; si tratta dunque di un dato ricavato durante il rilevamento di campagna e tiene conto della profondità minima presunta per ciascun movimento, dato che è stato poi utilizzato per la produzione delle mappe di suscettibilità (Capitolo 8).

Infine, riguardo all'attributo "stato" (tab.2.3), sono state prese in considerazione due diverse classificazioni: la prima, semplificata, distingue tra frane attive e quiescenti ed è stata utilizzata per le frane non oggetto di analisi multitemporale (domini 1000 e 4000 all'interno del campo stato, tab.2.3); la seconda, più complessa, consente di specificare un intervallo temporale di attività e quiescenza ed è stata implementata tramite l'analisi di ortofoto relative a diversi periodi, dagli anni '50 ad oggi (domini 1001, 1002, 4001, 4002 all'interno del campo stato, tab.2.3). Quest'ultima classificazione è stata appositamente proposta nel presente lavoro di tesi e verrà descritta con maggiore dettaglio nel paragrafo 2.2.1 (Stato di attività e proposta di una nuova classificazione).

Gli attributi sono distinti in base alla loro tipologia (campo "tipo_f") e sono classificati secondo l'agente morfogenetico responsabile del loro modellamento (campo "genesi"); esibiscono inoltre le informazioni, quando disponibili, dello stato di attività (campo "stato", fa riferimento a processi in atto, attivati recentemente, forme quiescenti, forme stabilizzate, artificialmente o naturalmente e forme relitte) e dell'anno (campo "anno", che specifica il momento in cui le informazioni su tali campi sono state acquisite o, nel caso dell'analisi multitemporale, l'anno di riferimento in cui certe evidenze sono state osservate, mappate e digitalizzate). Oltre a tipo_f, genesi, stato ed anno, tutte le entità geomorfologiche sono caratterizzate da una serie di altri campi ed attributi, che ne identificano le caratteristiche e le proprietà.

Questo rende possibile interrogare le diverse *features* secondo i principali tematismi di interesse: ad esempio forme gravitative, forme dovute alle acque correnti superficiali, etc...dando la possibilità al fruitore di visualizzare sul territorio gli attributi di interesse e le eventuali problematiche di pericolosità associate.

Nome del campo	Campo	data type	Dominio
Giaciture	direzio	Short integer	dm0_360
	inclina	Short integer	dm0_360
New_BD_Frane cartografabili	non direzio	Short integer	dm0_360
	movimento	text (50 length)	dm_movimento: c- Colamento lento_o_rapido
	stato_att	long integer	dm_stato: 1000-Attivo
	anno_acq	short integer	anno_acq
Faccette triangolari/trapezoidali di scarpata tettonica	Tipo_f	long integer	dm_tipo_f_p_lp: 5221 -faccetta triangolare/trapezoidale di scarpata tettonica
	genesi	long integer	dm_genesi: 5-forme strutturali, tettoniche, vulcaniche e ipoabissali

Tab. 2.1 Struttura del geodatabase per le features puntuali.

Dome del campo	Data type	Dominio
tipo_f	long integer	dm_tipo_f_1_lp: 5213-Orlo di scarpata di influenza litostrutturale, orlo di cuesta o hogback 1040-Trincea di frana o DGPV (trench) 1028-Orlo di scarpata di frana di colamento 1029-Orlo di scarpata di frana di scorrimento/scoscendimento 2043-Solco erosivo di ruscellamento concentrato, gully 2054-Corso d'acqua con tendenza all'approfondimento del letto (alveo in incisione) 2040-Vallecola a fondo concavo 2051-Orlo di scarpata di erosione fluviale o torrentizia attuale o subattuale 8011-Orlo di scarpata antropica
genesi	long integer	dm_genesi: 1-Forme di versante dovute alla gravità 2-Forme fluviali e di versante dovute a dilavamento 5-Forme strutturali, tettoniche, vulcaniche e ipoabissali 8-Forme antropiche
stato	long integer	1000-Attivo attualmente/in evoluzione/attuale sub attuale 2000-Antico
Anno	short integer	
bordo_poly	short integer	
Altezza	text (length 50)	

Tab. 2.2 Struttura geodatabase per le features lineari.

Nome del campo	Data type	Dominio
Unità_lito	Text (50 length)	dm_sigla_carta_GEOM: A-Depositi alluvionali EC-Depositi eluvio-colluviali ULA-Unità limoso-argillosa USL- Unità sabbioso-limosa USC- Unità sabbioso-ciottolosa UCS-Unità ciottoloso-sabbiosa UCI-Unità ciottolosa UMA-Unità Marnoso-Argillitica UAM- Unità Arenaceo-Marnoso UCM-Unità calcareo-marnosa FRN-Frane
movimento	Text (50 length)	dm_movimento: b- Scorrimento_lento_o_rapido c- Colamento_lento_o_rapido
direzio	short integer	dm0_360
stato	long integer	dm_stato:

		1000- Attivo 1001- attivo_Ilivello 1002- attivo_IIlivello 4000-Inattivo quiescente indeterminato 4001- Inattivo_quiescente_Ilivello 4002- Inattivo_quiescente_IIlivello
anno	short integer	1954 1988 1996 2014 2017
New_BD_DGPV	Text (50 length)	dm_DGPV_movimento
anno	short integer	
direzio	short integer	dm0_360
depth	short integer	

Tab. 2.3 Struttura geodatabase per le features poligonali.

2.2 Analisi multitemporale

Una volta concluso il lavoro di rilevamento geologico-geomorfologico di campagna, per ciascuna area di studio è stato eseguito un lavoro di fotointerpretazione.

Le procedure di fotointerpretazione sono state ampiamente utilizzate, già a partire dai primi anni del 900', durante la prima guerra mondiale, quando tale metodologia era applicata soprattutto a scopo militare, al fine di identificare trincee, disposizioni di artiglieria o eventuali fortificazioni. Con le successive implementazioni delle fotogrammetria aerea e l'avvento delle immagini da satellite, la fotointerpretazione ha trovato una sua utilità in svariati campi, da quelli generici per lo studio dell'ambiente e delle sue variazioni (Grignetti et al.,2004), a quelli più specifici per l'individuazione di siti inquinati e ricerche petrolifere (Bettini, 2007; Nappi, et al., 2008), fino ad essere utilizzata per l'individuazione di strutture archeologiche e antropiche sepolte attraverso l'analisi di anomalie nella copertura vegetale(Cavalli et. al., 2005).

Le immagini ottenute mediante telerilevamento sono state ampiamente utilizzate da svariati autori al fine di caratterizzare ed identificare le variazioni spaziali e temporali che avvengono in un dato territorio, ed hanno come unica pretesa quella di avere a disposizione un *dataset* di immagini appartenenti ad anni diversi, al fine di garantire un monitoraggio pressoché continuativo dei cambiamenti ambientali che avvengono in un dato intervallo temporale (Ayman & Ashraf 2009).

Non sempre tra le immagini utilizzate devono intercorrere intervalli temporali nell'ordine degli anni o decine di anni; talvolta, nel campo dei fenomeni di luminescenza e irraggiamento solare, alcuni autori hanno trattato riprese fotografiche effettuate entro intervalli temporali dell'ordine delle decine di minuti (Finotti et al. 2005).

Al fine di acquisire i dati derivanti dall'analisi multitemporale, la procedura di fotointerpretazione è stata condotta sia mediante stereoscopia, sia a monitor in ambiente GIS, consentendo in quest'ultimo caso di confrontare direttamente le immagini appartenenti a diversi periodi e di aggiornare in breve tempo i dati presenti nel geodatabase.

L'utilizzo di database GIS (*Geographical Information Systems*) compilati a partire dall'analisi comparata di mappe digitali esistenti e fotografie aeree è una procedura ampiamente utilizzata in tutto il mondo, che consente di descrivere sia le caratteristiche fisiche delle frane, sia le relazioni statistiche esistenti tra le frane e i parametri predisponenti (Dai & Lee 2002, Bourenane et al. 2015).

La sovrapposizione di immagini satellitari e/o aeree mediante software di elaborazione cartografica come ArcGIS, sono state largamente utilizzate per controllare la variazione di uso del suolo e di copertura vegetale, in contesti geologico e ambienti deposizionali profondamente diversi tra di loro (Ahmad 2012, Butt et al. 2015, Munyati 2000), che spaziano dall'erosione costiera, alle dinamiche di sedimentazione (Grignetti et al. 2004) fino alle variazioni dei processi geomorfologici (Bini et al. 2012), prendendo in considerazione, quando possibile, intervalli temporali anche di svariate decadi (Byrne et al. 1980, Yuan et al. 2005, Zoran & Anderson 2006).

Per quanto riguarda la procedura di stereoscopia, questa è una tecnica che consente di visualizzare immagini, disegni, fotografie con l'illusione della tridimensionalità, la stessa che si avrebbe con la visione binoculare del sistema visivo umano. Nella fotogrammetria stereoscopica si analizzano coppie di foto aeree; mediante un sistema di specchi è possibile fondere, in un'unica visione, due porzioni di immagini distanziate fra loro al fine di percepire la loro tridimensionalità (Fig. 2.2). Questo è possibile perché le strisciate di fotogrammi vengono scattate in sequenza, in modo che ogni fotogramma comprenda e si sovrapponga al 60% dell'area ripresa dal precedente e, per le strisciate contigue, si sovrapponga per il 20% dell'area ripresa.

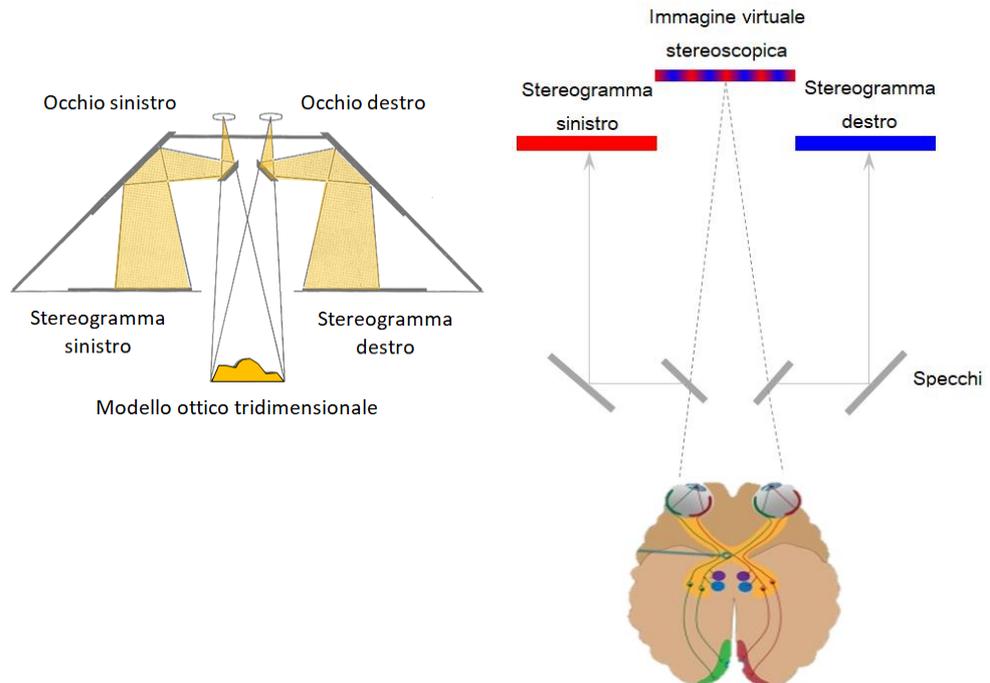


Fig. 2.2 Procedura alla base della stereoscopia.

La procedura utilizzata per la l'analisi condotta a monitor è, invece, quella della *fotointerpretazione comparata*, dunque si sono comparate ortofoto (foto aeree geo-referenziate e rettificata rispetto alla verticale) della stessa zona, riprese in quattro diversi periodi: 1954, 1988 e 1996 (immagini in bianco e nero) e quelle del 2013 (immagini a colori), caricando le immagini all'interno del Software ArcGIS 10.7 (ESRI)

L'esame sistematico delle immagini fotografiche attraverso analisi multitemporale consente di riconoscere tutte le modificazioni indotte sull'ambiente (uso del suolo, sviluppo degli insediamenti ed evoluzione dei movimenti gravitativi), con riferimento in special modo agli elementi lineari (naturale e/o artificiali) che compongono il paesaggio, come ad esempio strade, limiti di campo, filari di piante deformati.

A partire da queste evidenze è poi possibile confrontare i diversi oggetti e ipotizzare lo stato di attività dei fenomeni considerati. Ad esempio, la presenza di vegetazione, è parametro fortemente influenzato dall'uso dal suolo e dall'attività dei movimenti franosi: una fitta copertura vegetale con macchia o bosco si rinviene spesso nelle aree dove i lavori agricoli sono resi difficoltosi dalla pendenza e/o dall'attività dei movimenti franosi. Inoltre, anche le variazioni nelle tonalità di colore possono essere utilizzate come caratteri distintivi dell'analisi, per individuare ondulazioni e deformazioni del terreno o per distinguere la tipologia di copertura vegetale: toni molto scuri sono associati ad aree boschive o folta vegetazione, toni

mediamente scuri a aree a macchia o arbusti, toni gradatamente più chiari sono spesso associati a terreni a seminativo o lasciati incolti.

L'analisi multitemporale è stata realizzata solamente sui movimenti gravitativi che interessano o giungono a minacciare direttamente i margini degli abitati presi in considerazione.

È importante sottolineare come considerazioni sullo stato di attività condotte in porzioni limitate del corpo franoso sono poi state estese all'interpretazione dell'intero ammasso, ovvero evidenze di attività localizzate in aree di limitata estensione sono state generalizzate alla scala dell'intero ammasso in frana. Perciò, una frana che è stata classificata come attiva potrebbe aver manifestato sintomi di attività solamente in porzioni limitate dell'ammasso e nonostante ciò, si è deciso di classificarla come attiva nella sua interezza. Questo chiarimento è importante poiché l'intera analisi multitemporale è stata condotta con questa metodologia di interpretazione che, se da un lato tende a sovrastimare le aree effettivamente attive, dall'altro è rappresentativa delle peculiarità con cui le frane si manifestano nelle aree oggetto di analisi. Infatti, i movimenti gravitativi possono subire riattivazioni che coinvolgono non necessariamente l'intero corpo in frana originale, ma anche solo una sua porzione minore.

Tramite l'analisi multitemporale è stato possibile individuare le nicchie di distacco e gli accumuli di frana, le zone caratterizzate da contropendenze o depressioni e quelle soggette a vari tipi di erosione, i tracciati fluviali attuali, la presenza di paleo-alvei e di eventuali morfologie associate a interventi antropici, cercando di determinare quali di queste evidenze sono rimaste immutate e quali invece, hanno subito deformazioni o spostamenti apprezzabili. Gli elementi più facili da determinare, che sono costituiti da forme oggettive ben definite e univoche, sono soprattutto quelli lineari legati ad esempio al tracciato di una strada o al limite di un appezzamento, mentre altri attributi sono più sfuggenti e presentano una più elevata soggettività. Ecco perché un certo contributo soggettivo non può essere rimosso da questo tipo di analisi sebbene l'incertezza all'interpretazione tenda a diminuire con l'incremento dell'esperienza dell'analista. Infine, l'analisi multitemporale ha consentito di testare per la prima volta la classificazione dello stato di attività di frana proposta nel presente elaborato di tesi.

2.2.1 Stato di attività e proposta di una nuova classificazione

In passato alcuni autori hanno contribuito a fornire diverse classificazioni per lo stato di attività. Ad esempio, Bisci & Dramis (1991) definiscono attivi quei movimenti che possono essere modificati o attivati dagli stessi agenti che hanno generato i movimenti nel passato mentre vengono definiti inattivi quei movimenti per cui gli agenti causali non sono più presenti e/o non possono più modificare i versanti. Se si prendesse in considerazione questa definizione, la maggior parte delle frane risulterebbero attive, con importanti conseguenze per il riconoscimento del grado di pericolosità. Le definizioni proposte da Bisci & Dramis (1991) consentono di fare una distinzione tra frane attive s.s. e quiescenti, riallacciandosi a loro volta a Varnes (1978): sono considerate attive s.s. le frane che si sono mosse all'interno dell'ultimo ciclo stagionale e/o annuale, e quiescenti quelle in i cui tempi di ritorno sono più lunghi.

In questo lavoro di tesi, per le frane che non sono state analizzate mediante analisi multitemporale di ortofoto, si è utilizzata una classificazione dello stato di attività semplificata che identifica e distingue due tipologie di stato: attivo e quiescente. La Società Geologica Italiana stabilisce che una frana deve essere considerata attiva se il movimento è in corso. Le altre frane, anche se il movimento è avvenuto pochi mesi fa, devono essere considerate quiescenti e/o dormienti (WP / WLI, 1993). Tale classificazione, che distingue solamente tra frane attive e quiescenti, è stata adottata nel presente elaborato anche per le frane in cui l'analisi multitemporale non ha consentito di identificare una cronologia specifica.

La recente legenda geomorfologica proposta della Regione Toscana (http://www.regione.toscana.it/bancadati/atti/Contenuto.xml?id=5144092&nomeFile=Decreto_n.4505_del_10-04-2017-Allegato-A), prevede delle definizioni, relativamente allo stato di attività dei movimenti franosi, di poco diverse da quelle proposte nel presente elaborato, poiché tali definizioni tengono conto dei dati satellitari disponibili:

- Le frane definite come attive sono quelle che manifestano indizi di movimenti in atto o recenti. In particolare, questo stato di attività raccoglie tutti quei movimenti avvenuti (o parzialmente riattivati) negli ultimi decenni; il riferimento temporale viene attribuito mediante dati interferometrici da satellite (a disposizione dal 1992) o dalle immagini da remoto disponibili (sempre dal 1992), tenendo in considerazione le evidenze geomorfologiche, eventuali testimonianze, o studi specifici e monitoraggi effettuati nell'area in esame. Le evidenze geomorfologiche associate a queste frane sono solitamente caratterizzate da manifestazioni come rotture della superficie topografica, deformazioni della copertura vegetale e lesioni a strutture antropiche.

- Le frane attive di I° livello (o con tempo di ritorno pluriennale) sono le frane che manifestano indizi di movimenti in atto o recenti, ovvero tutti quei movimenti avvenuti (o parzialmente riattivati) negli ultimi anni, prendendo come riferimento temporale i dati interferometrici da satellite a disposizione (dal 2003) o le immagini da remoto disponibili (dal 2003). Le evidenze geomorfologiche associate a questo stato di attività sono simili a quelle viste in precedenza per le frane attive.
- Le frane attive di II° livello (o con tempo di ritorno pluridecennale), infine, sono frane il cui stato di attività non è riconducibile alle frane attive di I° livello, ma che sono comunque avvenute (o anche parzialmente riattivate) negli ultimi decenni. Il riferimento temporale utilizzato è quello relativo ai primi dati interferometrici da satellite a disposizione (dal 1992) o dalle immagini da remoto disponibili (dal 1992). In questo caso, parte delle evidenze geomorfologiche possono essere state lievemente rimodellate sia ad opera di attività antropiche che a seguito di agenti naturali.
- Per quanto riguarda le frane quiescenti, la Regione Toscana, le definisce come frane con indizi di movimento antichi, non recenti o relativamente recenti. Le morfologie relative al movimento, come ad esempio la corona di frana o possibili contropendenze e gradini, sono normalmente ancora riconoscibili anche se rimodellati ad opera di agenti naturali o antropici. L'area in frana presenta evidenze geomorfologiche o esistono testimonianze che indicano, o comunque non escludono, una possibile o potenziale riattivazione del processo nell'attuale sistema morfodinamico e morfoclimatico, ma non è possibile fare alcuna ulteriore verifica multitemporale.
- Vengono, invece, classificate come frane quiescenti di I° livello (o quiescenti relativamente recenti), quei movimenti in cui sono assenti le evidenze di rottura della superficie topografica mentre persistono le principali cause predisponenti il dissesto, con possibile riattivazione di tutta o parte della frana in seguito ad eventi scatenanti di carattere eccezionale ma ripetibili nelle attuali condizioni morfoclimatiche. Rientrano tra le quiescenti le frane avvenute o riattivate nell'arco temporale successivo alle prime immagini da remoto disponibili (dal 1950 circa). Dunque è possibile verificarne o presupporre l'attività in base ad evidenze geomorfologiche relative agli ultimi 60-70 anni.
- Le frane quiescenti di II° livello (con indizi di movimento antichi o non recenti), sono frane le cui morfologie (corona di frana, contropendenze, gradini, ecc.) sono ancora riconoscibili anche se rimodellate ed obliterate ad opera di agenti naturali o antropici. L'area in frana presenta evidenze geomorfologiche o esistono testimonianze che

indicano una possibile o potenziale riattivazione di tutta o parte della frana nell'attuale sistema morfodinamico e morfoclimatico; la copertura vegetale è continua e possono talvolta essere presenti fonti storiche. Tuttavia, mancano evidenze geomorfologiche o testimonianze di attività successive al 1950.

La nuova classificazione dello stato di attività di frana proposta nel presente elaborato di tesi consente di distinguere tra due stati di attività e due stati di quiescenza valutati non in base ai dati interferometrici da satellite a disposizione ma in funzione delle osservazioni dedotte dall'analisi sulle ortofoto. Questa nuova classificazione è dunque stata adottata per le sole frane oggetto di analisi multitemporale, ed ha consentito di individuare:

- a) Frane attive di I° livello, quando sono presenti evidenze di attività dagli anni 80' ad oggi (evidenze geomorfologiche associate a queste frane sono solitamente caratterizzate da deformazioni della copertura vegetale e irregolarità nei filari di piante, rotture della superficie topografica e lesioni a strutture antropiche).
- b) Frane attive di II° livello, quando indizi di movimento sono presenti già a partire dagli anni 50' e si osservano continuativamente fino al periodo attuale; dunque sono frane il cui stato di attività non è riconducibile alle frane attive di I° livello e in cui le evidenze geomorfologiche che sono state riconosciute nelle ortofoto del 1954 sono poi state parzialmente o totalmente rimodellate ad opera di attività antropiche e/o agenti naturali.
- c) Frane quiescenti di I° livello, quando le evidenze di movimento non sono più riconoscibili ed identificabili a partire dagli anni 80'; rientrano quindi in questa categoria le frane avvenute o riattivate nell'arco temporale compreso tra 1954 e 1988, ma per cui già a partire dal 1988 non si notano più indizi di movimento.
- d) Frane quiescenti di II° livello, quando non si osservano movimenti o evidenze di attività* a già a partire dagli anni 50'.

Con il termine "evidenze di attività" si fa riferimento a tutti quegli indizi di movimenti recenti o antichi, le cui morfologie sono riconoscibili ed identificabili anche se talvolta obliterate o rimodellate ad opera di agenti naturali o antropici.

Gli anni 50' sono stati scelti perché rappresentano i primi anni per i quali sono state realizzate foto aeree sul territorio italiano. Questo tipo di classificazione, che distingue tra anni '50 e '80 permette di fare considerazioni importanti riguardo a come siano cambiate la franosità e l'uso

del suolo del territorio italiano dal periodo successivo al 2° dopoguerra, fino allo sviluppo edilizio ed urbanistico intensivo degli anni '70-'80, permettendo poi di estendere le considerazioni fatte fino al periodo attuale.

2.3 **Analisi statistica descrittiva e suscettibilità da frana**

Terminato il processo di analisi multitemporale, si è proceduto all'analisi statistica descrittiva al fine di individuare aspetti significativi dei dati raccolti e procedere allo studio statistico delle relazioni esistenti tra fattori predisponenti le frane e le frane stesse (Koch e Link 2002, Ciotoli & Finoia 2005).

Le analisi statistiche finalizzate alle procedure di valutazione della suscettibilità da frana, prendono solitamente in considerazione svariati fattori causali, considerati predisponenti e incisivi nell'innescio dei movimenti gravitativi. Tali fattori possono essere di natura geologica, strutturale, topografica, morfologica, climatica e/o antropica (Nandi e Shakoore 2010, Piacentini et al. 2012, Pellicani et al. 2014, Bourenane et al. 2015, Meinhardt et al. 2015, Zhang et al. 2016).

Per il presente lavoro di tesi, si sono presi in considerazione un totale di 6 fattori predisponenti (litologia, uso del suolo, acclività dei versanti, esposizione, elevazione e area drenata) comuni a tutte le aree di studio, in modo tale da poter successivamente confrontare i risultati ottenuti nelle diverse zone di studio. Tali fattori, infatti, sono comuni alle tre aree investigate e consentono di omogenizzare l'analisi nonostante le differenze di natura geologico-strutturale presenti nei tre territori.

Questi parametri sono stati suddivisi in un certo numero di intervalli, consentendone la riclassificazione in classi. L'analisi statistica descrittiva ha consentito di identificare la distribuzione di tali parametri nell'area di studio e di valutarne la loro relazione con la franosità per mezzo di un Indice di Franosità percentuale (IF%) che esprime il rapporto percentuale fra l'area in frana all'interno di una certa classe e l'area totale della stessa classe (Trigila & Iadanza 2007). È stato quindi possibile fornire e rappresentare mediante *box plots* un quadro d'insieme che consente di visualizzare la variabilità (e le eventuali differenze) dei parametri predisponenti le frane, sia all'interno di ciascuna area di studio, sia nella sintesi di tutte le zone indagate.

Tale analisi, inoltre, è risultata fondamentale per le successive valutazioni di suscettibilità, poiché ha permesso di considerare la rilevanza statistica di ciascuna delle classi in cui sono stati suddivisi i fattori predisponenti.

I dati ottenuti con le precedenti fasi di lavoro (inventario delle frane, mappe dei parametri predisponenti morfometrici e ambientali) sono stati poi utilizzati all'interno di modelli previsionali basati su due diversi approcci: quello statistico bivariato e quello deterministico.

Il primo è rappresentato dal metodo del "*Information Value*", proposto in origine da Van Westen (1997) e per il quale è stato creato, come parte integrante di questo lavoro di tesi, un apposito Script di Python (Capitolo 7). Il metodo è facile da usare ma richiede una certa conoscenza dei problemi geologici per definire correttamente le classi e i pesi da attribuire ai fattori predisponenti. Un vantaggio comune ai metodi statistici bivariati rispetto ad altri più complessi (ad es. analisi fuzzy/fuzzy analysis, o reti neurali/neural network) è legato alla valutazione esplicita della relativa importanza o peso che viene attribuita alle variabili indipendenti, effettuata tramite l'assegnazione di pesi e coefficienti di correlazione (Pellicani et al. 2014). Tale metodo (*Information Value*) è facile da gestire e da applicare, anche per professionisti con poca esperienza in questo tipo di analisi, e può essere comodamente gestito ed adattato in modo affidabile a contesti geologico-strutturali diversi, in funzione dei dati a disposizione, semplicemente introducendo o eliminando i fattori predisponenti necessari.

Il secondo, invece, è costituito dal codice *open source* "*r.slope.stability*" (Mergili et al. 2014), che fornisce una stima del Fattore di Sicurezza (FoS) e della Probabilità di rottura (Pf) per l'intera area di studio (Capitolo 8). L'originale areale per la quale era stato testato tale modello (Collazzone, PG) aveva un'estensione di circa 90 km², perciò nel presente elaborato di tesi si vuole dimostrare come questo codice possa essere utilizzato in modo conveniente anche in aree di studio più piccole, mantenendo comunque un'elevata capacità predittiva.

Non va sottovalutato poi l'aspetto economico dei metodi adottati nel presente elaborato di tesi, che possono tutti essere sviluppati all'interno di software *open source* e, dunque, non richiedono di dover utilizzare programmi costosi o dispendiose risorse cartografiche e *database*, poiché la maggior parte dei tematismi necessari alle analisi possono essere ricavati a partire dai dati geologico-geomorfologici ottenuti dal lavoro di campagna e dai modelli digitali del terreno (DEM). Quest'ultimo fattore rende enormemente vantaggiosa l'applicazione di tali metodologie.

Capitolo 3

In questo capitolo si descrivono le principali caratteristiche e proprietà dei movimenti gravitativi, facendo riferimento ad alcune delle classificazioni esistenti che concorrono alla definizione della tipologia di frana. Queste definizioni si ritengono utili ai fini di una miglior comprensione dei processi gravitativi da parte di lettori che non sono necessariamente specialisti dell'argomento trattato ma che desiderano approfondire le proprie conoscenze sull'evoluzione geomorfologica delle aree oggetto di studio.

Fra le varie tipologie di frana descritte in letteratura ed elencate in maniera sintetica in questo capitolo, verrà approfondita la classificazione proposta da Varnes (1978), ripresa successivamente da Cruden e Varnes (1996) mentre nel capitolo successivo (Capitolo 4) saranno trattate nel dettaglio esclusivamente le tipologie di frana caratteristiche di ciascuna area di studio.

3. Definizione generale di frana

Le frane sono uno dei maggiori pericoli naturali che ogni anno producono ingenti danni sia in Italia che in altre parti del mondo, ed un gran numero di vittime. Le conseguenze dei fenomeni franosi in Italia sono talmente rilevanti da rappresentare un vero e proprio problema socio-economico.

Le prime definizioni del termine "frana" sono da ricondursi agli anni 50' ed in particolare a Terzaghi e Varnes. Per Terzaghi (1950) una frana è un "Rapido spostamento di una massa di roccia, terreno residuale o sedimenti, adiacenti ad un pendio, con movimento del centro di gravità della massa stessa verso il basso e verso l'esterno" mentre per Varnes (1958) si tratta di un "Movimento verso il basso e verso l'esterno di materiali (rocce e terreni naturali, materiali di riporto, o combinazioni di più materiali) formanti un pendio".

Negli anni 90' una delle migliori e più generiche definizioni del termine frana è stata data da Cruden (1991); egli definisce tale evento come “*the movement of a mass of rock, earth or debris down a slope*”, ovvero come “il movimento di una massa di roccia, terra e detrito lungo un pendio”. Tale definizione è stata definitivamente implementata e sintetizzata da Cruden & Varnes (1996), i quali descrivono una frana come un “Movimento di una massa di roccia, terreno o detriti lungo un pendio sotto l'azione della gravità”.

Le frane costituiscono un fenomeno naturale dell'evoluzione del paesaggio e sono uno dei principali agenti modellatori dei versanti. Rappresentano fenomeni di dissesto idrogeologico e di degrado ambientale che possono interessare ampie aree del territorio e costituire elementi di pericolosità e rischio per l'incolumità di strutture e infrastrutture antropiche con rischio di perdite di beni materiali e persino di vite umane.

I movimenti gravitativi si verificano comunemente come risultato di uno o più fattori, statici o dinamici: abbondanti precipitazioni, il rapido scioglimento della neve, condizioni climatiche particolarmente umide, erosione e rimozione del materiale presente ai piedi del versante, carichi di materiale nella parte superiore del pendio, terremoti, la scarsa e/o erronea gestione delle aree boschive aggiunta a drenaggi, irrigazioni e fosse settiche spesso distribuiti sul territorio in modo erroneo e poco funzionale (Rotaru et al. 2007). Terzaghi (1950) suddivide i fattori predisponenti le frane in esterni ed interni: i primi determinano generalmente un aumento della sollecitazione al taglio (variazioni geometriche del versante, aumento nel sovraccarico del pendio, variazioni del regime idrico) mentre le cause interne comportano una diminuzione della resistenza al taglio (cedimenti progressivi, azione erosiva da parte di agenti atmosferici o *weathering*). Varnes (1978), invece, sottolinea come sia più soddisfacente far riferimento a fattori causali, in modo generale, ovvero incorporando sia i “processi” che le “condizioni” che possono portare alle condizioni limite di rottura di un pendio.

I fattori che possono influenzare la stabilità di un pendio sono stati ampiamente descritti in letteratura (Dramis et al. 1995, Donati et al. 2002, Popescu 2002, Knapen et al. 2006, Borrelli et al. 2007, Wang et al. 2015) e possono dunque essere raggruppati in tre principali tipologie:

- predisponenti (ereditati dalle caratteristiche geologiche e climatiche del luogo): litologia, giacitura degli strati, acclività dei versanti, clima, precipitazioni, escursioni termiche, idrogeologia;
- preparatori (associati a eventi peculiari che possono avere ripercussioni significative sulle caratteristiche geotecniche dei terreni affioranti lungo un versante): erosione al piede del versante (fiume, mare), sovraccarico del versante, disboscamento, piovosità, erosione delle acque, variazione del contenuto d'acqua, azioni antropiche;

- scatenanti (associati a eventi che permettono di superare le soglie critiche di stabilità di un versante): abbondanti piogge, erosione fluviale, marina, carsica, terremoti, scavi e tagli artificiali.

3.1 Terminologia e caratteristiche dei movimenti franosi

La terminologia utilizzata per la caratterizzazione sintetica dei movimenti franosi, nel presente elaborato di tesi, è quella proposta da Varnes (1978) con le integrazioni per la sua applicazione in Italia proposte da Carrara et al. (1985). Gli elementi distintivi di un fenomeno franoso (Fig. 3.1) sono definiti in Tab. 3.1.

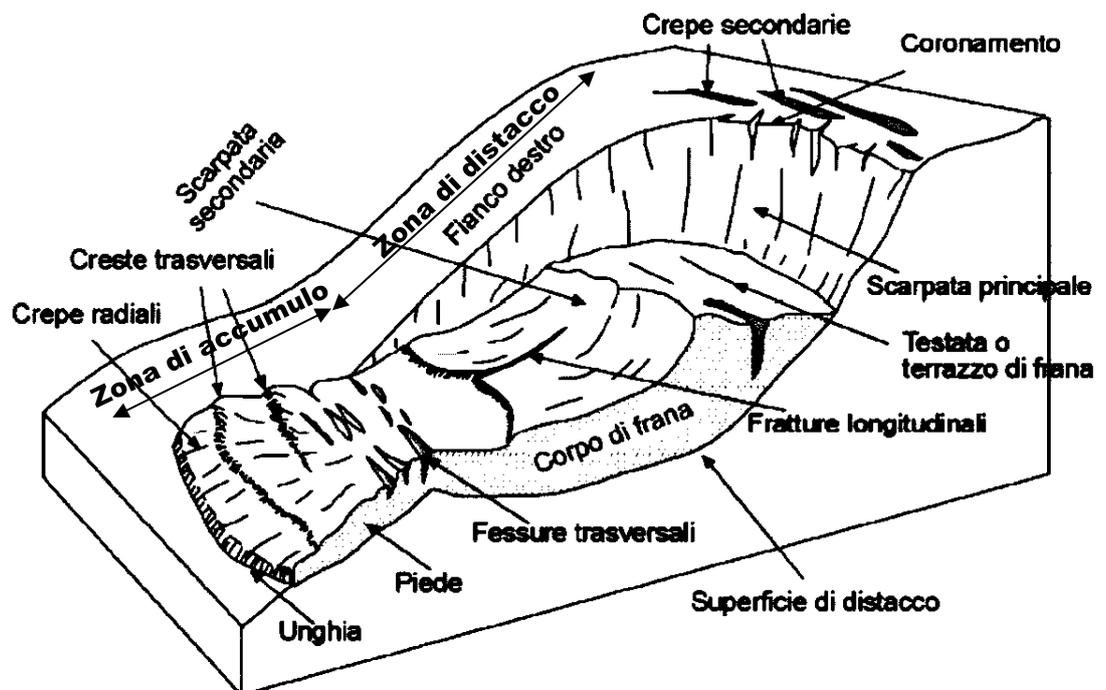


Fig. 3.1 Terminologia delle frane (da Varnes, 1978 - modificata)

ELEMENTI DISTINTIVI	DEFINIZIONE
Testata o corona	parte sommitale della scarpata principale costituita da materiale quasi indisturbato e adiacente alla parte più alta della scarpata principale
Scarpata principale	superficie più o meno ripida con un andamento planimetrico più o meno arcuato che marca l'inizio dell'area interessata dal distacco principale. La superficie di rottura è parzialmente visibile
Scarpata secondaria	superficie analoga alla precedente che si sviluppa all'interno del corpo di frana a causa di movimenti differenziali all'interno del materiale spostato
Top	il più alto punto di contatto tra il materiale spostato e la scarpata principale
Nicchia di frana	parte superiore del corpo di frana che comprende la scarpata principale e i fianchi; marca il fronte di separazione tra la massa franata e quella in posto
Corpo principale	materiale interessato dal movimento gravitativo che ricopre la superficie di rottura ed il versante originale tra la scarpata principale e l'unghia
Piede	linea che marca il passaggio tra il settore interessato da movimento all'interno della nicchia di frana e il versante originale
Unghia	il margine inferiore del corpo di frana situato a maggior distanza dalla scarpata principale
Superficie di distacco, rottura o scivolamento	superficie lungo la quale si è instaurato il movimento franoso al di sotto della superficie del terreno originale
Trincea	depressione parallela al versante, può essere posta sia ai piedi della scarpata principale che ai piedi delle scarpate secondarie
Crepe radiali	spaccature del terreno che si originano quando il corpo di frana si espande lateralmente lungo il margine inferiore della frana; possono anche svilupparsi nell'area di corona e in tal caso suddividono in numerosi prismi i blocchi fratturati

Crepe trasversali	spaccature del terreno che si originano in corrispondenza del piede a seguito di un aumento di velocità del movimento verso valle
Zona di distacco	l'area della frana in cui il materiale spostato si trova al di sotto della superficie originale del terreno
Zona di accumulo	l'area della frana in cui il materiale spostato si trova al di sopra della superficie del terreno originale
Deplezione	il volume delimitato dalla scarpata principale, dalla massa distaccata e dalla superficie del terreno originale
Massa distaccata	il volume del materiale spostato che sovrasta la superficie di rottura ma sottostante la superficie del terreno originale
Accumulo	il volume del materiale spostato che si trova al di sopra della superficie del terreno originale
Fianchi	proseguimento della scarpata principale lungo il versante a delimitare il corpo di frana nella parte mediana; in genere la scarpata che si origina in corrispondenza dei fianchi diminuisce progressivamente di altezza sino al piede della frana
Superficie originale del terreno	la superficie del pendio che esisteva prima della frana.

Tab. 3.1 Elementi distintivi delle frane.

La terminologia di frana proposta da Varnes (1978) e poi da Cruden & Varnes 1996 contiene definizioni esplicite per alcuni elementi distintivi di un fenomeno franoso (Figura 3.1). In generale, i movimenti franosi sono caratterizzati da una zona di distacco nella parte superiore, una zona centrale di movimento e una zona di accumulo nella parte inferiore. All'interno della zona di distacco la quota della superficie del terreno diminuisce come risultato della frana stessa, mentre nella zona di accumulo aumenta la quota della superficie del terreno (Cruden e Varnes, 1996). Una serie di trincee, crepe e creste radiali e trasversali possono svilupparsi all'interno del corpo franoso. Le trincee possono essere definite come una depressione parallela alla pendenza del versante e possono essere posizionate ai piedi della scarpata principale o ai piedi delle scarpate secondarie. Le fessure radiali sono fenditure nel terreno che hanno origine quando il corpo di frana si espande lateralmente, lungo il bordo inferiore della frana; tali fessure possono anche svilupparsi nell'area della corona e in questo caso dividere l'ammasso in numerosi prismi. Le fessure trasversali sono invece fratture del

terreno che hanno origine al piede della frana, a causa di un aumento della velocità del movimento verso il basso.

3.2 Dimensioni delle frane

La dimensione delle frane (figura 3.2) è stata definita dal WP / WLI (1993a) come segue:

- 1) W_d = larghezza della massa spostata. È l'ampiezza massima della massa spostata perpendicolare a L_d ;
- 2) W_r = larghezza della superficie di rottura. È la larghezza massima tra i fianchi della frana, perpendicolare a L_r ;
- 3) L = lunghezza totale. È la distanza minima dall'unghia della frana alla sua corona;
- 4) L_d = lunghezza della massa spostata. È la distanza minima dall'unghia della frana al suo top;
- 5) L_r = lunghezza della superficie di rottura. È la distanza minima dal piede alla corona;
- 6) D_d = profondità della massa spostata. È la profondità massima della massa spostata, misurata perpendicolarmente al piano contenente W_d e L_d ;
- 7) D_r = profondità della superficie di rottura. È la massima profondità della superficie di rottura al di sotto della superficie originale del terreno, misurata perpendicolarmente al piano contenente W_r e L_r .

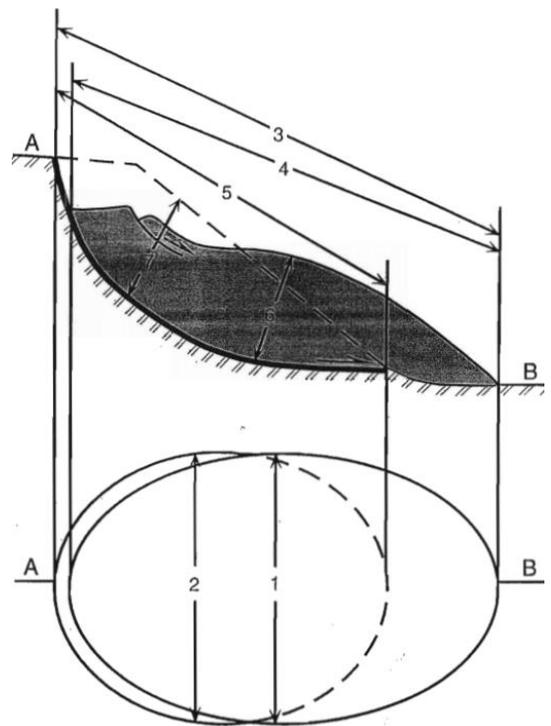


Fig. 3.2 Dimensioni delle frane (da WP/WLI 1993b)

3.3 Tipologia di movimento franoso

A causa dell'estrema variabilità delle situazioni geologiche e geomorfologiche le tipologie dei movimenti di versante sono numerose e variabili. Diversi autori hanno proposto specifiche classificazioni tra cui quelle di Varnes (1954, 1978), di Skempton e Hutchinson (1969), Hutchinson (1988) e di Cruden e Varnes (1996) sono le più note, assieme a quella più recente di Hungr et al. (2014), che rappresenta un aggiornamento di Varnes (1978).

Il Working Party of the International Geotechnical Societies ha sviluppato una serie di metodi per la definizione e classificazione delle frane, proponendo le metodologie più utili e significative per la descrizione delle frane, delle loro cause, stato di attività e del tasso di spostamento (WP/WLI 1990, 1991, 1993a, 1993b, 1994, 1995). Tra queste metodologie è presente anche la classificazione proposta per i movimenti gravitativi, sintetizzata in un glossario noto come Multilingual Landslide Glossary (WP/WLI, 1993b, Cruden & Lan, 2015), che ha ottenuto unanime consenso e non è altro che un aggiornamento delle più famose classificazioni di Varnes (1958, 1978).

Le classificazioni proposte da Varnes (1978), Hutchinson (1988), Cruden & Varnes (1996; Fig.3.3), Hungr et al. (2014) prendono in considerazione principalmente la tipologia di movimento, il tipo di materiale coinvolto e il tasso di spostamento.

Per la campagna di rilevamento geomorfologico abbiamo deciso di riferirci principalmente alla classificazione di Cruden e Varnes (1996) e in parte anche a quella di Hutchinson (1988) e Hungr et al. (2014), quest'ultimo utilizzato nei casi in cui i movimenti gravitativi cartografati presentano peculiarità molto simili a quelle rappresentate negli esempi forniti dagli autori. La classificazione di Hungr et al. (2014), infatti, prevede 32 diverse tipologie di movimenti gravitativi, contro le sole 6 tipologie fornite da Varnes (1978). Quest'ultime rappresentano una semplificazione delle effettive tipologie di movimenti gravitativi che possono verificarsi, ma sono comunque utili al fine di fornire una definizione adeguata, speditiva e generica per movimenti franosi diversi.

Le 6 tipologie proposte da Varnes (1978), discriminate in base al tipo di movimento e al materiale coinvolto (Tab.3.2), e successivamente riprese da Cruden e Varnes (1996), sono brevemente riassunte in Tab. 3.3.

TIPO DI MOVIMENTO	TIPO DI MATERIALE		
	ROCCIA	DETRITO	TERRENI FINI
Crolli (<i>Falls</i>)	Crolli in roccia	Crolli in detrito	Crolli in terra
Ribaltamenti (<i>Topples</i>)	Ribaltamento in roccia	Ribaltamento di detrito	Ribaltamento di terra
Scorrimenti (<i>Slides</i>)	Rotazionali	Scorrimento rotazionale di roccia	Scorrimento rotazionale di detrito
	Traslazionali	Scorrimento traslazionale di roccia	Scorrimento traslazionale di detrito
Espandimenti Lateralali (<i>Lateral Spreads</i>)	Espandimenti laterali di roccia	Espandimenti laterali di detrito	Espandimenti laterali di terra
Colamenti (<i>Flows</i>)	Flussi di roccia	Flussi di detrito	Flussi di terra
Frane Complesse/Composite	Combinazione di 2 o più tipi nello spazio e/o nel tempo		

Tab. 3.2 Classificazione delle frane (Varnes, 1978).

TIPOLOGIA DI MOVIMENTO	DEFINIZIONE
Crolli	Frane generate dal distacco di materiale di dimensioni variabili da una parete sotto l'azione della forza di gravità. La separazione del blocco dal materiale in posto è dovuta ad una rottura per trazione o per taglio lungo una discontinuità; il successivo moto avviene per lo più in aria. I crolli avvengono tipicamente in rocce più o meno fratturate e deformate.
Ribaltamenti	Frane che interessano prismi di roccia con strati verticali o sub-verticali e/o fratture nei pressi del versante e consistono nell'apertura progressiva di fratture che isolano un prisma e nella sua successiva rotazione intorno al baricentro del prisma sino al collasso di parte o dell'intera massa.
Scivolamenti	Movimenti dell'ammasso lungo una superficie di taglio/scivolamento che segue le debolezze interne della roccia o livelli meno competenti all'interno di una sequenza stratigrafica (scivolamenti planari) o superfici di neoformazione che tagliano gli strati rocciosi (scivolamenti rotazionali). In alcuni casi possono evolvere in colate.

Espandimenti laterali	Frane che coinvolgono blocchi di materiale molto rigido sovrastanti uno strato di materiale più deformabile. A causa di deformazioni che interessano lo strato di base, la placca di materiale rigido sovrastante si frattura e si separa in più blocchi che si allontanano lateralmente lungo piani di strato sub-orizzontali. Possono essere il risultato di processi di liquefazione o colamento (ed estrusione) che interessano il materiale più debole. Varnes 1978 distingue tra espandimenti laterali tipici di materiali rocciosi, che evolvono senza la formazione di una superficie di rottura netta e espandimenti in terreni coesivi che sovrastano materiali soggetti a liquefazione o materiali con comportamento plastico. I materiali coesivi possono anche traslare, ruotare, colare o disintegrarsi.
Colamenti	Movimenti di versante che hanno un comportamento cinematico che varia da movimenti deformativi impercettibili della massa a movimenti simili a quello di fluidi più o meno viscosi; la loro velocità può essere elevata in funzione della quantità d'acqua presente nella massa. Il limite inferiore del corpo di frana può essere una sottile superficie lungo la quale ha avuto luogo un movimento differenziale o una zona di taglio spessa. Il passaggio da scivolamento a colamento dipende dal contenuto di acqua, dalla mobilità del corpo e dall'evoluzione del movimento.
Movimenti complessi	Combinazione di uno o più tipologie di movimento che avvengono o in parti diverse della massa in frana o in stadi diversi durante lo sviluppo del movimento.

Tab. 3.3 Tipologie di movimento franoso (Varnes, 1978).

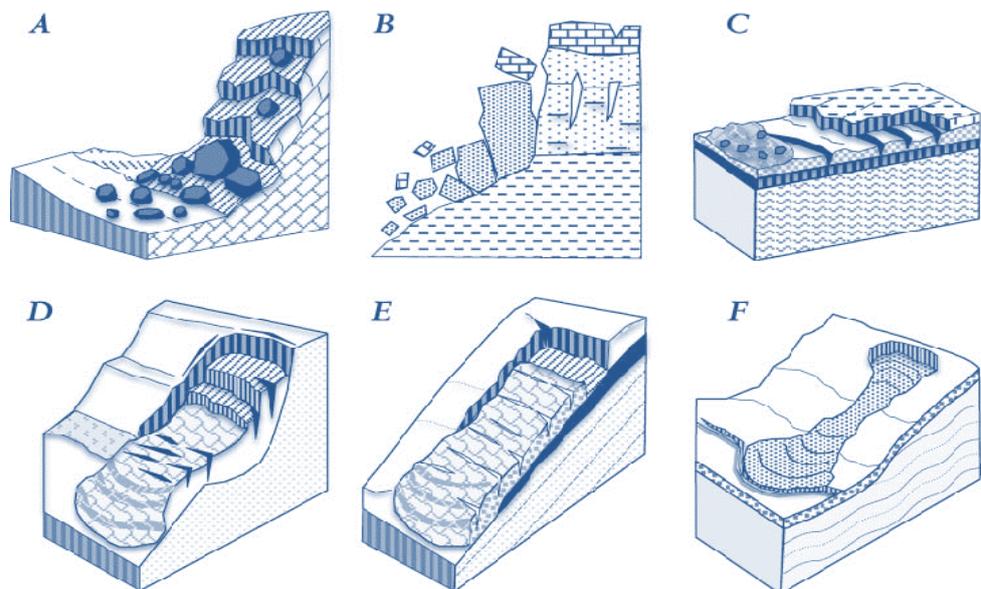


Fig. 3.3 Tipologie di movimento franoso: a) crollo in roccia, b) ribaltamento, c) espandimento laterale, d) scivolamento rotazionale, e) scivolamento traslativo, f) colamento. Modificata da Varnes (1978), Cruden e Varnes (1996), Guzzetti et al. (2015).

Per ciascuno di questi movimenti viene specificato il tipo di materiale coinvolto (Tab. 3.2) che può essere roccia (*bedrock* compatto, intatto e in posto), detrito (quando dal 20% all' 80 % dei clasti è maggiore di 2 mm e il resto è minore di 2 mm) o terra (materiale in cui l'80% o più dei clasti è inferiore a 2 mm; include una gamma di materiali che vanno dalle sabbie non plastiche all' argilla altamente plastica).

Per quanto riguarda i movimenti complessi è importante sottolineare la difficoltà nel distinguere il limite di demarcazione tra le diverse tipologie di movimento che concorrono a modellare il movimento. La transizione è spesso graduale e difficile da stabilire senza indagini geotecniche definite; sono soprattutto i movimenti quiescenti a rendere ancora più difficile questa interpretazione, poiché la forma morfologica originale tende ad essere rimodellata e degradata da anni e, talvolta, secoli di processi erosivi e/o attività antropica.

Per la cartografia geomorfologica realizzata per questo elaborato di tesi, le frane complesse sono state rappresentate mediante la tipologia di movimento prevalente e, solo nei pochi casi dove il limite di demarcazione era sufficientemente chiaro, si è provveduto a suddividere il corpo in frane nelle sue parti, distinguendone la tipologia di movimento dominante in ciascuna porzione.

Inoltre, le frane sono state classificate come “superficiali” o “profonde”, sulla base della loro profondità, nota o presunta. Tale profondità è stata desunta attraverso considerazioni relative allo spessore della scarpata principale dei movimenti franosi ricavato durante il rilevamento di campagna e tiene conto della profondità minima presunta per ciascun movimento. Solo in alcuni casi è stato possibile accedere a relazioni geologiche pregresse e utilizzare i dati relativi a prove geotecniche (prove penetrometriche e sondaggi) al fine di conoscere l'esatta ubicazione della superficie di taglio.

Per convenzione, sono state considerate “superficiali” le frane con una superficie di scivolamento posta a non oltre 5 metri di profondità, e “profonde” le frane la cui superficie di scivolamento è posta a più di 5 metri di profondità (generalmente compresa tra i 5 e 30m per le aree di Figline e Montespertoli, fino ad oltre 100m per il territorio di Corella).

3.4 Deformazioni gravitative profonde di versante

Nel corso del rilevamento di campagna, soprattutto nell'area studio di Corella, è stato possibile osservare le peculiarità geomorfologiche associate a movimenti gravitativi profondi di versante.

I primi studi sui movimenti gravitativi profondi di versante appaiono a partire dagli anni 60' quando autori come Jahn (1964), Zischinsky (1966, 1969), Beck (1968), Nemčok e Pasek (1969) iniziano a descrivere fenomeni gravitativi che coinvolgono per intero i versanti, descrivendone dettagliatamente le morfologie e caratteristiche principali quali: creste doppie, controscarpate, apertura e persistenza dei giunti, trincee, gradini e rigonfiamenti. Negli anni 70' e 80' sempre più scienziati rivolgono la loro attenzione a questi movimenti (Nemčok 1972, Radbruch-Hall et al. 1976, Mahr 1977, Radbruch-Hall 1977, Sorriso-Valvo 1979, Bovis 1982, Dramis 1984, Savage and Varnes 1987, Hutchinson 1988) così che è possibile iniziare a riconoscerne e classificarne le diverse tipologie. In funzione dei diversi autori è possibile distinguere:

- Insaccamenti (i *Sackung* di Zischinsky 1966, 1969), tipici di rocce scistose, sono anche detti *rock-flow*;
- sagging (Hutchinson, 1988), i quali rappresentano movimenti incipienti, che possono interessare anche interi versanti e nei quali la superficie di taglio basale può non essersi ancora sviluppata.
- Espandimenti laterali in cresta (*Lateral spread of ridges* di Jahn 1964, Varnes 1978 o i *sagging* di Hutchinson, 1988), si verificano quando delle litologie competenti sovrastano materiali plastici;
- Espandimenti laterali dei fronti di sovrascorrimento (Sorriso Valvo 1988), detti anche *block slide*, caratterizzati da superfici di scivolamento impostatesi ad esempio su fratture preesistenti.

Dramis e SorrisoValvo (1995) riportano una serie di casi studio al fine di illustrare quali sono le condizioni necessarie che possono favorire lo sviluppo delle suddette tipologie di DGPV.

Secondo questi autori i *sackung* consistono in un lento colamento per *creep* che si instaura su litologie fratturate in versanti ripidi (Zischinsky 1966, 1969). Cruden e Varnes (1996) includono questo tipo di movimenti nei colamenti di roccia (*bedrock flows*). Elementi che favoriscono la

formazione di un *sackung* sono la presenza di una tettonica attiva con il costante sollevamento dei rilievi e un'intensa e pervasiva fratturazione della roccia. Queste caratteristiche sono tipiche di aree che hanno subito sollevamenti crostali recenti o che sono state recentemente interessate da deglaciazione; perciò sono soprattutto i bacini intermontani ad essere coinvolti in questo tipo di deformazioni. Secondo Dramis e Sorriso-Valvo (1995) la superficie di rottura basale viene a crearsi nello stadio finale di sviluppo di un *sackung*, quando l'intera massa è ormai prossima alla rottura. Le morfologie associate a questo tipo di movimento sono principalmente strutture simili a *graben*, che si dispongono parallelamente alla direzione della cresta ma si riconoscono anche contro-scarpate e trincee. Tuttavia, se il materiale coinvolto nella deformazione è duttile, le trincee possono non formarsi. Infine, considerando il tasso di movimento, non sempre il movimento mostra un comportamento continuo e costante; talvolta le deformazioni avvengono in modo repentino, provocando spostamenti nell'ordine di metri ed esaurendosi nell'arco di pochi secondi.

Gli sdoppiamenti in cresta e gli espandimenti laterali sono fenomeni caratteristici di aree alpine di alta quota e sono caratterizzati dalla mancanza di una superficie di scivolamento basale netta. L'origine è incerta e potrebbe essere dovuta sia alla deglaciazione, sia alla rapida erosione fluviale, sia all'apertura di giunti all'interno di anticlinali formate da materiale coerente.

Per quanto riguarda gli espandimenti laterale del fronte di un sovrascorrimento in Italia gli studi di Sorriso-Valvo (1988) mostrano come da una deformazione dovuta inizialmente a ragioni tettoniche si passi ad un movimento controllato prevalentemente dalla gravità. Evidenze di questo comportamento sono visibili soprattutto nelle formazioni calcaree poiché queste rocce, per via della loro competenza, conservano a lungo le tracce delle deformazioni subite. In generale si assiste ad una transizione tra la fase iniziale, in cui agisce prevalentemente lo stress compressivo prodotto dalla tettonica, la fase intermedia, di espandimento e apertura, dove domina ancora la tettonica, e la fase avanzata, in cui la gravità diventa il motore di controllo principale delle DGPV.

Un numero crescente di DGPV è stato riconosciuto e descritto sia nei settori Appenninici che in quelli Alpini dopo gli anni 80' (Dramis et al. 1983, Agnesi et al. 1984, Forcella 1984, Coltorti et al. 1984, Cavallin et al. 1987, Dramis e Sorriso-Valvo 1995, Crosta 1997, Agliardi et al. 2001, Bentivenga et al. 2004, Coltorti et al. 2009, Pieruccini & Coltorti 2010, Gori et al. 2014).

Le peculiarità associate alle DGPV, che agevolano il riconoscimento di questi fenomeni, sono state descritte da molti autori (Fig.3.4). Le deformazioni gravitative profonde possono essere interpretate come grandi frane allo stadio embrionale (Hutchinson, 1988); secondo

Dramis & Sorriso-Valvo (1994) e Sorriso-Valvo (1995) manca di solito un piano di taglio netto alla base del movimento, il volume del materiale coinvolto è molto elevato e nell'ordine di centinaia di migliaia di m³ e lo spostamento totale dell'intera massa è molto piccolo se paragonato alle dimensioni del movimento. A questo vanno chiaramente aggiunte tutte le caratteristiche summenzionate riguardo allo sdoppiamento delle creste, scarpate e controscarpate, trincee, fratture beanti etc...

Riguardo alle cause scatenanti delle DGPV, molti autori, tra cui Agliardi et al. (2001) e Crosta et al (2013), ricercano le cause scatenanti di questi movimenti nello scioglimento dei ghiacciai e nel relativo rilascio tensionale indotto dalla rimozione del carico glaciale soprastante. Perciò non stupisce che le aree più colpite dalle DGPV siano proprio quelle che hanno sperimentato la presenza di una coltre glaciale durante l'ultima glaciazione (Würm, Pleistocene superiore).

La progressiva conoscenza acquisita in tempi recenti sia sui movimenti presenti sulla penisola italiana (Capitani et al. 2013, Di Maggio et al. 2014) sia in altre parti del mondo, rivela come questo tipo di movimenti possa interessare anche aree che non hanno mai sperimentato la glaciazione Pleistocenica (Němčok 1972, Coltorti et al. 1982, Sorriso-Valvo et al. 1999, Pieruccini & Coltorti 2011, Gori et al. 2014).

Sebbene il fenomeno della deglaciazione sia reputato il più rilevante, anche altre cause vengono citate tra i possibili fattori scatenanti delle DGPV come ad esempio: l'attività tettonica, legata al sollevamento recente di alcune catene montuose (Cotecchia & Melidoro, 1974), il rilascio tensionale dei fianchi vallivi provocato dall'approfondimento vallivo (Zischinsky, 1966) e, infine, lo scuotimento del suolo indotto dai terremoti (Gori et al. 2014).

Anche se alcune DGPV possono evolvere con dinamiche repentine, di solito sono caratterizzate da deformazioni lente con tassi di movimento nell'ordine del mm/anno come osservato da Agliardi et al. (2001) nei settori alpini e prealpini. Cruden & Lan (2014) interpretano e paragonano le deformazioni indotte dalle DGPV a quelle di un *creep* con tassi di movimento da lenti a molto lenti. Malgrado ciò, l'evoluzione di questi movimenti, seppur lenta, può causare danni ingenti a edifici e superfici stradali.

Una grande varietà di litologie può essere interessata da DGPV ma nei settori appenninici sono specialmente le formazioni marnoso-arenacee ad esserne maggiormente coinvolte (Assefa et al. 2015).

Alla luce di quanto detto in precedenza, per quando concerne le DGPV individuate durante il presente lavoro di tesi (area studio di Corella), la maggior parte è classificabile come movimenti di tipo *sagging* (Hutchinson, 1988): si tratta quindi di movimenti ad ampia scala

ancora allo stato embrionale, nei quali la superficie di scivolamento basale non si è del tutto delineata; prove di deformazioni fragili occorse nella parte sommitale del versante sono rappresentate da trincee, contro-scarpate e contropendenze, mentre i settori terminali del pendio sono solitamente interessati da rigonfiamenti e dominati da deformazioni di tipo duttile.

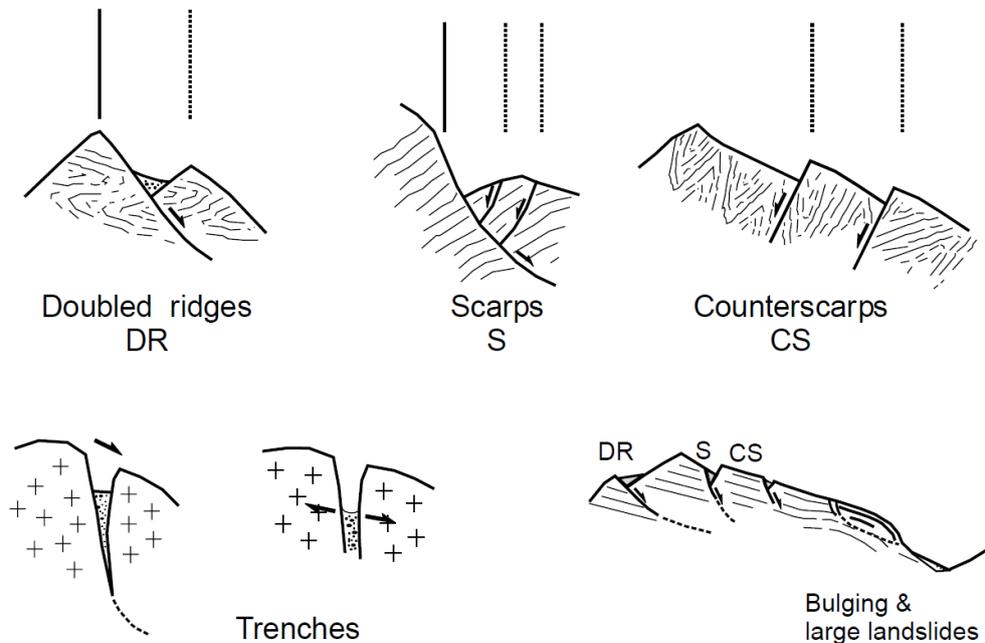


Fig. 3.4 Morfo-strutture tipiche di una DGPV (da Agliardi et al. 2001).

3.5 Terminologia relativa all'attività di una frana

Definire una terminologia univoca che consenta di determinare con esattezza lo stato di attività di un movimento gravitativo è un passo fondamentale, soprattutto durante il rilevamento di campagna, poichè consente di descrivere in modo corretto l'evoluzione di una frana.

Varnes (1978) identifica un lessico atto a descrivere l'età e lo stato di attività, raggruppando tali termini sotto tre voci principali:

1. **Stato di attività**, che descrive tutto ciò che è noto riguardo ai tempi del movimento;
2. **Distribuzione di Attività**, che descrive a grandi linee come e in quale direzione il movimento si muove;
3. **Stile di Attività**, che indica il modo in cui i diversi movimenti contribuiscono alla frana.

Queste stesse definizioni sono poi state riprese e migliorate dal Working Party of the International Geotechnical Societies, come esposto nei paragrafi seguenti.

3.5.1 Stato di Attività

Molte sono le descrizioni fornite riguardo allo stato di attività e una delle migliori è quella definita dalla classificazione del WP/WLI (1993a). In totale vengono descritti otto diversi stati di attività (Fig. 3.5), in parte ripresi da Varnes (1978):

1. Attiva (*Active*), frana “attualmente in movimento” (Varnes, 1978);
2. Sospesa (*Suspended*), frane che non si muovono al momento ma si sono spostate nell’ultimo ciclo stagionale;
3. Riattivata (*Reactivated*), quando una frana torna ad essere attiva dopo essere stata inattiva per un certo periodo;
4. Inattiva (*Inactive*), frane per le quali non ci sono indizi di movimento nell’ultimo ciclo stagionale. A loro volta tali frane possono essere suddivise in:

- 5) Dormiente/Quiescente

(Dormant), se la causa che ha generato il movimento è ancora presente e il movimento può essere riattivato;

- 6) Naturalmente stabilizzata (*abandoned*), se non può più essere influenzata dalle cause originarie, ovvero, le cause del movimento sono state naturalmente rimosse (es. il fiume che aveva eroso la frana al piede per molto tempo adesso ha cambiato il suo tracciato);

- 7) Artificialmente stabilizzata (*stabilized*), se è stata stabilizzata da opere artificiali;

8. Relitta (*relict*), se la frana si è sviluppata in condizioni geomorfologiche o climatiche considerevolmente diverse da quelle attuali.

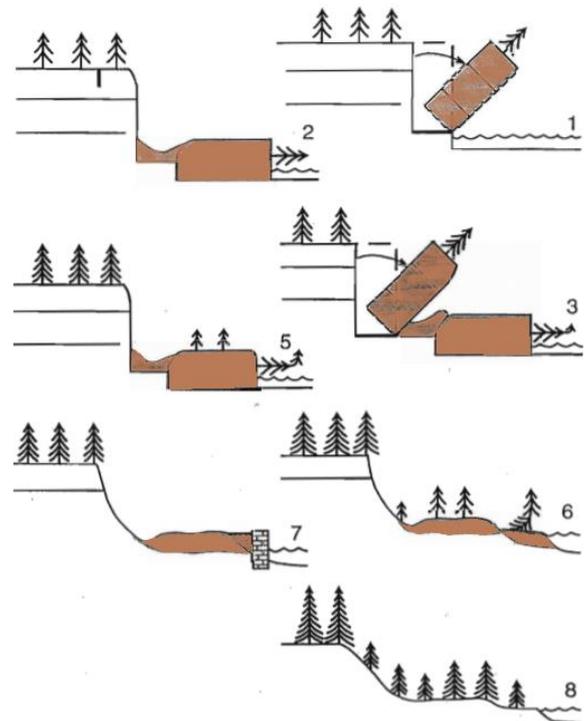


Fig. 3.5 Sezioni che mostrano diversi stati di attività di una frana per ribaltamento (da WP/WLI 1993b, modificata)

Nel presente lavoro di tesi si è applicata una classificazione che consente di distinguere, per le frane oggetto di analisi multitemporale, tra due stati di attività e due stati di quiescenza. Vengono così individuate frane attive di primo e di secondo livello, frane quiescenti di primo e di secondo livello (Capitolo 2, Paragrafo 2.2.1). Per quanto riguarda, invece, le frane cartografate che non sono state investigate mediante analisi multitemporale, si è scelto di considerare attive le frane nelle quali si sono rilevati indizi di movimento relativi all'ultimo ciclo stagionale, e quiescenti le frane in cui non si notano evidenze di movimento recenti ma sono ancora presenti condizioni morfologiche e climatiche tali da poter riattivare il fenomeno.

3.5.2 Distribuzione di attività

La WP/WLI (1993a) descrive anche la distribuzione delle tipologie di attività (Fig. 3.6); in particolare specifica la direzione di movimento e permette di prevedere l'evoluzione, nello spazio, della frana. Sette sono i casi che si possono avere:

1. frana in **avanzamento** (*advancing*), se la superficie di rottura si estende nella direzione del movimento, andando a coinvolgere aree sempre maggiori verso valle;
2. frana **retrogressiva** (*retrogressive*), se la superficie di rottura si sposta nella direzione opposta al senso del movimento, tendendo a coinvolgere aree sempre maggiori verso monte e spostando la corona di frana;
3. frana in **allargamento** (*enlarging*), se la superficie di rottura si sviluppa in più direzioni;
4. frana in **diminuzione** (*diminishing*), se il materiale spostato diminuisce nel tempo;
5. frana **confinata** (*confined*), se è presente una scarpata ma non è visibile la superficie di scorrimento al piede della massa franata e si possono osservare solo deformazioni;

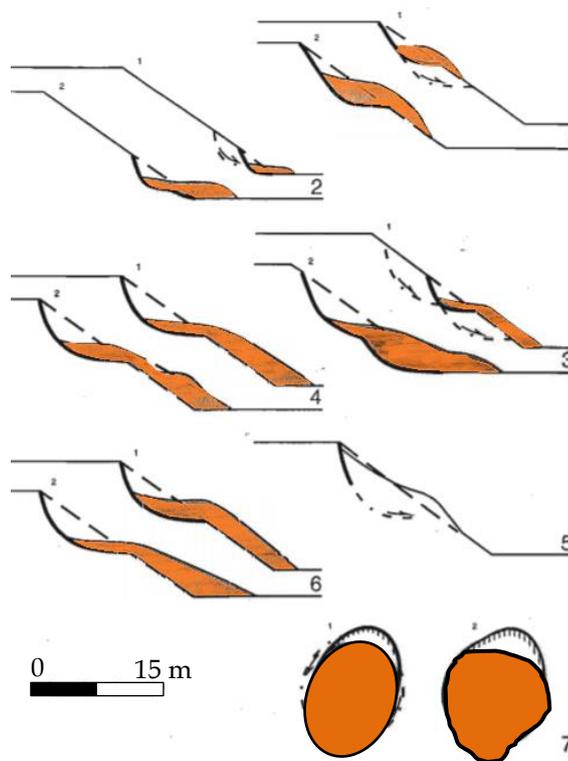


Fig. 3.6 Sezioni di frana che mostrano le diverse distribuzioni di attività (da WP/WLI 1993b modificata)

6. frana **costante** (*moving*), se il materiale spostato continua a muoversi senza variazioni apprezzabili del volume di materiale coinvolto e della superficie di rottura, il movimento avviene con gradualità e costantemente nel tempo;
7. frana in **allargamento** (*widening*), se la superficie di rottura aumenta su uno o su entrambi i lati di una frana.

3.5.3 Stile di attività

Lo stile di attività serve a definire come i diversi tipi di movimento possono contribuire al fenomeno franoso. Le seguenti definizioni (Fig. 3.7) sono basate sull' "International Glossary of Landslides" (WP / WLI, 1993b) e sulla classificazione di Cruden e Varnes (1996):

1. **Complesso** (*complex*), quando due o più tipi di movimento avvengono in sequenza temporale;
2. **Composita** (*composite*), fenomeno in cui due o più tipi di movimento avvengono in parti diverse della frana, a volte contemporaneamente; solitamente il primo movimento è situato ad una quota più elevata;
3. **Successiva** (*successive*), quando si verificano movimenti successivi dello stesso tipo ed i materiali coinvolti e le superfici di rottura rimangono distinti;
4. **Singola** (*single*), se esiste un solo movimento;
5. **Multiplo** (*multiple*), se lo stesso tipo di movimento si ripete per più volte, coinvolgendo masse già dislocate in precedenza.

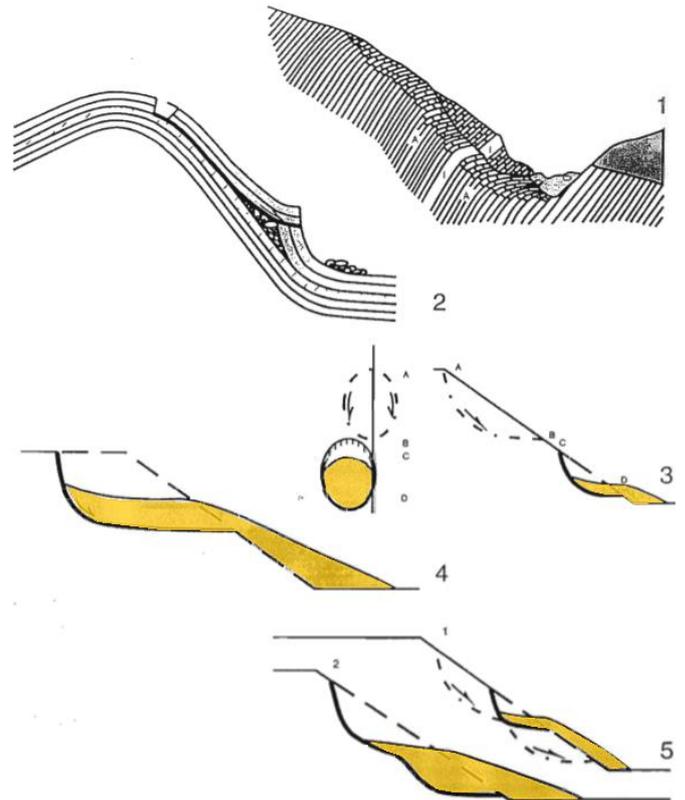


Fig. 3.7 Sezioni di frana che mostrano i diversi stili di attività (da WP/WLI 1993b, modificato)

Una precisazione va fatta riguardo ai movimenti compositi individuati durante la fase di rilevamento geomorfologico. Le frane composite che hanno origine in parti diverse del

versante e che sul fondovalle tendono ad unirsi in un unico corpo sono state descritte con la terminologia “coalescente”. In particolare, “coalescenti” sono risultati quei movimenti che hanno scarpate diverse ma che condividono la parte terminale del corpo di frana, solitamente interpretata come un colamento di roccia o di terra.

3.6 Tasso di movimento

Cruden e Varnes (1996) propongono una tabella in grado di definire la velocità di una frana indicando, in particolare, la massima velocità attesa a seguito dell’innesco della frana (Fig. 3.8). Tale velocità aumenta secondo multipli di 100 e ricopre 10 ordini di grandezza diversi. Gli autori, inoltre, definiscono il danno potenziale per ciascuna delle sette classi di velocità individuate.

L’intervallo identificato va da frane estremamente rapide, in cui la velocità tipica è di 5m/sec, superiore a quella di una persona che corre, a frane estremamente lente, la cui velocità è di 15 mm/anno, rilevabile generalmente solo attraverso una strumentazione sensibile ai piccoli spostamenti (ad esempio tramite DInSAR - Interferometria Differenziale Radar ad Apertura Sintetica).

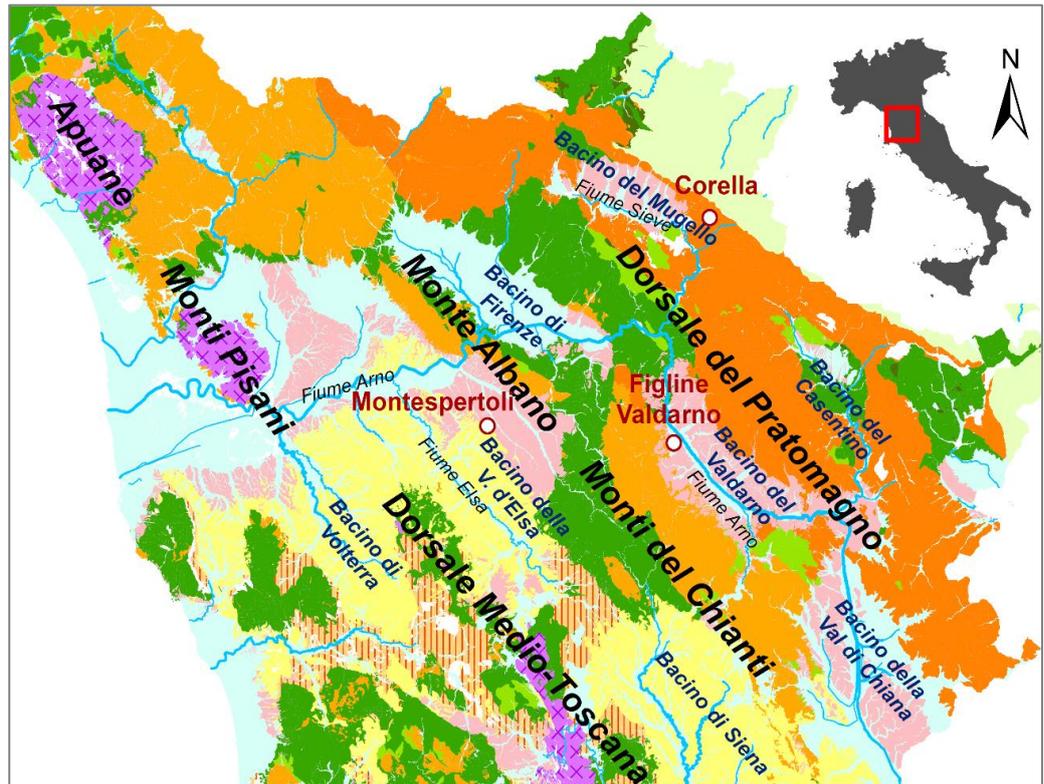
Velocity Class	Description	Velocity (mm/sec)	Typical Velocity	Probable Destructive Significance
7	Extremely Rapid	5×10^3	5 m/sec	Catastrophe of major violence; buildings destroyed by impact of displaced material; many deaths; escape unlikely
6	Very Rapid	5×10^1	3 m/min	Some lives lost; velocity too great to permit all persons to escape
5	Rapid	5×10^{-1}	1.8 m/hr	Escape evacuation possible; structures, possessions, and equipment destroyed
4	Moderate	5×10^{-3}	13 m/month	Some temporary and insensitive structures can be temporarily maintained
3	Slow	5×10^{-5}	1.6 m/year	Remedial construction can be undertaken during movement; insensitive structures can be maintained with frequent maintenance work if total movement is not large during a particular acceleration phase
2	Very Slow	5×10^{-7}	15 mm/year	Some permanent structures undamaged by movement
	Extremely SLOW			Imperceptible without instruments; construction POSSIBLE WITH PRECAUTIONS

Fig. 3.8 Classificazione della velocità di frana e il corrispondente danno potenziale (da Cruden e Varnes 1996).

Capitolo 4

4 Aree di studio

Nel presente capitolo vengono descritte le peculiarità geologico-geomorfologiche di tre diverse aree di studio (Fig.4): Montespertoli (FI), Figline Valdarno (FI) e Corella (FI). Inoltre, sono descritti i caratteri salienti associati alle diverse tipologie di frane rilevate e vengono riportate nel dettaglio le analisi multitemporali relative ai movimenti ritenuti più significativi ed interessanti ai fini della caratterizzazione di ciascun territorio. La scelta delle aree di studio è stata guidata dalla volontà di prendere in considerazione contesti geologico-strutturali diversi che hanno però come caratteristica comune quella di essere interessati dallo sviluppo di numerosi movimenti gravitativi, distinti per tipologia ed estensione.



Legenda

- Depositi alluvionali (Pleistocene Sup. - Olocene)
- Depositi continentali (Pliocene Inf. - Pleistocene Inf.)
- Depositi marini (Pliocene Inf. - Pleistocene Inf.)
- Depositi fluvio-lacustri (Tortoniano-Messiniano)
- Successione Epiligure
- Dominio Ligure
- Dominio sub-Ligure

0 12,5 25 50 Km

Dominio Toscano:

- Unità di M. Cervarola
- Falda Toscana
- Successione Toscana Metamorfica
- Dominio Umbro-Marchigiano

Fig. 4 Schema geologico della Toscana centro-settentrionale.

4.1 Montespertoli

4.1.1 Inquadramento geologico

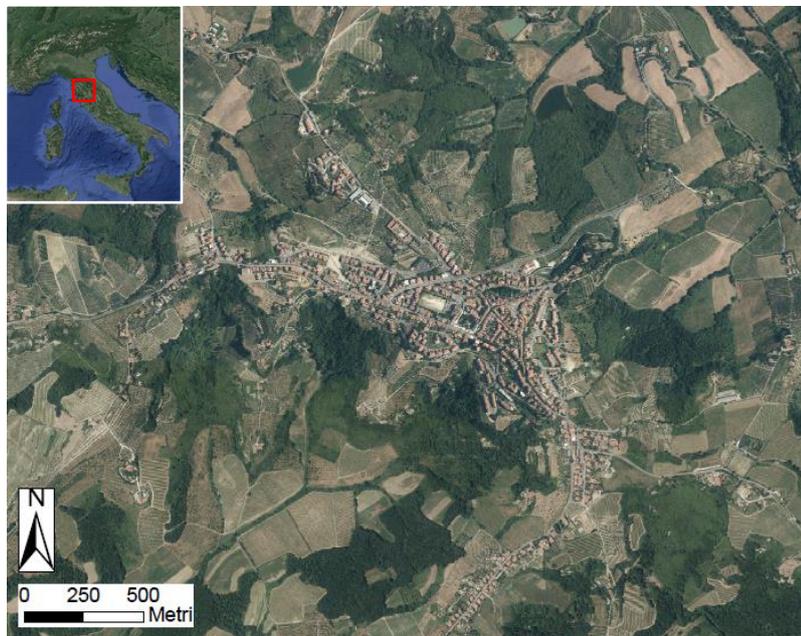


Fig 4.1 Inquadramento geografico di Montespertoli.

Montespertoli (Firenze) è una piccola cittadina di origine medievale ubicata nella Toscana centro occidentale (Fig. 4.1), all'interno del Bacino della Valdelsa. L'area ricade all'interno del foglio 275 (Carta geologica d'Italia, scala 1:50.000), nelle sezioni in scala 1:10.000 n° 275090, 275100, 275130 and 275140. Teorie contrastanti sono state proposte per l'origine di tale bacino, così come per altri bacini neogenico-quadernari. Molti autori hanno infatti interpretato questo bacino come un bacino post collisionale legato alla tettonica distensiva successiva alla compressione terziaria responsabile dell'orogenesi appenninica. Altri autori, in tempi più recenti sostengono che si tratta di bacini "perched" di "piggyback" o "satelliti" sviluppatasi sul retro di fronti di accavallamento e dunque con un'evoluzione tettonico-sedimentaria guidata da forze di tipo compressivo (Boccaletti et al., 2004; Bernini et al., 1994). Ulteriori autori interpretano questi bacini come bacini sinformi, legati alla formazione di ampie pieghe sinclinali e anticlinali con attività sinsedimentaria (Coltorti e Pieruccini, 1997; Coltorti et. al., 2012; Calamita et al., 1999) o "bowl shaped" (Pascucci et al., 1999), confermando una geometria analoga a quella che si sviluppa in regimi compressivi ma evolutesi al di sopra di faglie a basso angolo profonde, veri e propri detachment.

Il bacino della Valdelsa (Fig. 4.2) ha un'età compresa tra il Terziario Inferiore e il Quaternario Superiore (Pascucci et al. 1999; Coltorti et al. 2012) e si sviluppa in direzione NW-SE per una lunghezza di ca 60 km e una larghezza di ca 25km. Il bacino è bordato a NE dalla dorsale Monte Albano-Monti del Chianti (Dorsale Toscana Esterna) e dai Monti Pisani a SO (Dorsale Medio-Toscana; Abbazzi et al. 2008; Benvenuti et al. 2014). Tali dorsali sono caratterizzate dall'affioramento di Unità tettono-sedimentarie di età pre Miocenica; nel dettaglio, dall'alto in basso si hanno: 1) Unità Liguri e Sub Liguri; 2) Unità Non Metamorfica Toscana; 3) Unità Metamorfiche Toscane (Carmignani et al. 2004, 2013).

Il bacino è riempito da oltre 2000 m di sedimenti e marino-costieri del Miocene Superiore-Pleistocene Inferiore (Pascucci et al. 1999; Abbazzi et al. 2008; Benvenuti et al. 2014). Recenti studi stratigrafico-fisici ad alta risoluzione hanno permesso di ricostruire in maggior dettaglio l'evoluzione del bacino durante il Pliocene (Benvenuti & Dominici, 1992; Dominici, 1994; Benvenuti e Degli Innocenti, 2001; Benvenuti et al., 2007). In questi studi i depositi pliocenici sono stati suddivisi in varie litofacies, a loro volta raggruppate in sintemi (ISSC, 1994), sulla base di discordanze riconoscibili e tracciabili su ampi tratti del bacino. Nei sintemi le litofacies delineano architetture stratigrafico-deposizionali cicliche di diverso rango gerarchico. L'alternanza frequente tra litofacies grossolane e pelitiche individua, infatti, ciclicità sedimentarie di rango inferiore che riflettono la natura composita della dinamica deposizionale legate sia a variazioni laterali dei punti di immissione dei sedimenti sia a variazioni glacio-eustatiche. L'origine delle superfici di *unconformity* nel settore costiero che giunge sul bordo della scarpata continentale è in larga parte da riferire all'erosione associata alle trasgressioni marine mentre nei settori emersi le discontinuità sono legate a processi di incisione fluviale avvenuti per la brusca diminuzione del carico solido in genere alla fine di un periodo glaciale/inizio di un interglaciale. La porzione centro occidentale del bacino della Valdelsa è quella più nota ed è stata da lungo tempo descritta come una successione trasgressiva-regressiva (Dainelli & Videssot 1930, Bossio et al. 1993b, Dominici et al. 1995). Secondo tali autori essa consisterebbe nella parte basale in sabbie di origine fluvio-deltizia e in argille siltose di piattaforma interna meglio note come "Argille Azzurre" (trasgressione) e in un'alternanza di limi e sabbie di mare poco profondo e di ambiente paralico (regressione). La porzione orientale del bacino è invece meno nota ed è costituita prevalentemente da depositi sabbioso-ghiaiosi di ambiente fluvio-deltizio (Ciottolami di S. Casciano, Canuti et al. 1966), questi depositi grossolani si sarebbero accumulati in corrispondenza di due delta che sfociavano all'interno di un bacino poco profondo dove contemporaneamente si stavano depositando le unità quaternarie della sequenza al di sopra della Argille Azzurre.

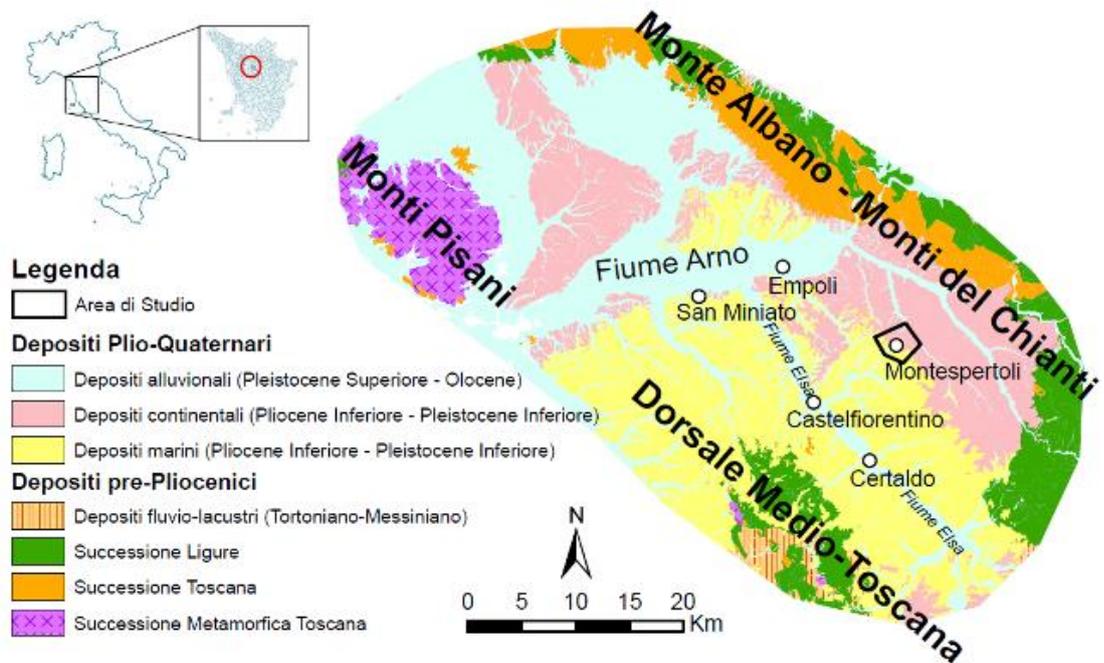


Fig 4.2 Localizzazione dell'area di studio. Schema geologico semplificato del bacino della Valdelsa.

I sedimenti plio-pleistocenici che compongono il substrato dell'area di studio di Montespertoli sono caratterizzati da un assetto strutturale orizzontale e/o blandamente inclinato, con inclinazioni massime nell'ordine dei 5°. Tali depositi sono stati suddivisi in sistemi sulla base di discontinuità stratigrafiche. Dalla sommità alla base troviamo:

- **Sintema di San Casciano (SC):** ciottolami, sabbie e peliti alluvionali affioranti al tetto della successione pliocenica nei settori centro-orientali del bacino. Non vi sono elementi per una precisa calibrazione cronologica che viene tentativamente collocata nel Gelasiano (Pleistocene inferiore).
- **Sintema di San Miniato (SM):** ciottolami, sabbie e peliti fluviali che dal settore NE passano verso SO a sabbie e peliti deltizie. Tale sintema è stato riferito alla parte iniziale del Gelasiano, e dunque al Quaternario, grazie alla presenza di vertebrati continentali attribuiti all'unità faunistica di Montopoli (Benvenuti et alii, 1995).
- **Sintema di Ponte a Elsa (PE):** complesso clastico caratterizzato dalla transizione ciottolami e sabbie fluviali, sabbie e peliti deltizie, lagunari e di piattaforma secondo un gradiente deposizionale orientato da NE a SO. Sulla base di sporadiche associazioni a foraminiferi indicanti la zona a G. aemiliana (Dominici et al. 1995), e in base alla presenza di vertebrati fossili in depositi fluviali riferibili all'unità faunistica Triversa della biocronologia a mammiferi (Benvenuti et al. 1995), il sintema è stato riferito alla porzione media-alta del Piacenziano.

- **Sintema di Certaldo (C):** successione costituita da un'alternanza di sabbie e peliti deltizie che passano con contatto netto a peliti di piattaforma. La presenza di una microfauna riferibile alle biozone *G. puncticulata*-*Discoaster tamalis* (Conti 1993, Bossio et al. 1993 e 2001; Capezzuoli et al. 2005) in depositi attribuiti a questo sintema, suggerisce un'età compresa tra lo Zancleano finale e il Piacenziano iniziale.

Durante la campagna di rilevamento geologico-geomorfologica i diversi sintemi sono stati raggruppati in quattro unità litologiche principali (Tab. 4.1), indipendenti dal sintema di appartenenza o dall'età del deposito, ma ottenute accorpando all'interno della medesima unità tutte quelle litofacies caratterizzate da simile tessitura. Anche i depositi alluvionali olocenici e quelli eluvio-colluviali posti alla base dei versanti sono stati riportati nella cartografia geomorfologica come unità a se stanti.

Unità litologiche	Sintemi
Ciottoli	San Casciano (litofacies ciottolosa)
Sabbie e ciottoli	San Miniato (litofacies sabbioso-ciottolosa) Ponte a Elsa
Sabbie e limi	San Casciano (litofacies sabbioso-limoso) San Miniato
Limi e argille	San Miniato (litofacies limoso-argillosa) Ponte a Elsa Certaldo

Tab 4.1 Unità litologiche riconosciute e raggruppate durante la fase di rilevamento geologico.

La fase di rilevamento geologico ha consentito di osservare i caratteri stratigrafici di alcuni litotipi grazie ad alcuni affioramenti estesi e ben visibili.

Ad ovest dell'abitato di Montespertoli in prossimità di loc. Palafitte (coordinate *Google earth*: 43°38'36,10" N - 11°3'5,80" E) una porzione della successione stratigrafica plio-pleistocenica è stata messa in evidenza lungo la scarpata principale di una frana (Fig. 4.3 a). La base della successione (Fig. 4.3 b) è caratterizzata da livelli centimetrici di argilla alternati a sabbie a granulometria media con laminazioni piano convesse, sormontati da sabbie e ghiaie fini con clasti da subangolari a subarrotondati. Procedendo verso la sommità della successione si rinviene uno strato sabbioso dello spessore di circa un metro, con alla sommità argille ricche in fossili come *Ostree sp.*, *Cardium sp.* e *Potamides sp.* riconducibile a un ambiente lagunare. L'assetto stratigrafico e la presenza di tali fossili permettono di ricondurre un simile affioramento a un ambiente lagunare, prospiciente un cordone litorale. I sedimenti sabbiosi costituirebbero depositi di *washover* che durante le principali mareggiate erano in grado di

superare il cordone litorale e dunque caratterizzavano la transizione spiaggia-laguna. I depositi argillosi sono francamente lagunari verosimilmente in seguito alla progressiva migrazione verso costa della linea di riva per la crescita e sviluppo di ulteriori cordoni litorali. Numerosi altri affioramenti si osservano lungo le scarpate di frana ma il loro accesso è stato impedito dalla ripidità della scarpata e dalla fitta vegetazione, spesso caratterizzata da rovi e arbusti.

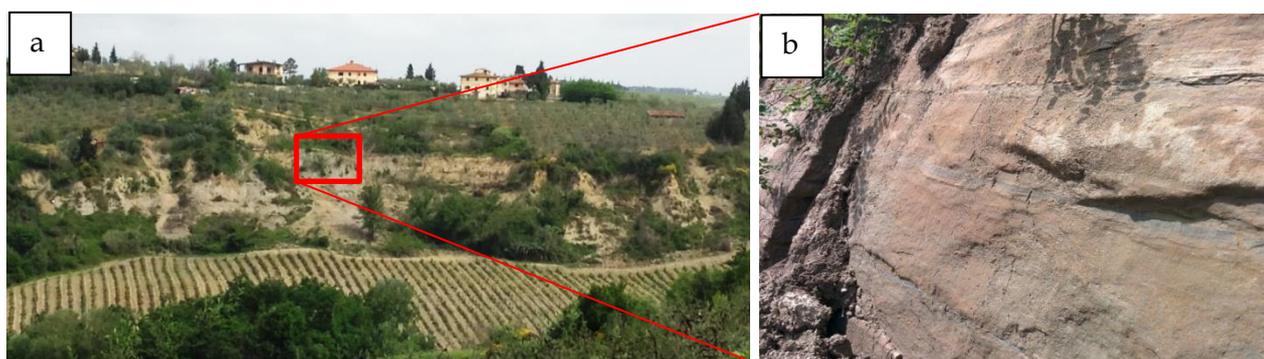


Fig. 4.3 Loc. Palafitte. (a) Vista panoramica della scarpata di frana, (b) Affioramento di strati orizzontali di argille e sabbie alternate riconducibili ad un ambiente lagunare.

Nella zona nord dell'abitato, presso la Loc. Volano, l'erosione selettiva indotta dal drenaggio superficiale di un impianto di depurazione ha messo in evidenza una scarpata, dell'altezza di qualche metro, costituita da depositi sabbiosi e limoso-argillosi del *bedrock*. Questo affioramento, collocato su una zona in frana, consente di osservare il comportamento e le caratteristiche associate alle frane in profondità. Nella porzione sommitale della parete è ben visibile un livello sabbioso, dello spessore di ~ 2 m e inclinato di $\sim 15^\circ$ a reggipoggio (Fig. 4.4), che presenta una superficie basale netta e ben definita riconducibile ad una superficie di scivolamento. Anche lo strato limoso argilloso affiorante al di sotto delle sabbie presenta una debole inclinazione, sebbene la stratificazione sia appena riconoscibile. Il sottile strato di sabbie è interessato da un numero limitato di fratture, disposte perpendicolarmente agli strati inclinati e spaziate qualche metro l'una dall'altra. Al di sotto di questo livello si osserva uno strato di limi-argillosi grigio-verdastri intensamente fratturati (fratture spaziate tra i 20 e i 50 cm) e intercalati con livelli fossiliferi scuri dallo spessore decimetrico. Proprio questi limi e argille sono tagliati da tre sistemi di fratture e piccole faglie, elencati di seguito, che sono il risultato del comportamento fragile del materiale coinvolto nella frana:

- a) sistema 1: N 90° S 85° (Fig. 4.1.1.5b, c)
- b) sistema 2: N 20° E 65° (Fig. 4.1.1.5d, e; linee nere);
- c) sistema 3: N 180° W 90° (Fig. 4.1.1.5d, e; linee bianche).

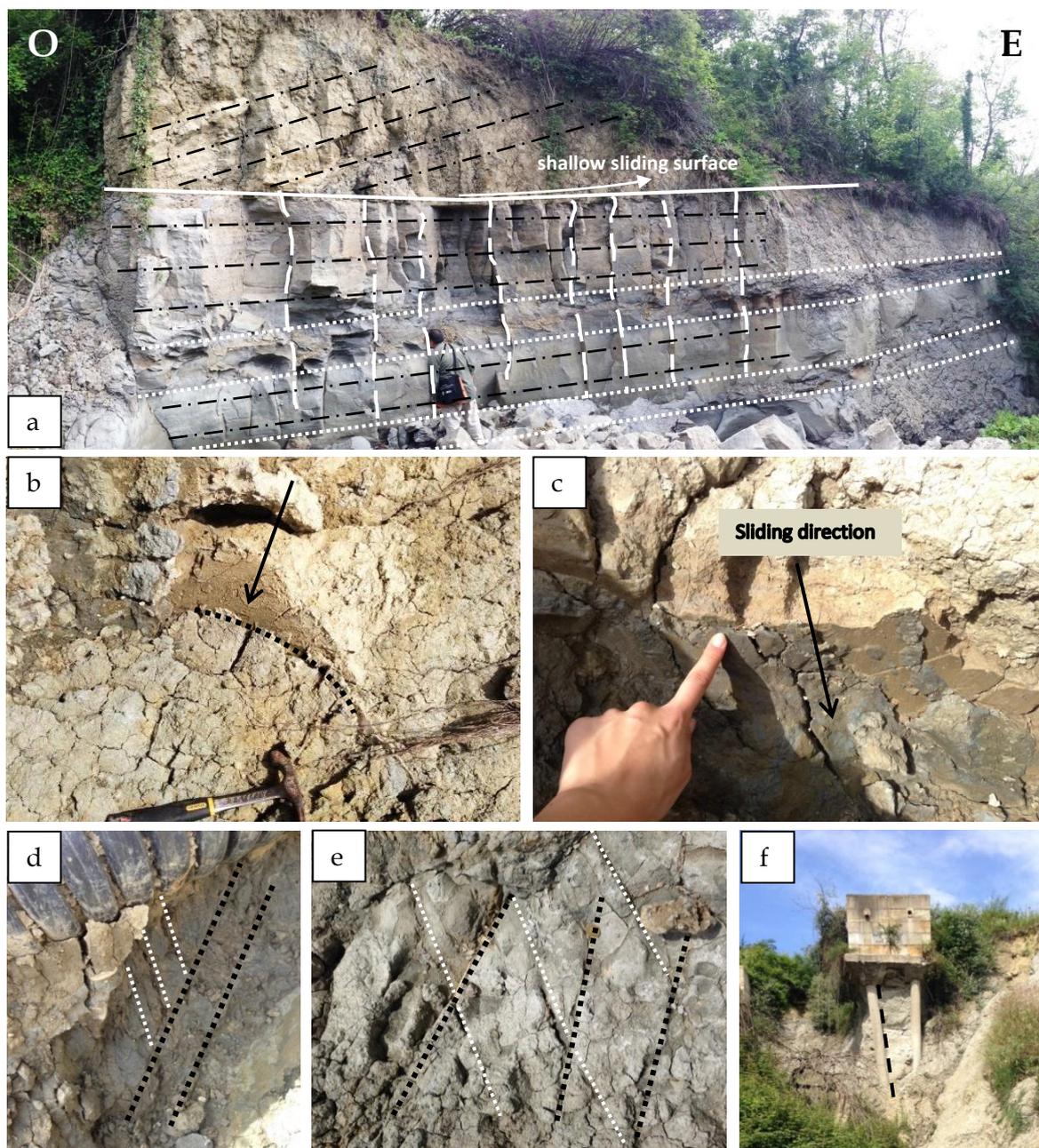


Fig. 4.4 (a) Affioramento di sabbie, limi e argille nei pressi di Via Amedeo bassi: vengono messi in evidenza la stratificazione (linee nere), la superficie di scivolamento (linea bianca), i sistemi di frattura (tratteggio bianco), i livelli fossiliferi scuri (puntinato bianco). (b) e (c) Sistema di fratture 1, (d) e (e) Sistemi di fratture 2 e 3. (f) Fossa settica e colonna di cemento inclinata (tratteggio nero).

La valutazione delle relazioni tra i diversi sistemi di fratture, permette la ricostruzione della cronologia relativa. Infatti, il sistema 2, il cui set di fratture taglia il sistema 3, può essere interpretato come il più recente tra i due. Andando nel dettaglio, i sistemi di fratture che coinvolgono i livelli di limo e argilla devono essere associati con la presenza di un movimento di versante che, probabilmente, ha origine in un livello più profondo di sabbie. Movimenti

recenti sono messi in evidenza dall'inclinazione della colonna sinistra della fossa settica (Fig. 4.1.1.5f), la cui stabilità della struttura è messa a repentaglio. Lo strato sabbioso contraddistinto, invece, da fratture disposte perpendicolarmente alla stratificazione, potrebbe essere rapportato ad uno scivolamento traslativo, con una superficie di taglio, quasi orizzontale. Questo non esclude che il movimento avvenga lungo un piano rotazionale collocato poco a valle dell'affioramento, in un settore più dinamico dell'ammasso in frana.

4.1.2 Inquadramento geomorfologico

Il centro storico del paese di Montespertoli sorge ad una quota compresa tra i 230 - 240 m s.l.m., sulla sommità di una superficie strutturale pianeggiante di forma allungata, con direzione NO-SE. Nei settori occidentali, il Torrente Orme suddivide la dorsale in due creste distinte. La morfologia risultante è quella di una dorsale il cui andamento sinuoso è prodotto in parte dell'attività di frane e in parte l'azione di incisione fluviale. Il crinale è modellato su litofacies prevalentemente conglomeratiche e sabbiose e, a causa delle diverse proprietà geotecniche e meccaniche delle litologie affioranti, si generano versanti a gradini con pendii dolci in corrispondenza di depositi poco coerenti e litotipi prevalentemente argillosi, mentre ripide scarpate e balze s'impostano in presenza di terreni conglomeratici e sabbiosi.

Nelle porzioni settentrionali dell'abitato, dove affiorano i litotipi argillosi, sono state cartografate anche aree a calanchi (Fig. 4.5) sulle quali si generano, talvolta, frane di colamento di piccola estensione. I calanchi sono infatti forme erosive associate sia all'incisione fluviale che a fenomeni gravitativi, e in particolare a colamenti (Bischi et al., 1982). Essi sono tipici di zone aride e sub-aride dove la vegetazione è assente, invece, nel paesaggio italiano, dove il clima è temperato, queste morfologie sono associate alla deforestazione e alla desertificazione antropica. I calanchi di Montespertoli sono vegetati, parzialmente stabilizzati ed esposti prevalentemente a sud.

Inoltre, nell'area di studio di Montespertoli si possono evidenziare due settori caratterizzati da morfologie diverse: i versanti meridionali sono costituiti da scarpate strutturali abbastanza estese lateralmente e con altezze che superano i 10 m, il paesaggio appare aspro e i versanti a gradini sono abbastanza estesi, mentre i settori posti a nord sono caratterizzati da un paesaggio dolce e smussato, con scarpate strutturali meno estese che raramente superano i 5 m di altezza.



Fig. 4.5 (a) Calanchi nel settore nord-ovest dell'abitato di Montespertoli, (b) Scarpate strutturali nei settori orientali.

L'idrografia superficiale è caratterizzata da un reticolo di drenaggio a bassa densità, con andamento moderatamente centrifugo. Il fiume principale è il Torrente Virginio, che scorre a NO della città. In Fig. 4.6 vengono riportati i fiumi e torrenti secondari: ad ovest scorre il Torrente Turbone, a nord-est il Borro del santo mentre a sud il Borro dei laghi e il Torrente Pesciola d'Aliano. Secondo la classificazione di Strahler (1952) la maggior parte di questi fiumi sono di I e II ordine e solo il Torrente Virginio è di III ordine.

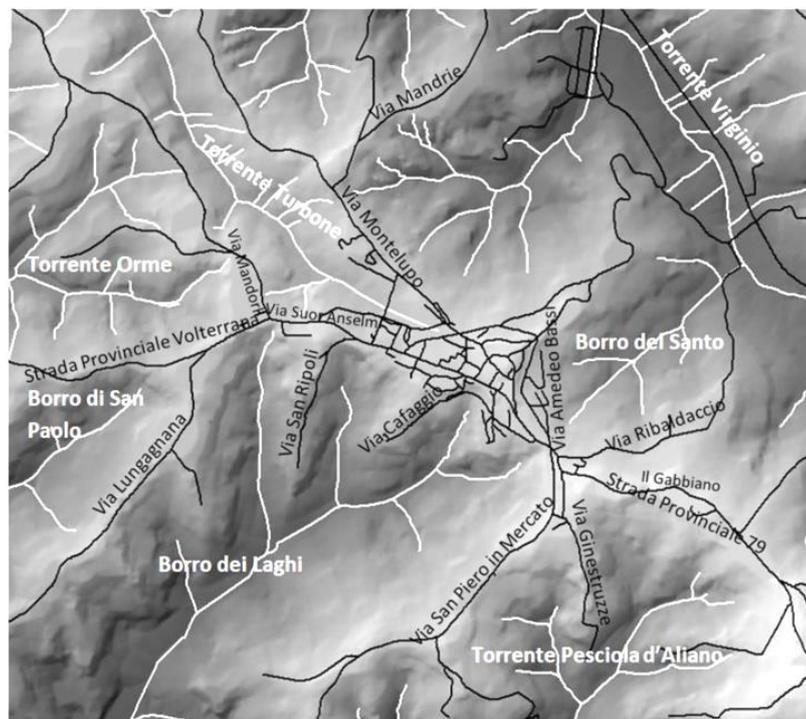


Fig. 4.6 Reticolo di drenaggio (in bianco) e strade principali (in nero) di Montespertoli.

4.1.3 Caratteristiche delle frane rilevate

Il rilevamento di campagna ha consentito l'osservazione dettagliata dei movimenti gravitativi caratterizzanti i territori limitrofi all'abitato di Montespertoli. Inoltre un'analisi più approfondita ha consentito di fare considerazioni sullo stato di attività ed evoluzione di alcuni dei movimenti che interessano direttamente l'abitato, le sue strade e i suoi edifici. Più di 90 frane sono state riconosciute e mappate in un'area di circa 10 Km². Alcune di queste sono frane singole, con un unico corpo di frana (Fig. 4.7, frane no. 2, 4, 9, 10, 11, and 12), ma la maggioranza è caratterizzata dalla presenza di più corpi franosi. Quest'ultima tipologia di frane può dunque essere definita "complessa", giacché è il risultato di più movimenti gravitativi avvenuti in sequenza (Cruden e Lan, 2014). Inoltre, sono state riconosciute anche frane "composite" (Fig. 4.7, frane no. 1, 3, 5, 6, 7, 13, and 14) quando diversi tipi di movimento avvengono in aree diverse dell'ammasso in frana, talvolta anche simultaneamente (WP/WLI 1993b; Cruden e Couture 2011). I movimenti "compositi" che hanno origine in parti diverse del versante e sul fondovalle tendono ad unirsi in un unico corpo sono stati indicati con la nuova terminologia "coalescente" (vedi Capitolo 3, paragrafo 3.4.3). Alcuni lavori che trattano di frane complesse (Malamud et al. 2004) o movimenti gravitativi profondi di versante e che includono frane con un comportamento "coalescente" (Fonseca et al. 2010) non riportano una spiegazione descrittiva delle peculiarità di questo termine.

Venendo alle principali tipologie di movimenti gravitativi riconosciuti nel territorio di Montespertoli, questi possono essere così suddivisi:

- Scivolamenti (*slides* secondo la classificazione di Cruden e Varnes 1996 o *slips* secondo quella di Hutchinson 1988; *clay/silt rotational slide* per Hungr et al., 2014);
- Movimenti complessi (*complex landslides* secondo Cruden e Varnes 1996) che sono generalmente costituiti da scivolamenti che evolvono in colamento);
- Colamenti (*flows* secondo Varnes 1978 e Cruden e Varnes 1996; tab. 3.2).

Secondo la classificazione di Hungr et al. (2014), la maggiorparte dei movimenti può essere definita come "*slow to very slow clay/silt compound, rotational or planar slides*", ovvero come scivolamenti rotazionali o planari di tipo composito, con velocità di movimento da lente a molto lente e coinvolgenti prevalentemente terreni di natura argilloso-siltosa.

La forma in pianta di queste frane è riportata in Fig. 4.7.

Stimando il rapporto tra lunghezza e larghezza (L/W) di ciascun corpo di frana è possibile osservare che quando il rapporto è minore di 2 i movimenti sono solitamente degli scivolamenti, mentre quando il rapporto è maggiore di 2 i movimenti sono frane per colamento; nell'area di studio quest'ultime appaiono piuttosto allungate lungo la direzione di movimento (Fig. 4.7, frane n° 1, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14).

Secondo la classificazione di Hutchinson (1988) gli scivolamenti (*slip*) non sono particolarmente

allungati lungo la direzione del movimento e hanno una scarpata principale posta poco prima della cresta del versante. Un meccanismo di scivolamento rotazionale è messo in evidenza dalla presenza di scarpate secondarie che si impostano progressivamente verso la base del versante (geometria DD in Hutchinson 1988). Talvolta queste scarpate possono essere distribuite lungo tutto lo spessore del corpo di frana (es. frane no. 1,3 e 4) anche se è più comune un loro confinamento ad una porzione limitata dell'ammasso.

Le scarpate principali dei movimenti sono sviluppate all'interno delle litologie più competenti, collocate alla sommità del crinale. Le evidenze associate ai movimenti di scivolamento rotazionale sono costituita da trincee, contropendenze e contro-scarpate, particolarmente diffuse nei settori nord dell'abitato. In genere le contro-scarpate sono state rimodellate e smussate dai lavori agricoli, che hanno lasciato contrasti di pendenza molto ridotti. Trincee e contropendenze sono in parte mascherate da materiale proveniente dalle piccole frane e dall'alterazione del terreno esposto nella zona di scarpata.

Lo spessore dei corpi di frana, in mancanza di sondaggi e altri dati geotecnici, è stato ipotizzato a partire dalla quota della scarpata principale osservata durante la fase di rilevamento. Le scarpate si presentano con andamento verticale o sub-verticale, mentre l'assetto stratigrafico è caratterizzato da strati con andamento sub-orizzontale; proprio queste caratteristiche suggeriscono che la superficie di scivolamento tenda a listricarsi al contatto tra litologie differenti.

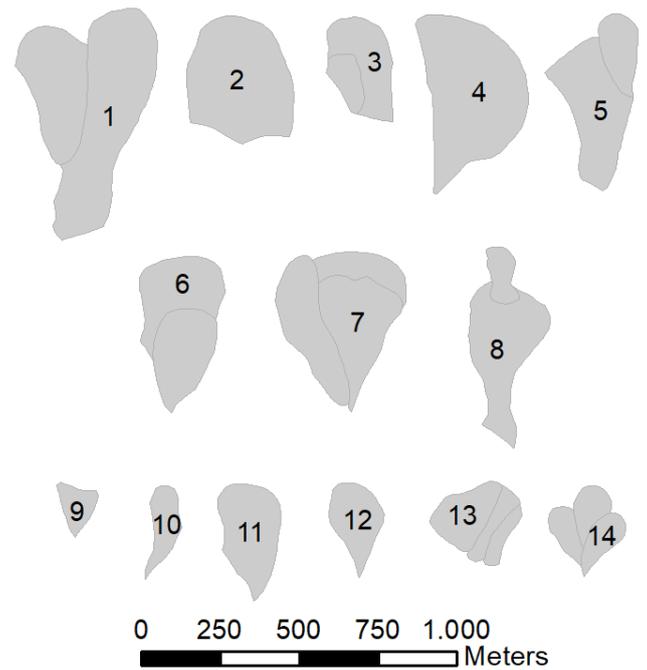


Fig. 4.7 Proiezione in pianta dei corpi di frana oggetto di analisi multitemporale.

Per quanto riguarda i colamenti, di solito questi movimenti hanno una forma molto allungata lungo la direzione del movimento. Un allungamento modesto rivela che l'ammasso in frana non ha incorporato sufficiente acqua per muoversi con un comportamento fluido. La maggior parte di queste frane sono talvolta ricoperte da corpi di frana secondari. Ad esempio, nei settori meridionali dell'area di studio, dove ondulazioni e rigonfiamenti sono una peculiarità diffusa del paesaggio, le colate di roccia appaiono spesso ricoperte da colamenti superficiali. Nei pressi di via San Ripoli e Via Cafaggio, nel margine meridionale della città, evidenze di colamenti sono rappresentate da lacerazioni del terreno e scarpate smussate, degradate o talvolta spoglie di vegetazione (Fig. 4.8 a). In generale le strade, sia quelle principali che quelle secondarie e sterrate, hanno perso la regolarità che avevano al momento della loro costruzione proprio a seguito della progressiva attività delle frane. Anche durante la fase di rilevamento non sono mancate testimonianze di questi movimenti. Una delle strade secondarie situata al di sopra della frana n° 5 (Fig. 4.8 b,c,d) mostra intense lacerazioni e crepe nel manto stradale.

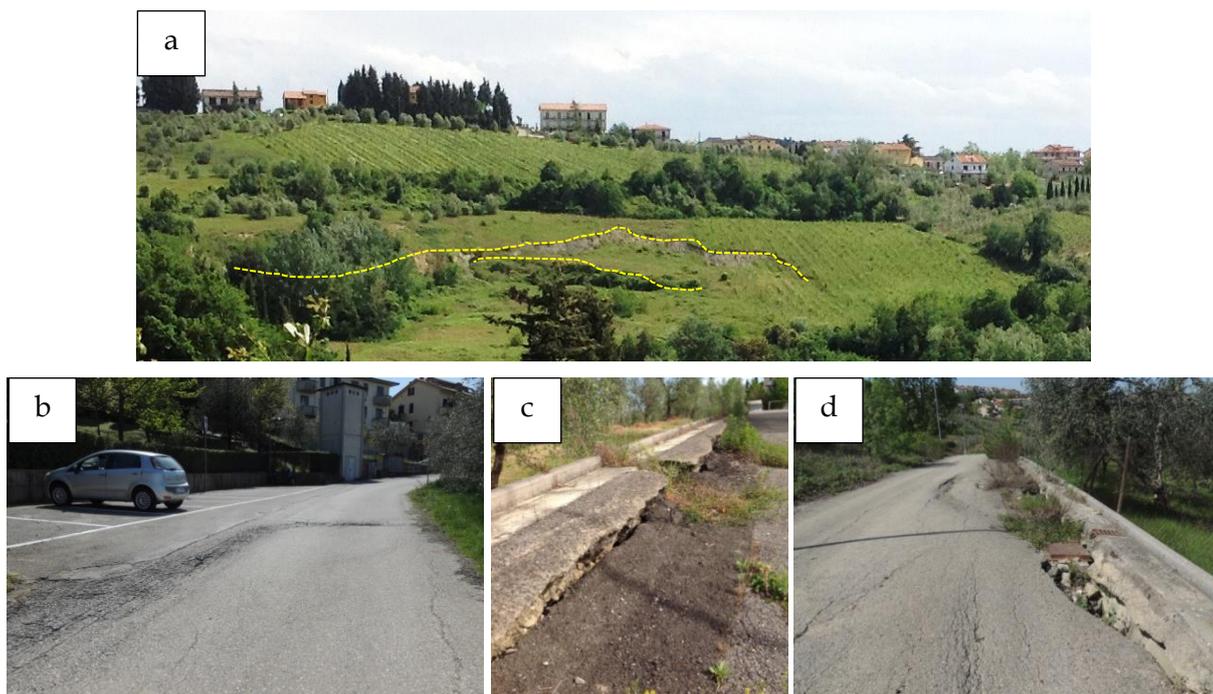


Fig. 4.8 (a) Scarpate secondarie recenti che coinvolgono ed interrompono i filari di un vigneto, presso Loc. le due Case; (b,c,d) Crepe e fratture del manto stradale nei pressi di Via Ribaldaccio (frana n° 5).

Nell'area oggetto di studio le frane complesse (Varnes 1978; Cruden e Varnes 1996; Cruden and Lan 2015) sono caratterizzate da un settore in scivolamento, quello a ridosso dell'area di corona, e tendono poi ad evolvere in scivolamento nei settori distali. La superficie di scivolamento è visibile alla base della scarpata principale solamente subito dopo che il movimento è stato attivato/riattivato mentre poco dopo viene rapidamente degradata e

smussata dai processi erosivi, particolarmente attivi nelle litologie meno competenti. La porzione in colamento, ubicata nelle vicinanze del fondovalle, è caratterizzata da ondulazioni e rigonfiamenti del terreno.

Infine, il tasso di movimento relativo alle frane che bordano il perimetro dell'abitato sembra essere da lento a molto lento (da 1,6 m/anno a 16 mm/anno; WP/WLI 1995, Cruden e Varnes 1996, Hungr et al. 2014) considerando le evidenze osservate sia in campagna che dalla fotointerpretazione. Tuttavia è possibile che fenomeni di precipitazione intensa possano portare ad un incremento della velocità a scala locale.

Per quanto riguarda l'uso del suolo in concomitanza delle frane, negli anni 50' i terreni erano interamente coltivati, tuttavia molte zone sono state abbandonate negli anni successivi sia a causa di variazioni dell'economia sia a causa delle dinamiche gravitative in atto, che riducevano la praticabilità e la redditività del terreno.

4.1.4 Analisi multitemporale

L'analisi multitemporale è stata condotta su 14 frane, collocate su ambo i lati del crinale (Fig. 4.9). Tutte le frane analizzate sono risultate attive di secondo livello perciò la loro attività può essere fatta risalire almeno agli anni 50'. In Tab.4.1 si riportano le peculiarità di ciascun movimento oggetto di analisi. Un aspetto interessante è che l'area interessata dai movimenti gravitativi non resta sempre la stessa ma tende a variare, inglobando nuove aree nel corso dei diversi anni.

Tra i caratteri distintivi per l'interpretazione delle forme rientrano tutti quei caratteri geometrici e spettrali come forma, dimensione, struttura, ombra, toni di grigio, variazioni di colore, che consentono di rilevare la forma, la dimensione e lo stato di attività.

Perciò aree prive di vegetazione o filari di piante interrotti, risultano i migliori caratteri per identificare aree attive dal punto di vista gravitativo, così come, quando identificabili, crepe nel manto erboso o geometrie lineari associate a scarpate e rotture del terreno, la cui presenza in foto è spesso marcata da variazioni, talvolta nette, di tonalità di grigio.

La peculiarità dei movimenti rinvenuti nel settore meridionale di Montespertoli è la presenza di scarpate di frana il cui carattere retrogressivo porta a coinvolgere nel movimento anche gli edifici e le strade prospicienti la frana (vedi Frana no. 12 - Frana di Loc. la Fornace). Fratture, crepe trasversali del manto stradale ed edifici con fondazioni divelte, inclinate e deformate sono alcune delle evidenze più nette. Anche in altre aree, poste a nord dell'area di studio (vedi frana no. 13 - Frana della Stazione AGIP), la progressiva attività delle frane ha indotto ingenti danneggiamenti alle strutture antropiche.

I 14 movimenti gravitativi sono stati scelti poiché risultano quelli più pericolosi per l'abitato; la loro attivazione/riattivazione, infatti, potrebbe causare ingenti danni a edifici e strade.

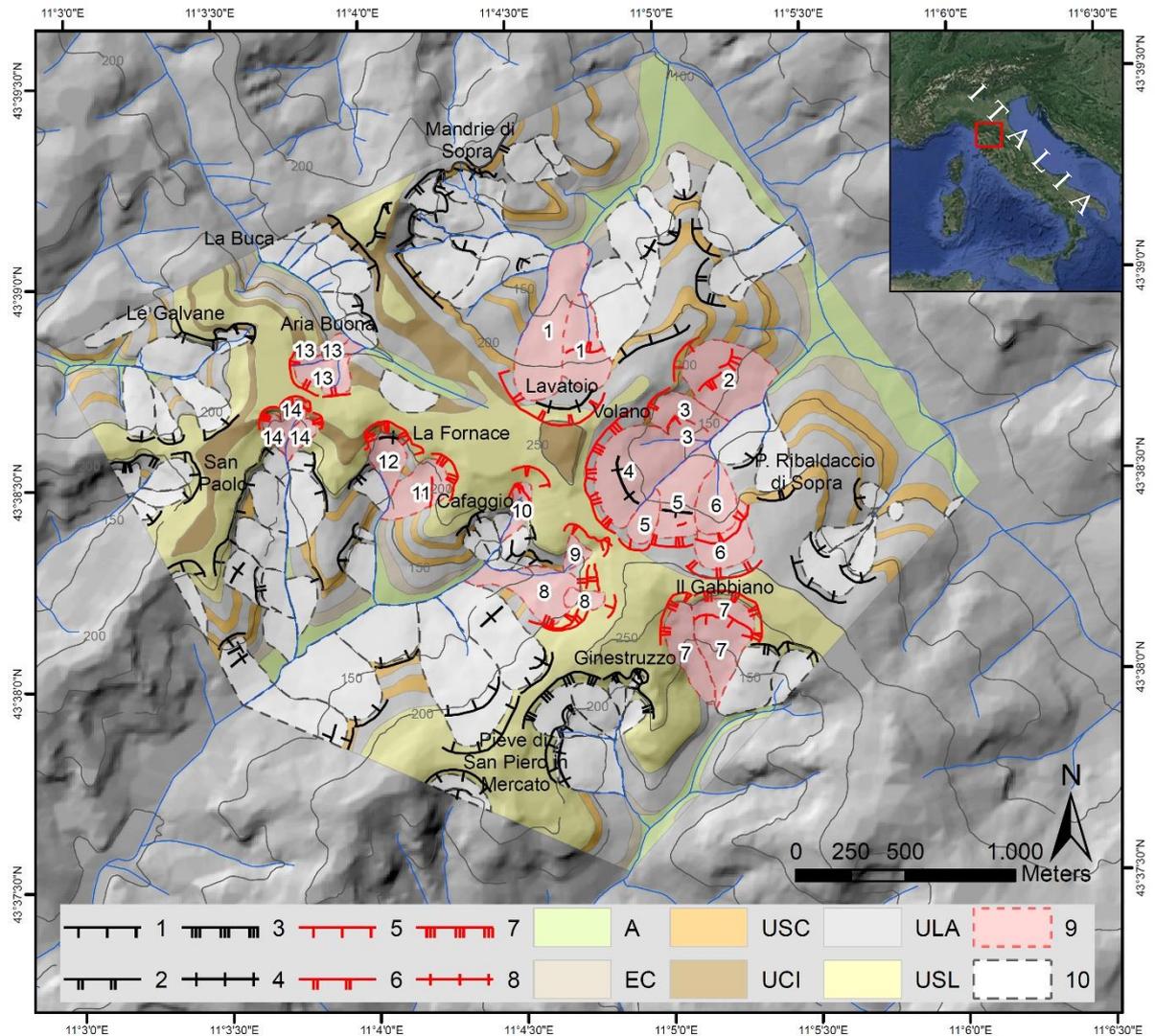


Fig. 4.9 Geologia dell'area di studio. Vengono riportate le frane e le unità litologiche rilevate in campagna. Tra i movimenti gravitativi si sono distinti quelli oggetto di analisi multitemporale (in rosso) da quelli non oggetto di analisi (in nero): (1 e 5) Scarpata di frana < 5 m, (2 e 6) scarpata di frana compresa tra 5-10 m, (3 e 7) scarpata di frana > di 10 m, (4 e 8) trincea, (8 e 9) limiti dei corpi di frana; A - depositi alluvionali, EC - depositi eluvio-colluviali, USC - unità sabbioso-ciottolosa, UCI - unità ciottolosa, ULA - unità limoso-argillosa, USL - unità sabbioso-limosa. In blu è riportato il reticolo idrografico.

Nelle pagine seguenti viene riportata una breve descrizione di alcuni dei movimenti gravitativi caratterizzanti l'area di studio e ne vengono riportati i risultati dell'analisi multitemporale (Fig. 4.10). Si tratta sia di movimenti composti la cui tipologia dominante è lo scivolamento di roccia/terra (frana no. 13. Fig.4.10), sia di movimenti complessi in cui la

tipologia dominante è lo scivolamento rotazionale (frane no. 11-12, Fig.4.10), di movimenti complessi (frana no. 4, Fig.4.10) e compositi (frana no. 7, Fig.4.10). Lo scopo è quello di identificare e descrivere le peculiarità di tipologie diverse di frane.

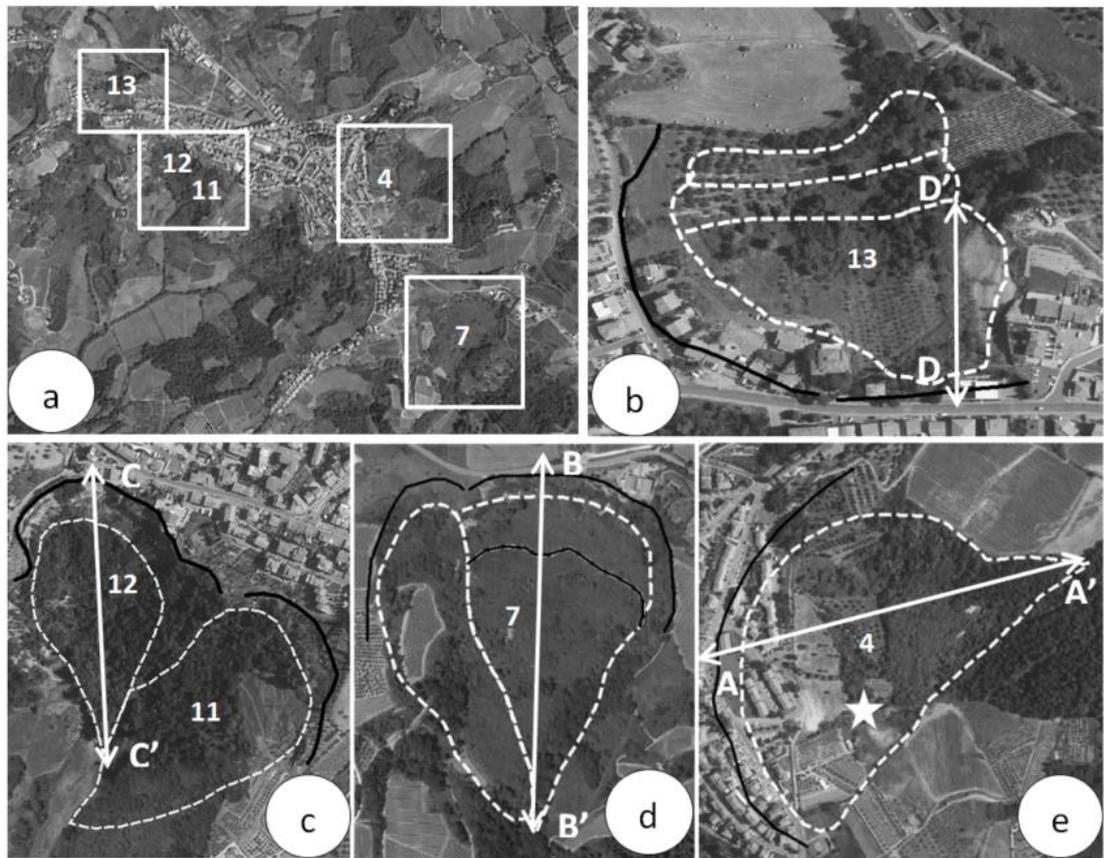


Fig. 4.10 Frane oggetto di analisi multitemporale: (a) Localizzazione delle frane analizzate, (b) frana 13, (c) frane 11 e 12, (d) frana 7, (e) frana 4.

4.2.1 Frana 4 - La frana di Volano

La frana di Volano (Fig. 4.10 e, Fig. 4.11) è situata sul margine nord-orientale del crinale. La sua scarpata principale coinvolge le litologie della parte superiore della sequenza plio-pleistocenica che appartengono alle unità litologiche sabbioso-siltosa e a quella siltoso-argillosa. La sommità della scarpata è posta a 240 m s.l.m., ha un'altezza superiore a 10 m e si estende per una lunghezza di ~ 700m. La sua forma è arcuata, con l'angolo convesso rivolto verso E. Il corpo di frana è lungo circa 560m, largo 400m e occupa un'area di ~130.000m². I dati relativi alle dimensioni delle frane e delle relative scarpate sono stati estrapolati direttamente dalle linee e poligoni digitalizzati per la cartografia in ambiente GIS. Il movimento è stato interpretato come un movimento complesso il cui movimento principale è uno scivolamento multiplo rotazionale, anche grazie alla presenza di una evidente contropendenza collocata alla

quota di 218 m s.l.m. La sommità del versante mostra un profilo concavo mentre verso l'unghia della frana diviene convesso. Nei settori più distali sono distinguibili zone fortemente ondulate e aree denudate, prodotte da piccole frane di colamento di terra. Anche i versanti limitrofi la frana di Volano, sono caratterizzati da prove di instabilità come le piccole scarpate smussate dalla lavorazione agricola visibili in prossimità del fianco destro della frana no. 3.

Nel 1954 la scarpata principale del movimento era abbastanza visibile anche se in parte smussata da processi erosivi e dalle lavorazioni agricole. Il centro storico del paese si sviluppava già ai margini della zona di corona e un numero esiguo di case sorgeva all'interno del corpo di frana. La parte sommitale del corpo di frana non mostrava nessuna evidenza di attività e perciò può essere interpretata come attiva. La presenza di piccole variazioni topografiche e di numerosi canali e rivoli secondari consente di suddividere questo settore in almeno cinque corpi diversi con aree comparabili. Nei settori medio-terminali sono distinguibili dei corpi allungati riferibili a frane di colamento che generano ondulazioni diffuse e deformazioni della linearità dei limiti di campo, oltre che piccole scarpate secondarie e scalini. In queste zone maggiormente dinamiche le attività agricole erano limitate e il pendio era ricoperto in prevalenza da vegetazione boschiva. Dunque l'attività di questi movimenti risale a tempi precedenti rispetto al 1954.

Nel 1988 la rapida crescita economica aveva indotto un importante sviluppo degli insediamenti urbani, e molti nuovi edifici erano stati costruiti ai piedi della scarpata principale. Le piccole colate risultate attive negli anni '50 mostrano negli anni '80 un comportamento retrogressivo e sembrano in allargamento rispetto agli anni precedenti. Le pratiche agricole nei settori terminali del corpo di frana vengono totalmente abbandonate. Anche nelle aree centrali del corpo di frana l'attività del movimento era testimoniata dalle deformazioni di alcuni filari di piante, ondulazioni sparse e piccoli gradini visibili nei campi arati.

Nel 1996 le peculiarità della frana erano simili a quelle degli anni '80 e le maggiori evidenze di deformazione erano ancora visibili nelle aree centrali del corpo di frana.

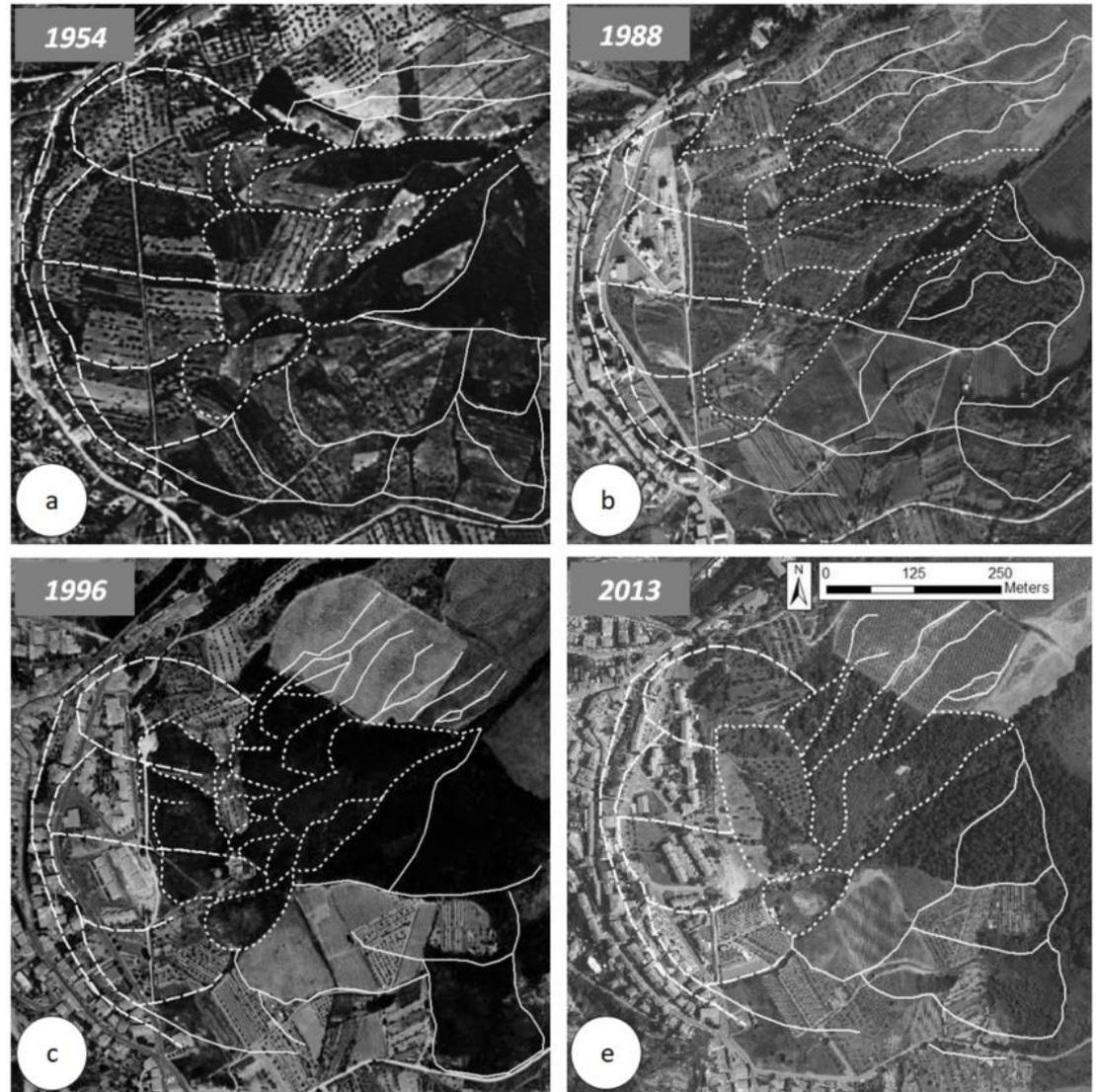


Fig. 4.11 Ortofoto relative all'analisi multitemporale eseguita sulla frana no. 4: (a) 1954, (b) 1988, (c) 1996, (d) 2013. Si distinguono scarpate e corpi di frana attivi (puntinato bianco), scarpate e corpi di frana quiescenti (tratteggio bianco) e limiti associati alle altre frane rilevate (linea continua bianca).

4.2.2 Frana 7 – Frana di Loc. Il Gabbiano

La frana 7 si sviluppa nei versanti meridionali di Montespertoli, nei pressi di Loc. Il Gabbiano, ed è uno dei movimenti più dinamici di questa area (Fig.4.10 d). La corona di frana è attualmente suddivisa in due porzioni dalle quali si dipartono due corpi di frana distinti: quello ad est, più esteso, e quello ad ovest, di dimensioni più piccole. La scarpata del movimento orientale è collocata ad una quota di circa 260m e si estende, nella zona di corona, fino al margine della Strada Provinciale 79. La scarpata, semicircolare, ha un'altezza di ~10m e si estende lateralmente per 900m, con l'angolo convesso orientato verso S. Tale scarpata si presenta parzialmente vegetata, tranne nei settori in cui di recente si sono riattivati piccoli

colamenti di terra. Poco più in basso, ad una quota di 230m, è presente una scarpata secondaria con altezza compresa tra 5-10 m, la quale separa la parte soprastante, caratterizzata da un movimento per scivolamento rotazionale, dalla parte sottostante, che evolve come un colamento, come suggerito dai gradini e ondulazioni visibili fino al piede. La scarpata più orientale, mostra una forma più arcuata con una corda dell'arco orientata NE-SO, è posta ad una quota leggermente inferiore rispetto alla precedente, ca 240m, ed ha una lunghezza di ~340m e un'altezza di quasi 10m. Quest'ultima scarpata è maggiormente vegetata e il corpo di frana sottostante è caratterizzato da una geometria fortemente allungata, numerose scarpate secondarie, gradini e ondulazioni verso il fondovalle, che hanno consentito di classificare il movimento come un colamento.

Nel 1954 il corpo di frana era caratterizzato da due settori principali, con areale comparabile, e una geometria a forma a cuore (Fig. 4.12). Nel caso del movimento orientale, la scarpata principale era priva di vegetazione e fortemente degradata, specialmente nel settore NE. Una serie di scarpate secondarie era riconoscibile poco al di sotto di quella principale. Un secondo movimento gravitativo, con forma a cuore, interessava i settori medio-orientali del corpo di frana, i quali risultavano ricoperti di vegetazione e non coltivati. Il settore occidentale, invece, mostrava una serie di scarpate secondarie multiple, di cui quella più orientale era la più piccola. Anche discendendo il versante verso il fondovalle non mancano le evidenze di numerose altre scarpatine che identificavano una lingua di terreno franata per colamento. I due settori del corpo di frana erano divisi tra di loro da un piccolo colamento con forma piuttosto allungata. Gradini e deformazioni dei filari delle piante (vigneti e frutteti) erano evidenti su tutto il corpo di frana. Queste deformazioni interessavano anche le strade e i limiti di campo. Tuttavia, nonostante i movimenti ancora in atto, il terreno dove possibile era ancora coltivato.

Nel 1988, la scarpata principale orientale era degradata da piccoli fenomeni di colamento, indicati nell'ortofoto dalla mancanza di vegetazione. Anche le scarpate secondarie apparivano per la maggior parte "fresche" e prive di arbusti. Una serie di canali artificiali deviavano le acque superficiali provenienti dalla zona di corona verso l'interno del corpo di frana dove era presente anche una contropendenza, probabilmente generata da una trincea. Una seconda scarpata, di forma irregolare, marca il passaggio ai settori medio terminali che evolvono in colamento. Tale scarpata era interessata da piccole frane di colamento. La frana occidentale era caratterizzata da una lunga colata, e le aree poste a sud-ovest mostravano una certa attività. A causa sia dei cambiamenti socio economici, ed anche della continua attività

dei movimenti presenti in questi settori, è possibile apprezzare l'enorme variazione di uso del suolo rispetto agli anni 50'. Il terreno risulta, infatti, ricoperto interamente da vegetazione arbustiva e da bosco.

Nel 1996 la situazione resta abbastanza simile al decennio precedente. Piccole aree prive di vegetazione caratterizzavano ancora la scarpata principale. Le piccole colate situate nella porzione centrale del corpo di frana erano evolute fino a coinvolgere settori sempre più ampi ed inglobando anche il colamento provenienti da nord-ovest. Il corpo di frana occidentale, invece, era invariato, indicando che i movimenti in quest'area avevano subito un rallentamento. Solamente il colamento posto a sud ovest dell'area distale mostrava segni di attività ed aree prive di vegetazione. L'intera area di frana era ricoperta da bosco, tranne un piccolo settore coltivato, prossimo alla scarpata principale.

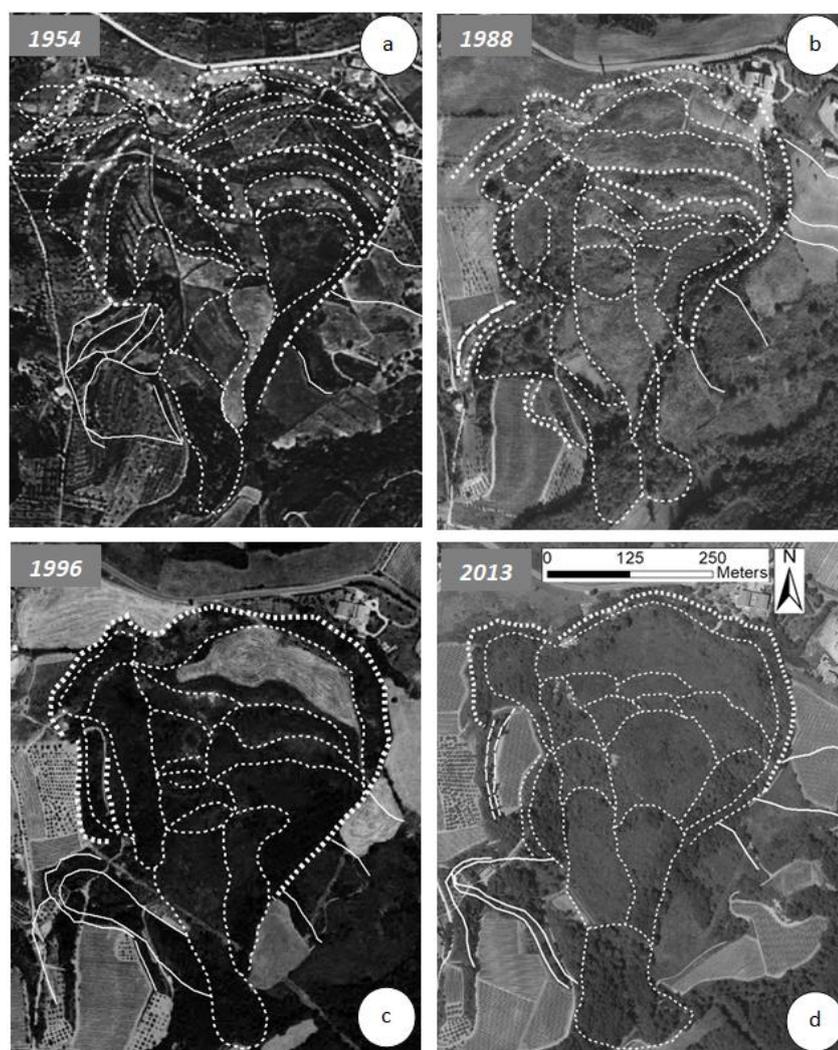


Fig. 4.12 Ortofoto relative all'analisi multitemporale eseguita sulla frana no. 7: (a) 1954, (b) 1988, (c) 1996, (d) 2013. Si distinguono scarpate e corpi di frana attivi (puntinato bianco), scarpate e corpi di frana quiescenti (tratteggio bianco) e limiti associati alle altre frane rilevate (linea continua bianca).

4.2.3 Frana 11-12 - La frana di Loc. la Fornace

Queste frane, di tipo composito, sono collocate nei settori meridionali al margine dell'abitato e sono costituite da una serie di scivolamenti che evolvono in colamenti (Fig. 4.10c). La scarpata principale del movimento si imposta sulle unità ciottolose e sabbioso-siltose della porzione sommitale della sequenza plio-pleistocenica. Si tratta di una serie di movimenti che traggono la loro origine alla testata e sui fianchi di una valle minore, in cui scorre un affluente di destra idrografica del Borro dei Laghi.

La frana 12 si origina su di una scarpata molto arcuata, dallo spessore di circa 25-30m e lunga oltre 360m, con una corda dell'arco orientata E-O. La quota a cui si colloca la scarpata è di 230m, in una posizione prossima agli edifici che si affacciano sulla strada Provinciale Volterrana (Fig.4.13 a). Per ragioni geologiche, legate all'affioramento di livelli sabbioso-siltosi intercalati con livelli più spessi di sabbia (Fig.4.13 b), tale scarpata risulta suddivisa verticalmente in due sezioni, generando così un gradino. Inoltre, la scarpata principale è caratterizzata da piccole colate, crolli e ribaltamenti, che ne interrompono la continuità. Una contropendenza è visibile ai piedi della scarpata principale.

L'attività di questa frana, anche in tempi recenti, è testimoniata dalle fondamenta di un parcheggio e dal manto stradale ed un edificio di via San Ripoli, che sono stati largamente danneggiati dalla progressiva evoluzione del movimento (Fig. 4.13 c, d, e, f, g, h). Il pavimento stradale è marcato e divelto da una serie di crepe longitudinali parallele alla scarpata e da gibbosità molto nette.

La frana 11 si origina ad est della 12, e ne borda il fianco sinistro. La scarpata principale si colloca in corrispondenza dell'unità sabbioso-limosa ed è separata da quella della frana 12 da una piccola frana, a forma di U, generata da uno scivolamento in successione (*successive slip*, Hutchinson 1988) il cui corpo è interessato da una serie di scarpatine minori.

In entrambi i corpi di frana sono riconoscibili una serie di ondulazioni, in parte prodotte dalla presenza di scarpate secondarie con basso gradiente o parzialmente smussate. Riguardo all'uso del suolo, in entrambe le frane il terreno è attualmente lasciato a bosco. Una serie di alberi più alti rispetto agli altri consente di definire il limite dell'area più attiva. Tuttavia, l'assenza di aree non vegetate prova come i movimenti legati a queste due frane siano molto lenti e di piccola entità.



Fig. 4.13 (a) Vista panoramica della scarpata principale della frana no. 12, (b) dettaglio dei litotipi affioranti sulla zona di scarpata, (c,d) palificata in cemento armato con cordolo in testa scalzata al piede da processi erosivi e gravitativi, (e) crepe longitudinali e rigonfiamenti lungo il manto stradale di Via San Ripoli, (f) guard rail deformato e spostato, (g,h) deformazioni delle fondamenta e muro perimetrale fuori asse di un fabbricato lungo Via San Ripoli.

Nel 1954 l'area racchiusa nella valletta era interamente coltivata sia con terreni arati sia con filari di piante (frutteti e vigneti). Le scarpate principali dei movimenti erano prive di vegetazione e sembravano interessate da una serie di colamenti di terra (Fig.4.14). Una densa vegetazione ricopriva le scarpate secondarie, in gran parte degradate dai lavori agricoli, tranne quelle collocate ad est della frana 11, che apparivano attive per la mancanza di flora. Solo la porzione terminale di questo corpo di frana era ricoperta da bosco, ad indicare la presenza di continui movimenti che osteggiavano lo sfruttamento dell'area. Dinamiche simili caratterizzano la frana 12. Evidenti sono le deformazioni e interruzioni dei filari di un vigneto posto nei settori medio-terminali del versante (sulla frana no. 11). I movimenti, nella parte centrale della frana erano molto intensi e riconoscibili per mezzo di estese ondulazioni e rigonfiamenti dei campi arati.

Nel 1988 gran parte delle aree in frana erano ricoperte da una fitta vegetazione. I filari di un vigneto erano ancora distinguibili a SO. La scarpata principale era ancora "nuda" e priva di vegetazione a causa di continui movimenti. Una piccola frana era visibile nei versanti orientali. Tuttavia le maggiori evidenze di deformazioni, lente ma continue, erano rappresentate da variazioni nella linearità dei filari, fratture del terreno, discontinuità nella copertura boscosa e rigonfiamenti.

Nel 1996 una parte della scarpata principale mostrava tracce di colamenti di terra. Un movimento piuttosto esteso si era attivato lungo il margine SO della frana, distruggendo parte dei filari che erano visibili nel 1988. Anche se erano ancora presenti filari di vigneto, progressivamente movimenti embrionali avevano iniziato a minacciare anche questi settori. Nei settori restanti della frana la copertura boschiva mascherava gran parte delle evidenze e solo dove quest'ultima era meno densa è possibile apprezzare blande ondulazioni.

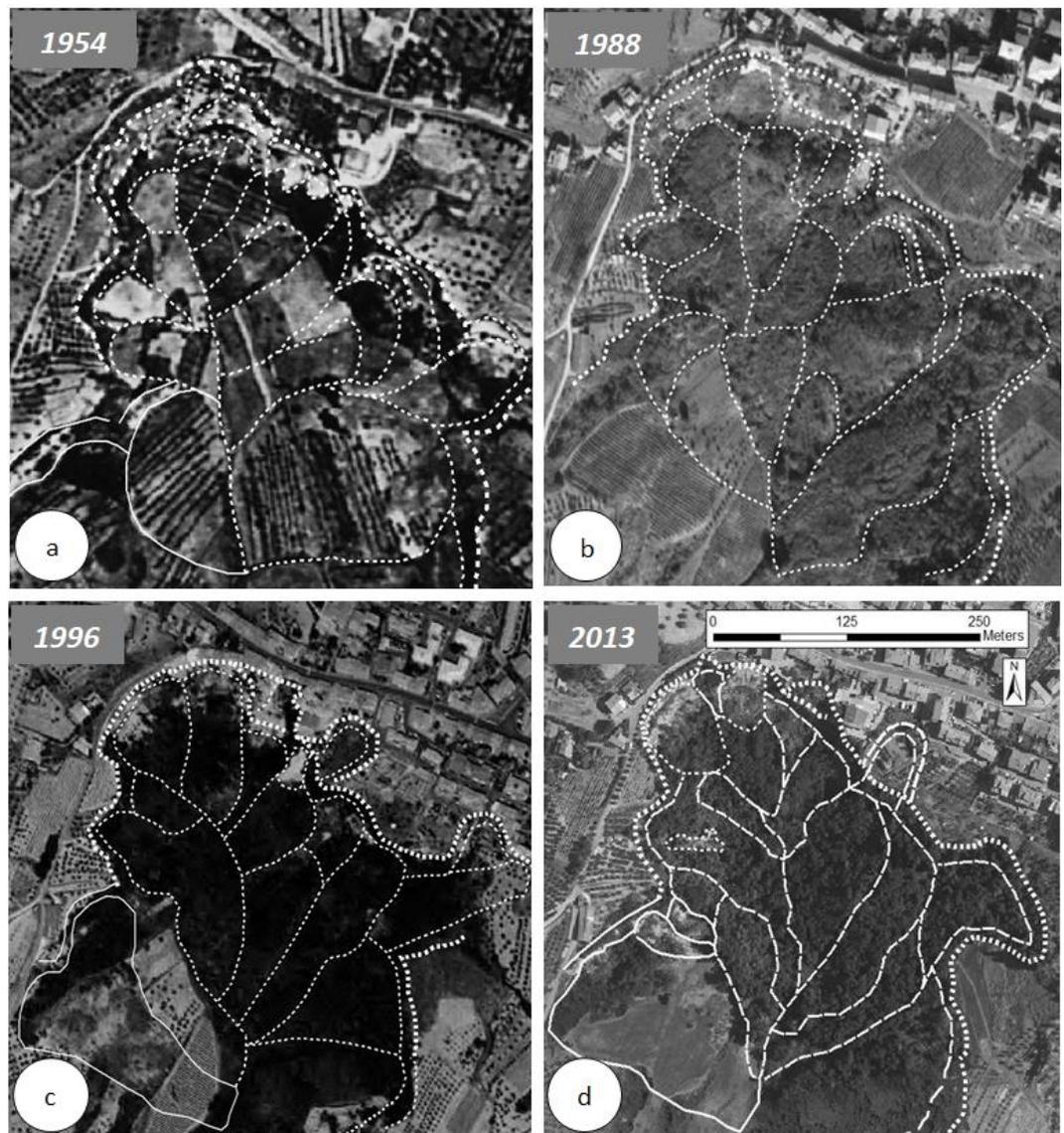


Fig. 4.14 Ortofoto relative all'analisi multitemporale eseguita sulle frane no. 11-12: (a) 1954, (b) 1988, (c) 1996, (d) 2013. Si distinguono scarpate e corpi di frana attivi (puntinato bianco), scarpate e corpi di frana quiescenti (tratteggio bianco) e limiti associati alle altre frane rilevate (linea continua bianca).

4.2.4 *Frana 13 – Frana del distributore*

Questo movimento è collocato nella periferia NO dell'abitato, lungo la zona di raccordo la strada Provinciale Volterrana e Via Mandorli, e alla testata della valle generata dal Torrente Turbone (Fig.4.10 b).

La frana è di tipo composito e attualmente è costituita da tre corpi principali, ciascuno dotato di una propria scarpata, sebbene quella più evidente e meno degradata sia rappresentata dalla scarpata più orientale. Piccole frane di colamento insistono sul fianco destro della scarpata più orientale, dove peraltro è stato costruito un insediamento abitativo tra il 2003 e il 2007. Il muro perimetrale che borda il terreno delle nuove abitazioni ha subito di recente uno scalzamento al piede che ha portando a giorno il cordolo in testa che unisce la palificata in cemento armato (Fig. 4.15 a). Le scarpate sono collocate ad una quota media di ~ 230m ed hanno un'altezza compresa tra 5 e 10m. Il rimodellamento antropico di questi settori (lavorazioni agricole e urbanizzazione recente) ha progressivamente ridotto le evidenze associate a tali lineamenti. I danni maggiori indotti da queste frane sono stati rilevati nel retro della stazione Agip, dove si è resa necessaria la costruzione di un muro di contenimento al fine di prevenire l'erosione al piede delle fondamenta in cemento armato della struttura e dell'autolavaggio. Quest'ultimo è stato comunque smantellato a seguito di gravi danneggiamenti riportati (Fig. 4.15 b, c).

I due corpi di frana orientali sono lunghi ~300m e ricoprono un'areale di oltre 36000km². Le loro scarpate sono piuttosto degradate e anche il versante mostra un profilo più regolare. Il movimento più orientale, invece, è collocato proprio al di sotto della Stazione Agip, ha una lunghezza di 200m e ricopre un'area di 20000 m². Lungo il fianco orientale sono distinguibili una serie di piccole scarpate, "fresche" e dunque prive di vegetazione, che marcano i limiti del settore in frana.



Fig. 4.15 (a) Muro perimetrale del nuovo agglomerato insediativo costruito tra 2003 e 2007 con evidenziato il settore il cui i processi erosivi e gravitativi hanno portato alla luce la testata della palificata in cemento armato, (b,c) danni indotti sull'autolavaggio dall'arretramento della scarpata principale.

Nel 1954 l'area della frana era interamente coltivata. Via Mandorli, così come alcuni limiti di campo, erano parzialmente deformati ed ondulati (Fig. 4.16 a). Le scarpate di frana erano prossime ai margini stradali anche se poco visibile poiché mascherate dagli alberi. Blande ondulazioni erano visibili sui corpi di frana, sia perché rimodellate dalla lavorazione agricola, sia perché le dinamiche in atto erano probabilmente molto lente e non erano in grado di generare evidenze nette. I filari di piante esistenti nella parte medio-alta di versante, infatti, risultavano appena deformati. Riguardo al movimento più orientale, nonché il più dinamico, la porzione più attiva del movimento era proprio quella sommitale, dove erano riconoscibili scarpate minori legate alla riattivazione del movimento principale.

Nel 1988 parte della zona di scarpata viene urbanizzata. Le frane più occidentali erano quiescenti e solamente alla base del versante si osservavano blande ondulazioni. Movimenti continui erano presenti nei settori orientali dove l'allargamento del corpo centrale aveva inglobato parte del movimento orientale. Le parti distali dei corpi di frana, caratterizzate da movimenti continuativi, erano lasciate a bosco.

Nel 1996 le scarpate dei due movimenti occidentali erano mascherate dagli edifici e comunque, i corpi di frana non manifestavano segni di dinamiche in atto. La presenza poi di una fitta rete di arbusti impedisce ulteriori considerazioni su questi corpi di frana. I settori centrali del corpo orientale, tuttavia, mostravano blande ondulazioni, riconducibili a movimenti in atto.

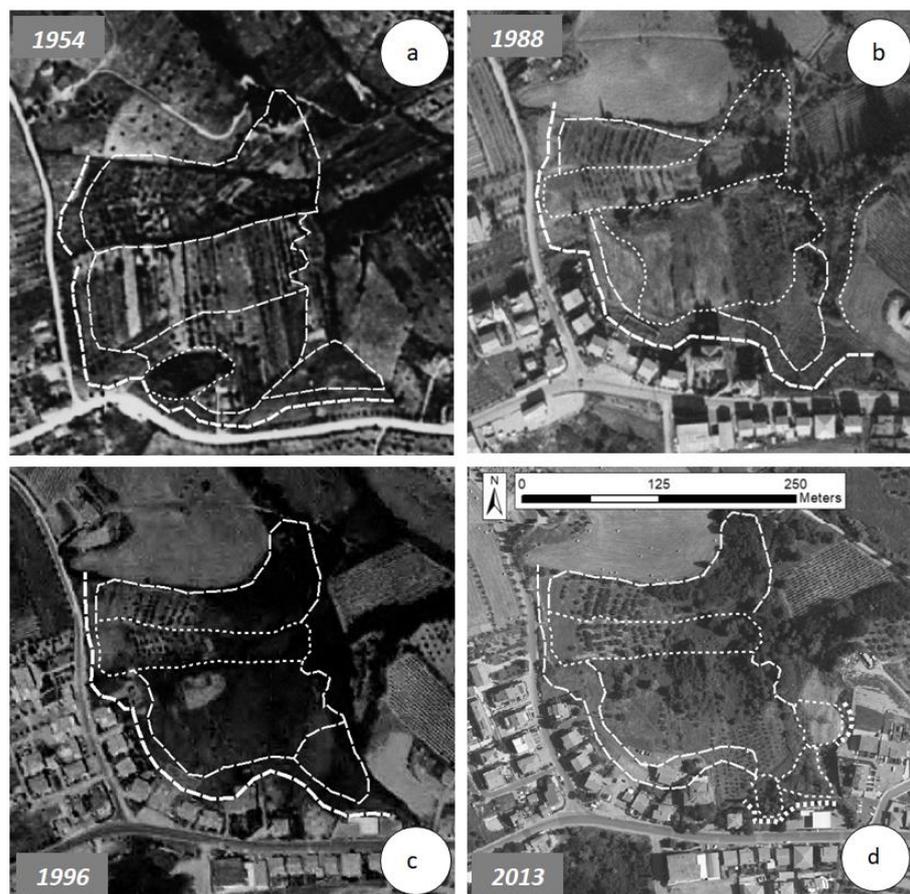


Fig. 4.16 Ortofoto relative all'analisi multitemporale eseguita sulla frana no. 13: (a) 1954, (b) 1988, (c) 1996, (d) 2013. Si distinguono scarpate e corpi di frana attivi (puntinato bianco), scarpate e corpi di frana quiescenti (tratteggio bianco) e limiti associati alle altre frane rilevate (linea continua bianca).

4.1.5 Considerazioni finali

Nella Tab.4.2 viene riportata l'interpretazione finale dedotta per i movimenti oggetto di analisi multitemporale. In definitiva tutti i movimenti sono stati classificati come attivi di secondo livello. Questa considerazione nasce dal fatto che lo stato di attività di movimento complessi e compositi tende a non essere uniforme sui tutti i corpi di frana. I movimenti infatti possono riattivarsi solo in parte, senza coinvolgere la totalità il corpo di frana e senza necessariamente raggiungere la profondità dell'eventuale superficie di scivolamento. Tuttavia, data la presenza di continue deformazioni ed evidenze di attività osservate per queste frane, si è scelto cautelativamente di classificare i movimenti gravitativi come attivi dagli anni 50'.

Una considerazione generale, valida per tutte le frane analizzate, riguarda proprio la loro distribuzione di attività, retrogressiva, che coinvolge progressivamente quasi tutti i settori posti in prossimità della testata del movimento. Gli anni di maggior attività sono quelli compresi nell'intervallo 1954 - 1988, mentre nei periodi successivi si assiste ad una generale attenuazione della dinamicità delle frane. Recentemente, durante la fase di rilevamento, si sono osservati piccole frane di colamento che si sono impostate al di sopra di movimenti più profondi. Sebbene le aree più dinamiche siano proprio quelle collocate nella zona di testata del movimento, i relativi corpi di frana non mostrano variazioni significative del loro areale nell'intervallo temporale analizzato. Va sottolineato come la presenza di una fitta vegetazione sia arbustiva che boscosa abbia in parte mascherato alcune delle tracce di attività. Molte aree che negli anni 50' sono state coinvolte in movimenti gravitativi, negli anni successivi sono state progressivamente abbandonate e lasciate o incolte o a bosco. L'uso del suolo è cambiato notevolmente dagli anni 50' ad oggi, anche a seguito della crescita e sviluppo di tecniche meccanizzate per la lavorazione del terreno.

Frana no.	Tipo movimento	Movimento dominante	L/W	Spessore stimato	Corpo di frana			Stato di attività	Scarpata principale		
					L (m)	W (m)	Area (m ²)		L (m)	H (m)	Direzione
1	Complesso	Colamento	2	10-20	650	380	173000	Attiva II livello	750	>10	E-W
2	Scivolamento	Scivolamento	1,2	10-20	400	340	110600	Attiva II livello	260	>10	SE-NW
3	Complesso	Scivolamento	1,5	10-20	320	210	54000	Attiva II livello	160	>10	NE-SW
4	Scivolamento	Scivolamento	1,9	10-20	560	300	130000	Attiva II livello	700	>10	N-S
5	Complesso	Scivolamento	1,7	10-20	420	190	86000	Attiva II livello	340	>10	WNW-ESE
6	Complesso	Scivolamento	2,4	10-20	500	210	91000	Attiva II livello	400	>10	E-W
7	Complesso	Colamento	2,9	10-20	500	380	113400	Attiva II livello	1200	>10	E-W
8	Colamento	Colamento	2,8	10-20	475	170	70400	Attiva II livello	500	>10	NE-SW
9	Colamento	Colamento	1,6	10-20	155	100	13000	Attiva II livello	350	>10	NW-SE
10	Colamento	Colamento	3,3	5-10	300	90	18000	Attiva II livello	230	5-10	NW-SE
11	Complesso	Colamento	1,7	20-30	300	180	52000	Attiva II livello	300	>10	NW-SE
12	Complesso	Scivolamento	2	10-20	300	150	33000	Attiva II livello	360	>10	E-W
13	Complesso	Colamento	2	5-10	300	250	57000	Attiva II livello	390	5-10	WNW-ESE
14	Colamento	Colamento	2,2	10-20	200	265	35000	Attiva II livello	350	>10	W-E

Tabella 4.2 Caratteristiche salienti dei movimenti franosi oggetto di analisi multitemporale (L- lunghezza, W - larghezza, L/W - rapporto lunghezza/larghezza, H - altezza).

Inoltre, sono state ipotizzate delle sezioni attraverso i corpi di frana, che consentono di supporre l'andamento in profondità delle superfici di rottura (Fig.4.17 - Per ubicazione delle sezioni vedi Fig. 4.10).

La banca dati geologica disponibile sul sito della Regione Toscana (<http://www.regione.toscana.it/-/banche-dati-sottosuolo>), che costituisce l'archivio delle indagini di sottosuolo a scala regionale, purtroppo non presenta indagini realizzate nella zona d'interesse. In tutto il territorio comunale di Montespertoli è presente un unico sondaggio di natura geotermica (SGT - sorgente geotermica - 28000607), posto circa 3 km a nord dell'abitato di Montespertoli. Tale prova puntuale non consente la ricostruzione dell'assetto stratigrafico inerente all'area di studio. Perciò al fine di realizzare delle sezioni verosimili per ciascuna frana sono stati utilizzati sia i dati ottenuti durante il rilevamento di campagna (osservazioni di natura geologica e geomorfologica relative all'assetto stratigrafico e giacitura degli strati e alle altezze delle scarpate principali e secondarie), sia le informazioni presenti in indagini e relazioni geologiche pregresse, realizzate durante i lavori di consolidamento e messa in sicurezza dei settori, prevalentemente, meridionali dell'abitato (loc.La Fornace, loc.Cafaggio, loc.Il Gabbiano e loc.Lavatoio).

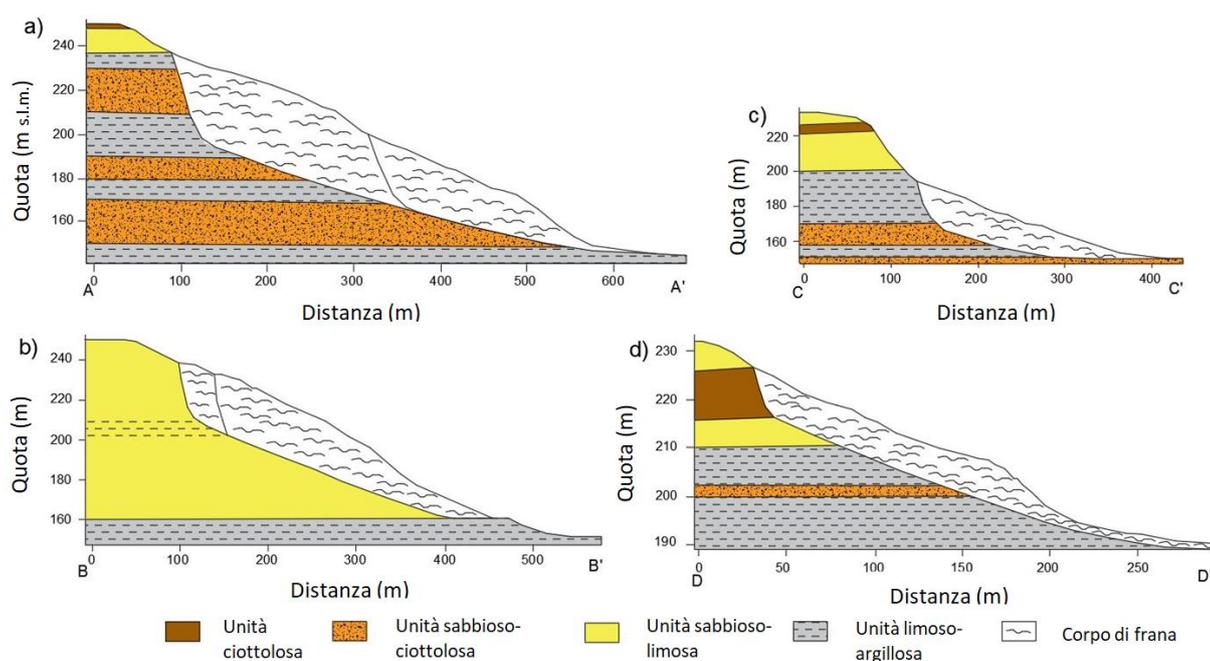


Fig. 4.17 Sezioni ipotetiche delle frane no. 4(a), 7(b), 12(c) e 13(d).

Sintetizzando dunque le considerazioni relative ai quattro movimenti gravitativi descritti in precedenza è possibile dire che:

- La frana no. 4 è un movimento complesso composto da uno scivolamento di terra con una superficie di scivolamento profonda (~20m). Al di sopra del corpo principale si sono poi impostati colamenti di terra più superficiali.

- b) La frana no. 7 è una frana complessa costituita da due corpi principali: quello orientale è uno scivolamento rotazionale che evolve in colamento di terra, mentre quello occidentale, più piccolo, è prevalentemente una colata di terra. La superficie di scivolamento sarebbe presumibilmente all' interno di un interstrato argilloso intercalato nell'unità sabbioso-limosa.
- c) Le frane no. 11-12 sono frane composite che consistono in diversi movimenti complessi che si sono originati dalla coalescenza di scivolamenti rotazionali e traslativi che evolvono in colamenti di terra. Il corpo della frana 12 ha uno spessore ipotizzato compreso tra 20 e 30 m.
- d) La frana no. 13 è una frana composta composta da frane complesse che hanno origine come scivolamenti di terra ed evolvono come colamenti di terra.

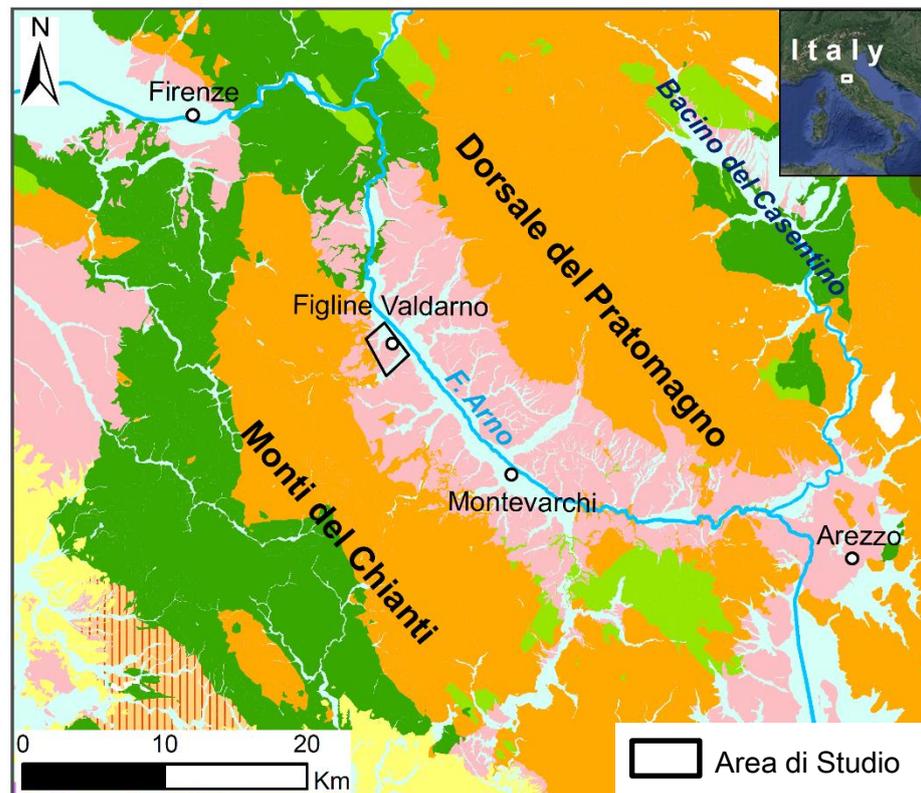
4.2 Figline

4.2.1 Inquadramento geologico



Fig.4.18 Inquadramento geografico dell'area di studio di Figline Valdarno.

La città di Figline Valdarno (FI; Fig.4.18) è situata 30 km a SE di Firenze, all'interno del bacino del Valdarno Superiore, e ricade nel foglio 276 (Mappa geologica d'Italia, scala 1:50.000) all'interno del foglio in scala 1:10.000 no. 276140. Questo bacino si sviluppa per 35 km in lunghezza e 15 km in larghezza in direzione NO-SE. Il bacino si sarebbe impostato su di una depressione asimmetrica, detta *semi-graben*, bordata dalla Dorsale del Pratomagno a NE, che separa il bacino del Valdarno Superiore dal Bacino del Casentino, e dai Monti del Chianti a SO (Merla & Abbate 1967, Magi 1992). La struttura asimmetrica del bacino sarebbe caratterizzata da un margine nord-orientale più acclive rispetto a quello sud-occidentale. Il suo basamento è costituito dalle arenarie oligoceniche del Macigno e dalle arenarie torbiditiche mioceniche appartenenti all'Unità Cervarola-Falterona (Albianelli et al. 1995). Il bacino è colmato da depositi lacustri, fluviali e di conoide alluvionale, di un'età compresa fra Pliocene Superiore e Pleistocene medio, disposti con assetto stratigrafico orizzontale o sub-orizzontale (Fig.4.19).



Legenda

Depositi Plio-Quaternari

- Depositi alluvionali (Pleistocene Sup.- Olocene)
- Depositi continentali (Pliocene Inf. - Pleistocene Inf.)
- Depositi marini (Pliocene Inf.- Pleistocene Inf.)

Depositi pre-pliocenici

- Depositi fluvio-lacustri (Tortoniano-Messiniano)
- Successione Epiligure
- Dominio Ligure
- Dominio sub-Ligure
- Dominio Toscano

Fig.4.19 Schema geologico dell'area di studio di Figline Valdarno.

Il riempimento del bacino è stato portato a termine attraverso tre fasi deposizionali distinte (Sestini, 1936; Merla & Abbate, 1967) separate tra loro da superfici erosive, discordanze angolari e *hiatus* deposizionali (Billi et al. 1991; Martini & Sagri, 1993). La prima fase si è sviluppata nei margini sud-occidentali del bacino ed ha portato alla deposizione di sedimenti fluvio-lacustri della Successione di Castelnuovo (conglomerati e sabbie di conoide alluvionale sormontate da argille palustri, con spessi livelli di lignite). In seguito il bacino viene colmato da sabbie fluviali (Sabbie di San Donato) le quali sono sormontate da almeno 30 m di sabbie biancastre di origine eolica (Rena Bianca), ampiamente descritte da Magi & Sagri (1996) e attualmente attribuite alla sovrastante sequenza di Montevarchi.

La seconda fase ha interessato la porzione centrale del bacino ed ha portato alla deposizione di depositi lacustri e palustri, seguiti dalla deposizione di sedimenti di conoide alluvionale nelle zone marginali (Billi et al., 1991). I depositi lacustri e palustri sono rappresentati da alternanze di sabbie e limi e sono stati raggruppati all'interno della Successione di Montevarchi, per uno spessore totale di 80-90m. Invece, i depositi alluvionali sono caratterizzati da ciottolami grossolani che passano a sabbie e ciottoli di canale.

La terza ed ultima fase deposizionale conduce al definitivo riempimento del bacino e il contatto con i sedimenti sottostanti è marcato da un evento erosivo. Nella zona assiale del bacino affiorano i sedimenti di facies fluviale appartenenti alla Successione di Monticello, mentre al margine SE, in prossimità della Dorsale del Pratomagno, affiorano i sedimenti di conoide alluvionale della Successione di Ciuffenna.

I sedimenti plio-pleistocenici che compongono il substrato dell'area di studio di Figline Valdarno sono caratterizzati da un assetto strutturale prevalentemente orizzontale, talvolta blandamente inclinato verso nord. Nell'area di studio affiorano, dalla base alla sommità:

- a) Unità Cervarola-Falterona:
 - **Membro di Montalto** (Miocene inferiore): si tratta prevalentemente di arenarie, marne, argilliti e siltiti.
- b) Unità della falda Toscana
Successione Monti del Chianti (Oligocene)
 - **Macigno**: arenarie torbiditiche quarzoso-feldspatiche spesso gradate, a granulometria da media a grossolana. Nella parte superiore risultano relativamente comuni intercalazioni di calciliti marnose/marne calcaree e di argilliti nerastre;

- **Macigno b:** intercalazioni argillitico-marnoso-calcareo-arenacea stratificata generalmente poco tettonizzata (olistostroma superiore).
- c) Sintema del Valdarno:
- Subsintema di Montevarchi (Pliocene superiore - Pleistocene inferiore)
- **Sabbie di Palazzetto:** sabbie e sabbie limose giallastre a stratificazione tabulare con locali intercalazioni di limi sabbioso-argillosi grigi e di ghiaie ad elementi prevalentemente arenacei. Sono presenti paleosuoli;
 - **Sabbie di Borro Cave:** alternanza irregolare di sabbie giallastre, sabbie limose e limi sabbioso-argillosi grigi o grigio-giallastri con intercalazioni di banchi di argille limoso-sabbiose, grigio azzurrognole e di lenti di ciottolami ad elementi arenacei;
 - **Ciottolami e sabbie di C. la Querce:** ciottolami giallastri-ocracei ad elementi arenacei in banchi e lenti con irregolari intercalazioni di sabbie e limi di colore giallastro e grigio. Locali paleosuoli.
- Subsintema di Monticello-Ciuffenna (Pleistocene medio)
- **Sabbie di Levane:** sabbie fluviali quarzoso feldspatiche di colore giallo chiaro o grigiastro e ciottoli silicei talora arenacei ed intercalazioni di livelli limosi.
 - **Sabbie di La Loccaia:** sabbie e ghiaie con clasti prevalentemente arenacei con intercalazioni di limi sabbiosi bruno-rossastri spesso pedogenizzati;
 - **Limi di Latereto e di Pian di Tegna:** limi sabbioso-argillosi bruno-giallastri e rossastri, di regola pedogenizzati, con intercalazioni di sabbie e sabbie limose e di ciottolami ad elementi arenacei;
- d) **Depositi alluvionali terrazzati:** sedimenti alluvionali terrazzati dell'Arno e dei suoi affluenti, originati durante l'ultima fase di evoluzione del bacino valdarnese. I terrazzi alluvionali sono litologicamente costituiti da ciottolami, sabbie e limi, organizzati in corpi tabulari tra loro interdigitati (Pleistocene superiore-Olocene);
- e) **Depositi alluvionali recenti:** Sabbie, limi e ghiaie; depositi prevalentemente limoso - sabbiosi per le piane alluvionali minori (Olocene).

Il rilevamento geologico condotto in campagna ha permesso di individuare le unità litologiche e gli elementi strutturali caratteristici dell'area. Sono state individuate sei unità litologiche principali create non in base al sintema di appartenenza o all'età del deposito, ma accorpando sotto una stessa unità tutte quelle litofacies caratterizzate da simile granulometria

(Tab. 4.3). Anche i depositi alluvionali, così come quelli terrazzati e quelli eluvio-colluviali, sono stati riportati nella cartografia geomorfologica come unità a sé stanti.

Unità Litologiche	Formazioni Geologiche, Sintemi e sub-Sintemi
Ciottoli e sabbie	Ciottolami e sabbie di C.la Querce
Sabbie e ciottoli	Sabbie di la Loccaia (litofacies sabbioso-ciottolosa) Sabbie di Levane
Sabbie, silt, limi	Sabbie di Palazzetto (litofacies sabbioso-siltosa) Sabbie di Borro Cave
Silt, limi e argille	Limi di Latereto and Pian di Tegna (litofacies limoso-argillosa)
Arenarie e marne	Membro di Montalto
Marne, peliti e arenarie	Macigno b

Tab 4.3 Unità litologiche riconosciute e raggruppate durante la fase di rilevamento geologico.

Durante il rilevamento, nelle aree dove affioravano, è stato possibile osservare i caratteri stratigrafici di alcuni litotipi. Un affioramento è collocato ad ovest dell'abitato, nei pressi di Loc. I Cappuccini, lungo la strada sterrata che conduce a sud verso il Castellaccio (coordinate google earth: 43°36'39.32"N -11°27'54.93"E). Il versante, particolarmente acclive in questo settore, ospita una serie di terrazzamenti creati appositamente per la coltivazione degli olivi. L'affioramento è stato messo in evidenza lungo la scarpata che marca il gradino superiore dei terrazzi. Si tratta di sabbie gialle, con abbondanti ghiaie e ciottoli arenacei, appartenenti alle Sabbie di Levane, del sub-sintema di Monticello Ciuffenna (Fig.4.20). Il materiale che compone l'affioramento si presenta caotico, poco o per nulla cementato e i singoli clasti di forma sub-arrotondata, talvolta sub-angolare, sono facilmente asportabili con l'uso della mano. La scarsa cementazione dei depositi è una caratteristica comune dei terreni di Figline: gran parte dei depositi, infatti, non è litificata e questo facilita i processi di degradazione.



Fig. 4.20 Affioramento di sabbie e ciottoli (Sabbie di Levane) lungo Via San Romolo, nei pressi di Loc. I Cappuccini.

4.2.2 Inquadramento geomorfologico

La maggior parte della città di Figline si sviluppa lungo la piana alluvionale del fiume Arno. Il settore analizzato in questo lavoro di tesi è però solamente quello occidentale, situato in sinistra idrografica del fiume principale. Il settore nord-orientale dell'area di studio comprende le pianure alluvionali del fiume Arno, e dei suoi affluenti Borro di Ponterosso e Borro di Cesto; in questi settori è la dinamica fluviale a prevalere nettamente tra gli agenti morfogenetici.

La parte sud-occidentale del paese, invece, è collocata su di un crinale il cui andamento, piuttosto sinuoso, è dovuto sia a processi di erosione fluviale sia a fenomeni gravitativi. La morfologia che ne consegue è comparabile con quella di Montespertoli. La dorsale raggiunge quote massime di 240 m s.l.m. ed è costituita da sedimenti continentali e di transizione plio-pleistocenici. Il margine del crinale è marcato da superfici strutturali coincidenti con il piano stratigrafico superiore di un banco di sedimenti maggiormente resistente composto dai Limi di Latereto e Pian di Tegna e dalle Sabbie di Levane. I versanti che bordano il crinale sono particolarmente acclivi e vengono scolpiti da ripide scarpate sub-verticali, in corrispondenza delle quali hanno origine i principali fenomeni gravitativi dell'area di studio. Tali scarpate, modellate su litotipi prevalentemente sabbiosi-ghiaiosi-ciottolosi, mantengono spessori inferiori ai 10 m. La morfologia della zona è dunque molto influenzata dall'assetto strutturale: la giacitura degli strati è prevalentemente orizzontale tranne limitati settori che risultano blandamente inclinati (circa 5°) verso nord.

L'idrografia di Figline è caratterizzata da un reticolo dendritico (Fig.4.21). Il fiume principale è l'Arno, che scorre ad est dell'area di studio in direzione SE-NO. Dai rilievi situati nella zona ovest di Figline Valdarno, si dipartono una serie di affluenti di sinistra orografica del Fiume Arno che scorrono in direzione SO-NE. Procedendo da nord a sud si trova dapprima il Borro di Fracassi, poi il Fosso della Granchia e il Borro della Golfonaia che sono tributari rispettivamente sinistro e destro del Borro di Ponterosso, e più a sud il Borro del Cesto che scorre in direzione SO-NE. Inoltre in sinistra idrografica del Fiume Arno e del Borro del Cesto si individuano vari ordini di terrazzi alluvionali, solitamente bordati verso valle da scarpate (orli di terrazzo), distinguibili per la loro morfologia pianeggiante e l'abbondante presenza di ghiaie e ciottoli sub-arrotondati e sub-angolari (Fig.4.22).

La zona di fondovalle è spesso interessata da fenomeni di allagamento ed esondazione, specialmente quella limitrofa al Fosso di Ponterosso per il quale sono stati eseguiti interventi inerenti la rettificazione dell'alveo e la costruzione di argini artificiali (Fig.4.23).

Infine, nella zona di C. Francio, a sud dell'abitato di Figline Valdarno, è presente anche una conoide alluvionale che si è depositata allo sbocco di una piccola valle sulla piana alluvionale del Borro del Cesto.

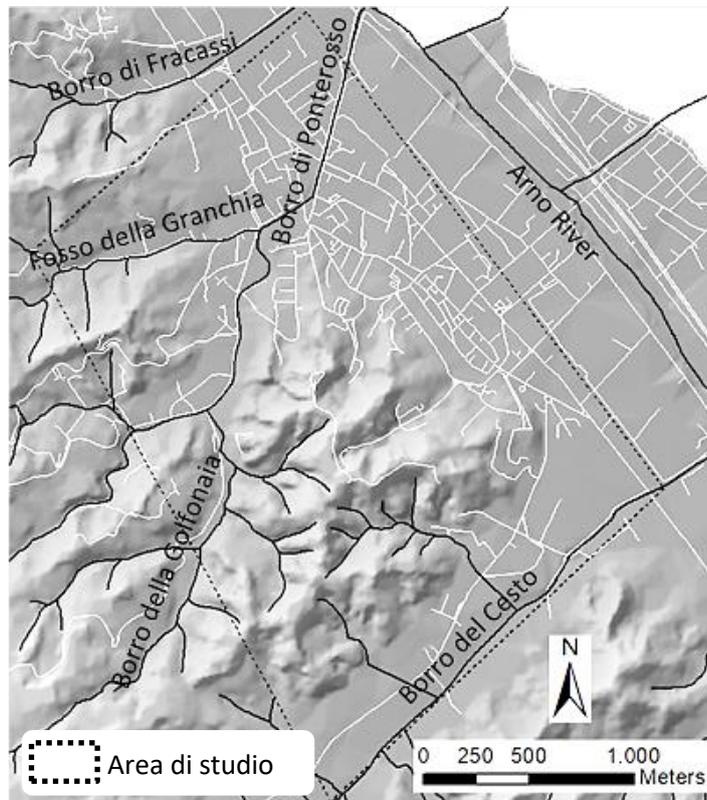


Fig.4.21 Reticolo idrografico (linee nere) e strade principali (linee bianche) dell'area studio di Figline Valdarno.



Fig.4.22 Terrazzo fluviale nei pressi del Cimitero "Scampata" in sinistra orografica di Borro del Cesto, e particolare dei ciottoli caratteristici.

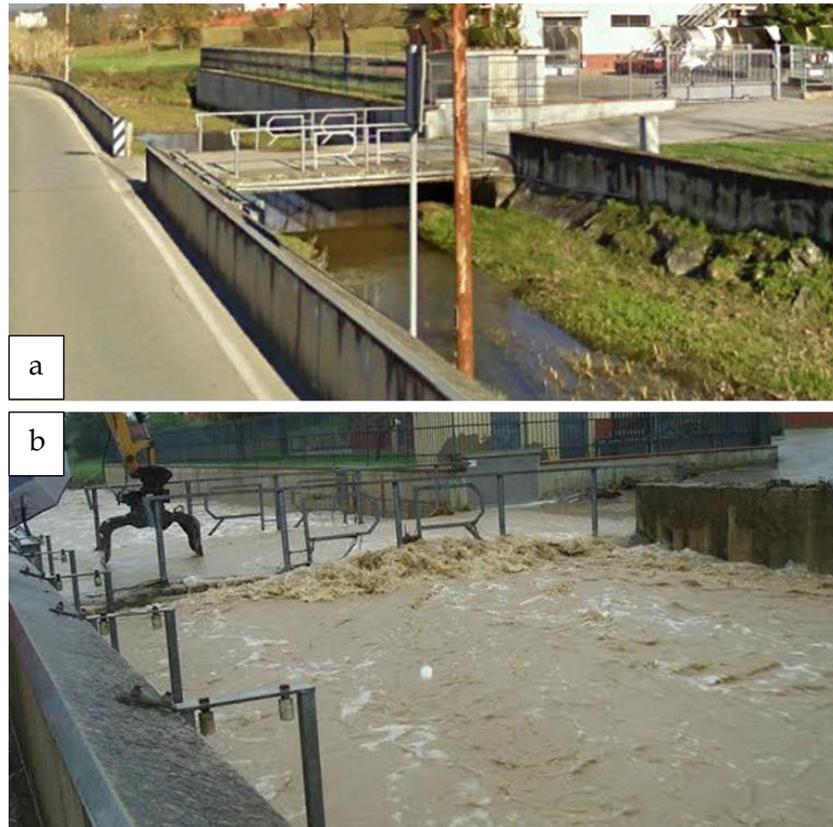


Fig.4.23 Argini artificiali lungo il Borro di Ponterosso: (a) in condizioni normali, (b) durante una piena.

4.2.3 Caratteristiche delle frane rilevate

Il rilevamento di campagna ha consentito l'osservazione dettagliata dei movimenti gravitativi caratterizzanti i territori limitrofi all'abitato di Figline Valdarno. Inoltre un'analisi più approfondita ha consentito di fare considerazioni sullo stato di attività ed evoluzione di alcuni dei movimenti che interessano direttamente l'abitato, le sue strade e i suoi edifici. Circa 50 frane sono state riconosciute e mappate in un'area di circa 10 Km². La maggior parte sono frane singole, con un unico corpo di frana (Fig. 4.24) anche se non mancano frane complesse in cui più movimenti gravitativi sono avvenuti in sequenza (Cruden & Lan 2015).

Venendo alle principali tipologie di movimenti gravitativi riconosciuti nel territorio di Figline, questi possono essere così suddivisi:

- Colamenti (*flows e debris flows* secondo Varnes 1978, Hutchinson, 1978, Cruden e Varnes 1996; or *debris flowslide* secondo Hungr et al. 2014);
- Scivolamenti (*rotational/translational slides* secondo la classificazione di Cruden e Varnes 1996 o *rotational slips e translational slides* secondo quella di Hutchinson 1988);

- Movimenti complessi (*complex landslides* secondo Cruden e Varnes 1996) che sono generalmente costituiti da scivolamenti che evolvono in colamento);

Altri processi relativi a fenomeni gravitativi sono da ricondurre a sporadici fenomeni di soliflusso che interessano la coltre pedogenetica più superficiale.

Secondo la classificazione di Hungr et al. (2014), la maggior parte dei movimenti può essere definita come “*debris/earth/sand flows*”, ovvero come colamenti di detrito e di terreni prevalentemente sabbiosi, la cui velocità di movimento può essere anche rapida o molto rapida.

La forma in pianta di queste frane è riportata in Fig.4.24.

Le frane per colamento, e quelle di tipo *debris flow*, sono collocate sui versanti moderatamente acclivi, e le scarpate dei movimenti si impostano in corrispondenza delle litologie sabbioso limose presenti sul margine della scarpata strutturale che borda il crinale, ad una quota media di 210m s.l.m.. In generale hanno una forma piuttosto allungata (Fig. 4.24, frane n° 5, 7, 10, 11, 12, 13, 14) ma non mobilitano grandi volumi di terreno; la porzione di *run-off*/accumulo

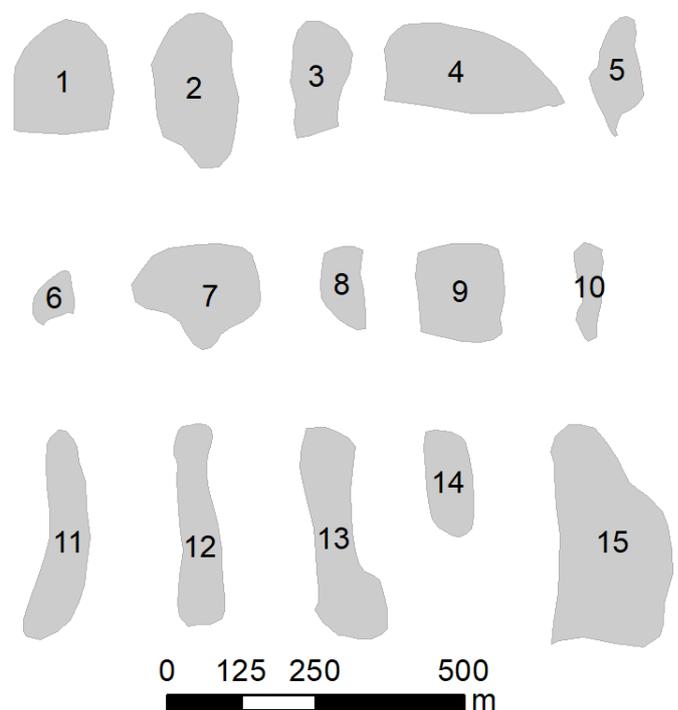


Fig. 4.24 Proiezione in pianta dei corpi di frana oggetto di analisi multitemporale.

che di solito raggiungere il fondovalle è spesso assente. La causa è da ricercare sia nell’erosione operata da piccoli torrenti effimeri generati durante abbondanti precipitazioni, sia nelle opere di risistemazione e smantellamento messe in atto dai contadini stessi nei casi in cui i fenomeni franosi hanno raggiunto i terreni coltivati.

Questi movimenti sono caratterizzati da un comportamento retrogressivo la cui attività è resa ben evidente, nelle zone di scarpata di frana, da settori privi di vegetazione (Fig.4.25). I movimenti dormienti sono, invece, di più difficile interpretazione e la geometria originale del

corpo di frana è parzialmente mascherata e rimodellata dalla crescita della vegetazione e fenomeni antropici.



Fig. 4.25 Zone di scarpata prive di vegetazione attivate e/o riattivate in concomitanza del rilevamento geomorfologico (anno 2016).

I movimenti per scivolamento, in generale, hanno una forma meno allungata dei colamenti (Fig.4.24. no. 1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 15) Queste frane hanno una scarpata principale collocata in prossimità del crinale che può raggiungere gli oltre 20m di altezza (spessore stimato durante la fase di rilevamento a partire dalla quota della scarpata principale). Come osservato anche per l'area studio di Montespertoli, le scarpate si presentano con andamento verticale o sub-verticale, nonostante un assetto stratigrafico prevalentemente a strati

orizzontali, suggerendo dunque che l'eventuale piano di scivolamento possa listricarsi al contatto di variazioni litologiche.

Tali scarpate, talvolta, giungono a ledere in modo importante strade e edifici, come si può osservare in Fig.4.26 dove il muretto che borda il giardino dell'abitazione è stato divelto dall'attività del movimento franoso e, nel corso degli ultimi due anni, è crollato definitivamente, a seguito dell'arretramento della scarpata.

L'estensione dei corpi di frana, di solito abbastanza ridotta, può variare da poche decine a qualche migliaio di m². Le evidenze associate ai movimenti di scivolamento rotazionale sono costituita da trincee, contropendenze e contro-scarpate, diffuse nei settori dell'abitato esposti a N e NE. Trincee e contropendenze sono in parte smussate dalle lavorazioni agricole.



Fig. 4.26 Muro perimetrale di un giardino nei pressi di Loc. I Cappuccini: (a) foto scattata nel 2014 dove il muro appare fratturato e spanciato, (b) foto scattata nel 2016 dove il muro perimetrale è definitivamente crollato e la scarpata del movimento è arretrata all'interno del giardino.

Nell'area oggetto di studio le frane complesse (Varnes 1978; Cruden and Varnes 1996; Cruden e Lan 2015) sono caratterizzate da un settore in scivolamento, quello a ridosso dell'area di corona, e tendono poi ad evolvere in scivolamento nei settori distali. La porzione in colamento, ubicata nelle vicinanze del fondovalle, è caratterizzata da ondulazioni e rigonfiamenti del terreno.

Stimando il rapporto tra lunghezza e larghezza (L/W) di ciascun corpo di frana è possibile osservare che quando il rapporto è minore di 2 i movimenti sono solitamente degli scivolamenti, mentre quando il rapporto è maggiore di 2 (generalmente intorno a 5 nell'area di studio di Figline, vedi Tab.4.4) i movimenti sono frane per colamento (frane piuttosto allungate lungo la direzione di movimento). Infine, il tasso di movimento relativo alle frane per scivolamento che bordano il perimetro dell'abitato sembra essere da lento a molto lento (da 1,6 m/anno a 16 mm/anno; WP/WLI 1995, Cruden e Varnes 1996, Hungr et al. 2014) mentre quello relativo ai movimenti per *debris flow* e colamento, indotti da precipitazioni

intense, può essere da rapido a estremamente rapido (da 1,8 m/h a 5 m/s; WP/WLI 1995, Cruden e Varnes 1996, Hungr et al. 2014).

Per quanto riguarda l'uso del suolo in concomitanza delle frane, negli anni 50' i terreni erano in gran parte coltivati, mentre a partire dal 1988 le aree localizzate sul crinale vengono lasciate a bosco.

Frana no.	Tipo di movimento	L/W	Spessore stimato (m)	Corpo di frana			Stato di attività	Scarpata		Direzione
				L (m)	W (m)	Area (m ²)		L (m)	H (m)	
1	Scivolamento	1,1	5 - 10	190	170	28000	Quiescente I°Livello	180	5 - 10	N-S
2	Scivolamento	2,1	5 - 10	270	130	30000	Quiescente I°Livello	120	<5	O-E
3	Scivolamento	2,2	1 - 5	200	90	16000	Quiescente I°Livello	110	<5	O-E
4	Scivolamento	0,6	5 - 10	150	240	35500	Quiescente I°Livello	140	<5	NE-SO
5	debris-flow	2,9	5 - 10	200	70	11500	Quiescente I°Livello	450	<5	NE-SO
6	Scivolamento	1,0	1 - 5	70	70	4000	Attivo II°Livello	130	<5	NE-SO
7	debris-flow	0,9	5 - 10	190	210	27000	Attivo II°Livello	500	>10	NO-SE
8	Scivolamento	1,9	5 - 10	130	70	8500	Quiescente I°Livello	80	<5	NO-SE
9	Scivolamento	1,1	5 - 10	160	150	23000	Quiescente I°Livello	120	<5	NO-SE
10	debris-flow	5,7	1 - 5	170	30	6000	Quiescente I°Livello	115	<5	NE-SO
11	Colamento	5,3	1 - 5	370	70	24000	Attivo II°Livello	100	<5	N-S
12	Colamento	5,0	5 - 10	350	70	22000	Attivo II°Livello	65	5 - 10	N-S
13	Colamento	5,1	1 - 5	360	70	31000	Quiescente II°Livello	100	<5	N-S
14	Colamento	2,4	1 - 5	190	80	13000	Attivo II°Livello	65	<5	N-S
15	Scivolamento	1,9	10 - 20	370	190	60000	Attivo II°Livello	180	<5	NE-SO

Tabella 4.4 Caratteristiche salienti dei movimenti franosi oggetto di analisi multitemporale (L- lunghezza, W - larghezza, L/W - rapporto lunghezza/larghezza, H – altezza).

4.2.4 Analisi multitemporale

L'analisi multitemporale è stata condotta su un totale di 15 frane collocate in sinistra idrografica del fiume Arno, e ad ovest dell'abitato di Figline (Fig. 4.28). La classificazione dello stato di attività risultate dall'analisi è riportata in Tab.4.4 assieme alle peculiarità di ciascun movimento oggetto di analisi. Come osservato a Montespertoli, le aree interessate dai movimenti gravitativi variano nel corso dei diversi anni. Sono soprattutto le zone collocate in prossimità delle scarpate principali che mostrano tracce di movimenti in atto. Infatti, la storia evolutiva dei dissesti è caratterizzata da progressivi arretramenti della scarpata principale, spesso attraverso delle piccole colate di terra e di fango, che nelle ortofoto assumono l'aspetto

di settori degradati e privi di vegetazione. Questi settori spesso giungono a coinvolgere anche le strade secondarie che collegano i poderi e le abitazioni disseminati lungo il crinale.

Di seguito si riporta la descrizione di alcune delle frane più dinamiche, la cui attività potrebbe danneggiare strade ed edifici.

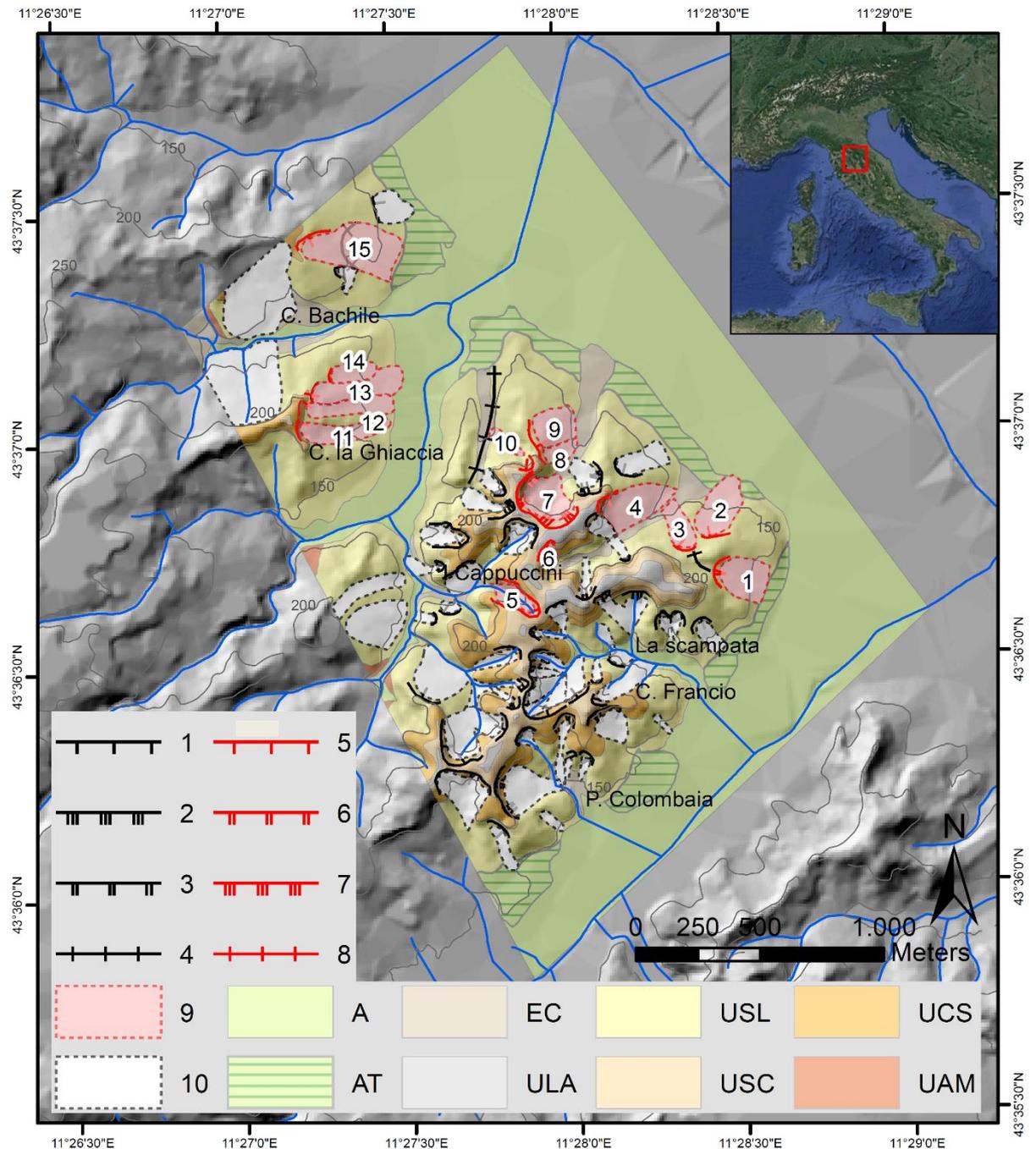


Fig. 4.28 Geologia dell'area di studio. Vengono riportate le frane e le unità litologiche rilevate in campagna. Tra i movimenti gravitativi si sono distinti quelli oggetto di analisi multitemporale (in rosso) da quelli non oggetto di analisi (in nero): (1 e 5) Scarpata di frana < 5 m, (2 e 6) scarpata di frana compresa tra 5-10 m, (3 e 7) scarpata di frana > di 10 m, (4 e 8) trincea; A - depositi alluvionali, AT - depositi alluvionali terrazzati, EC - depositi eluvio-colluviali, ULA - unità limoso-argillosa, USL - unità sabbioso-limosa, USC - unità sabbioso-ciottolosa, UCS - unità ciottoloso-sabbiosa, UAM - unità arenaceo-marnosa. Vengono riportati anche i limiti dei corpi di frana oggetto di analisi multitemporale (9) e quello delle frane non oggetto di analisi multitemporale (10). In blu è riportato il reticolo idrografico.

4.2.4.1 Frane 1, 2, 3, 4

Questi movimenti franosi sono caratterizzati da peculiarità simili. Sono collocati nel margine sud-occidentale dell'agglomerato cittadino, ad Est di Loc. Cappuccini e coinvolgono le vie di Via Papa Giovanni XXIII (Frana 4), Via Luigi Galvani (Frane no. 2-3), e gli edifici ad Ovest di Via Giovanni Verrazzano (Frana no. 1). Tali movimenti sono caratterizzati da delle scarpate principali piuttosto arcuate, ricoperte da una fitta vegetazione arborea, il loro spessore è di ~10 m e non mostrano tracce di attività recente. Si attestano ad una quota di ~180m (frane no.1,2,3) e di ~220-230 m s.l.m (frana no.4). Il corpo di frana 1 ha una lunghezza di 200m, una larghezza di 165m e occupa un'areale di circa 28000m². Il corpo di frana 2 ha una lunghezza di 270m, una larghezza di 130m e occupa un'areale di circa 30000m². Il corpo di frana 3 ha una lunghezza di 190m, una larghezza di 100m e occupa un'areale di circa 16000m². Il corpo di frana 4 ha una lunghezza di 200m, una larghezza di 250m e occupa un'areale di circa 355000m². Gli edifici posti all'interno del corpo di frana, non risultano lesi e non presentano fratture riconducibili ad una qualche dinamica di recente attività. Anche osservando le ortofoto più recenti (2013) non sono visibili ondulazioni nel terreno o aree prive di vegetazione e dunque le frane sembrano essere quiescenti. Solamente una lieve contropendenza nella frana 3 fa ipotizzare la presenza di una trincea o di una crepa trasversale e vista l'estensione dei corpi di frana, l'assenza di evidenze eclatanti sulla superficie e di fratture negli edifici, i movimenti sono stati classificati come degli scivolamenti rotazionali.

Nel 1954 le scarpate principale dei movimenti erano poco o per nulla vegetate, talvolta rimodellate dai lavori agricoli (Fig.4.29a). Ai piedi delle scarpate, si notano campi coltivati sia a seminativo che con filari di piante (vigneti e frutteti). Proprio grazie alla presenza dei lineamenti prodotti dai filari di piante, nella frana 3 è possibile notare delle evidenze di movimento che, seppur blandamente, interessano le aree apicali e mediane del corpo di frana. Nelle frane 1-2-4 la presenza di movimenti in atto è segnalata da lievi ondulazioni, strappi nel manto erboso e aree prive di vegetazione, mentre le strade sterrate ed i limiti di campo non presentano increspature.

Nel 1988 le scarpate di frana sono più vegetate rispetto agli anni precedenti e parte dei corpi di frana sono stati interessati da un'intensa urbanizzazione. Nella frana 1 si nota un'area, al centro del corpo, caratterizzata da intensa erosione superficiale, mentre altre possibili evidenze, nelle frane 2,3 e 4 sono state mascherate quasi totalmente dagli edifici costruiti e dalla vegetazione.

Nel 1996 la scarpata principale dei movimenti è vegetata e si trova nella stessa posizione degli anni precedenti. Nei corpi di frana, possibili movimenti del terreno sono offuscati dalla presenza delle abitazioni. I filari di piante presenti nella porzione sommitale della frana 3 si mostrano interrotti, in concomitanza di una strada sterrata che corre al centro del campo, tuttavia non sono apprezzabili altri tipi di deformazioni.

Le quattro frane, dunque, sono state classificate come scivolamenti quiescenti di primo livello, poiché le uniche evidenze certe di attività sono state osservate nel 1954, mentre dal 1988 all'attuale i movimenti sembrano essersi attenuati o arrestati e dalle ortofoto non risulta nessuna evidenza di una qualche dinamica in atto.

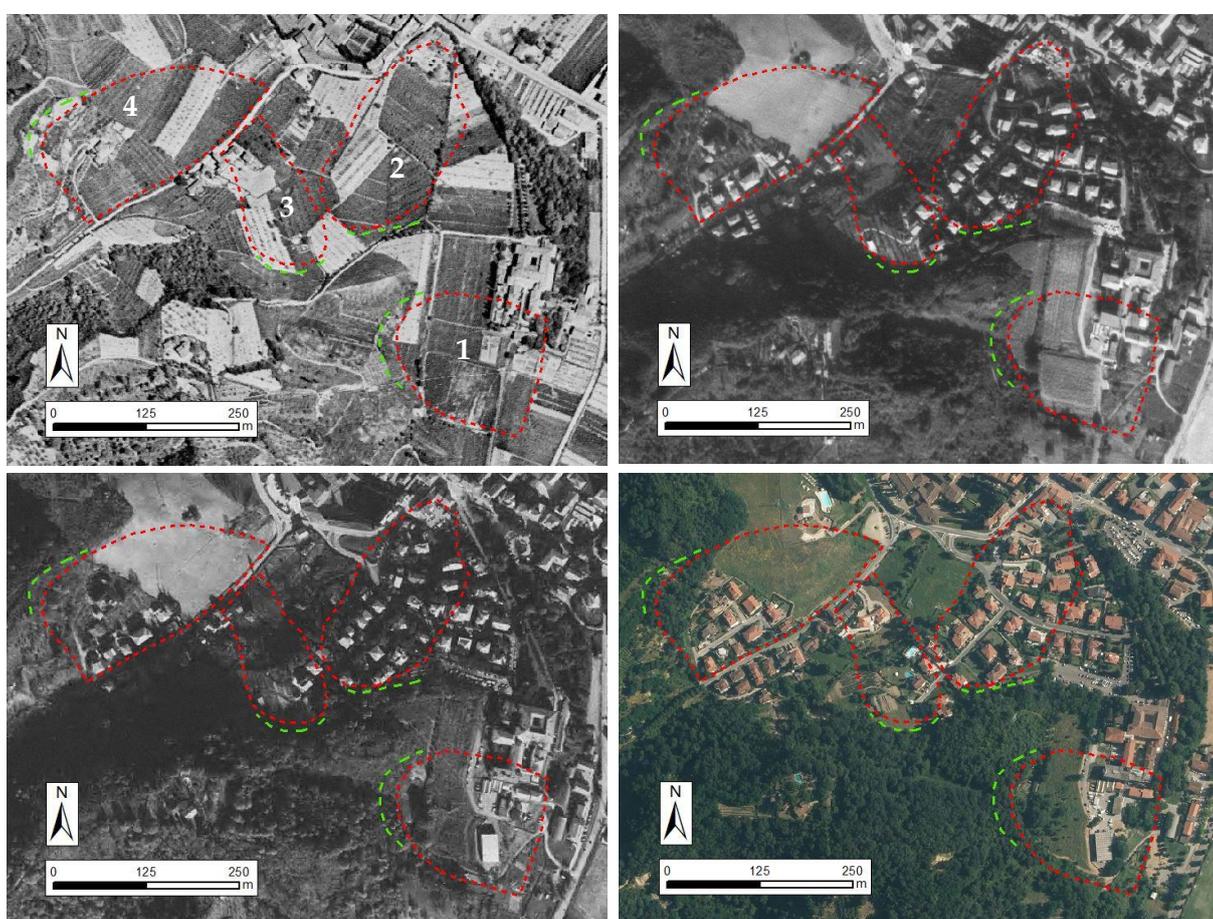


Fig. 4.29 Ortofoto relative all'analisi multitemporale eseguita sulle frane no. 1,2,3,4: 1954, 1988, 1996, 2013. Si distinguono la scarpata principale (tratteggio verde) e il corpo di frana (tratteggio rosso).

4.2.4.2 Frana 11 - Frana di loc. La Ghiaccia

Tale dissesto, una frana per colamento, è ubicato nel settore nord-occidentale del paese, nei pressi di Loc. La Ghiaccia e rischia di coinvolgere una porzione della strada provinciale 16 Chianti-Valdarno. La scarpata principale del movimento ha una forma arcuata, si sviluppa sui

depositi dell'unità sabbioso-siltosa ad una quota di circa 210 m s.l.m. ed è parzialmente vegetata da una coltre di arbusti. Sporadici settori, infatti, appaiono denudati in concomitanza di piccole frane di colamento che si sono sviluppate a spese della corona di frana. Riguardo alla sua estensione ha una lunghezza di ~100m e uno spessore di ~10m.

Il corpo di frana presenta una direzione allungata in direzione da ovest ad est, ha una lunghezza di 370 m ed una larghezza di 70 m, estendendosi sino al settore pianeggiante di raccordo con la piana alluvionale, densamente ricoperto di edifici. Nonostante la limitata estensione, il movimento è stato inserito all'interno delle frane oggetto di analisi multi-temporale, perché minaccia direttamente la SP 16, e con essa i collegamenti stradali verso Dudda e Greve in Chianti. Nella parte alta del versante (Fig.4.30) una serie di piccole crepe arcuate e rigonfiamenti nel terreno marcano l'area caratterizzata da maggiore dinamicità. In particolare, in tempi recenti, sono stati eseguiti dei lavori per la regimazione delle acque superficiali, in modo tale da allontanarle dal corpo di frana.

L'attuale uso del suolo è caratterizzato da piccoli appezzamenti coltivati a vigneto e orti.



Fig.4.30 Frana 11, Figline (per ubicazione vedere Fig. 4.28). Vista del corpo di frana durante due diverse fasi del rilevamento di campagna: a) 2015, le scarpate del movimento (tratteggio bianco) sono scarsamente vegetate ad indicare come l'attività associata a tale movimento sia piuttosto recente; b) 2017, parziale piantumazione di una scarpata secondaria, che indica una lieve stasi del movimento negli ultimi cicli stagionali; c) trincea drenante creata con lo scopo di far defluire le acque superficiali lontano dal corpo di frana.

Nel 1954 alla sommità del versante la zona di scarpata appariva degradata, soprattutto nella sua porzione prossima al fianco sinistro, dove una zona denudata indicava locali fenomeni di colamento (Fig.4.31 a). Poco al di sotto della scarpata principale, nella parte

superiore del corpo di frana si distinguevano ondulazioni e crepe del terreno che interrompevano la continuità del manto erboso. I settori terminali non mostravano invece evidenze di attività. Per quanto riguarda l'uso del suolo il corpo di frana era caratterizzato dalla presenza di campi arati e filari di piante, in prevalenza vigneti. La strada Provinciale 16 era già presente in questi anni.

Nel 1988 la corona della frana appariva vegetata con piante arboree. Nel settore sommitale del corpo era stata abbandonata la coltivazione di filari di piante e non erano visibili eclatanti evidenze di movimento se non un settore localizzato sul fianco sinistro, nella parte superiore del corpo, dove la ridotta vegetazione lasciava intravedere il substrato sabbioso che sottendeva la copertura vegetale. Invece, nell'area terminale, in special modo a partire dalla porzione al di sotto della strada asfaltata, erano ben distinguibili crepe nel terreno, rotture del manto erboso, e filari di piante che avevano perso, in più settori, la loro originaria linearità.

Nel 1996 l'uso del suolo era molto simile al decennio precedente. Tuttavia una zona debolmente denudata era presente alla base della scarpata principale. Verso la zona mediana del versante, in un campo arato posto al di sotto della strada SP16, si notava un settore che negli anni precedenti sembrava essere rimasto stabile mentre nel 1996 appare smosso. Erano inoltre visibili filari di piante spanciati nel settore terminale.

Il movimento, dunque, è stato classificato come colamento attivo di II livello, poiché le evidenze di attività sono state osservate nell'intero periodo dell'analisi multitemporale, a partire dal 1954.

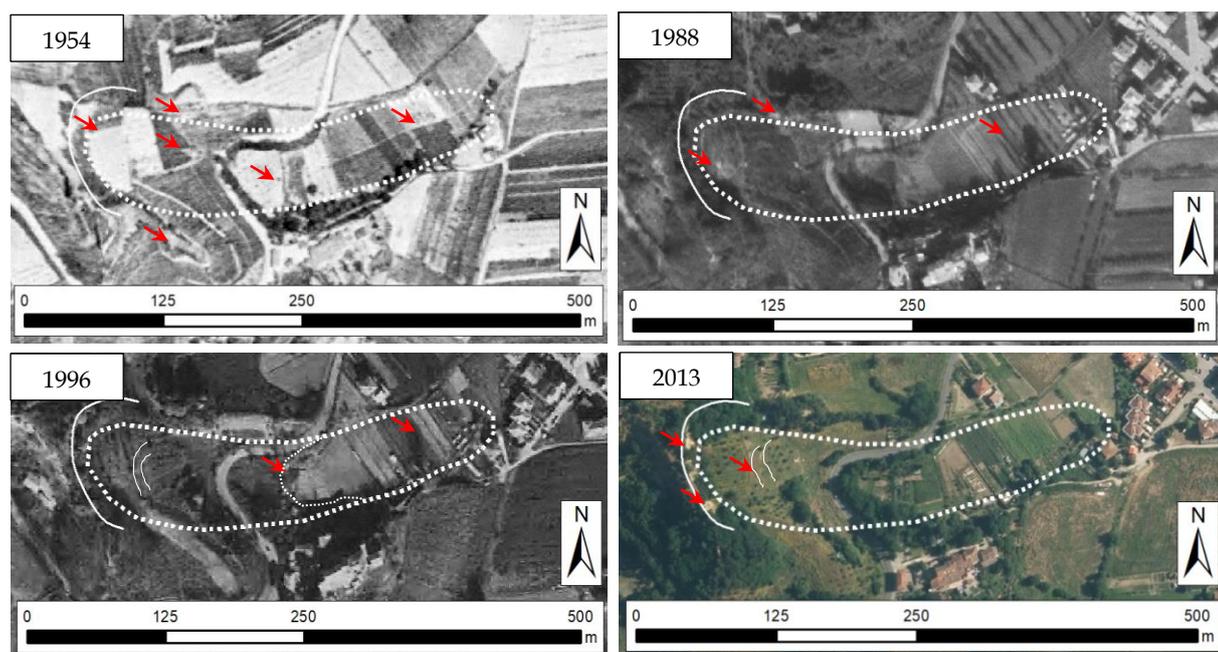


Fig. 4.31 Ortofoto relative all'analisi multitemporale eseguita sulla frana no. 11: 1954, 1988, 1996, 2013. Si distinguono la scarpata principale (linea bianca) e il corpo di frana attivo (puntinato bianco). Sono indicate anche le aree con maggiori evidenze (freccia rossa).

4.2.5 Considerazioni finali

In definitiva, la maggior parte dei movimenti gravitativi classificati come colamenti sono stati classificati come attivi di secondo livello, mentre la maggioranza degli scivolamenti sono stati classificati come quiescenti dagli anni '80, ovvero di primo livello.

Le evidenze di movimenti recenti sono visibili soprattutto in settori localizzati delle scarpate principali. Le aree prossime alla zona di corona sono state progressivamente lasciate incolte o a bosco poiché, in accordo anche con le testimonianze di alcuni abitanti, le piccole colate e *debris flows* che si originavano nei settori apicali delle scarpate danneggiavano di sovente i muri perimetrali, le strade, i campi coltivati e i filari di piante, rendendo difficile continuare a praticare l'agricoltura.

Anche al di fuori delle aree analizzate mediante analisi multitemporale sono ben distinguibili aree denudate da recenti colamenti e piccoli *debris flows*. Dagli anni 50' ad oggi, le strade sterrate che si dipanano lungo il crinale sono state oggetto di molti lavori di risistemazione; in molti casi il comportamento retrogressivo delle frane ha compromesso parzialmente la praticabilità di alcune strade (Fig. 4.32), raggiungendo anche gli edifici e i muri perimetrali di un giardino (Fig. 4.26). Spesso sono stati gli stessi abitanti della zona a risistemare le strade dissestate.



Fig. 4.32 Strada sterrata nei pressi di Loc. Il Castellaccio: l'arretramento della scarpata principale ha raggiunto il ciglio stradale e ha divelto il guard rail.

Le frane che si sviluppano nei settori meno acclivi e terminali del pendio sono quelle che presentano meno evidenze di movimenti e per le quali sono stati attribuiti stati di attività quiescente. Alcune frane sono addirittura naturalmente stabilizzate (come dedotto dal piano strutturale del comune di Figline), pertanto si è potuto procedere alla loro urbanizzazione.

Gli anni di maggiore attività restano quelli prossimi al 1954, mentre nelle decadi seguenti si assiste ad un generale rallentamento del tasso di movimento. Solo in tempo recenti, sia nelle ortofoto del 2013, sia durante il rilevamento di campagna, sono stati osservati rari settori che hanno ripreso la loro attività, ma come già detto si tratta di aree limitate alle scarpate dei movimenti gravitativi che bordano il crinale. Quindi le aree prossime alla sommità della dorsale sono state classificate come attive di II livello (dagli anni 50') mentre quelle ubicate verso la base dei versanti e più prossime al fondovalle sono state classificate come quiescenti di I livello poiché le evidenze di movimenti attivi sono state osservate solo nelle ortofoto del 1954 e non in quelle degli anni successivi.

4.3 Corella

4.3.1 Inquadramento geologico

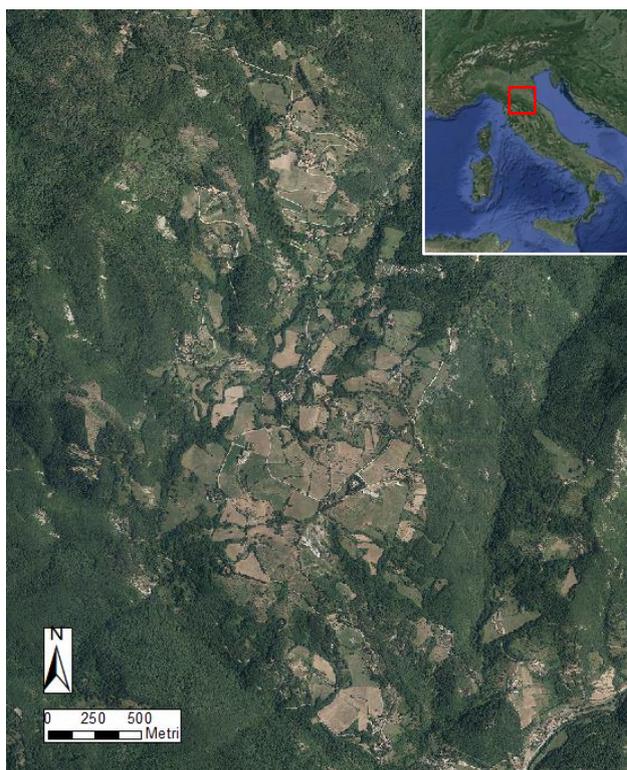


Fig. 4.33 Inquadramento geografico di Corella.

Corella (Fig. 4.33), una piccola frazione del comune di Dicomano (Firenze), è situata nel lato tirrenico dell'Appennino Tosco-Romagnolo, all'interno del foglio 264 (Carta geologica d'Italia, scala 1:50.000), e all'interno dei fogli 264070 e 264030 delle sezioni 1:10.000.

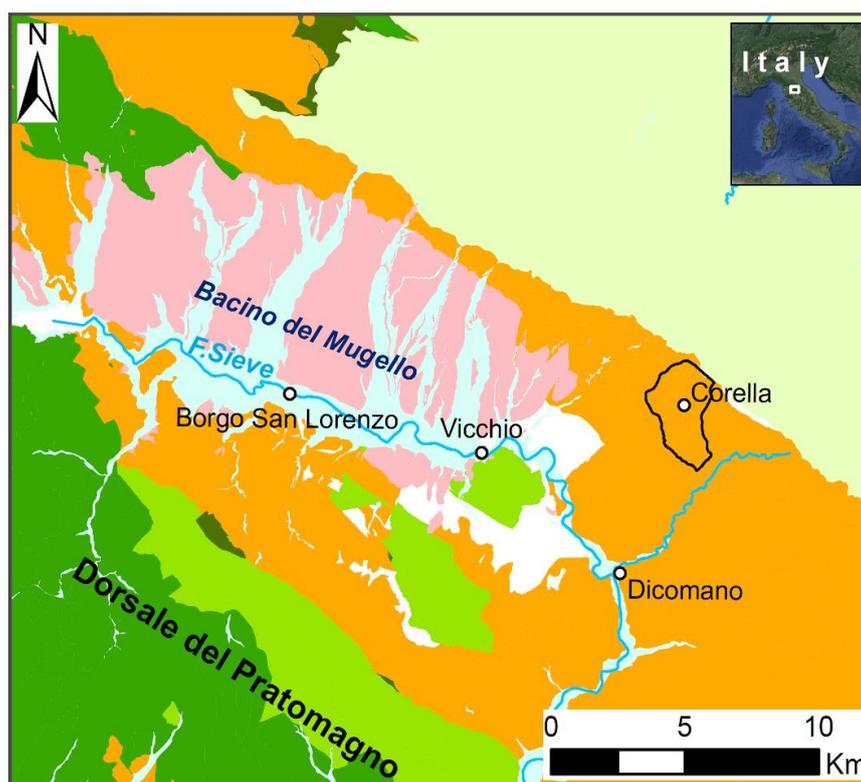
La dorsale su cui sorge Corella è bordata ad O dal Bacino del Mugello, mentre a N-NE è dai principali fronti di accavallamento delle unità tettoniche appenniniche (Martini & Sagri, 1993). Secondo vari autori le catene orogeniche sono il risultato di un lungo processo di convergenza e collisione tra placche continentali a seguito della chiusura di un bacino oceanico frapposto.

Nel Cretacico superiore da un regime tettonico distensivo (Butler, 1990) si sarebbe passati ad uno convergente, il bacino tetideo si sarebbe richiuso tramite movimenti di convergenza tra il margine africano (promontorio adriatico) e quello europeo (Alvarez, 2010). Data l'estrema irregolarità dei margini continentali, europeo e africano, il processo di convergenza avrebbe avuto un carattere diacrono: alle latitudini più settentrionali i due margini sarebbero entrati in collisione a partire dal Paleogene, dando origine alle Alpi, mentre a latitudini più meridionali il processo di collisione si sarebbe pienamente realizzato solo nell'Oligocene superiore, dando origine all'Appennino. La collisione (Bortolotti et alii, 1970; Boccaletti et alii, 1981, 1990a, 1990b), iniziata nell'Eocene superiore-Oligocene, sarebbe ancora in atto, come sarebbe testimoniato dall'attività sismica attuale. Dalla letteratura emerge che le prime fasi di convergenza sarebbero iniziate nel Cretacico superiore con la creazione di una zona di subduzione che avrebbe portato, probabilmente dall'Eocene medio, a seguito della completa consunzione della crosta oceanica, alla collisione continentale (Abbate et alii, 1980, 1986). Dal punto di vista paleogeografico questi autori distinguono dunque un dominio oceanico ed un dominio continentale. Nel dominio oceanico si sarebbe impostata, a partire dal Giurassico superiore, al di sopra delle rocce mafiche e ultramafiche della crosta oceanica, una sedimentazione pelagica silicea e calcareo-argillosa e in seguito torbidityca, che costituisce le serie che si rinvencono nelle Unità Tettoniche Liguri e, al limite oceano-continente, alle Unità Tettoniche Subliguri. Nel dominio continentale, si sarebbero depositate dal Triassico medio, sopra ad un basamento ercinico, successioni prevalentemente carbonatiche (le successioni Toscane e Umbro - Marchigiano - Romagnole). Dall'Oligocene superiore al fronte della catena si sarebbe strutturato il sistema "catena a thrust-avanfossa" (Bally et alii, 1985) in cui si sarebbero deposte le successioni torbidityche oligo-mioceniche (Macigno, Arenarie del Monte Cervarola, Formazione di Monte Falterona e Formazione Marnoso-Arenacea) e di scarpata e piattaforma plio-pleistoceniche (Argille Azzurre). La compressione invocata per la strutturazione della catena sarebbe migrata nel tempo e nello spazio, da SO verso NE, e con essa sarebbe migrato il margine in evoluzione. Durante le fasi collisionali le Unità Tettoniche Liguri e Subliguri si sarebbero impilate le une sulle altre e successivamente si sarebbero sovrapposte sulle Unità Tettoniche Toscane e Umbro - Marchigiano - Romagnole, costituendo una successione di coltre alloctone.

Durante le fasi di avanzamento, sulle Unità Tettoniche Liguri e Subliguri si sarebbero deposte in discordanza le Successioni Epiliguri, presenti però solamente nelle zone più settentrionali e orientali della catena (Bettelli et alii, 2002; Martelli et alii, 2002).

Nella porzione più interna della catena, già a partire dal Tortoniano superiore - Messiniano inferiore, dopo una fase di sollevamento ed erosione, sarebbe iniziata la sedimentazione di potenti successioni prevalentemente terrigene di ambiente da continentale a lacustre e marino, deposte sia sulle Unità Tettoniche Liguri che sulle sottostanti Unità Tettoniche Toscane, in bacini allungati in senso longitudinale e separati tra loro da "dorsali" dove sarebbero affiorati i terreni più antichi. In parziale sovrapposizione temporale con la sedimentazione nei bacini, a partire dal Miocene superiore, nella parte interna della catena, si sarebbe sviluppato un magmatismo a vario chimismo (Serri et alii, 1993; 2001).

Nel territorio dell'abitato di Corella affiorano depositi Oligocenici e Miocenici di ambiente marino (Fig. 4.34; Bortolotti et al. 2010).



Legenda

Area di Studio

Depositi Plio-Quaternari

Depositi alluvionali (Pleistocene Sup. - Olocene)

Depositi continentali (Pliocene Inf. - Pleistocene Inf.)

Depositi pre-pliocenici

Successione Epiligure

Dominio Ligure

Dominio sub-Ligure

Dominio Toscano

Dominio Umbro-Marchigiano

Fig. 4.34 Inquadramento geologico dell'area studio di Corella.

In particolare si tratta di flysch torbiditico-silicoclastici e di depositi emipelagici appartenenti all'Unità Cervarola-Falterona. Questo flysch forma gran parte dell'ossatura della catena appenninica presente nella parte orientale della Toscana, estendendosi da Cutigliano alla val di Chiana, fino a raggiungere il confine con l'Umbria, e passando attraverso il Mugello, Prato Magno e il Casentino. In discordanza erosiva sui precedenti ed all'interno di una topografia più o meno comparabile a quella attuale, durante il Quaternario si sono depositi sedimenti fluviali. Di seguito si riportano le descrizioni, riprese dalle note illustrative della Carta Geologica d'Italia, delle formazioni affioranti nell'area di studio, suddivise per Unità Tettoniche e ordinate dalla più antica alla più recente:

- Unità Tettonica Acquerino

I terreni appartenenti a quest'unità sono interposti tra l'Unità Tettonica Falterona a sud-ovest e l'Unità Tettonica Castel Guerrino a nord est. Vengono inoltre ricoperti in discordanza dai depositi continentali della "Successione del Mugello" (Sanesi 1965) all'estremità orientale del bacino. L'Unità è costituita da due formazioni: quella delle "Marne varicolori di Villore" a cui segue la "Formazione dell'Acquerino" (Bettelli et alii, 2002), formata da depositi torbiditici di avanfossa.

Questa unità è stata considerata da molti Autori una sotto-unità dell'Unità Cervarola-Falterona (Abbate et al. 1969; Boccaletti & Coli, 1982; Guenther & Reutter, 1985; Bettelli et al. 2002). Altri Autori l'hanno considerata un'unità tettonica indipendente (Bettelli et al. 2002; Cerrina Feroni et al. 2002; Cibirin et al. 2004);

Marne Varicolori di Villore (MVV): Argilliti più o meno marnose alternate a marne e marne siltose, di colore grigio chiaro e grigio azzurro, talora verdastre, e più raramente rossastre. Sono presenti anche strati sottili o molto sottili di arenarie finissime e siltiti. Talora si presentano intensamente foliate; frequenti le vene mineralizzate a calcite (Fig. 4.35). Il contatto stratigrafico superiore pur essendo abbastanza netto, è graduale per la rapida comparsa di strati di arenarie torbiditiche di pochi metri di spessore.

Il contatto inferiore non è preservato in quanto questa formazione è sempre troncata alla base da superfici di sovrascorrimento, visto che costituisce il livello di scollamento preferenziale dei depositi di avanfossa soprastanti. Si tratta di depositi emipelagici e di scarpata che precedono l'instaurarsi di un'avanfossa a sedimentazione torbiditica grossolana (Chattiano - Aquitaniano).

Formazione dell'Acquerino (ACQ): è articolata in tre membri, sulla base dello spessore medio degli strati e del rapporto arenaria/pelite e presenta un trend *fining* e *thinning upward*, rappresentando un singolo sistema deposizionale torbidity. In questa area affiorerebbe solo il membro arenaceo-pelitico basale.

Si tratta di un'alternanza arenaceo-pelitica in strati gradati da sottili a molto spessi, talora in banchi. Si alternano pacchi decametrici caratterizzati da strati sottili e molto sottili con peliti prevalenti, alternati a banchi o strati arenacei molto spessi (Fig.4.36). Avvicinandoci alla base aumentano le peliti. Le arenarie hanno una composizione feldspatoidica, mentre la porzione più fine è caratterizzata dall'assoluta predominanza dei frammenti litici metamorfici, analogamente alla Formazione del Torrente Carigiola (Aquitano).

- Unità tettonica di Castel Guerrino

Formazione del Torrente Carigiola (TCG): alternanze pelitico-arenacee torbidity in strati da sottili a molto spessi. Presenta pacchi di strati caratterizzati da prevalenti peliti a cui si intercalano strati arenacei molto spessi e banchi a grana più grossolana. Caratteristica di questa formazione è la presenza, a vari livelli della successione, di megastrati a base molto grossolana con arenarie di spessore da 5 a 20 metri e frazione pelitica spesso superiore a quella arenacea. Le paleocorrenti provenivano da NO (provenienza europea). Sono presenti slump di alcune decine di metri di spessore (Fig.4.37). Localmente affiora un livello di marne e marne calcaree grigie sottili alternate a sporadici strati arenacei, calcareniti medie e sottili grigio chiare con marna calcarea molto spessa, sono presenti livelli di lucine. (Aquitano).

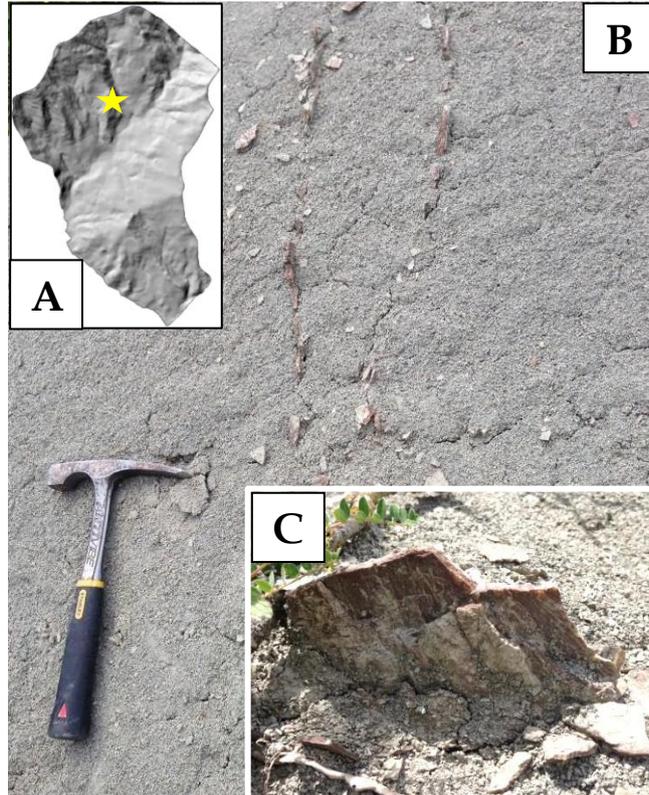


Fig. 4.35 Affioramento di Marne Varicolore di Villore (MVV). Coordinate Google earth: 43°56'46.94"N; 11°33'32.21"E. (a) Localizzazione dell'affioramento, (b) marne tettonizzate e vene di calcite, (c) particolare di una vena di calcite che mostra striature e "slike and sides".

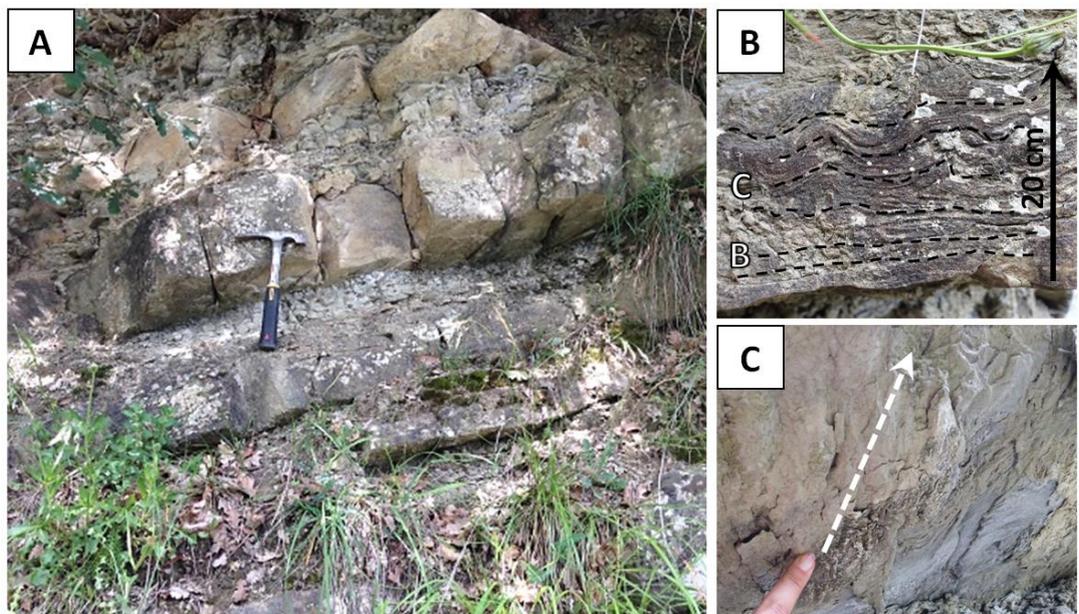


Fig 4.36 (a) Affioramento della formazione dell'Acquerino (ACQ) caratterizzato dall'alternanza di strati politico-arenacei, con spessi banconi di arenarie. (b) Strutture sedimentarie associate a variazioni granulometriche: particolare di strutture a laminazione piano-parallela e lamine convolute riconducibili agli intervalli B e C della sequenza di Bouma. (c) Flute-casts, controimpronte di fondo, indicatori della direzione della paleocorrente.

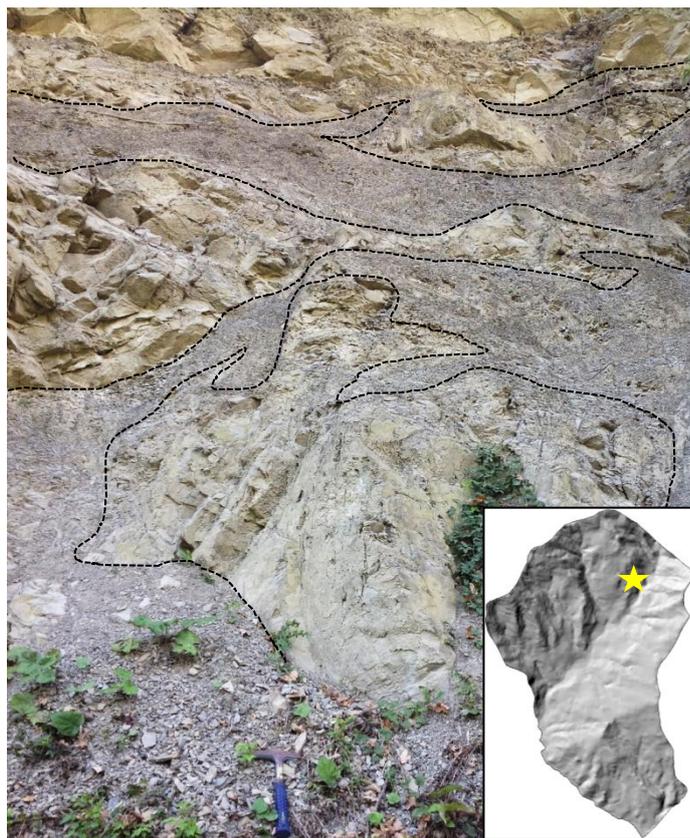


Fig. 4.37 Affioramento di uno slump lungo una strada sterrata nei pressi di Larciano. Coordinate Google earth: 43°56'56.40"N; 11°33'54.71"E. Il tratteggio nero marca il contatto tra i litotipi arenacei e quelli pelitici

Durante la campagna di rilevamento geologico-geomorfologica i diversi litotipi affioranti sono stati raggruppati in due unità litologiche principali (Tab. 4.5), ottenute accorpando all'interno della medesima unità tutte quelle litofacies caratterizzate da simile granulometria: a) unità arenaceo marnosa, b) unità marnoso-pelitico-arenacea. Si tratta, generalmente, di "strong rocks" che si alternano a livelli di "weak rocks" (Tab. 3 in Hungr et al., 2014).

Unità litologiche	Formazioni geologiche
Arenaceo-marnosa	Acquerino <i>fm</i> (litotipi arenacei)
	Torrente Carigiola <i>fm</i>
Marnoso-pelitico-arenacea	Acquerino <i>fm</i>
	Torrente Carigiola <i>fm</i> (litotipi marnosi)
	Marne Varicolore di Villore <i>fm</i>

Tab. 4.5 Unità litologiche riconosciute e raggruppate durante la fase di rilevamento geologico.

La successione sedimentaria è spesso ben esposta lungo i fianchi delle valli, soprattutto in destra idrografica del Torrente Corella e mostra degli strati orientati prevalentemente verso

SE con un'inclinazione che va dai 30 ai 70°. Lo spessore, talvolta ridotto, dei banconi arenacei, suggerisce una geometria comparabile a quella di corpi lenticolari, anche se la presenza di movimenti gravitativi estesi ne impedisce una adeguata identificazione. Infatti, non si riesce bene a distinguere se i corpi arenacei siano delimitati da piani di taglio, simili a quelli che separano due unità tettoniche o se il contatto avvenga mediante piani di scivolamento di ampia estensione.

La carta geologica regionale (Foglio 264, sezioni in scala 1: 10.000 no. 264030-264070) riporta come contatti tettonici gran parte dei contatti tra le formazioni affioranti. Durante il rilevamento di campagna, tuttavia, non si sono individuate evidenze che testimoniassero la presenza di tali strutture, dato che la parte basale delle unità sia pelitiche che arenacee è quasi sempre mascherata da depositi di frana. Osservando dalla bibliografia le caratteristiche delle varie formazioni affioranti nella zona e i loro ambienti deposizionali, si è cercato di dedurre i loro rapporti stratigrafici anche basandosi sul loro intervallo deposizionale. Le marne di Villore si sono depositate in un intervallo compreso tra il Chattiano inferiore e l'Aquitaniense, mentre sia la Formazione dell'Acquerino, sia la Formazione del Torrente Carigiola, si sono depositate tra Chattiano Superiore e Aquitaniense. Allo stato attuale delle conoscenze appare problematico riportare un contatto tettonico tra i vari litotipi e non si esclude che possa trattarsi di successioni appartenenti al medesimo bacino deposizionale. A confermare questa possibile interpretazione è anche la scarsa continuità delle unità tettoniche riportate dagli autori che in alcuni membri terminano dopo breve distanza. Non si esclude dunque che le formazioni si siano deposte negli stessi intervalli e che quindi si tratti di ripetute alternanze prodotte a causa di variazioni nell'ambiente deposizionale. Le marne sarebbero tipiche di un ambiente di piattaforma o pelagico e si sarebbero depositate in un bacino pelagico o emipelagico all'interno del quale, in seguito a frane sottomarine, o onde di torbida, provenienti dalla scarpata, si sarebbero deposte le alternanze di arenarie, marne e peliti provenienti dal bordo della piattaforma. Successive oscillazioni eustatiche, variazioni dell'apporto sedimentario o scosse sismiche sarebbero state responsabili della deposizione alternata di marne e peliti e di arenarie e marne.

Durante il rilevamento geologico di campagna è stato possibile distinguere i caratteri stratigrafici di alcuni litotipi, affioranti nei settori meridionali dell'area di studio, lungo la strada frazione di Corella. (Fig.4.38), nelle vicinanze di Pod. Cafaggio. L'affioramento è stato messo in evidenza da recenti fenomeni gravitativi che hanno rimosso la coltre pedogenica sovrastante, consentendo così di caratterizzare il substrato. Si tratta di livelli arenacei

densamente fratturati alternati a marne, con inclinazioni di circa 50° verso il settore sud-occidentale.

Nella parte sinistra dell'affioramento sono presenti livelli arenacei di colore ocreo con spessori di circa 20-30 cm, alternati a livelletti marnosi di colore brunastro grigiastro di spessore centimetrico. Nella parte destra si ha una riduzione dello spessore dei livelli arenacei e un aumento della componente marnosa. Verso la sommità dell'affioramento gli strati arenacei sono blandamente piegati. Osservando nella sua totalità l'affioramento, i caratteri individuati suggeriscono che si tratti di uno *slumping*, ovvero una struttura sin sedimentaria legata a fenomeni franosi sottomarini lungo l'antica scarpata continentale. Anche fenomeni di questo tipo conducono alla genesi di contatti anomali che possono essere facilmente interpretati come contatti tettonici in quanto sono originati da spinte meccaniche, ma a differenza di un sovrascorrimento, uno *slumping* esaurisce il contatto geometrico anomalo nell'ambito della sequenza deposizionale.



Fig. 4.38 Affioramento geologico lungo la strada comunale di Corella (Formazione dell'Acquerino). Coordinate Google earth: 43°55'32.36"N;

4.3.2 Inquadramento geomorfologico

L'abitato di Corella sorge in una zona delimitata a NO e a SE da due dorsali orientate in direzione circa NE-SO le cui quote massime sono rispettivamente di circa 730 m e 650 m, mentre le zone di fondovalle si aggirano intorno ai 400 m.

L'area di studio è ubicata su una zona di alta collina all'interno della valle con direzione NE - SO del Torrente Corella, tributario di destra idrografica del fiume San Godenzo. Il bacino idrografico ha una morfologia allungata ed è bordato dai seguenti spartiacque: Monte Campogianni (742 m) a nord, dal Monte Gattaia (644.6 m) ad est, a sud da Poggio Spicchio (575.2 m) e Poggio Calimorti (520.7), ad ovest da Poggio Lavacchio (740.3m) e Poggio Paline (760.1m). Il reticolo idrografico (Fig. 4.39), angolare con sviluppo NE-SO e NO-SE, ha un andamento che rispecchia le alternanze litologiche del substrato anche se, a grande scala, all'interno dei rami principali è presente un reticolo dendritico.

L'alternanza di litologie molto competenti (baconi arenacei) e litotipi deboli (marnosi pelitici e argillosi) è uno dei fattori principali che regola l'andamento dei versanti: pendii molti acclivi con scarpate strutturali nette si sono formati in corrispondenza delle litologie arenacee mentre versanti più dolci con pendenze blande si sono impostati in corrispondenza dei livelli marnoso-argillosi. In particolare, in destra idrografica della valle di Corella, sul versante dove sorge l'insediamento di Petrograno, l'incisione fluviale ha generato una serie di elementi con profilo trasversale triangolare comparabile a quello associato a forme strutturali delle faccette triangolari (Fig.4.40).

Anche l'inclinazione degli strati influenza l'andamento dei pendii: gli strati hanno inclinazioni medie di circa 45-50° verso sud-ovest e l'incisione fluviale di un torrente secondario ha generato, in almeno un caso, un breve *hogback*, ovvero una cresta formata dall'emergenza di strati competenti assai inclinati (Fig.4.41). Rispetto al crinale si hanno quindi giaciture a reggipoggio, a franapoggio e a traverso poggio.

Nella porzione meridionale, dove affiorano i litotipi marnosi (MVV) e prevalgono i processi erosivi, si sono create aree calanchive sulle quali s'impostano importanti movimenti franosi. Queste zone sono esposte a sud-est, appaiono perlopiù prive di vegetazione e dunque in fase di attività. Tali forme di erosione, attraverso il loro progressivo arretramento, hanno raggiunto una strada sterrata, situata a sud-ovest di Loc. Paterno, rendendola inagibile (Fig.4.42).

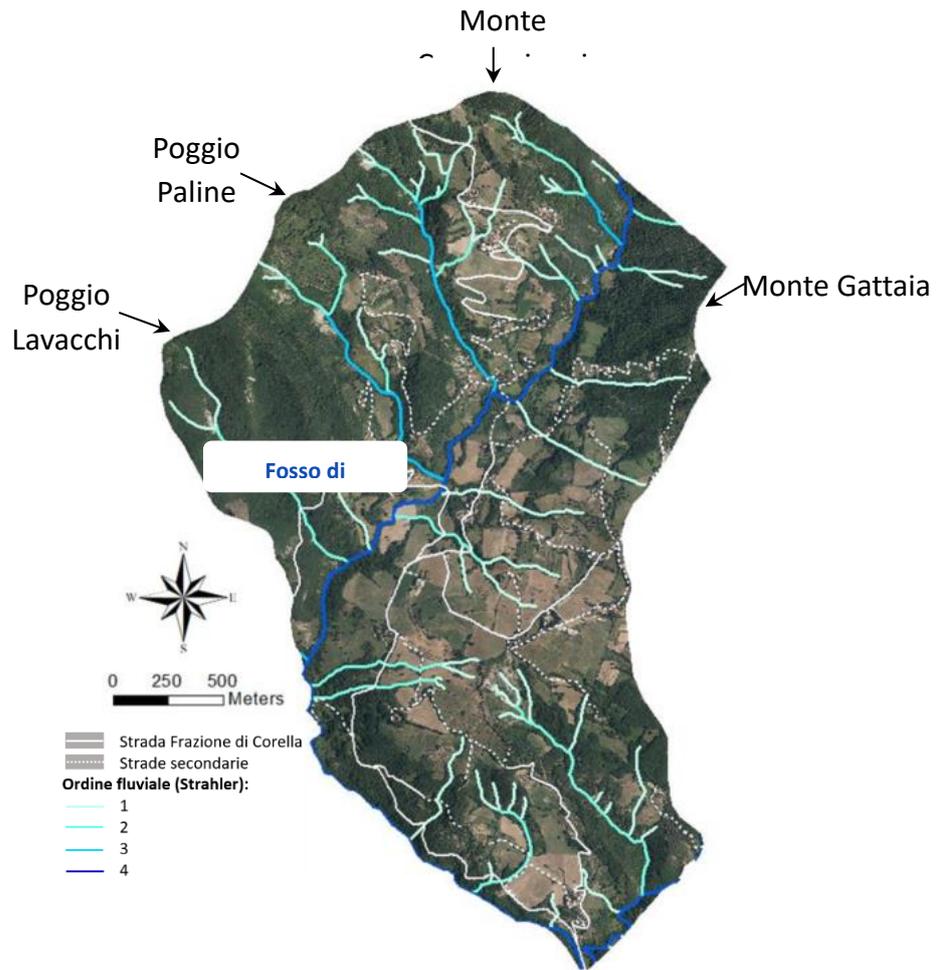


Fig.4.39 Strade principali (bianco) e reticolo fluviale principale di Corella.



Fig.4.40 Faccette triangolari sul versante di Petrognano.

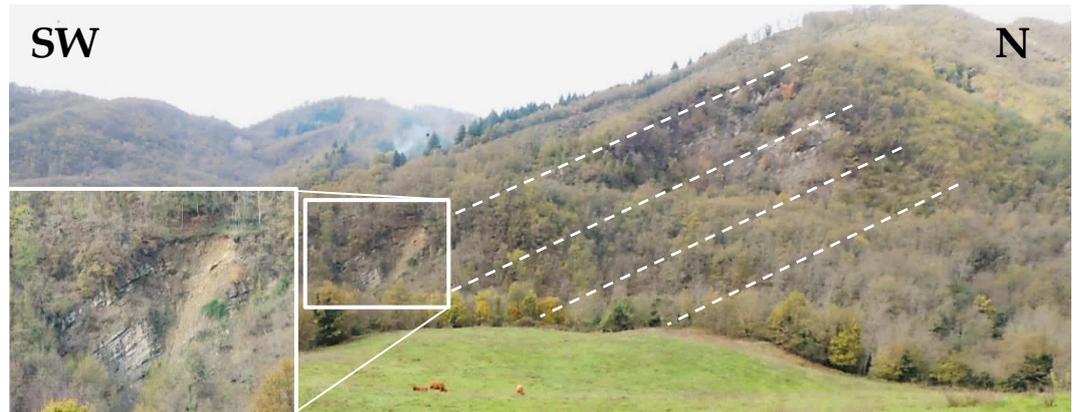


Fig.4.41 Hogback sul fianco destro della valle di Corella: l'andamento della stratificazione è evidenziato dal tratteggio bianco.

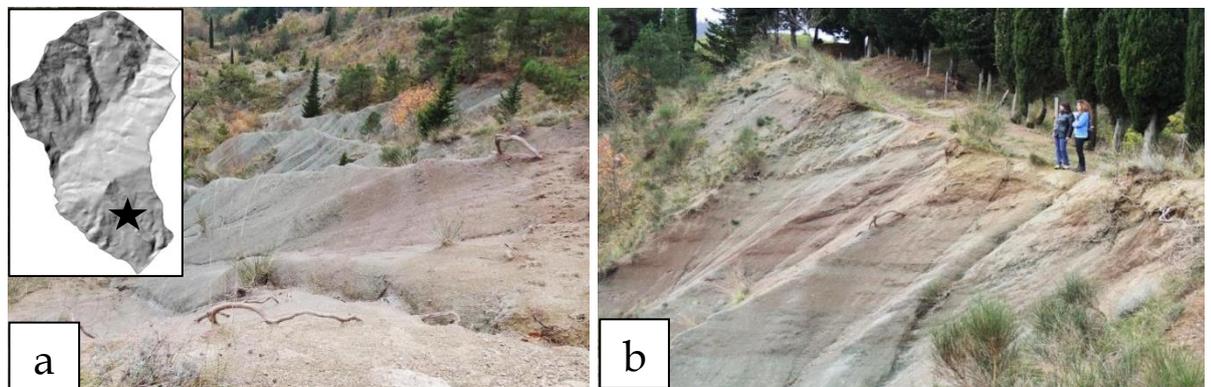


Fig.4.42 Calanchi nei settori meridionali dell'area di studio di Corella (Loc. Paterno): le litologie interessate sono le Marne Varicolori di Villore.

4.3.3 Caratteristiche delle frane rilevate

Il rilevamento di campagna ha consentito l'osservazione dettagliata dei movimenti gravitativi caratterizzanti i territori limitrofi all'abitato di Montespertoli. Inoltre un'analisi più approfondita ha consentito di fare considerazioni sullo stato di attività ed evoluzione di alcuni dei movimenti che interessano direttamente l'abitato, le sue strade e i suoi edifici. Più di 50 frane sono state riconosciute e mappate in un'area inferiore ai 10 Km².

Le principali tipologie di movimenti gravitativi riconosciuti a Corella possono essere suddivise in:

- Scivolamenti rotazionali (*rotational slides* secondo la classificazione di Cruden e Varnes 1996);

- Scivolamenti planari (*Rock block slide* secondo Varnes 1978, *planar slide* secondo Hutchinson 1988, *rock planar slide* o *block slide* secondo Hungr et al. 2014);
- Colamenti (*flows* secondo Varnes 1978 e *bedrock flows* secondo Cruden e Varnes 1996; vedi tabella 1);
- Crolli, rari e di piccola entità (*falls* secondo Varnes 1978, Cruden e Varnes 1996; *rock fall* in Hungr et al. 2014)
- Movimenti complessi (*complex landslides* secondo Cruden e Varnes 1996) che sono generalmente costituiti da scivolamenti che evolvono in colamento);
- Deformazioni gravitative profonde di versante (DGPV; *Deep-seated gravitational slope deformations* secondo Dramis e Sorriso-Valvo, 1995; *Rock/mountain slope deformation* in Hungr et al. 2014)

Inoltre sono stati cartografati svariati fenomeni di soliflusso, legati a deformazioni della coltre più superficiale del terreno.

Secondo la classificazione di Hungr et al. (2014), la maggior parte dei movimenti ubicati in concomitanza del crinale può essere definita come “*slow to very slow gravel/sand/debris slide*”, ovvero come scivolamenti di terreni ghiaiosi, sabbiosi o di detrito che tendono a trasformarsi in colamenti nelle porzioni distali, con velocità di movimento da lente a molto lente.

La forma in pianta di queste frane è riportata in Fig. 4.

Le frane per colamento identificate nell’area di studio hanno una morfologia piuttosto allungata e interessano i litotipi prevalentemente argilloso-marnoso-pelitici (Fig.4.43, n° 1b, 2b, 2c). Evidenze di questo tipo di movimenti sono rappresentate da crepe e ondulazioni nei settori terminali dei versanti, in prossimità del torrente Corella. Alcune delle strade

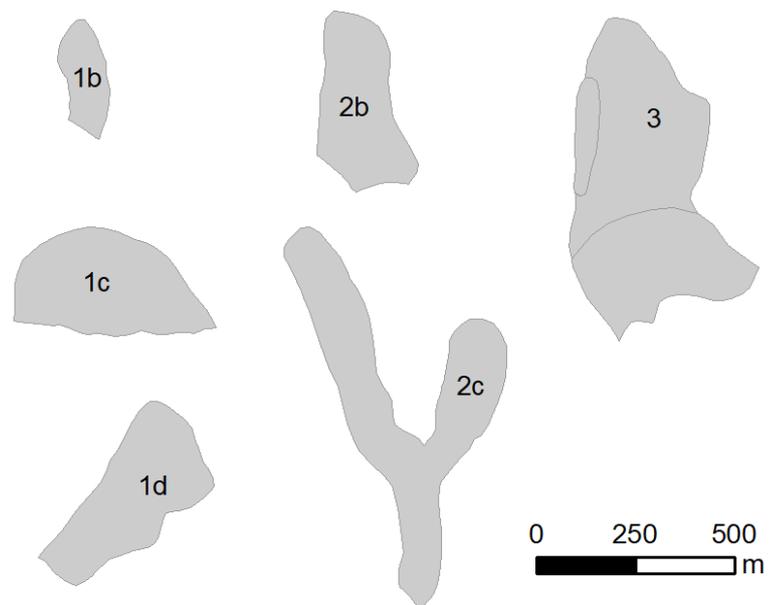


Fig. 4.43 Proiezione in pianta dei corpi di frana oggetto di analisi multitemporale.

principali e secondarie hanno perso la linearità del loro tracciato e presentano nette deformazioni e rigonfiamenti, come osservato in una strada sterrata nei pressi di Loc. Paterno (Fig. 4.44 a).

Nei settori prospicienti il cimitero paesano gli alberi mostrano una forma uncinata e sono debolmente inclinati in avanti (Fig. 4.44 b). Alcuni edifici mostrano danni evidenti, come la piccola cappella cimiteriale, interessata da un'evidente crepa sul bordo sinistro della parete meridionale Fig. 4.44 c), o come alcuni edifici dell'agglomerato di case di Larciano, interessate dallo stesso tipo di danni. Inoltre la presenza di gabbionate lungo il margine stradale testimoniano ulteriori movimenti superficiali (Fig. 4.44 d). Tutte queste evidenze consentono di ipotizzare la presenza di fenomeni di soliflusso che coinvolgono la coltre pedogenica superficiale.

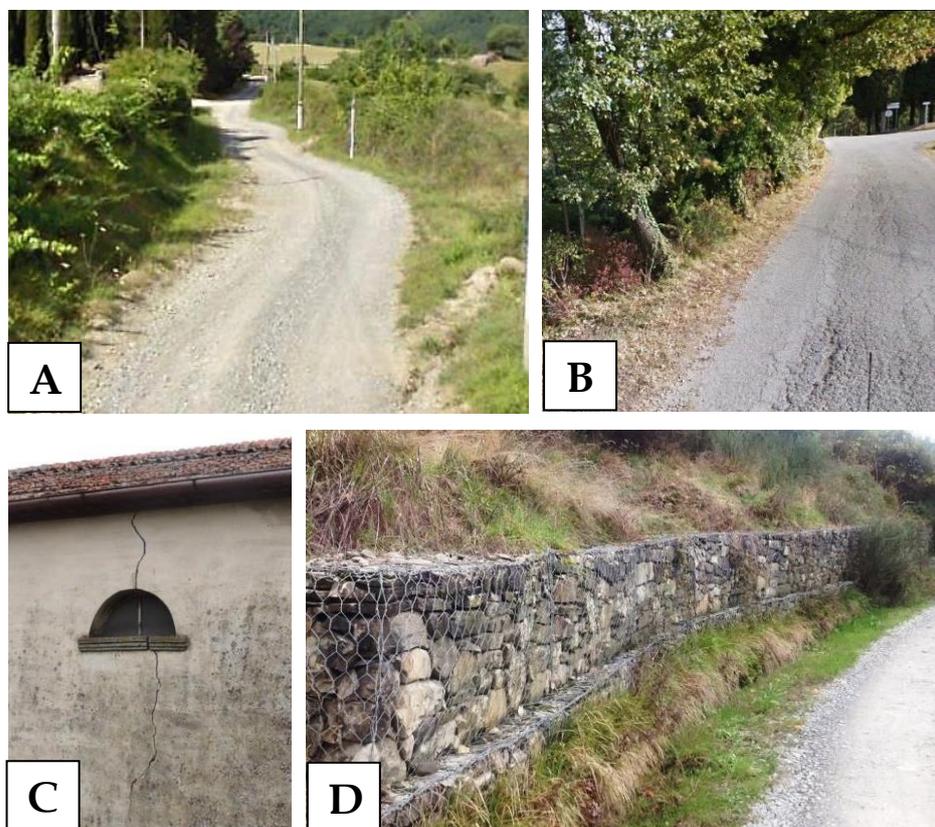


Fig.4.44 Evidenze di deformazioni: (a) ondulazioni e rigonfiamenti indotti da un colamento in una strada nei pressi di Loc. Paterno; (b) alberi uncinati e crepe longitudinali lungo la strada Frazione Corella; (c) crepe sulla cappella del cimitero di Corella; (d) gabbionate metalliche nei pressi di Larciano.

Come evidenziato anche da Sauchyn et al. (1998) la giacitura degli strati e di eventuali giunti incide notevolmente sullo sviluppo dei processi di versante. Cruden (2000) mostra come i versanti cataclinali e anaclinali di un *hogback* siano caratterizzati da processi gravitativi definiti: lungo i versanti cataclinali prevalgono gli scivolamenti lungo la stratificazione mentre

su quelli anaclinali sono più abbondanti ribaltamenti o scivolamenti lungo giunti e fratture beanti.

Sul fianco destro della valle di Corella si è osservata una direzione preferenziale della giacitura degli strati verso SE, e lungo questi stessi settori sono le frane per scivolamento traslativo ad essere più diffuse. I movimenti sono controllati da livelli argillosi e marnosi che fungono da superfici di debolezza mentre i banconi arenacei, più competenti, tendono a fratturarsi in blocchi i quali si comportano come unità indipendenti dentro alla massa in frana. Infatti, i litotipi arenacei sono pervasi da una grande quantità di giunti che promuovono l'infiltrazione di acqua verso settori più profondi dell'ammasso, fino ai livelli argilloso-pelitici che, invece, fungono da superfici impermeabili, favorendo la stagnazione delle acque. Un incremento del contenuto d'acqua e un innalzamento del livello piezometrico della falda possono dunque indurre una variazione delle condizioni dell'ammasso, disgregando i blocchi rocciosi e inducendo un movimento che può evolvere come colamento.

Altri tipi di movimento cartografati durante il rilevamento di campagna sono gli scivolamenti rotazionali. Tali movimenti avvengono lungo una superficie di rottura circolare e producono una rotazione all'indietro dell'area sottostante la scarpata principale, la quale si attesta solitamente sui litotipi arenacei e presenta un profilo piuttosto verticale, tanto che può succedere che piccoli fenomeni di crollo di roccia interessino la zona più acclive della scarpata.

Nell'area di studio questi fenomeni di crollo interessano soprattutto le scarpate impostatesi sui litotipi arenacei esposti a N e NE. Ad esempio poco al di sotto della sommità di Poggio Lavacchio e Poggio Paline c'è un settore privo di vegetazione e fortemente degradato che coinvolge spessori decametrici dell'unità arenacea. Soprattutto l'area vicina ai torrenti secondari, in prossimità della cima del versante è caratterizzata dalla presenza di piccoli crolli e colamenti di roccia, entrambi generati dai processi di erosione fluviale. Come detto le frane di crollo di solito sono localizzate nella zona di scarpata degli scivolamenti, dove la parete rocciosa verticale è ormai priva di supporto alla base. Se l'evento di crollo è stato innescato durante una precipitazione intensa, i blocchi di roccia, dopo essersi staccati, galleggiano sul corpo di frana e quando il contenuto d'acqua all'interno dell'ammasso aumenta a sufficienza, il materiale assume il carattere di una colata di roccia.

Nei pressi di Loc. Il baco e Petrognano, sul fianco destro della valle di Corella, la morfologia risulta piuttosto complessa e una serie di scarpate, contropendenze e trincee forniscono una sintomatica prova a favore della presenza di profondi movimenti di versante, di grande estensione, che interessano l'intera area compresa dalla sommità alla base del

versante (Fig. 4.45 a,b). Questi movimenti sono ascrivibili a deformazioni gravitative profonde di versante (Dramis & Sorriso-Valvo 1995) e corrispondono ai *sagging* di Hutchinson (1988). Nell'area di studio questi grandi movimenti sono ancora allo stadio embrionale, presumibilmente alla loro base non si è ancora delineata una superficie di taglio netta che colleghi la zona di testata con il piede di frana. I corpi di frana sono caratterizzati da velocità di spostamento estremamente o molto ridotte (Hungur et al. 2014). Considerando i fattori predisponenti tipici di questi grandi movimenti gravitativi, si può affermare che per il territorio di Corella siano l'approfondimento vallivo e l'incisione fluviale ad avere un ruolo centrale nell'innescare e sviluppo di tali fenomeni.

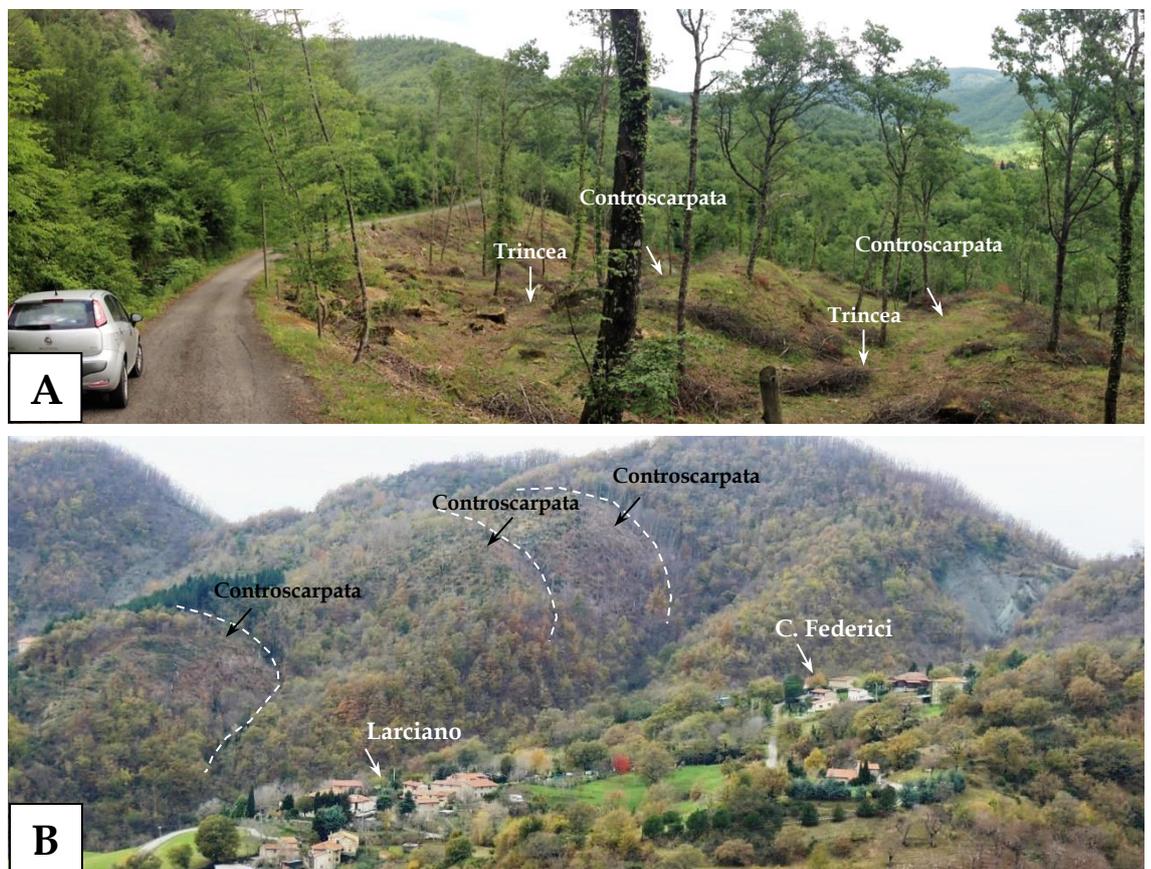


Fig. 4.45 Evidenze di DGPV rinvenute nei settori ovest dell'area di studio: (a) trincee e controscarpate in prossimità di Loc. Petrognano, (b) trincee e contro-scarpate a nord di Loc. Petrognano.

4.3.4 Analisi multitemporale

L'analisi multitemporale è stata condotta su un totale di 8 movimenti gravitativi, collocati sia in destra che in sinistra idrografica del fosso di Corella (Fig. 4.46), la cui attivazione/riattivazione minaccia direttamente edifici e rete stradale.

Gli anni che mostrano maggiore attività sono quelli relativi al 1954, mentre nelle decadi seguenti si assiste ad una generale attenuazione dell'attività franosa. Movimenti diffusi sono testimoniati da ondulazioni e rigonfiamenti nel terreno, aree denudate e filari di piante deformate. Le aree che mostrano maggiori evidenze di instabilità sono quelle collocate in prossimità del fondovalle e nelle aree vicinali ai torrenti superficiali. In queste aree l'erosione fluviale, soprattutto l'incisione di sponda lungo l'asta fluviale principale, può essere considerato il fattore di instabilità principale.

Le variazioni subite dall'uso del suolo sono evidenti: dall'uso dell'alberata degli anni 50', che prevede filari di viti maritate con altre piante generalmente da frutto, si passa a campi coltivati e pascoli dagli anni 80' fino all'attuale.

Le frane analizzate con analisi multitemporale sono state classificate come attive di secondo livello e quiescenti di primo livello.

La peculiarità essenziale di questa area di studio resta la presenza di estesi movimenti gravitativi (DGPV), le cui scarpate principali non mostrano però evidenze di attività durante gli anni analizzati; i loro corpi di frana, invece, esibiscono gobbe, collinette e ondulazioni che sono riconducibili a movimenti superficiali di ridotta profondità e limitata estensione, piuttosto che all'intero movimento.

Dunque, dopo un'attenta analisi sia degli elementi relativi all'uso del suolo che della morfologia superficiale, le DGPV non sono state considerate attive nella loro interezza; perciò nonostante alcuni settori mostrino delle prove di attività, le DGPV sono state classificate come quiescenti di secondo livello (dagli anni 50').

Nelle pagine seguenti si riporta una breve descrizione di alcuni dei movimenti analizzati mediante l'analisi multitemporale al fine di descrivere le peculiarità delle frane che interessano i versanti di Corella. Data la complessità e peculiarità di questi movimenti, soprattutto quelli associati alle DGPV, si è deciso di descrivere tutte le frane che sono state studiate in dettaglio con analisi multitemporale.

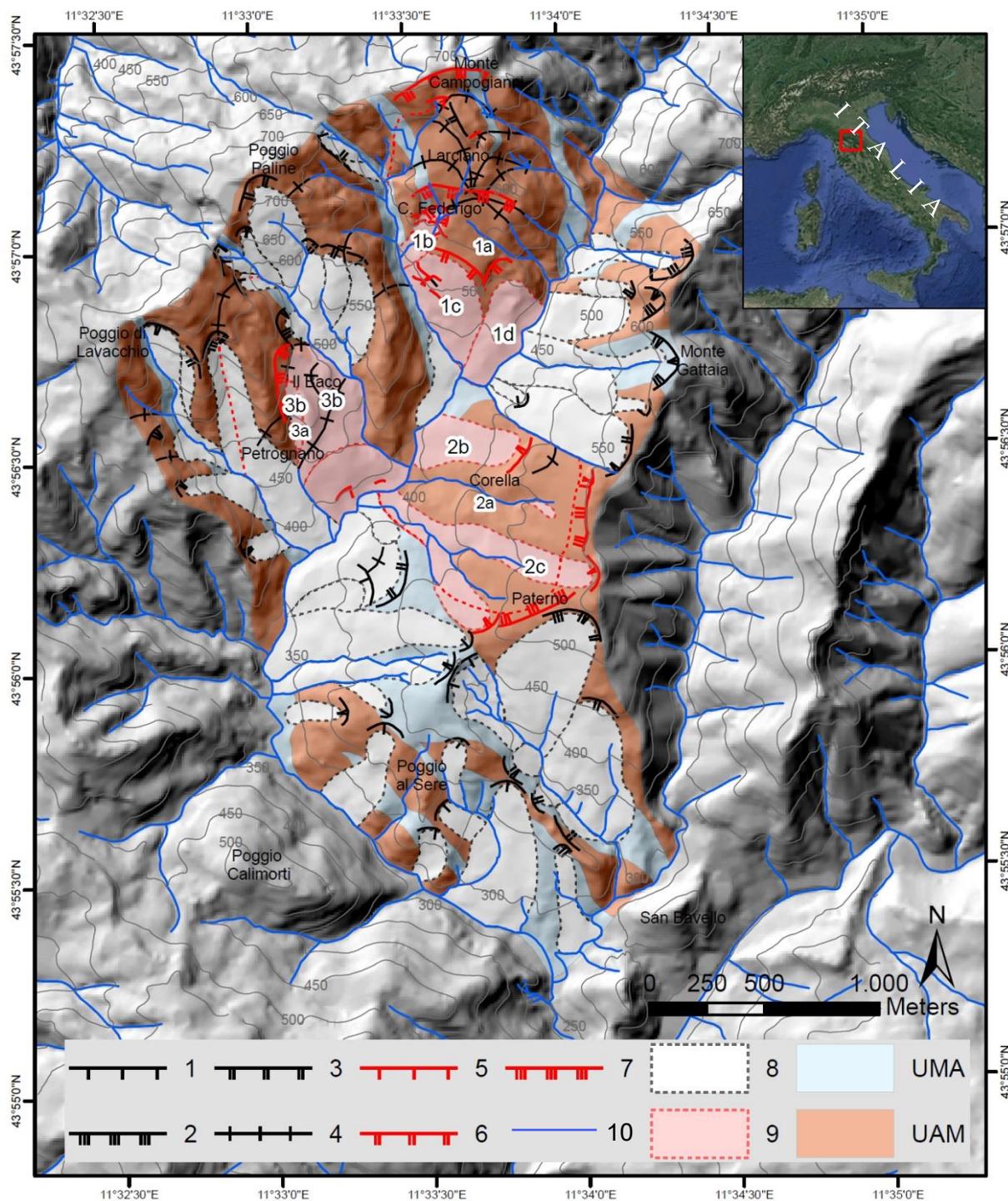


Fig. 4.46 Geologia dell'area di studio. Vengono riportate le frane e le unità litologiche rilevate in campagna. Tra i movimenti gravitativi si sono distinti quelli oggetto di analisi multitemporale (in rosso) da quelli non oggetto di analisi (in nero): (1 e 5) Scarpata di frana < 5 m, (2 e 6) scarpata di frana compresa tra 5-10 m, (3 e 7) scarpata di frana > di 10 m, (4 e 8) trincea, (8 e 9) limiti dei corpi di frana, (10) idrografia superficiale; UAM – unità arenaceo-marnosa, UMA – unità marnoso-pelitico-arenacea.

4.2.5 *Complesso di Larciano*

Tale complesso è costituito da un movimento gravitativo profondo di versante, sopra al quale si sono poi impostati movimenti di minore estensione. Quindi, a causa della complessità del movimento, la frana 1 è stata suddivisa in quattro diversi corpi (Fig.4.47). Si fornisce dunque una descrizione accurata sia della DGPV (Frana 1 A) sia dei movimenti più recenti (1B, C, D) sovrastanti, che sono stati classificati tutti come colamenti poiché caratterizzati da evidenti ondulazioni e da una morfologia piuttosto allungata.

Frana 1 A - Frana di Larciano

La sommità del versante su cui sorge l'agglomerato di case di Larciano è collocata ad una altitudine di 733.5m mentre il fondovalle, su cui scorre il Fosso di Corella, si trova ad una quota media di 435m.

La frana 1 è stata classificata come una grande deformazione gravitativa profonda di versante (DGPV) poiché il suo corpo di frana si sviluppa lungo tutto il versante, in direzione N-S (Fig. 4.47 a) per una lunghezza totale di 1200m e una larghezza massima di 850m, ricoprendo un'area di 715000m². La frana coinvolge sia l'unità arenaceo-marnosa che quella marnoso-pelitico-arenacea. La scarpata principale, semi-circolare, di tale movimento è situata a quota 730m s.l.m., quasi alla sommità del versante. La sua altezza è di ~30m e si estende lateralmente per oltre 450m, con una corda dell'arco orientata NE-SO.

L'elemento saliente di questo movimento è rappresentato da una serie di trincee posizionate ad altitudini via via decrescenti del versante: 660m, 640m, 620m, e 580 m s.l.m... Nella porzione medio-occidentale del corpo di frana, ad una quota di 620m, c'è un'ulteriore trincea, collocata poco sotto Larciano. Immediatamente al di sotto di questo settore, a 580m s.l.m. è stata individuata un'ultima trincea che attraversa orizzontalmente buona parte del corpo di frana. Sul fianco sinistro alcuni torrenti si approfondiscono lungo la prosecuzione di queste trincee. La morfologia risultante di tutta l'area è quella di un versante a gradini. L'estensione totale del movimento può essere stimata prendendo in considerazione lo spessore della scarpata principale e dei torrenti che si approfondiscono lungo le linee di trincea, portando ad ipotizzare una profondità di ~150m.

Le alternanze litologiche affioranti lungo il pendio sono interessate da piani di taglio, forse superfici di scivolamento secondarie, che hanno direzione E-O ed immergono verso sud con inclinazione maggiore rispetto alla stratificazione. Le trincee si sviluppano generalmente lungo questi piani e, soprattutto, non proseguono sui versanti limitrofi ad indicare come siano interpretabili come il risultato di una risposta fragile del *bedrock* arenaceo (Fig.4.47 b). Queste

linee di debolezza, da un lato, potrebbero essere interpretate come faglie dirette, connesse con una fase tettonica distensiva post-orogena, tuttavia il loro confinamento all'interno del singolo versante consente di considerare questi lineamenti come evidenze di frane profonde di versante (DGPV). Le trincee stesse possono essere riferite ad un piano di taglio immergente quasi verticalmente all'interno delle formazioni arenacee e che si orizzontalizza all'interno di livelli più deboli di natura marnoso-pelitica.

Le principali evidenze di movimento sono rappresentate da ondulazioni nei campi arati e crepe e fratture lungo la strada frazione di Corella. In Fig 4.47 (c, d, e) possiamo fare il confronto tra i cambiamenti sperimentati da questa strada negli ultimi anni: nel 2016 il guardrail è inclinato, ondulato e eroso alla sua base, nel 2014 la strada mostra ondulazioni e rigonfiamenti, nel 2011 invece sono visibili solo deboli deformazioni del manto stradale. Movimenti superficiali, avvenuti in tempi recenti, sono inoltre testimoniati da numerosi tiranti installati su edifici, probabilmente costruiti all'inizio del 900'. Molte sono le fratture e crepe rilevate sui muri perimetrali delle costruzioni.

L'attuale uso del suolo è caratterizzato da terreni lasciati a pascolo e aree boscate, quest'ultime dominanti sulle porzioni perimetrali del corpo di frana.

Nel 1954 lievi ondulazioni erano visibili in settori ristretti collocati lungo il fianco sinistro e nella porzione terminale, testimoniate da una perdita di continuità dei filari di piante maritate al vigneto (Fig.4.48). La scarpata di frana era caratterizzata dalla presenza di piante arboree sparse e aree lasciate a pascolo. Per quanto riguarda l'uso del suolo, il territorio in corrispondenza della frana era prevalentemente coltivato sia a seminativo che con piante arboree e con filari di piante maritate al vigneto.

Nel 1988 aumentano le evidenze associate a deformazioni e rigonfiamenti, probabilmente anche a seguito di un'intensa variazione di uso del suolo e della transizione da vigneti a terreni lasciati a pascolo e campi arati. Nella parte sommitale e centrale si osservavano ondulazioni relative a fenomeni di soliflusso superficiale, marcate anche da strappi del manto erboso e testimoniate dai tiranti presenti sulle abitazioni. La scarpata principale invece si mostrava vegetata e priva di sintomi di attività.

Nel 1996 le ondulazioni erano ben visibili nel settore sommitale e in quello centrale soprattutto in corrispondenza delle aree lasciate a pascolo, collocate in prossimità dei due agglomerati di case Larciano e C. Federigo. Tali evidenze, visibili solamente in sporadici settori circoscritti, sono da ricondurre a deformazioni superficiali lente identificabili come soliflussi. Inoltre era presente un settore ristretto privo di vegetazione, sulla parte sommitale destra del

corpo, che può suggerire la presenza di una recente riattivazione. Per quanto riguarda l'uso del suolo, ai piedi della scarpata erano presenti aree boscate e zone dedite al pascolo. Nella parte superiore e in quella terminale del corpo di frana l'uso del suolo rimane invariato rispetto al decennio precedente.

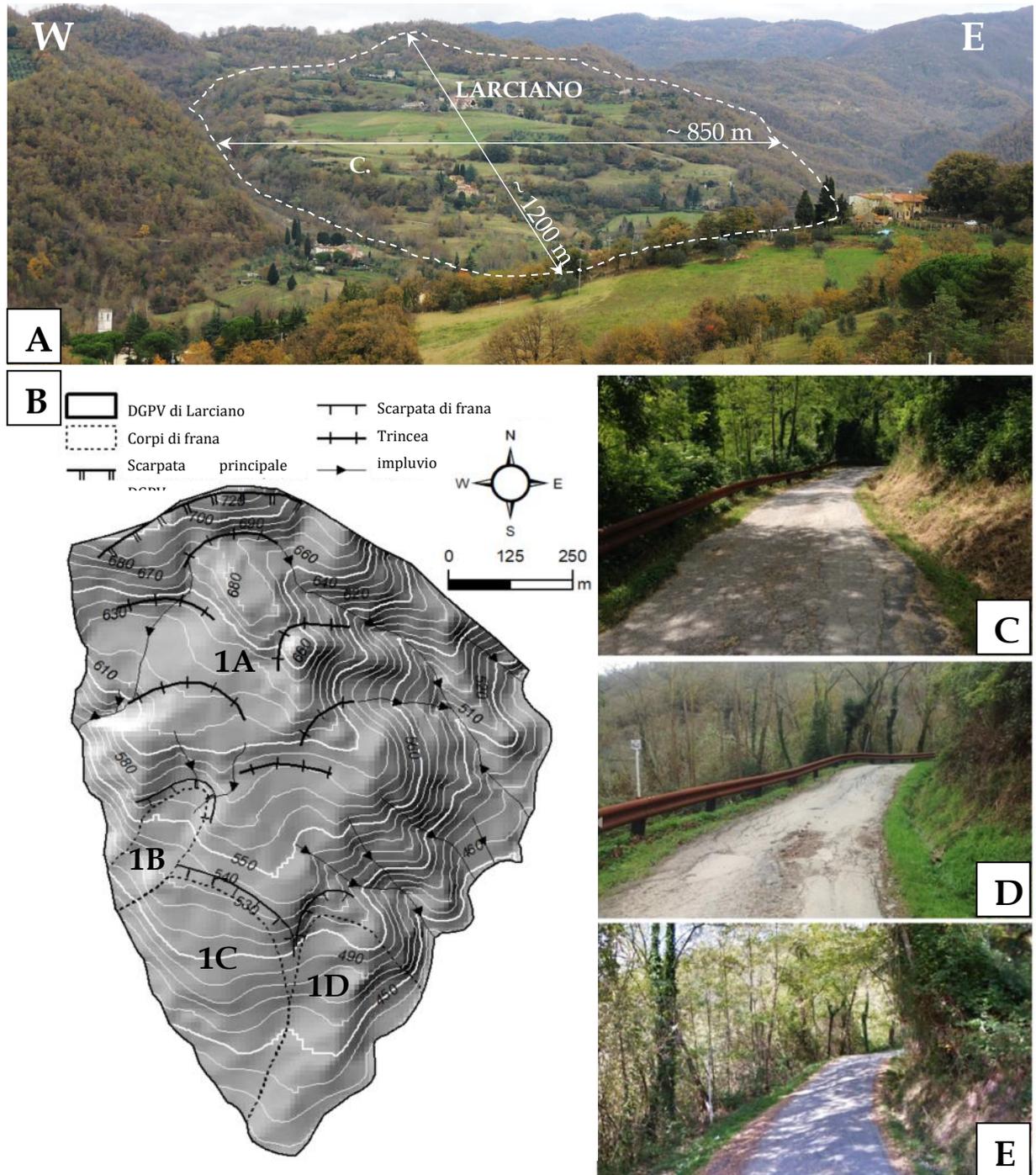


Fig. 4.47 Frana di Larciano: (a) elementi salienti del versante di Larciano (il tratteggio bianco delimita il corpo di frana); (b) caratteristiche salienti della frana di Larciano. Si riportano inoltre i cambiamenti riconosciuti lungo la strada di Corella (Frana 1D): (c) 2017 – strada deformata e guardrail inclinato, (d) 2014 – deformazioni e ondulazioni del manto stradale, (e) 2011 – strada blandamente deformata.

Sia la scarpata che il corpo principale di frana sono stati classificati come quiescenti di secondo livello perché nonostante movimenti superficiali attivi siano stati osservati in vari punti del corpo franoso, essi sono riconducibili a ondulazioni superficiali che coinvolgono settori circoscritti del corpo di frana.

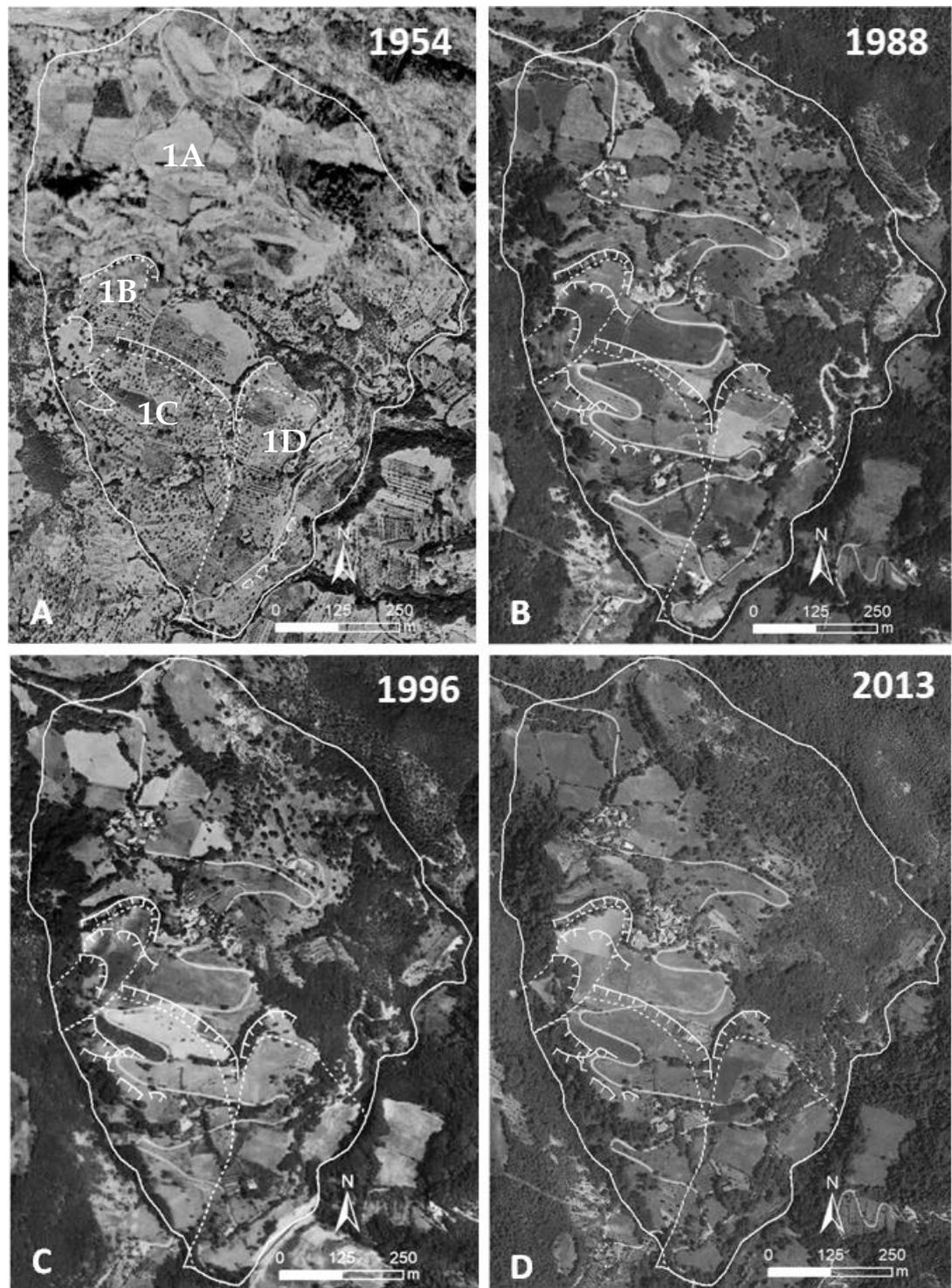


Fig. 4.48 Ortofoto relative all'analisi multitemporale eseguita sulla frana no. 1° - Frana di Larciano: (a) 1954, (b) 1988, (c) 1996, (d) 2013. Si distinguono la DGPV (linea bianca) le scarpate (linee bianche con trattini) e corpi di frana più superficiali 1B,C,D (puntinato bianco).

Frana 1B

La frana 1b (Fig. 4.47), classificata come un colamento, è collocata subito ad ovest di C. Federigo. La sommità della scarpata principale nell'area di corona si trova ad una quota di ~570 m s.l.m. Essa ha un'altezza compresa tra i 5 e i 10 m, si estende lateralmente per ~250 m, con una corda dell'arco orientata NO-SE e si presenta vegetata. Il manto erboso subito al di sopra della scarpata presenta quelli che sembrano strappi paralleli all'andamento del gradino associato alla corona. Una serie di scarpate secondarie è poi identificabile scendendo lungo il corpo di frana verso il fondovalle. La scarpata secondaria più estesa ha una forma arcuata, è collocata a una quota media di ~535 m s.l.m. e si estende lateralmente per 110 m, con una corda dell'arco orientata NO-SE e un'altezza compresa tra i 5 e i 10 m. Tale scarpata è ricoperta interamente da vegetazione arborea. Nella parte superiore del corpo franoso si trovano altre due scarpate secondarie, meno estese della precedente, con altezza inferiore a 5 m, collocate a quota di circa 550 m s.l.m.; queste scarpatine sono poco visibili poiché degradate da rimodellamenti agricoli. Il corpo di frana ha una lunghezza di ~70 m e un'estensione areale complessiva di ~6000 m². La frana è caratterizzata da ondulazioni che si sviluppano prevalentemente nella parte superiore tra la scarpata principale e quelle secondarie. Eventuali evidenze di movimento nella porzione distale sono mascherate dalla presenza di una folta copertura boscosa la cui presenza testimonia comunque un'instabilità diffusa del versante. L'attuale uso del suolo vede la prevalenza di campi coltivati a seminativo e aree a pascolo ai piedi della scarpata principale, nella parte superiore-centrale del corpo di frana, mentre nella parte terminale il terreno è prevalentemente lasciato a bosco.

Nel 1954 il settore sottostante tra la scarpata principale era interessato da deformazioni visibili sotto forma di filari di piante interrotti mentre verso il piede del movimento l'incisione torrentizia aveva prodotto la formazione di aree denudate, prive di vegetazione (Fig.4.48). Per quanto riguarda l'uso del suolo, l'area appariva totalmente coltivata, nella parte superiore del corpo, infatti, erano presenti coltivazioni ad alberi disposti in filari, mentre la parte inferiore era lasciata incolta, probabilmente a causa delle elevate pendenze e di processi gravitativi già in atto.

Nelle ortofoto del 1988 erano ben visibili alcune scarpate minori, a forma di mezzaluna, che indicavano una limitata riattivazione del movimento franoso. La scarpata secondaria inferiore era più evidente che nelle decenni precedenti ed era stata interessata da una riattivazione, con andamento retrogressivo, testimoniata dalla riduzione areale dei campi coltivati sovrastanti tale lineamento. Inoltre, riguardo all'uso del suolo, in questi anni si assiste

ad una netta riduzione delle pratiche agricole e i filari piante vengono soppiantati da terreni lasciati a pascolo.

Nel 1996 una debole attenuazione dei movimenti era testimoniata da una netta riduzione delle evidenze associate all'attività. La scarpata principale non era variata rispetto alla decade precedente. Sul fianco destro della frana, in un settore ristretto, ondulazioni e aree denudate suggeriscono lievi movimenti di colata in atto. Eventuali evidenze di movimento nella porzione distale erano mascherate dalla presenza di una folta copertura boscosa. L'uso del suolo era simile a quello degli anni precedenti.

Il colamento è stato dunque classificato come attivo di secondo livello sebbene le evidenze di movimenti in atto siano presenti solo in settori localizzati. La scarpata principale resta sostanzialmente invariata nel corso degli anni oggetto di analisi, e viene classificata come quiescente di secondo livello. Le scarpate secondarie, invece, che si sono attivate e/o riattivate dal 1988, vengono classificate come attive di primo livello, eccetto la scarpata secondaria arcuata più inferiore (posta a quota 535m) che sembra già attiva dal 1954 e perciò è stata classificata come attiva di secondo livello.

Frana 1C

Il colamento 1C è situato a sud di C. Federici (Fig. 4.47 b) ed è caratterizzato da una scarpata principale profondamente rimodellata dalle lavorazioni agricole. Tale scarpata, di forma arcuata, è situata ad una quota di 535 m s.l.m., ha un'altezza tra 5 e 10 m e una lunghezza di ~330 m con una corda dell'arco orientata NO-SE. Il corpo di frana ha una lunghezza di ~300 m e un'estensione areale complessiva è di oltre 100000 m², è caratterizzato da blande ondulazioni in settori circoscritti, che ne hanno consentito la classificazione come colamento. Riguardo all'uso del suolo sono dominanti i terreni lasciati a pascolo e ciò consente di osservare con facilità le tracce di ondulazioni e gibbosità. Inoltre, la presenza di gabbionate metalliche (Fig.4.48 d) e il percorso piuttosto sinuoso della strada Frazione di Corella sono ulteriori prove a favore di dinamiche superficiali tutt'ora attive.

Nel 1954 localizzate evidenze di attività erano concentrate sia ai piedi del versante, in prossimità del torrente, sia in corrispondenza di filari di piante interrotti, lungo il fianco sinistro del movimento. La scarpata principale era smussata e ricoperta di vegetazione. L'uso del suolo era dominato dalla tradizionale coltura dell'alberata, con filari di vite maritati a piante da frutto.

Nel 1988 la scarpata principale era ancora vegetata e non si apprezzano modificazioni rispetto agli anni precedenti. Il settore medio-terminale del corpo di frana invece era

interessato da una serie di piccole colate, con scarpatine arcuate, che avevano spogliato il terreno della sua copertura erbosa.

Nel 1996 nelle aree collocate sul fianco destro della frana erano visibili crepe nel suolo e piccole aree con scarsa vegetazione, localizzate in settori circoscritti. Rispetto alla decade precedente l'uso del suolo non sembrava aver subito variazioni apprezzabili.

Il colamento è stato classificato dunque come attivo di secondo livello. Tuttavia, rispetto agli anni 50' quando le prove di attività erano più evidenti, nel periodo attuale il movimento sembra essersi attenuato e tende ad evolvere con dinamiche molto lente. La scarpata principale, invariata per tutto l'intervallo di osservazione (1954-2013), è stata classificata come quiescente di secondo livello. Le scarpate secondarie, invece, sono evidenti a partire dal 1988 e sebbene la loro attività si riduca già a partire dal 1996, sono state classificate come attive di primo livello.

Frana 1D

Il colamento 1D (Fig. 4.47 b) è situata sul fianco sinistro del versante ed è caratterizzata da una scarpata principale arcuata, attualmente totalmente ricoperta da vegetazione. Quest'ultima è collocata ad una quota di 530m, ha un'altezza compresa tra 5-10 m e una lunghezza di oltre 160m. Il corpo di frana raggiunge il fondovalle, ha una lunghezza di circa 350 m e un'estensione areale complessiva di circa 94000m². Esso è caratterizzato da ampie ondulazioni concentrate in prevalenza nella porzione terminale del versante. Evidenze di instabilità sono rappresentate anche da ondulazioni e deformazioni che coinvolgono la strada Frazione di Corella (Fig4.47 c,d,e) e da fratture sulle pareti di un edificio intirantato, le quali tuttavia non indicano necessariamente un *creep* profondo ma possono essere associate anche a pessime fondazioni. Per quanto riguarda l'uso del suolo dominano campi arati, terreni lasciati a pascolo e aree boscate.

Nel 1954 la scarpata principale era fortemente smussata e in parte priva di vegetazione, sinonimo di una riattivazione dei movimenti in settori circoscritti. L'intero versante era interessato da intense lavorazioni agricole con una netta prevalenza di filari: in generale quest'ultimi non presentavano interruzioni della propria continuità se non in aree ristrette, dove apparivano irregolari e interessati da ondulazioni. Il settore più attivo era quello prospiciente il fondovalle, dove erano presenti numerose piccole frane con scarpate arcuate, in larga parte attivate dall'erosione di sponda fluviale. In queste aree, una strada secondaria

che costeggiava il piede del movimento lungo il suo fianco sinistro, mostrava un andamento molto sinuoso ed era stata interrotta da una piccola colata di roccia o detrito.

Nel 1988 la scarpata non mostrava variazioni rispetto alle decadi precedenti. In questo periodo i movimenti erano concentrati soprattutto nei settori in prossimità del Fosso di Corella, dove si attivavano colate di modesta entità, e nell'area centrale del corpo di frana. L'uso del suolo era notevolmente variato rispetto agli anni 50' passando da frutteti e filari di piante a terreni coltivati.

Nel 1996 i settori interessati da modesti movimenti erano i medesimi di quelli del 1988. La scarpata non mostrava variazioni significative, mentre, lungo il fosso di era presente uno sbancamento compiuto probabilmente per realizzare opere di difesa degli argini. L'uso del suolo era simile alla decade precedente.

Il movimento è stato dunque classificato come un colamento attivo di secondo livello, grazie alla presenza di deformazioni diffuse e localizzate lungo l'interno ammasso franoso.

Al fine di comprendere le peculiarità geomorfologiche di questa area è stata realizzata, con l'utilizzo di un modello digitale del terreno DTM, una sezione del versante di Larciano, interessato dalla presunta DGPV (Fig. 4.49). Nella sezione sono evidenziati i lineamenti principali che caratterizzano questo settore, ovvero la superficie di scivolamento, la sua scarpata principale e le numerose trincee che interessano il corpo di frana in tutta la sua lunghezza. Nella sezione viene ipotizzata l'eventuale profondità del piano di taglio, desunto da considerazioni tratte a partire dallo spessore della scarpata (osservato in campagna) e dalle quote a cui si sviluppano le trincee. Al momento non ci sono dati diretti che possono provare la reale presenza di una superficie di scivolamento netta, tuttavia da un'analisi delle caratteristiche morfologiche superficiali del corpo di frana, sembra possibile che la superficie di scivolamento non sia ancora delineata nella sua interezza. Evidenze di una zona di taglio, infatti, sono visibili solamente nella porzione sommitale del movimento franoso.

Allo stato attuale delle conoscenze, quindi, la sezione qui riportata vuole fornire una delle possibili interpretazioni dell'area in questione e non vuole avere l'onere di rappresentare la soluzione definitiva all'interpretazione geologico-strutturale di questo versante. Maggiori studi basati su sondaggi profondi e/o su analisi geofisiche potrebbero rivelare, con un dettaglio migliore, l'effettiva morfologia e profondità della DGPV.

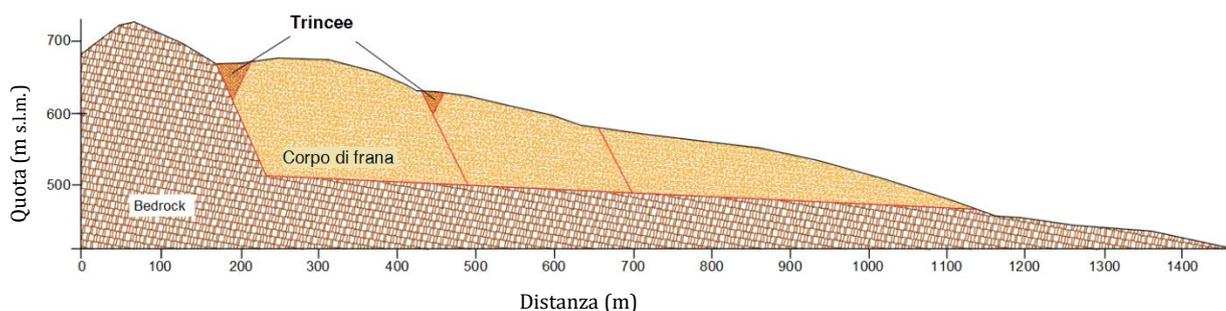


Fig. 4.49 Sezione schematica della DGPV di Larciano. Sono riportate superficie di scivolamento ipotizzata e le trincee (linea rossa).

4.2.6 Complesso di Corella

Come già visto per il complesso di Larciano, anche nel caso del complesso di Corella si può identificare una DGPV sopra alla quale si sono poi impostati movimenti di minore estensione. Dunque, la frana 2 è stata suddivisa in tre diversi corpi (Fig.4.50 a). Dopo aver fornito una descrizione accurata della DGPV (Frana 2A) si descriveranno anche i movimenti più recenti (2B,C) sovrastanti, che sono stati classificati come colamenti poiché caratterizzati da evidenti ondulazioni e da una morfologia piuttosto allungata.

Frana 2A - Frana di Corella

Il paese di Corella (FI) sorge sul versante occidentale del Monte Gattaia (644.6m); il fondovalle, che in corrispondenza del movimento si sviluppa di direzione NE-SO, è collocato ad una quota variabile tra i 410m e i 385m s.l.m... La frana coinvolge l'interno versante e si attesta prevalentemente sull'unità arenaceo-marnosa per una lunghezza complessiva di 750m, una larghezza media di 800m e un'estensione areale di ~600000m². Il movimento è caratterizzato da una scarpata principale semicircolare, alta più di 10m, e perde la sua continuità al di sotto di Loc. Paterno. Tale scarpata si trova ad una quota di 550m s.l.m... Il corpo di frana è marcato da una trincea, collocata ad una quota di 512m, e in generale è modellato da gradini ed ondulazioni sia nei settori sommitali che verso il fondovalle. La scarpata e la trincea sono però parzialmente rimodellate e smussate dalle lavorazioni agricole.

Il paese di Corella è situato al di sopra di questa grande DGPV, e diversi edifici sono stati tirantati, come ad esempio alcuni edifici del piccolo agglomerato di Loc. La Villa e il campanile della Chiesa di S. Martino (Fig.4.50 b ,c). L'uso del suolo è caratterizzato da campi arati e terreni lasciati a pascolo.

Nel 1954 la zona di corona di frana era intensamente rimodellata dai lavori agricoli e la scarpata principale era nascosta da una fitta vegetazione. Evidenze di attività erano visibili

sotto forma di piccole colate e ondulazioni, disseminate soprattutto ad est del paese, inoltre il tracciato stradale di alcuni percorsi era fortemente sinuoso. L'uso del suolo era dedito soprattutto alla pratica dell'alberata anche se non mancano filari di piante sparsi.

Nel 1988 la scarpata principale era ancora parzialmente ricoperta da vegetazione e smussata dai lavori agricoli. Il corpo di frana mostrava attività in settori localizzati, preferenzialmente nelle vicinanze di fossi e torrenti secondari ad est di Corella. L'uso del suolo era variato notevolmente rispetto alla decade precedente e i campi arati erano preferiti ai vigneti e filari di piante.

Nel 1996 l'analisi multitemporale rivela simili evidenze di attività e medesimo uso del suolo rispetto alla decade precedente.

A seguito dell'analisi si è deciso di classificare l'attività sia della scarpata principale, sia del corpo di frana come quiescenti di secondo livello perché non sono state apprezzate evidenze significative. Movimenti superficiali che coinvolgono settori circoscritti del corpo di frana sono associabili a fenomeni di *creep* e soliflusso. Tali fenomeni sono stati osservati in vari punti del corpo franoso, e molte sono le strutture antropiche che ne hanno risentito (Fig.4.50 b, c).

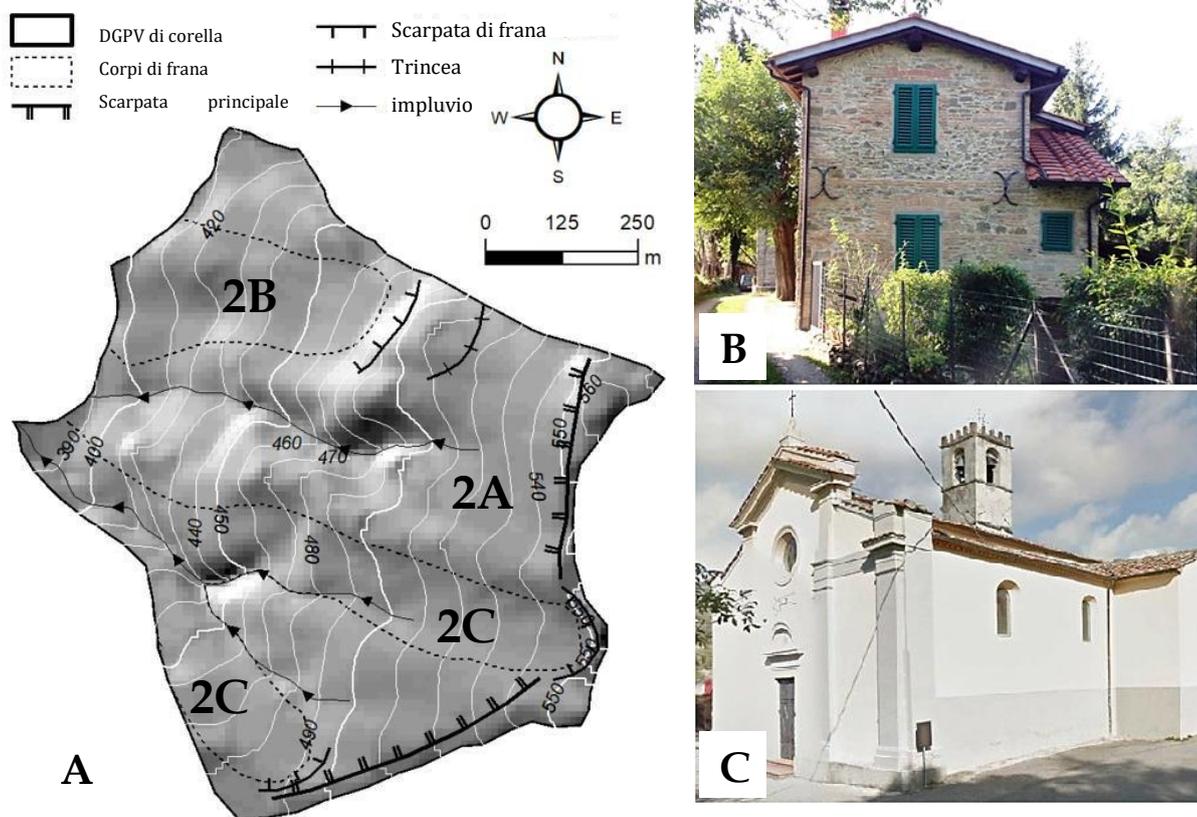


Fig.4.50 Frana di Corella (frana 2): (a)Elementi salienti della frana 2, (b) edificio con tiranti in Loc. La Villa, (c) tiranti nel campanile della Chiesa di S. Martino.

Frana 2B

La frana 2B (Fig.4.50) è un colamento che si sviluppa a nord dell'abitato di Corella. Questo movimento è caratterizzato da una scarpata principale semicircolare posta ad una quota di 495m, ha un'altezza compresa tra 5 e 10m e una larghezza media di 200m. Il corpo di frana ha una lunghezza di 450m, una larghezza di 200 e ricopre un areale di 78000m². La geometria del corpo di frana è moderatamente allungata e una serie di deformazioni e rigonfiamenti sono ben distinguibili nei campi arati. La strada principale taglia il corpo di frana nel settore centrale, in direzione N-S e il suo manto stradale è interessato da molteplici crepe longitudinali.

Nel 1954 la scarpata principale si presentava degradata dalle pratiche agricole e priva di vegetazione arborea suo settore destro. Poco sopra tale scarpata i filari di piante erano spanciati e parzialmente interrotti; anche nei settori terminali del versante i limiti di un campo e i filari di un vigneto erano deformati e ondulati. Inoltre una piccola area, collocata poco sopra la strada frazione Corella, mostrava segni di degradazione ad opera di una piccola colata di terra. Per quanto riguarda l'uso del suolo, la zona era interamente coltivata con piante arboree prevalentemente organizzate in filari.

Nel 1988 la scarpata principale era totalmente vegetata; tuttavia, mediante l'analisi multitemporale è stato rilevato un modesto arretramento, nell'ordine di pochi metri, della zona di corona rispetto alla sua posizione negli anni 50'. Il vigneto collocato poco sopra la strada principale mostrava ancora filari deformati, mentre al piede del versante due piccoli colamenti disturbavano la continuità di un campo arato.

Nel 1996 erano poche le evidenze di movimento. La morfologia era comparabile a quella degli anni 80' così come l'uso del suolo.

La frana è stata quindi classificata come un colamento, attivo di secondo livello. Il movimento evolve comunque con dinamiche piuttosto lente e mostra evidenze di attività in porzioni modeste dell'intero ammasso. Anche la scarpata principale, che esibisce un trend retrogressivo, può essere considerata come attiva di secondo livello.

Frana 2C

Questo colamento si sviluppa a SE di Corella ed è caratterizzato dalla presenza di due corpi di frana coalescenti, che si originano da scarpate diverse poste in settori diversi del versante e che si uniscono in un unico corpo di frana in corrispondenza della porzione centrale del versante. Le due scarpate principali sono semi-circolari e hanno entrambe un'altezza compresa tra 5 e 10m. La scarpata più orientale è situata ad una quota di 550m e si estende

lateralmente per ~ 180m, con una corda dell'arco orientata N-S; quella più occidentale è posta ad una quota media di 520m e si estende per 1770m, con una corda dell'arco orientata approssimativamente NE-SO.

I due corpi di frana coalescenti sono stati parzialmente degradati dai rimodellamenti agricoli e sono attraversati da una strada secondaria che connette il piccolo abitato di Petrognano con i poderi circostanti. La lunghezza media del corpo di frana è di ~ 1000m, con un'ampiezza media di ~ 150, ed un'estensione di oltre 165000m²; la forma in pianta che ne deriva è quella di una frana particolarmente allungata lungo la direzione di massima pendenza del versante. L'uso del suolo è dominato da campi coltivati e a seminativo.

Nel 1954 le due scarpate principali erano smussate a causa delle pratiche agricole (Fig.4.51). Evidenze di attività erano suggerite da filari interrotti e ondulazioni nei campi arati, diffuse ampiamente lungo l'intero corpo di frana. Tali evidenze erano più fitte in corrispondenza della zona di congiunzione dei due movimenti. Filari di piante e terre arate erano l'uso del suolo tipico di questo settore.

Nel 1988 la zona limitrofa alle scarpate dei movimenti era caratterizzata da coltivazioni e piante arboree sparse. Le evidenze di deformazione erano collocate soprattutto nella parte sommitale del corpo più orientale e erano rappresentate da: ondulazioni, discontinuità dei tracciati stradali e filari di piante deformati. Questo corpo sembrava più esteso verso la sommità rispetto agli anni 50'. Riguardo all'uso del suolo, sull'intero settore in frana dominavano i campi coltivati.

Nel 1996 la scarpata principale era vegetata mentre diffuse deformazioni erano ancora visibili sui corpi di frana. Alcuni limiti di campo e tracciati stradali apparivano ancora più sinuosi che nella decade precedente.

Il movimento è stato dunque classificato come un colamento composito attivo di secondo livello. Inoltre la distribuzione di attività può essere considerata in allargamento, poiché il volume di materiale coinvolto sembra aumentare nel passaggio dagli anni 50' agli anni 80'. Le scarpate principali sono state classificate come quiescenti di secondo livello perché non sembrano essere state interessate da riattivazioni nell'arco temporale analizzato.

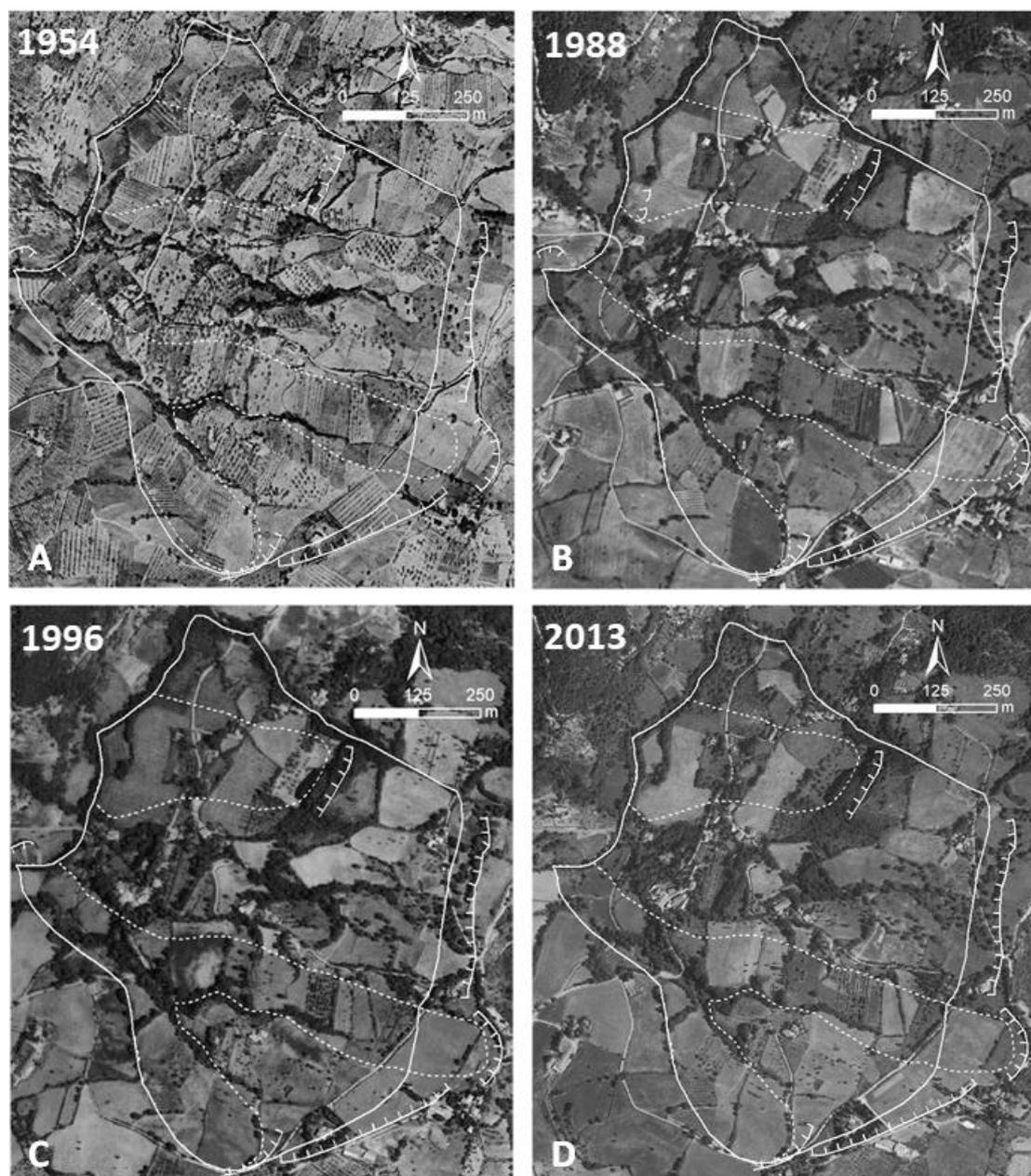


Fig. 4.51 Ortofoto relative all'analisi multitemporale eseguita sulla frana no. 2 - Frana di Larciano: (a) 1954, (b) 1988, (c) 1996, (d) 2013. Si distinguono la DGPV (linea bianca continua) le scarpate (linee bianche dentate) e corpi di frana più superficiali 2B,2C (puntinato bianco).

4.2.7 *Complesso di Petrognano*

Esso è costituito da una deformazione gravitativa profonda di versante sulla quale, in posizione medio-terminale, si è imposta una frana di tipo complesso. L'analisi multitemporale si è concentrata solamente sulla frana no.3 che coinvolge l'area circostante l'abitato di Petrognano, tralasciando le dinamiche relative agli altri settori disabitati.

Di seguito si fornisce una descrizione dei caratteri salienti del versante, che ne hanno portato alla classificazione come DGPV, focalizzandosi successivamente sulla delucidazione delle peculiarità relative alla frana 3.

Frana 3 - Frana di Petrognano

In prossimità di Loc. Il Bacio e Petrognano, sul fianco destro della valle di Corella, la morfologia è piuttosto complessa. Sono visibili due scarpate, la prima posta ad una quota di 960m appare degradata e parzialmente priva di vegetazione, invece la seconda, a una quota inferiore di 575m, è interamente ricoperta da vegetazione.

La zona centrale del versante è caratterizzata da una serie di contro-scarpate e contropendenze, distribuite in modo abbastanza uniforme scendendo verso la base del versante: a 685m e 550m si distinguono le due trincee principali della frana 3, mentre a 535m, 510m e 475m sono state mappate ulteriori trincee. Nell'area di studio si è osservato come spesso queste trincee fungano da linee di drenaggio preferenziali sulle quali si impostano gli impluvi secondari che si dipartono dai margini del versante. In corrispondenza di queste contropendenze, l'incisione fluviale ha generato elementi strutturali con profilo trasversale triangolare comparabile a quello associato alle faccette triangolari (Fig.4.40).

L'area immediatamente sottostante Petrognano mostra nette ondulazioni e piccole scarpate minori interamente ricoperte da vegetazione. Il piede del versante è interessato da fenomeni di erosione di sponda e in questo settore il tracciato fluviale mostra una forte sinuosità.

Considerando lo spessore medio delle scarpate (~ 20 m) e lo spessore del corpo disseccato dalle trincee (~ 150m), è possibile stabilire come il movimento non sia confinato nei settori superficiali del versante, ma piuttosto interessi l'intero pendio.

La frana di Petrognano, frana 3, coinvolge un'alternanza di strati arenacei, marnosi e argillosi che immergono verso i settori sud-occidentali con inclinazioni che vanno da circa 30° a 75°.

La scarpata principale del movimento è arcuata e posta alla quota di 575m. L'altezza della scarpata è di oltre 20 m e si estende lateralmente per 390m con una corda dell'arco orientata NE-SO. Il corpo di frana ha una lunghezza di 650m, una larghezza di 330m e ricopre un'area di ~230000m².

Il movimento è caratterizzato da una trincea principale posta a 550m s.l.m., che taglia il corpo di frana in direzione NE-SO. Tuttavia non si hanno prove dirette che questo piano di taglio sia ben definito e che la superficie di scivolamento sia completamente enucleata dalla sommità alla base del versante. Se così non fosse allora il movimento sarebbe una frana ancora allo stato

incipiente paragonabile ai *sagging* di Hutchinson (1988). Se una superficie di taglio esistesse, allora sarebbe probabilmente collocata all'interno di un interstrato marnoso-pelitico e il movimento potrebbe essere descritto come uno scivolamento planare di roccia (*Rock block slide* secondo Varnes 1978, *planar slide* secondo Hutchinson 1988, *translational slide* secondo Cruden e Varnes 1996, *rock planar slide* o *block slide* secondo Hungr et al. 2014) e avrebbe uno spessore superiore ai 70m (stimato dallo spessore della scarpata e da quello delle trincee che si approfondiscono sul margine del versante verso il fondovalle). Inoltre, le deformazioni osservate alla base del versante sono riferibili a colamenti di roccia (*rock flows* secondo Varnes 1978, Cruden e Varnes 1996).

Per quanto riguarda l'uso del suolo prevalgono zone boscate e talvolta filari di piante nei settori sommitali del corpo di frana mentre nelle aree medio terminali prevalgono campi arati e filari di piante.

Nel 1954 la scarpata principale era solo parzialmente vegetata ed evidenze di deformazioni erano localizzate sul fianco sinistro della frana; al di sopra della scarpata piccole aree prive di vegetazione erano assimilabili a colamenti mentre in prossimità dei torrenti secondari e al piede del movimento erano evidenti deformazioni e ondulazioni del terreno. Nei settori mediani i filari di piante avevano perso la loro originaria linearità (Fig.4.52).

Nel 1988 l'area sommitale non mostrava grandi evidenze di deformazione eccetto un settore localizzato al di sotto della scarpata principale, che era attivo anche negli anni 50'. Ondulazioni e deformazioni erano ben visibili al piede del versante e in prossimità degli impluvi, sul fianco sinistro del movimento. I campi arati erano nettamente prevalenti su tutto il corpo di frana mentre le pratiche agricole con filari di piante, molto diffuse nei decenni precedenti, erano state abbandonate.

Nel 1996 le evidenze relative a ondulazioni e deformazioni del terreno erano più evidenti rispetto al decennio precedente, soprattutto nei settori medio-terminali della frana, dove si distinguevano piccoli fenomeni di colamento.

Dunque a seguito dell'analisi multitemporale la scarpata del movimento, attualmente completamente vegetata è stata classificata come quiescente di secondo livello. Il movimento, classificabile come frana complessa può essere così suddiviso: il settore sommitale può essere interpretato come uno scivolamento planare di roccia, quiescente di secondo livello poiché non mostra segni evidenti di attività nel periodo analizzato, mentre l'area limitrofa al fondovalle e in generale la porzione terminale può essere interpretato come un colamento di roccia, attivo di secondo livello e caratterizzato da tassi di movimento lenti.

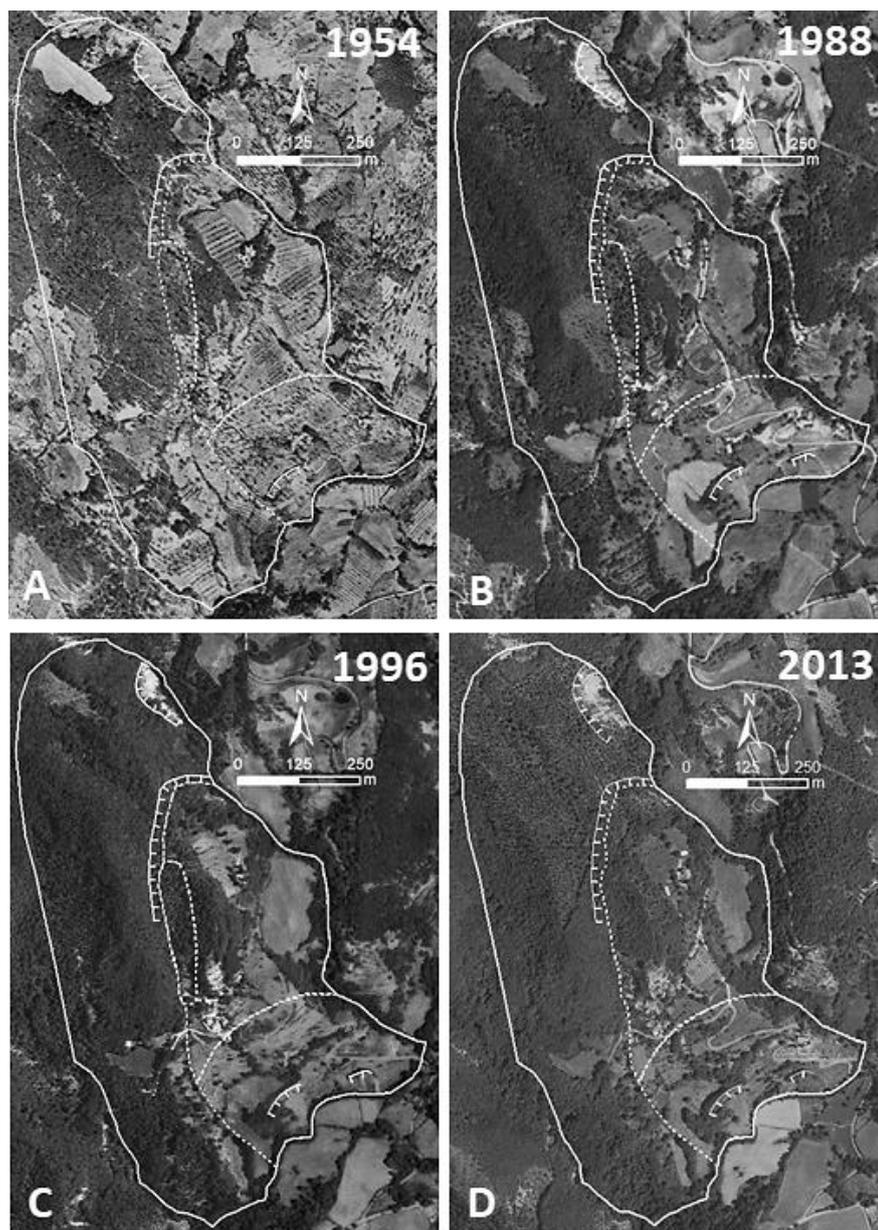


Fig. 4.52 Ortofoto relative all'analisi multitemporale eseguita sulla frana no. 3 - Frana di Petrognano: (a) 1954, (b) 1988, (c) 1996, (d) 2013. Si distinguono la DGPV (linea bianca continua) le scarpate (linee bianche dentate) e il corpo della frana 3 (puntinato bianco).

4.3.5 Considerazioni finali

La maggior parte dei movimenti gravitativi sono stati classificati come attivi di secondo livello, tranne le deformazioni gravitative profonde, che sono state classificate come quiescenti già a partire dagli anni '50. I movimenti per colamento hanno mostrato segni di riattivazione solo in porzioni limitate dell'ammasso senza coinvolgere la totalità il corpo di frana e senza necessariamente raggiungere la profondità dell'eventuale superficie di rottura. La presenza di

continue deformazioni ed evidenze di attività osservate per queste frane a partire dagli anni '50 ha consentito di classificare, cautelativamente, i movimenti come attivi dagli anni 50', ovvero di 2° livello. In Tab.4.6 viene riportata l'interpretazione finale dedotta per i movimenti oggetto di analisi multitemporale.

Una valutazione valida per tutte le frane analizzate, riguarda proprio la loro distribuzione di attività, prevalentemente avanzante, che coinvolge progressivamente quasi tutti i settori posti in prossimità del torrente principale e degli impluvi secondari. Gli anni di maggior attività sono quelli compresi nell'intervallo 1954-1988 o, per alcuni movimenti, 1954 - 1996, mentre nei periodi successivi si assiste ad una generale attenuazione della dinamicità delle frane. Recentemente, durante la fase di rilevamento, si sono osservati piccole frane di colamento che si sono impostate al di sopra di movimenti più profondi e sono collocate generalmente nei settori terminali del versante. I corpi di frana non mostrano variazioni significative del loro areale nell'intervallo temporale analizzato. Va sottolineato come la presenza di una fitta vegetazione sia arbustiva che boscosa abbia in parte mascherato alcune delle tracce di attività visibili durante la fotointerpretazione.

Molte aree che negli anni 50' erano intensamente coltivate sono state o abbandonate o lasciate a prato, e tale variazione di uso del suolo è da imputare ad una diversificazione dell'economia agricola, che a partire dagli anni '80 ha privilegiato la diffusione di pascoli piuttosto che quella di vigneti e frutteti.

Frana no.	Tipo di movimento	L/W	Spessore stimato (m)	Corpo di frana				Scarpata		
				L (m)	W (m)	Area (m2)	stato di attività	L (m)	H (m)	Direzione
1A	DGPV	1,4	>100	1200	850	715000	Quiescenti 2° livello	450	>30	O-E
1B	Colamento (di roccia)	2,7	5 - 10	270	100	26500	Attivi 2° livello	110	5 - 10	NO-SE
1C	Colamento (di roccia)	2,5	1 - 5	430	175	100000	Attivi 2° livello	330	<5	NO-SE
1D	Colamento (di roccia)	1,4	5 - 10	380	270	94000	Attivi 2° livello	170	5 - 10	NE-SO
2A	DGPV	0,9	10 - 20	750	800	600000	Quiescenti 2° livello	1000	>10	NE-SO
2B	Colamento (di roccia)	2,3	5 - 10	450	200	78000	Attivi 2° livello	200	5 - 10	NE-SO
2C	Colamento (di roccia)	7,7	5 - 10	1000	130	167000	Attivi 2° livello	170	5 - 10	NE-SO
3	DGPV (sackung/sagging o scivolamento di roccia translativo/colamento di roccia)	2,0	>50	650	330	230000	Quiescenti 2° livello (parte superiore), Attivi 2° livello (parte inferiore)	390	>20	NE-SO

Tabella 4.6 Caratteristiche salienti dei movimenti franosi oggetto di analisi multitemporale (L- lunghezza, W - larghezza, L/W - rapporto lunghezza/larghezza, H – altezza).

Di seguito si sintetizzano le considerazioni desunte dall'analisi multitemporale delle frane dell'area studio di Corella.

- a) Analizzando nel complesso il versante in frana di Larciano (frana 1) si può ricostruire la cronologia relativa dei movimenti successivi alla DGPV. Dall'analisi multitemporale si è visto come il movimento più antico sia la DGPV (frana 1 A, che certamente prosegue al di sotto delle altre frane) che è responsabile della destabilizzazione delle frane più superficiali. Nella parte distale, quella prospiciente il fosso, l'elevata imbibizione idrica ha condotto all'attivazione di tre colamenti (1B, 1C e 1D). Il colamento 1B appare quello con maggiore dinamicità e con evidenze di movimenti per tutto il periodo di osservazione. Il movimento 1C appare in larga parte stabilizzato dal 1954 e solo limitati tratti presentano indizi di attività nel 1996 e nel 1998. Caratteristiche analoghe presenta il colamento 1D dove i movimenti che nel 1954 sono attivi prevalentemente nella parte distale sovrastante il fosso, presentano meno evidenze negli anni successivi. L'unica eccezione è rappresentata dal settore centrale che presenta lievi ondulazioni nel 1954; tali evidenze continuano poi ad essere attive, con movimenti lenti, sino ai giorni nostri.
- b) Per quanto riguarda il versante di Corella (frana 2), dall'analisi multitemporale si è visto come il movimento più antico sia la DGPV (frana 2A) che certamente prosegue al di sotto delle altre frane e che è responsabile della destabilizzazione che conduce al loro movimento. Su tale frana si sono poi impostati, in tempi più recenti, i due colamenti 2B e 2C. Il colamento 2B, si è sviluppato sul lato destro della DGPV e presenta solo limitati tratti con indizi di attività relativi all'intervallo 1954-1988. Tali evidenze continuano poi ad essere attive, con movimenti lenti, sino ai giorni nostri. Il colamento 2C, che si è impostato sul fianco sinistro della DGPV, interrompendone la scarpata principale, appare, invece, quello più dinamico e con evidenze di movimento per tutto il periodo di osservazione.
- c) Infine, la frana 3, che coinvolge i versanti di Petrognano, è costituita da una deformazione gravitativa profonda di versante (DGPV) sulla quale, in posizione medio-terminale, si è impostata una frana di tipo complesso. Quest'ultima può avere una duplice interpretazione: può essere considerata un movimento complesso di tipo scivolamento traslativo che evolve in colamento (*Complex rock slide-rock flow*, Cruden

and Varnes 1996; *rock planar slide-earthflow*, Hungr et al. 2014) qualora la superficie di scivolamento sia ben delineata, oppure può essere interpretato come una deformazione gravitativa profonda ancora allo stato embrionale (Dramis and Valvo, 1995) comparabile ai *sackung* di Zischinsky (1966) e ai *sagging* di Hutchinson (1988), qualora si tratti di un movimento incipiente, senza una marcata superficie di rottura alla base. L'attività del movimento è evidente soprattutto nell'intervallo '54-'88 quando una serie di modeste colate degradano il versante nel suo settore terminale, verosimilmente innescate dall'erosione di sponda del Fosso di Corella. Dal 1996 fino all'attuale le evidenze di movimento sono, invece, localizzate alla fascia di terreno che borda il fosso.

Capitolo 5

5 Analisi statistica descrittiva

Le analisi statistiche consentono la descrizione qualitativa e quantitativa di fenomeni naturali, anche piuttosto complessi e variabili, e viene condotta generalmente interpretando i dati e le misure ottenuti durante il lavoro di campagna, a partire da determinazioni analitiche condotte da soggetti diversi, con metodologie differenti e, in alcuni casi, anche in tempi diversi (Ciotoli & Finoia 2005).

Tali analisi trovano applicazione nei più svariati campi, dal monitoraggio sull'inquinamento ambientale (Gilbert 1987), alla petrologia e geochimica (Lepeltier 1969, Le Maitre 2013), dall'ingegneria ambientale (Brown & Hambley 2002), al campo delle risorse idriche (Helsel & Hirsch 2002).

L'Analisi di statistica descrittiva è la branca della statistica che consente di descrivere quantitativamente e/o riassume le caratteristiche di un dato set di informazioni, solitamente espresso da una popolazione di dati o da una parte di essa (detta campione).

Rappresenta un metodo esplorativo utilizzato per individuare aspetti significativi dei dati mediante semplici procedure aritmetiche e/o grafiche, che li riassumono.

Si distingue, dunque, dalla statistica inferenziale, che viene utilizzata per conoscere le caratteristiche della popolazione a partire dall'osservazione di un campione di dati che la rappresenta. Lavorando su campioni casuali, questo tipo di statistica si sviluppa sulla base della teoria della probabilità, rispondendo a dei quesiti specifici attraverso misure e analisi di incertezze associate ad eventi futuri. I risultati ottenuti dall'analisi inferenziale dovranno riflettere l'incertezza attraverso tabelle di probabilità ed intervalli numerici.

Le statistiche descrittive, invece, forniscono semplici riepiloghi sul campione e sulle osservazioni che ne derivano. Tali sommari possono essere sia quantitativi, cioè statistiche

riassuntive, sia visivi, ovvero grafici e tabelle. Questi riepiloghi possono essere utilizzati come base della descrizione iniziale dei dati, possono rappresentare parte di un'analisi statistica più ampia, oppure possono essere utilizzati a sé stante per una particolare indagine.

Il vantaggio associato alle procedure statistiche è quello di consentire la gestione ed elaborazione di enormi moli di dati sperimentali per valutare le condizioni reali dei fenomeni da essi descritti, ed è possibile condurle con diversi gradi di approfondimento, a seconda delle disponibilità di conoscenze, mezzi ed informazioni (Koch & Link 2002). Analisi di questo tipo consentono di minimizzare possibili interpretazioni soggettive dei dati ambientali, (Ciotoli & Finoia 2005) e permettono di effettuare analisi preliminari speditive dei parametri predisponenti più incisivi nell'innescò delle frane di ciascuna area studio, consentendo di coglierne le relative peculiarità e similitudini.

Nel presente elaborato di tesi, la statistica descrittiva ha permesso di analizzare le interazioni esistenti tra i fattori ambientali e i fenomeni gravitativi mappati durante il rilevamento geomorfologico.

In particolare, l'obiettivo è quello di fornire un quadro d'insieme e consentire di visualizzare la variabilità (e le eventuali differenze) dei parametri predisponenti le frane, sia all'interno di ciascuna area di studio, sia nella sintesi di tutte le zone investigate. In passato svariate metodologie sono state applicate per comprendere i rapporti tra i caratteri fisici dell'ambiente e i fenomeni franosi (Sorriso Valvo et al. 1996), tuttavia la maggior parte di tali metodologie si sono incentrate sui rapporti esistenti solamente tra la franosità e le litologie (Carrara 1983, Sorriso-Valvo 1984). Negli ultimi decenni, invece, il peso attribuito a diversi fattori ambientali come ad esempio esposizione e acclività dei versanti, distribuzione dei lineamenti tettonici, distanza dalle linee di drenaggio e uso del suolo, è progressivamente aumentato, anche grazie all'utilizzo di software specifici di tipo GIS e tecniche di fotointerpretazione (Swan & Sandilands 1995, Lee et al. 2004; Yalcin, 2008; Magiulo 2008; Abdallah 2005; Zhu & al. 2006).

La limitazione di un'analisi di questo tipo risiede principalmente nell'impossibilità di considerare le eventuali reciproche relazioni tra variabili diverse, poiché è possibile analizzare e riassumere l'andamento di un set di dati appartenenti ad una sola variabile alla volta.

Al fine di uniformare l'analisi e rendere confrontabili tra loro le diverse aree di studio sono stati selezionati i medesimi parametri predisponenti per tutte le aree investigate. L'analisi di statistica descrittiva è stata condotta mediante la sovrapposizione tra le frane riportate nel *geodatabase* (realizzato durante il lavoro di dottorato) e i 6 fattori predisponenti considerati: litologia, uso del suolo, acclività del versante, esposizione, elevazione e area drenata Per

ciascun fattore causale, dunque, tramite l'utilizzo di software GIS, si è realizzata una mappa in formato *raster* dalla risoluzione di 10X10m (100 m²).

L'analisi statistica ha preso come area di riferimento sia quella relativa a ciascuna area di studio, che generalmente ha un'estensione di pochi km², sia l'area a scala sub-comunale, di estensione nell'ordine dei ~100 km², prendendo in considerazione un limite geometrico prossimo ma non uguale a quello del comune di riferimento per ciascuna area di studio.

L'inventario delle frane utilizzato per le aree studio è il medesimo realizzato durante il lavoro di campagna e analisi multitemporale. Tale inventario è particolarmente dettagliato anche nel caso di movimenti gravitativi con stato di attività quiescente; in questi casi, infatti, l'analisi multitemporale, coadiuvata dal rilevamento di campagna, ha consentito di determinare dettagliatamente anche i limiti delle frane quiescenti, solitamente di non facile interpretazione poiché mascherate dal rimodellamento antropico ed erosione.

I poligoni delle frane utilizzate per le aree a scala sub-comunale, invece, sono stati ricavati dagli shp file presenti sul sito della Regione Toscana (database aggiornato con i contenuti del Progetto IFFI, Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia realizzato dall'ISPRA e dalle Regioni e Province Autonome), le cui morfologie finali sono state parzialmente reinterpretate tramite le più recenti ortofoto disponibili (anno 2013).

In particolare, all'interno dell'areale di ciascuna frana si è considerata sia la zona di accumulo sia quella di distacco.

5.1 Indice di Franosità (IF)

Per definire e quantificare l'incisività di ciascuna delle classi negli episodi di franamento è stato individuato un Indice di Franosità (IF; Trigila & Iadanza 2007). Tale indice, espresso in percentuale, esprime il rapporto fra l'area in frana all'interno di una certa classe litologica e l'area totale della stessa classe litologica (formula 5.1) e viene ottenuto tramite la seguente formula:

$$IF = \frac{\left(\frac{NLPIX \times 100}{NTLPIX}\right)}{\left(\frac{NPIXLU \times 100}{NTPIXLU}\right)} \quad [5.1]$$

dove

- NLPIX = n° di pixel in frana per ciascuna unità litologica

- NTLPIX = n° totale di pixels per ciascuna unità litologica
- NPIXLU = n° pixel per ciascuna unità litologica
- NTLUPIX = n° totale di pixel

I sei parametri predisponenti (litologia, uso del suolo, acclività del versante, esposizione, elevazione e area drenata) sono stati riclassificati secondo specifici intervalli. Dopodiché si sono discussi dapprima i risultati prodotti dalla combinazione tra i parametri predisponenti e le frane censite nell'inventario; successivamente si sono incrociati tra loro i parametri predisponenti che sono risultati più significativi. In questo modo è stato possibile conoscere la rilevanza statistica di ciascuna delle classi identificate.

Infine, per consentire la visualizzazione all'interno di ciascuna area di studio della variabilità (e delle eventuali differenze) dei parametri predisponenti il dissesto, si è fatto ricorso a dei grafici di sintesi (*box plot*) che potessero evidenziare sia la distribuzione dei parametri considerati predisponenti per ogni sito, sia la loro variabilità, valutando così quali parametri sono i più determinanti per quanto riguarda la distribuzione dei fenomeni gravitativi rilevati.

5.2 Definizione dei parametri predisponenti

5.2.1 Pendenza

La pendenza (o acclività) è uno dei fattori predisponenti che ha maggiore impatto sull'innescio di un fenomeno franoso ed è valutato come uno dei più importanti dato che è direttamente correlato con l'angolo del versante (Yalcin, 2008). Spesso l'acclività è fortemente dipendente dalle caratteristiche strutturali del versante (giacitura degli strati, elementi tettonici). La mappa dell'acclività, in formato *raster*, è stata ottenuta derivandola direttamente dal Digital Elevation Model (DEM - risoluzione del pixel 10X10m) dell'area di studio, mediante gli strumenti di *Geoprocessing* dedicati presenti all'interno dei Software GIS, in particolare quelli relativi allo *Spatial Analyst*. Il *raster* così ottenuto è stato riclassificato in 8 diverse categorie (Tabella 5.1), per le quali l'unità di misura scelta sono i gradi (°).

CLASSE	Acclività (°)
1	0-5
2	5-10
3	10-15
4	15-20
5	20-30
6	30-40
7	40-50
8	>50

Tabella 5.1 Classi individuate per la riclassificazione del parametro "Acclività".

5.2.2 Esposizione

L'esposizione dei versanti è un altro importante fattore che spesso incide nell'innescare dei movimenti gravitativi. La carta relativa all'esposizione, espressa in gradi, è stata ricavata dal DEM, tramite le specifiche funzioni di *Spatial Analyst* presenti su GIS, così come visto per la mappa dell'acclività.

L'esposizione incide su parametri come l'esposizione alla luce del sole e il grado di saturazione del terreno (Yalcin et al., 2008). Inoltre ha un'importante influenza sulle temperature (alla scala globale) e può influenzare la composizione del suolo. La mappa così ottenuta è stata riclassificata in 9 categorie in funzione dell'orientazione geografica (Tabella 5.2).

CLASSE	Esposizione (°)
ORIZZONTALE	0
N	337.5-22.5
NE	22.5-67.5
E	67.5-112.5
SE	112.5-157.5
S	157.5-202.5
SO	202.5-247.5
O	247.5-292.5
NO	292.5-337.5

Tabella 5.2 Classi individuate per la riclassificazione del parametro "Esposizione".

5.2.3 Litologia

Nella mappa della litologia, le differenti unità geologiche affioranti nelle aree di studio sono state raggruppate all'interno di Unità litologiche, create in base alle similitudini di tessitura e granulometria tra i diversi litotipi. Una suddivisione simile è stata utilizzata anche da altri autori, come Magiulo (2008), il quale chiama "complessi litologici" le diverse unità geologiche identificate. Considerando le tre aree di studio, sono state individuate un totale di 8 classi litologiche, suddivise e riassunte in tabella 5.3:

Unità Litologiche	Classi Litologiche	Formazioni geologiche, membri e sintemi	Area di studio
Conglomerati e Ciottoli	UCI	San Casciano (litofacies ciottolosa)	Montespertoli (FI)
Sabbie e ciottoli	USC	San Miniato (litofacies sabbioso-ciottolosa)	
Sabbie e silt	USL	Ponte a Elsa	
		San Casciano (litofacies sabbioso-siltosa)	
Silt e argille	ULA	San Miniato	
		San Miniato	
		Ponte a Elsa (litofacies siltoso-argillosa)	
Ciottoli e sabbie	UCS	Certaldo	Figline Valdarno
		Ciottolami e sabbie di C.la Querce (litofacies ciottolosa-sabbiosa)	

Sabbie e ciottoli	USC	Sabbie di La Loccaia (litofacies sabbioso-ciottolosa)	(FI)
		Sabbie di Levane	
Sabbie e silt	USL	Sabbie di Palazzetto (litofacies sabbioso-siltosa)	
		Sabbie di Borro Cave	
		Sabbie di San. Donato	
Silt e argille	ULA	Limi di Latereto e Pian di Tegna (litofacies siltoso-argillosa)	
Arenarie e marne	UAM	Membro di Montalto	
Marne e arenarie	UMA	Macigno b	
Calcari e marne	UCM	Sillano fm	
		Sillano a	
Arenarie e marne	UAM	Acquerino fm (litotipi arenacei)	Corella (FI)
		Torrente Carigiola fm (litotipi arenacei)	
Marne e arenarie	UMA	Acquerino fm (litotipi marnosi)	
		Torrente Carigiola fm (litotipi marnosi)	
		Marne Varicolore di Villore fm	

Tabella 5.3 Classi individuate per la riclassificazione del parametro "Litologia".

5.2.4 Uso del suolo

L'uso del suolo riflette la diversa copertura presente sulle aree di studio e la relativa mappa rappresenta un prezioso strumento per la conoscenza del territorio ai fini della pianificazione e della gestione.

Svariati sono gli autori che nell'ultima decade hanno dimostrato l'influenza della vegetazione e della copertura del suolo sulla stabilità dei versanti (Ercanoğlu e Gokceoğlu, 2004; Yalcin 2007). Anche l'azione svolta dalle radici delle piante, talvolta a favore della stabilizzazione altra volte della destabilizzazione del versante è stata dimostrata da diversi autori (Steinacher et al., 2009). La presenza di vegetazione consente una certa stabilizzazione dei versanti più ripidi (Rickli e Graf, 2009). Gli apparati radicali delle piante e degli arbusti svolgono un'azione rinforzante sul versante, sono in grado di fornire supporto laterale quando attraversano zone di debolezza e, in generale, producono un incremento della coesione. Essi influenzano i parametri idrici del terreno come la permeabilità, evapo-traspirazione e suzione; la copertura vegetale riduce la quantità di acqua in grado di infiltrarsi nel terreno e il ruscellamento superficiale. Allo stesso tempo anche l'azione di ancoraggio delle radici e il peso degli alberi influenzano la stabilità fisica dei versanti (Tsukamoto 1990, Bischetti et al. 2004). Alcuni autori

hanno stimato come l'incremento della resistenza del terreno indotto dalle radici abbia la capacità di ridurre il tasso di occorrenza delle frane (Cannon & Renau 2000, Beguería 2006). Queste considerazioni valgono però solamente nel caso di frane piuttosto superficiali o con superfici di rottura poco profonde, nell'ordine di qualche metro. Nel caso in cui la superficie di scivolamento sia piuttosto profonda, né gli apparati radicali, né il peso degli alberi, né l'incremento di coesione indotto dalle radici, garantiscono la stabilizzazione del versante.

La deforestazione, che induce una perdita della resistenza sul terreno da parte dei sistemi radicali, è uno dei fattori principali nella destabilizzazione del versante. Tuttavia il disboscamento di aree prone al franamento, al fine di diminuire la pressione indotta dal peso delle piante stesse, è una procedura messa in atto di frequente nelle regioni alpine, perciò meriterebbe di essere approfondita più attentamente per capire in anticipo se questa pratica ha un riscontro positivo e negativo sulla stabilizzazione del versante (Steinacher et al. 2009).

Il database di uso e copertura del suolo utilizzato è il medesimo reso disponibile *open source* dalla Regione Toscana (<http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/cartoteca.html#>). In particolare si è preso in considerazione il secondo livello di dettaglio presente nel database datato 2013. In totale 12 sono le categorie di uso del suolo che sono state riconosciute nelle diverse aree di studio, come evidenziato in tabella 5.4:

CLASSE	Uso del suolo
11	Aree urbane
12	Zone industriali
13	Zone estrattive cantieri, discariche e terreni artefatti e abbandonati
14	Zone verdi artificiali non agricole
21	Seminativi
22	Colture permanenti
23	Prati
24	Zone agricole eterogenee
31	Zone boscate
32	Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea
33	Zone aperte con vegetazione rada o assente
41	Zone interne umide
51	Acque continentali

Tabella 5.4 Classi individuate per la riclassificazione del parametro "Uso del suolo".

5.2.5 Elevazione

L'elevazione è un altro fattore, talvolta preso in considerazione tra i fattori causali di frana (Pachauri & Pant 1992). La mappa in formato *raster* relativa alle quote è stata ricavata direttamente dal DEM di ciascuna area di studio, riclassificandolo in diverse categorie a seconda dell'area di studio, al fine di definire quale intervallo di quote fosse più pronò al franamento (Tab. 5.5). Questo perché le aree montuose sono caratterizzate da *range* piuttosto ampi (ad esempio tra il fondovalle e la sommità del crinale si possono avere oltre 1000m di dislivello), mentre le aree di bacino o collinari hanno dislivelli meno variabili, nell'ordine di poche centinaia di metri.

CLASSE	ELEVAZIONE (m)
1	10-150
2	150-300
3	300-400
4	400-500
5	500-600
6	600-700
7	700-800
8	800-900
9	900-1000
10	1000-1000
11	1100-1200
12	1200-1300

Tabella 5.5 Classi individuate per la riclassificazione del parametro "Elevazione" nell'area di Corella.

5.2.6 Area drenata

L'area drenata, detta anche *flow-accumulation*, calcola il n° di celle che contribuiscono alla direzione principale di flusso (Fig.5.1). Alti valori di *flow-accumulation* indicano aree con un'alta concentrazione del flusso che identificano le celle del reticolo idrografico. Bassi valori sono relativi alle celle adiacenti con la linea spartiacque del bacino e il valore di 0 identifica alti topografici o le celle coincidenti con lo spartiacque. In pratica il *raster* creato indica la direzione di deflusso da ogni cella verso le celle limitrofe confinanti più basse, utilizzando il modello classico *D-Infinity* nel quale ad ogni cella viene assegnata una delle 360 possibili direzioni di deflusso in funzione della massima pendenza e dell'azimut.

L'area contribuente al deflusso, detta anche area drenata, viene calcolata sommando in progressione il numero di celle che si trovano lungo i percorsi che portano a ciascuna cella.

Il Risultato del "*Flow Accumulation*" è un *raster* dei flussi accumulati da ogni cella, cioè dall'accumularsi del "peso" di area drenata da parte di tutte le celle. Le celle corrispondenti allo spartiacque avranno valore 1, mentre la cella della sezione di chiusura avrà come valore la somma di tutte le celle dell'intero bacino.

In totale sono 7 le categorie di area drenata che sono state create nelle aree di studio, consultabili nella tabella 5.6:

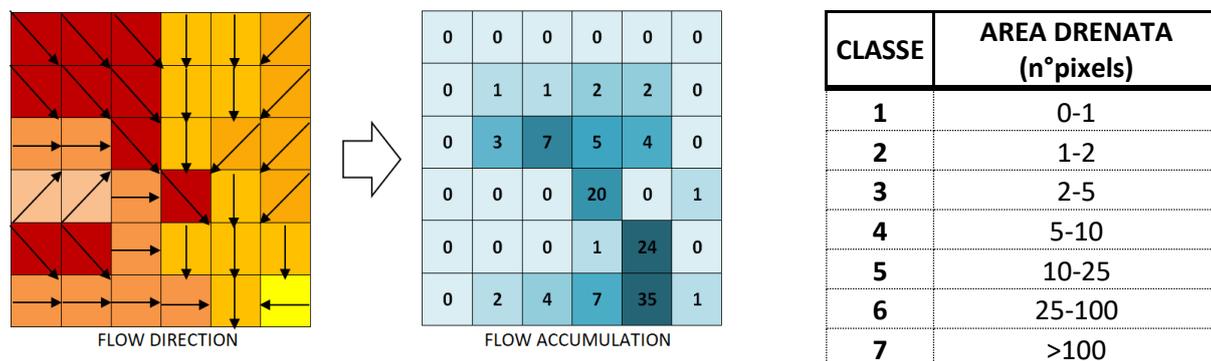


Fig.5.1 Modalità di creazione del raster relativo all'area drenata (flow accumulation) in ambiente GIS.

Tabella 5.6 Classi individuate per la riclassificazione del parametro "Area drenata".

Inoltre, l'area drenata è un parametro che è funzione della lunghezza del versante. La dimensione dell'area di alimentazione può, infatti, influire su due fattori principali:

- a) quantitativo di acqua che defluisce lungo il versante;
- b) spessore della coltre detritica.

In generale, all'aumentare di entrambi questi fattori il versante tende ad essere più instabile, a parità di altre condizioni, come ad esempio pendenza del versante o precipitazioni.

5.3 Montespertoli

5.3.1 Montespertoli area di studio

A partire dalle valutazioni statistiche relative alla distribuzione dei fattori predisponenti considerati e del relativo Indice di Franosità, è possibile capire quale parametro è il più significativo ed incisivo nell'innescare dei fenomeni franosi.

- a) Per quanto riguarda la litologia, nell'area studio di Montespertoli sono 6 le classi litologiche identificate: 1) ULA, 2) USC, 3) UCI, 4) USL, 5) A (depositi alluvionali), 6) EC (eluvio-colluvi) (per le sigle vedere Tab.5.3). Grazie al valore di IF% (Fig. 5.2) è possibile considerare come le litologie USC e ULA, che sono le litologie dominanti nell'area di studio, rappresentano anche quelle più suscettibili al franamento. In particolare, queste litologie presentano proprietà geotecniche molto diverse: i livelli argillosi (ULA), impermeabili, intrappolano l'acqua drenata dai livelli sabbioso-

ciottolosi e assumono un comportamento visco-plastico, mentre i livelli sabbiosi, generalmente più competenti, tendono ad essere i livelli nei quali si impostano le scarpate dei movimenti gravitativi. Questo spiega sia il caratteristico aspetto a gradini dei versanti di Montespertoli, sia le dinamiche relative ai movimenti gravitativi, che tendono a svilupparsi come movimenti complessi, con la porzione terminale del corpo di frana che evolve in colamento.

b) L' uso del suolo è stato suddiviso in 12 classi (Tab. 5.1).

ID	CLASSI DI USO DEL SUOLO	ID	CLASSI DI USO DEL SUOLO
11	Aree urbane	23	Prati
12	Zone industriali	24	Zone agricole eterogenee
13	Zone estrattive cantieri, discariche e terreni artefatti e abbandonati	31	Zone boscate
14	Zone verdi artificiali non agricole	32	Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea
21	Seminativi	33	Zone aperte con vegetazione rada o assente
22	Colture permanenti	51	Acque continentali

Tabella 5.1 Classi di uso del suolo riconosciute nell'area di studio di Montespertoli.

L'analisi statistica rivela la netta dominanza delle classi 22 e 31 e l'Indice di franosità (Fig.5.3) indica come le aree più suscettibili di frana sono, in ordine, quelle caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea, quelle boscate e le aree con vegetazione rara o assente. Questi risultati mostrano come le aree caratterizzate da fenomeni di instabilità sono attualmente abbandonate e lasciate incolte. Di conseguenza si può presumere che, in molti casi, sia stata l'attività incessante dei movimenti franosi ad aver limitato le pratiche agricole; perciò nelle aree non più coltivate, la vegetazione è cresciuta in modo spontaneo, dando origine a boschi e zone arbustive. Anche i terreni coltivati a seminativo sono affetti da numerosi fenomeni gravitativi; l'instabilità del versante in questi settori è spesso da attribuire ai numerosi rivoli e canali che vengono realizzati per l'irrigazione e il drenaggio dei campi, che talvolta incidono in modo negativo apportando, anziché togliere, acqua all'ammasso in frana.

- c) L'esposizione dei versanti e la distribuzione del relativo indice di franosità (Fig. 5.4) indicano come ci sia un sostanziale accordo tra la direzione predominante dei versanti e quella delle aree in frana. La direzione preferenziale, infatti, risulta essere quella verso N, NE e NO e l'IF% (Fig.5.4) sottolinea come N e NO siano anche le esposizioni delle aree tipicamente in frana, sebbene, in generale, anche i versanti con altre esposizioni siano caratterizzati da movimenti gravitativi.
- d) Riguardo all'acclività dei versanti, le frane tendono ad essere distribuite abbastanza uniformemente su tutte le classi anche se si ha una predominanza tra due intervalli specifici (10-15° e 15-20°); tuttavia l'indice di franosità maggiore si ha per la classe compresa tra 30-40° (Fig. 5.5), ovvero l'intervallo di pendenze associato generalmente alle zone di scarpata di frana.
- e) La distribuzione dell'elevazione è stata suddivisa in 6 classi e mostra la predominanza dell'indice di franosità per quote comprese tra 150-200m s.l.m. (Fig.5.6a). Questo risultato deve essere interpretato tenendo in considerazione il fatto che l'analisi è stata svolta non sulle sole aree di scarpata di frana (che si trovano chiaramente a quote elevate) ma considerando l'intero movimento. Perciò, dato che anche la zona di accumulo è stata inserita nell'analisi, le classi di elevazione affette da frana sono quelle collocate a quote inferiori rispetto a quella che si potrebbero stimare se si considerassero solamente le aree di scarpata dei movimenti.
- f) Infine, riguardo al parametro che esprime l'area drenata, si può dire che le frane tendono ad impostarsi su aree in cui il valore di tale parametro è compreso tra 10-25 pixels mentre l'indice di franosità (Fig.5.7) è maggiore per la classe compresa tra 25-100 pixels, ovvero possiamo considerare che l'areale di ciascuna frana è piuttosto esteso e tende a coinvolgere soprattutto aree distali agli spartiacque.

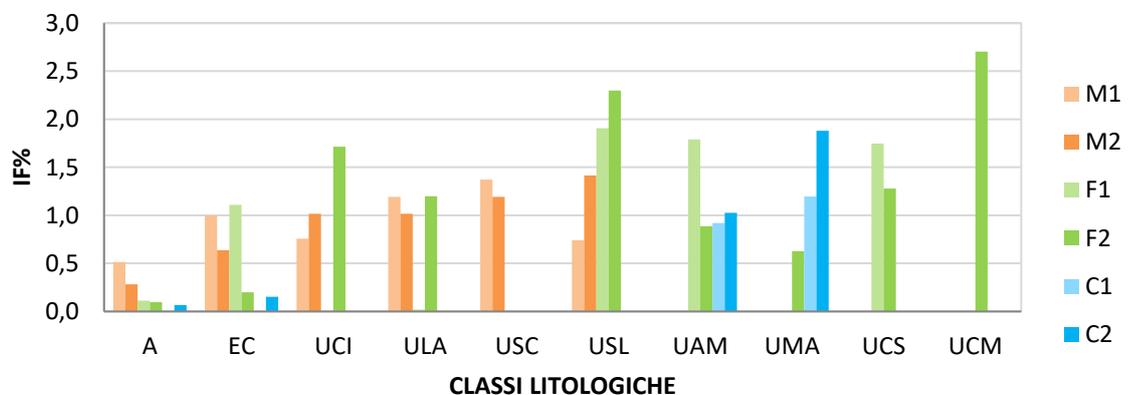


Fig.5.2 Istogramma relativo al valore di Indice di franosità associato alle diverse classi litologiche nelle 6 aree di studio: M1 - Montespertoli area di studio, M2 - Montespertoli area sub-comunale, F1 - Figline Valdarno area di studio, F2- Figline Valdarno area sub-comunale, C1 - Corella area di studio, C2- Corella area sub-comunale.

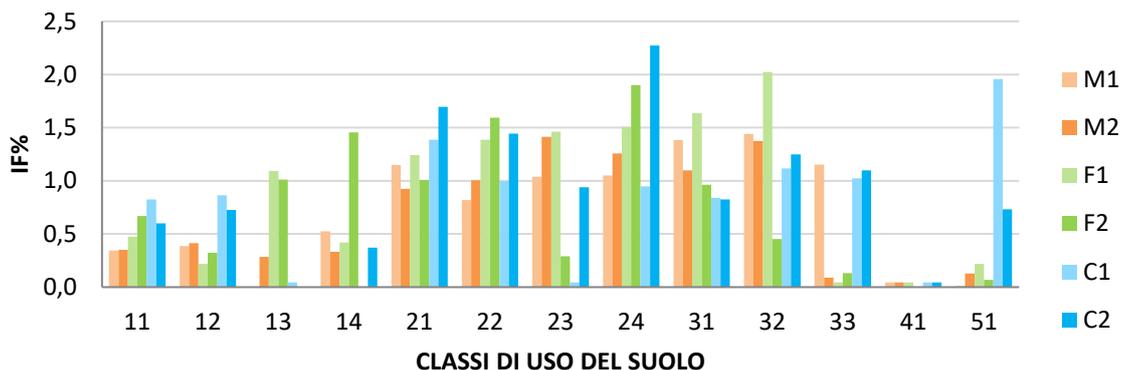


Fig.5.3 Istogramma relativo al valore di Indice di franosità associato alle diverse classi di uso del suolo nelle 6 aree di studio: M1 - Montespertoli area di studio, M2 – Montespertoli area sub-comunale, F1 - Figline Valdarno area di studio, F2- Figline Valdarno area sub-comunale, C1 – Corella area di studio, C2- Corella area sub-comunale.

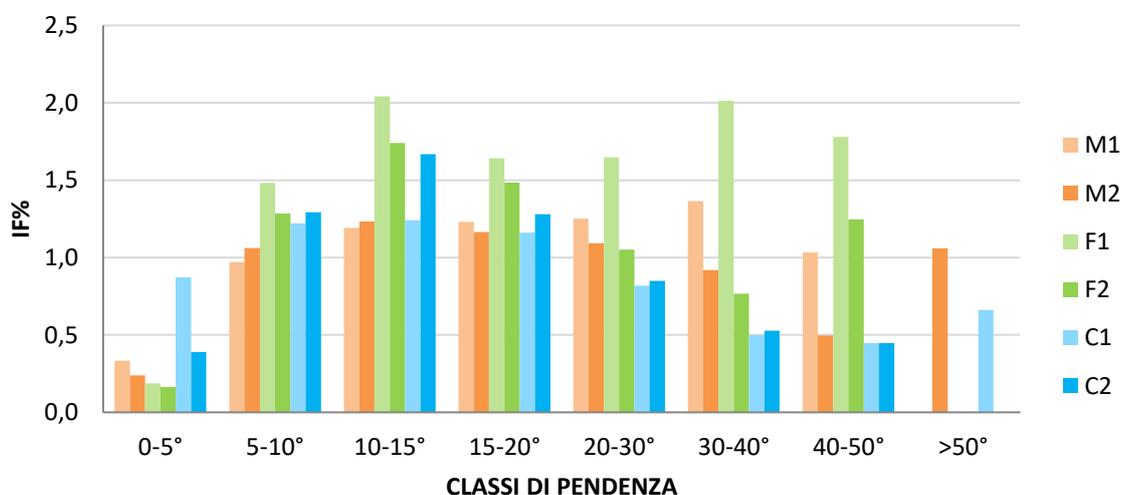


Fig.5.4 Istogramma relativo al valore di Indice di franosità associato alle diverse classi di pendenza nelle 6 aree di studio: M1 - Montespertoli area di studio, M2 – Montespertoli area sub-comunale, F1 - Figline Valdarno area di studio, F2- Figline Valdarno area sub-comunale, C1 – Corella area di studio, C2- Corella area sub-comunale.

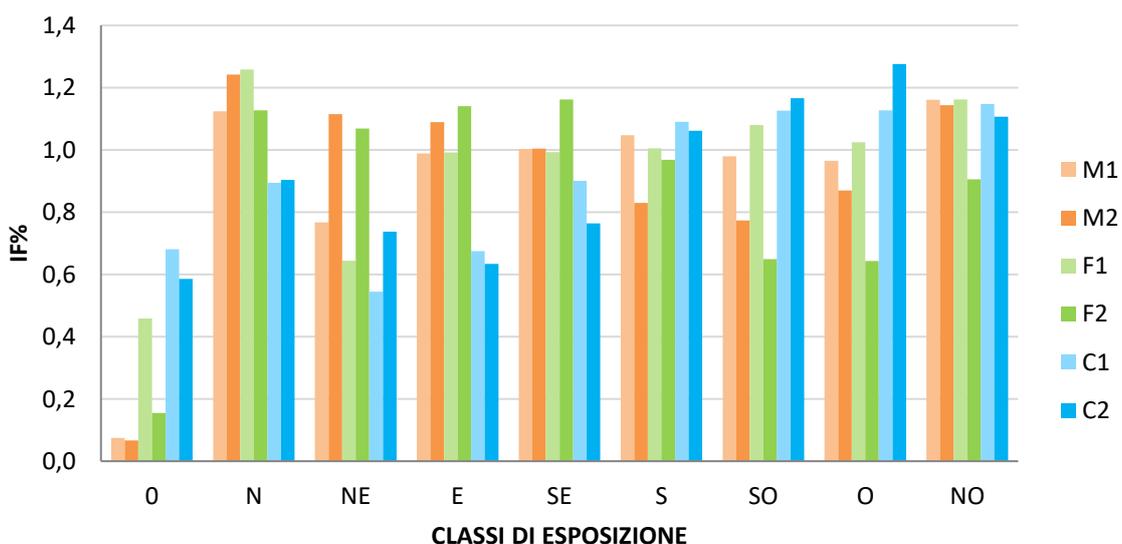


Fig.5.5 Istogramma relativo al valore di Indice di franosità associato alle diverse classi di esposizione nelle 6 aree di studio: M1 - Montespertoli area di studio, M2 – Montespertoli area sub-comunale, F1 - Figline Valdarno area di studio, F2- Figline Valdarno area sub-comunale, C1 – Corella area di studio, C2- Corella area sub-comunale.

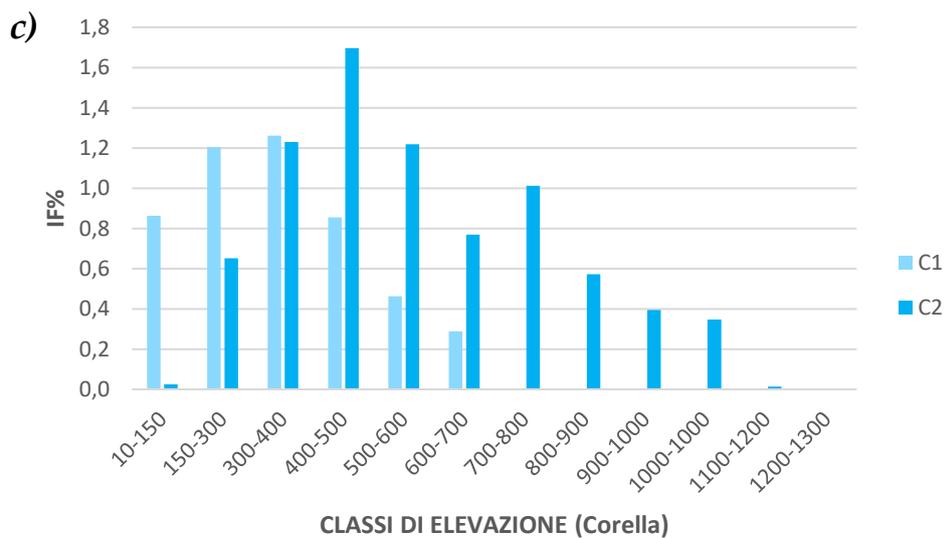
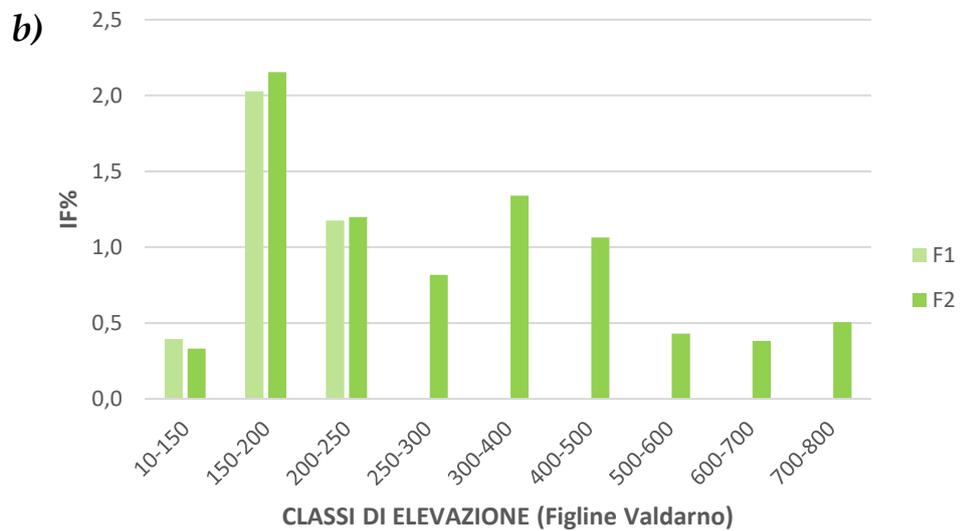
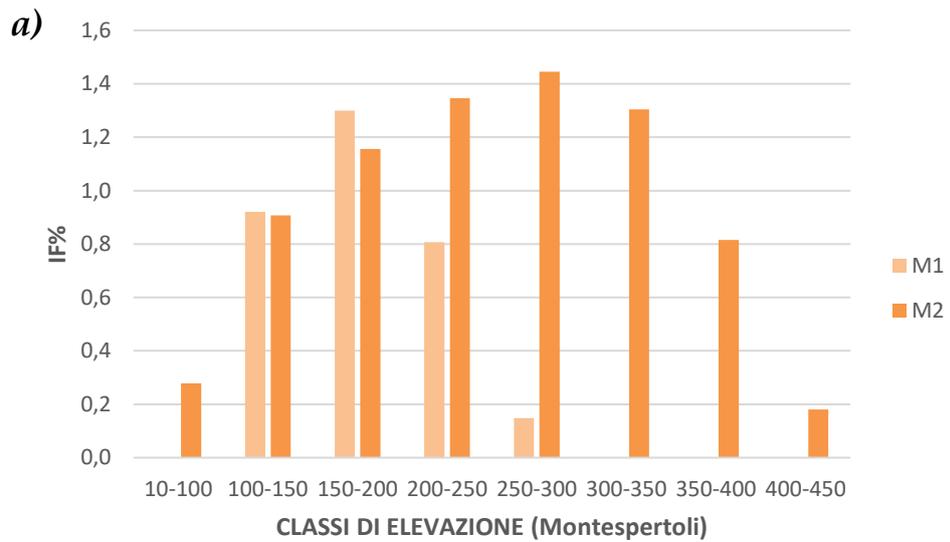


Fig.5.6 Istogramma relativo al valore di Indice di franosità associato alle diverse classi di elevazione nelle 6 aree di studio: a) M1 - Montespertoli area di studio e M2 - Montespertoli area sub-comunale, b) F1 - Figline Valdarno area di studio e F2- Figline Valdarno area sub-comunale, c) C1 - Corella area di studio e C2- Corella area sub-comunale.

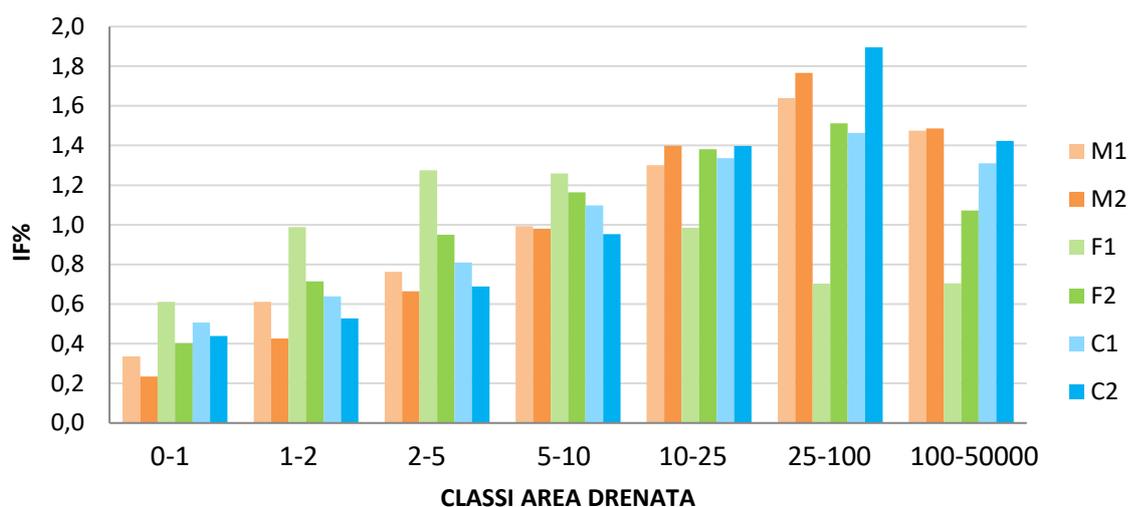


Fig.5.7 Istogramma relativo al valore di Indice di franosità associato alle diverse classi di area drenata nelle 6 aree di studio: M1 - Montespertoli area di studio, M2 – Montespertoli area sub-comunale, F1 - Figline Valdarno area di studio, F2- Figline Valdarno area sub-comunale, C1 – Corella area di studio, C2- Corella area sub-comunale.

I parametri che sembrano incidere maggiormente sulla franosità dell'area studio di Montespertoli sono dunque la litologia e l'acclività. Al fine di comprendere una loro eventuale correlazione sono state combinate fra loro le mappe riclassificate di questi due parametri. Infatti, in ambiente GIS, attraverso lo strumento di analisi spaziale noto come "Combine", è possibile combinare tra loro file raster dei parametri predisponenti desiderati e abbinare le relative tabelle degli attributi.

Il risultato di tale analisi è che la distribuzione dell'acclività risulta conforme alla distribuzione della litologia e strettamente dipendente dalle caratteristiche geotecniche dei litotipi analizzati (Fig.5.8). I depositi alluvionali, così come quelli eluvio colluviali, posti di solito alla base dei versanti e negli impluvi, sono quelli caratterizzati da pendenze minori, invece i litotipi più competenti costituiti da sabbie e ciottoli tendono ad essere distribuiti su versanti più acclivi, che sono le aree dove si impostano solitamente le zone di scarpata. Un'ulteriore considerazione riguarda la classe UCI, relativa ai litotipi di facies prettamente ciottolosa. Questa classe è piuttosto abbondante per pendenze comprese tra 0-5°. Tale risultato potrebbe sembrare in disaccordo con quanto appena esposto, poiché queste litologie hanno proprietà geotecniche migliori rispetto ai terreni limoso-sabbiosi. Tuttavia la ragione per cui questa unità è piuttosto diffusa anche a basse pendenze a da ricercare nella sua collocazione topografica; difatti la classe UCI affiora soprattutto alla sommità del crinale, dove la morfologia è piuttosto spianata.

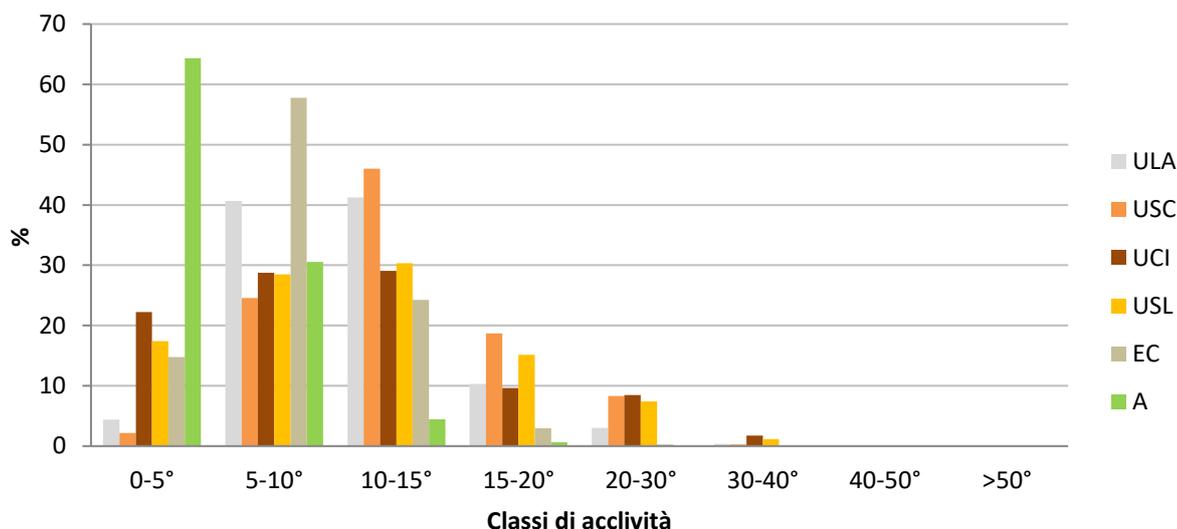


Fig.5.8 Distribuzione delle classi litologiche rispetto all'acclività.

5.3.2 Montespertoli area sub-comunale

- a) Per quanto riguarda la litologia, a scala sub-comunale, sono state individuate un totale di 6 classi: 1) A (depositi alluvionali), 2) EC (eluvio-colluvi), 3) UCI, 4) ULA, 5) USC, 6) USL. I litotipi dominanti nell'area considerata sono ULA e USL, tuttavia l'indice di franosità relativo alla litologia indica che le classi relative alle unità USL e USC (Fig.5.2) sono le più suscettibili alle frane. A differenza di quanto osservato per l'area di studio di Montespertoli, dove la suscettibilità è più elevata per i litotipi siltoso-argillosi, alla scala approssimata del territorio comunale, sono le litologie sabbioso-siltose e quelle sabbioso-ciottolose ad avere valori più elevati.
- b) Riguardo all'uso del suolo sono state identificate 12 diverse classi (vedi Tab.5.1). Le classi 22, 31 e 21 sono le più diffuse. L'Indice di franosità (Fig.5.3) indica come le aree maggiormente in frana sono, in ordine, quelle lasciate a prato, quelle caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea e in piccola parte anche le aree zone coltivate (classi 23, 32 e 24). Questi risultati mostrano come le aree caratterizzate da fenomeni di instabilità sono effettivamente le zone in cui le pratiche agricole sono state prevalentemente abbandonate prediligendo le aree lasciate a prato a quelle coltivate. Di conseguenza, in modo simile all'area di studio di Montespertoli, si può presumere che in molti casi sia stata l'attività incessante dei movimenti franosi ad aver limitato le pratiche agricole. Per le zone coltivate si ritiene che siano prevalentemente gli erronei sistemi di canalizzazione ad incidere in modo negativo sulla stabilità del versante.

- c) Riguardo all'acclività dei versanti, le classi di pendenza prevalenti sono quelle comprese tra 5-10° e 10-15° mentre l'indice di franosità (Fig.5.4) mostra che i versanti più proni al franamento sono quelli con pendenze comprese tra 10-15°, 15-20° e anche i versanti con pendenze superiori a 50°. La ragione per cui anche aree con pendenze abbastanza ridotte sono soggette a franamento è strettamente dipendente dal fatto che le frane mappate tendono a svilupparsi ed evolvere lungo il versante, generalmente fino al fondovalle, e dunque anche le pendenze più basse rientrano nella valutazione statistica, sebbene non siano le acclività nella quali si innescano direttamente le frane.
- d) L'esposizione dei versanti è orientata in prevalenza verso i settori NE, NO and O. La distribuzione dell'indice di franosità (Fig.5.5) indica come la direzione predominante dei versanti sia concorde con quella delle aree in frana e i versanti esposti a N e NO siano i più franosi sebbene, in generale, anche i versanti con altre esposizioni siano caratterizzati da movimenti gravitativi.
- e) L'elevazione è stata suddivisa in 8 classi. La distribuzione dell'elevazione mostra come le due classi più diffuse nell'area sono quelle il cui *range* è compreso tra 100-150m e 150-200m s.l.m. mentre l'indice di franosità (Fig.5.6a) mostra una predominanza per quote comprese tra 250-300m s.l.m., seguito dalle quote comprese tra 200-250m e 300-350m s.l.m..
- f) Infine, riguardo l'area drenata, il n° di pixel caratteristico dell'area è compreso tra 5-10 mentre, secondo l'indice di franosità (Fig.5.14 a) le frane tendono ad impostarsi su aree in cui il valore di tale parametro è compreso tra 25-100 pixels. Dunque, anche a scala comunale, le frane sono collocate in aree di raccordo delle linee di flusso e distanti dagli spartiacque.

Al fine di comprendere perché anche i versanti con basse pendenze siano suscettibili al franamento si è analizzata la relazione tra i fattori predisponenti che sono risultati più incisivi, ovvero acclività e litologia. Le mappe riclassificate di questi due parametri sono state quindi combinate tra loro per valutare la loro correlazione.

La distribuzione dell'acclività è conforme alla distribuzione della litologia e strettamente dipendente dalle caratteristiche geotecniche dei litotipi analizzati (Fig.5.9). I depositi alluvionali, così come quelli eluvio colluviali, posti di solito alla base dei versanti e negli impluvi, sono quelli caratterizzati da pendenze minori, invece i litotipi più competenti costituiti da sabbie e ciottoli tendono ad essere distribuiti su versanti più acclivi e sono le aree dove si impostano le zone di scarpata.

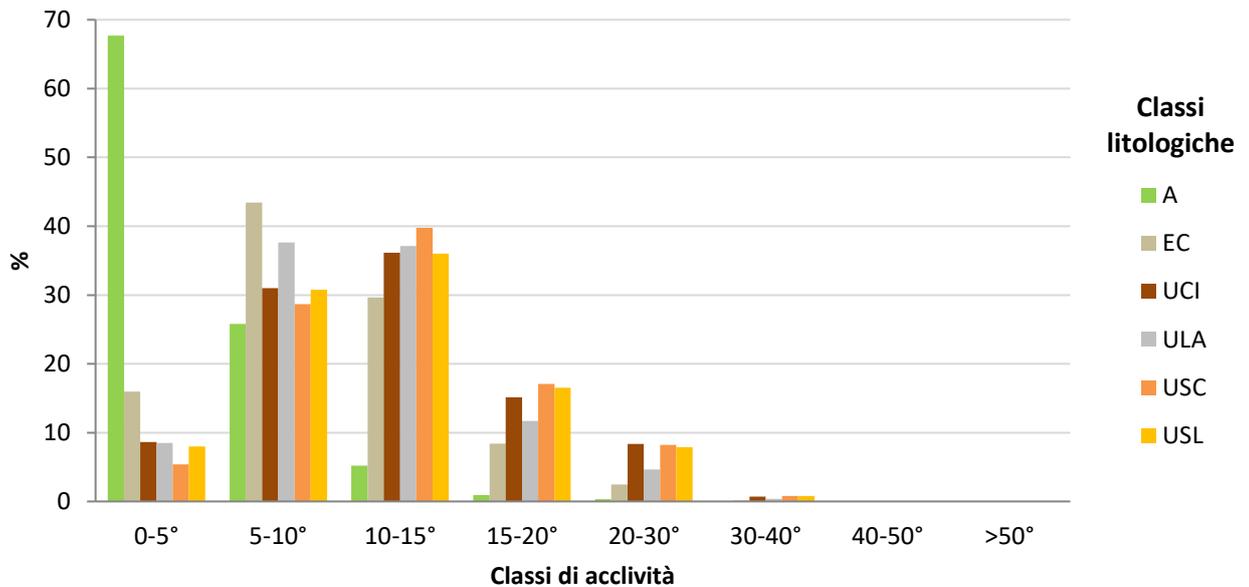


Fig.5.9 Distribuzione delle classi litologiche rispetto all'acclività.

Combinando tra loro litologia ed elevazione è possibile stabilire l'esistenza di una relazione tra le litologie affioranti nell'area di studio e le elevazioni (Fig.5.10). In particolare le litologie più argillose e quelle sabbioso ciottolose (ULA e USC) sono distribuite su quote inferiori ai 250m s.l.m., mentre i litotipi sabbiosi e ciottolosi (USL e UCI) caratterizzato quote più elevate. Perciò all'interno della classe di elevazione con IF% maggiore, ovvero quella compresa tra 250-300m, ricadono per la maggior parte litotipi sabbioso-siltoso-limosi (USL) e ciottolosi (UCI). La classe litologica USL è a sua volta la classe litologica più prona al franamento. Dunque la distribuzione della litologia e dell'elevazione sono interdipendenti e le quote più franose sono quelle in cui affiorano, a loro volta, le litologie più franose.

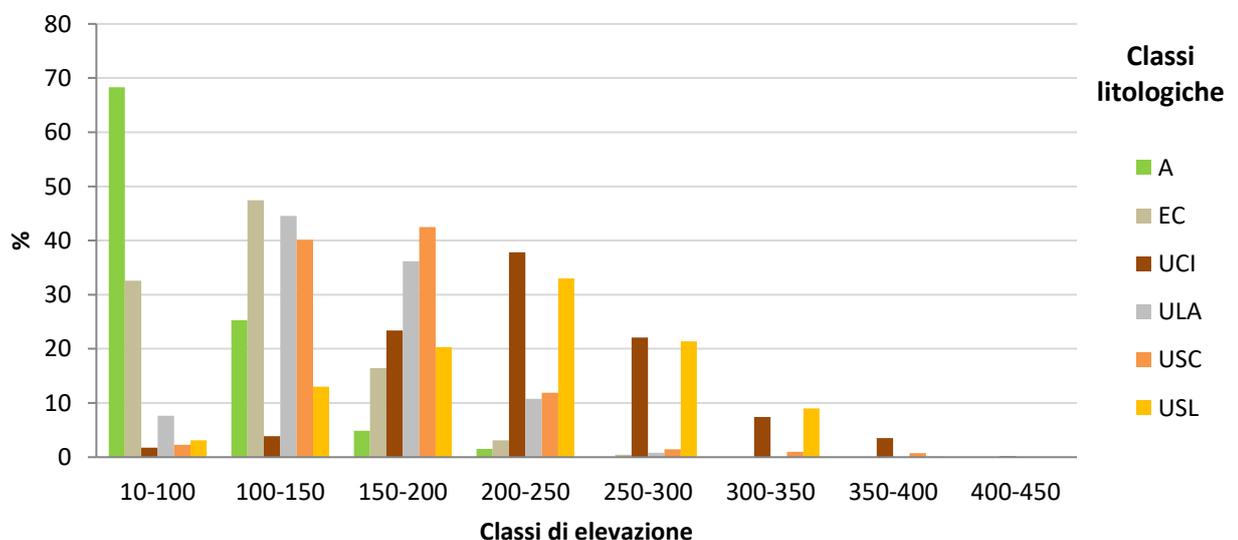


Fig.5.10 Distribuzione delle classi litologiche rispetto all'elevazione.

5.4 Figline Valdarno

5.4.1 Figline Valdarno area di studio

- a) Per quanto riguarda la litologia, nell'area studio di Figline, sono 6 le classi identificate: 1) EC (eluvio-colluvi), 2) A (depositi alluvionali recenti e terrazzati), 3) UAM (arenaceo-marnosa), 4) ULA, 5) USL, 6) UCS.

L'analisi statistica descrittiva sottolinea come le litologie appartenenti alle unità A (alluvioni recenti e depositi terrazzati), USL (sabbie, limi e silt) e UCS (ciottoli e sabbie) siano dominanti nell'intera area di studio. Tuttavia, prendendo in considerazione l'indice di franosità (IF%) (Fig.5.2) è possibile considerare le classi USL e UCS e UAM come quelle più franose. In particolare queste litologie presentano proprietà geotecniche molto diverse tra di loro. Le unità USL e UCS sono costituite da depositi non molto cementati e questo incrementa i fenomeni di degradazione superficiale indotti da intense precipitazioni. La presenza di acqua, infatti, riduce la resistenza al taglio dei materiali e sono proprio i livelli composti da materiali incoerenti e granulari a risentirne maggiormente. Questo spiegherebbe, in parte, le dinamiche relative ai movimenti gravitativi, che tendono a svilupparsi o come piccoli *debris flow* (quando il terreno è imbevuto di una grande quantità d'acqua a seguito di precipitazioni intense) o come movimenti complessi (scivolamento + colamento), che evolvendo in colamento verso il fondovalle.

- b) L'uso del suolo è stato suddiviso in 11 classi (Tab.5.2).

ID	CLASSI DI USO DEL SUOLO	ID	CLASSI DI USO DEL SUOLO
11	Aree urbane	23	Prati
12	Zone industriali	24	Zone agricole eterogenee
13	Zone estrattive cantieri, discariche e terreni artefatti e abbandonati	31	Zone boscate
14	Zone verdi artificiali non agricole	32	Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea
21	Seminativi	51	Acque continentali
22	Colture permanenti		

Tabella 5.2 Classi di uso del suolo riconosciute nell'area di studio di Figline Valdarno.

L'analisi statistica rivela la netta dominanza delle classi 11, 31, 21 (Fig.5.3), mentre l'Indice di franosità indica come le aree maggiormente in frana sono, in ordine, quelle caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea, quelle boscate e le zone agricole eterogenee (32, 31 e 24). Anche le zone lasciate a prato, quelle coltivate con colture permanenti e quelle a seminativo risultano tra le più suscettibili di frana (21, 23 e 24). Questi risultati indicano che non è presente una netta predominanza di alcune classi rispetto ad altre. Perciò, in generale, molte delle aree caratterizzate da fenomeni di instabilità sono attualmente abbandonate e lasciate incolte; tuttavia in queste aree la maggior parte dei movimenti rilevati sono stati classificati come dormienti. Questo stato di quiescenza ha perciò consentito la prosecuzione di numerose pratiche agricole nonostante la presenza di movimenti gravitativi.

- c) Riguardo all'acclività dei versanti, le aree più franose tendono a distribuirsi secondo due principali classi: 30-40° e 10-15°. Valori elevati dell'indice di franosità sono anche stati osservati per la classe compresa tra 40-50° (Fig. 5.4). Questo duplice intervallo può essere spiegato come segue: le pendenze più basse sono associate soprattutto ai fenomeni di tipo complesso, mentre le frane per colamento e i piccoli *debris-flows*, che hanno la loro nicchia di distacco alla sommità del crinale, sono quelle caratterizzate dalle pendenze maggiori.
- d) L'esposizione dei versanti e la distribuzione del relativo indice di franosità indicano che le aree in frana sono orientate verso i settori N e NO, malgrado la maggior parte dei versanti sia esposta verso NE e SE (Fig.5.5).
- e) L'elevazione è stata suddivisa in 3 classi. Le principali quote del crinale sono comprese tra i 10-150m s.l.m. mentre la distribuzione dell'elevazione mostra una predominanza dell'indice di franosità per quote comprese tra 150-200m s.l.m. (Fig.5.6b). Questo risultato deve essere interpretato tenendo in considerazione il fatto che l'analisi è stata svolta non solo sulle aree di scarpata di frana (che sarebbero collocate principalmente all'intervallo di quote tra 200-250 m s.l.m.) ma considerando l'intero movimento (scarpata + corpo di frana). Perciò, dato che anche la zona di accumulo è stata inserita nell'analisi, l'elevazione generale risulta inferiore rispetto a quella che si otterrebbe se si considerassero solamente le aree di scarpata.
- f) Infine, riguardo all'area drenata, le frane tendono ad impostarsi su aree in cui il valore di tale parametro è compreso tra 2-5 pixels (Fig.5.7). In virtù del valore assunto da questo parametro e dal relativo valore di IF% nelle altre aree di studio (Montespertoli e Corella) sembra plausibile che quando l'intervallo di pixels statisticamente

predominante tende ad essere un valore piccolo, questo sia da attribuire verosimilmente a frane collocate nelle vicinanze degli spartiacque e generalmente caratterizzate da minore estensione. Come detto in precedenza per Montespertoli, dal confronto delle aree studio di Figline e Montespertoli, ad esempio, risulta chiara la differenza di estensione dei corpi di frana, che sono molto più ampi a Montespertoli piuttosto che a Figline Valdarno.

I parametri che sembrano dunque incidere maggiormente sono: litologia, acclività e esposizione.

Dapprima si sono considerati litologia e acclività, al fine di verificare se i due valori più elevati di indice di franosità riscontrati per il parametro relativo alle pendenze avessero una qualche relazione con la litologia. Osservando l'istogramma della Fig.5.11 si nota che le unità UCS e UAM sono le più abbondanti per la classe di pendenza compresa tra 10-15°, classe che peraltro è risultata essere quella con IF% maggiore, mentre l'unità USL è la più abbondante nella classe di pendenze compresa tra 20-30°. Perciò la distribuzione dell'acclività riflette la distribuzione delle unità litologiche.

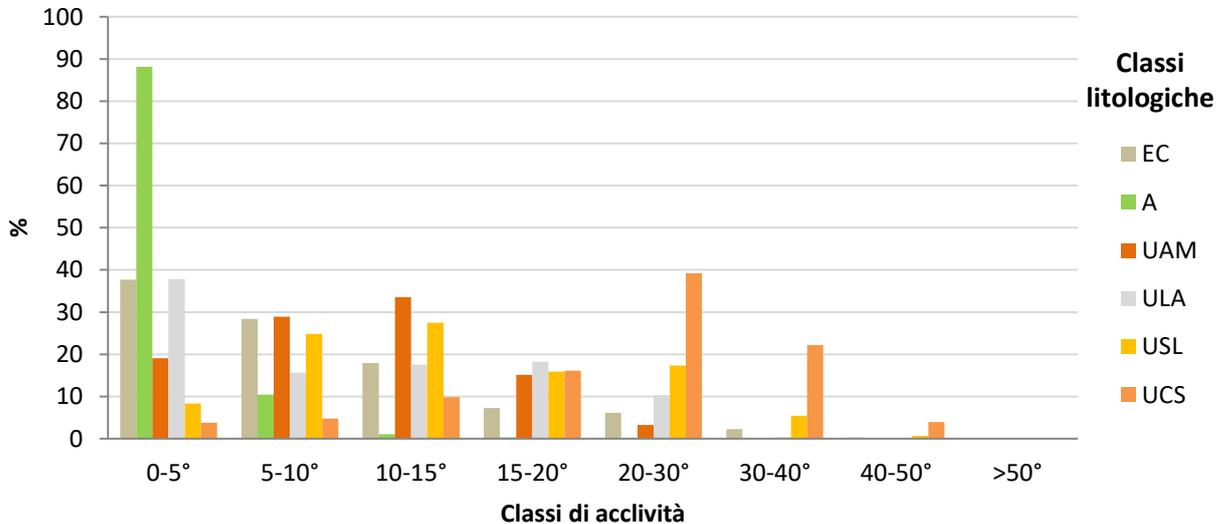


Fig.5.11 Distribuzione delle classi litologiche rispetto all'acclività.

In secondo luogo si è verificata la relazione tra litologia e esposizione. Dall'analisi statistica si è osservata una propensione al dissesto dei versanti esposti a N e NO, nonostante la maggior parte dei versanti sia orientata a NE, E e SE. Nell'istogramma riportato in Fig.5.12. si osserva come i versanti esposti a nord-ovest siano caratterizzati da abbondanti affioramenti delle unità ciottoloso-sabbiose e arenaceo marnose (UCS - UAM), che sono le più franose nell'area di

studio; quindi la presenza di tali litologie rende prone al franamento queste classi di esposizione.

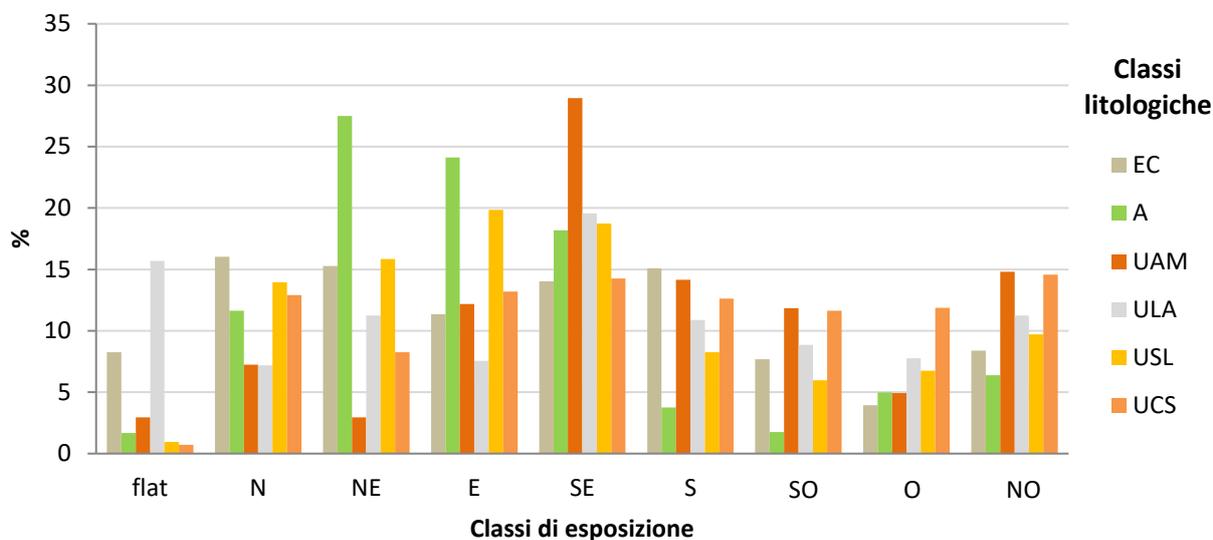


Fig.5.12 Distribuzione delle classi litologiche rispetto all'esposizione.

5.4.2 Figline Valdarno area sub-comunale

- a) Riguardo alla litologia, a scala sub-comunale sono state individuate un totale di 9 classi: 1) EC (elevio-colluvi), 2) A (depositi alluvionali recenti e terrazzati), 3) UAM, 4) ULA, 5) USL, 6) UCS, 7) UCI, 8) UMA, 9) UCM. I litotipi dominanti nell'area considerate sono UMA e A. L'indice di franosità relativo alla litologia indica che le classi relative alle unità UCM e USL e UCI sono quelle maggiormente in frana (Fig.5.2), sottolineando come le variazioni litologiche e le differenti proprietà geotecniche dei litotipi calcarenitico-marnosi abbiano un ruolo importante nell'instabilità del versante. Indubbiamente il fatto che USL e UCI siano unità caratterizzate da depositi poco cementati incrementa ulteriormente i fenomeni di degradazione superficiale indotti da intense precipitazioni, così come già detto per l'area studio di Figline.
- b) Nel caso dell'uso del suolo sono state identificate 12 classi (Tab.5.3).

ID	CLASSI DI USO DEL SUOLO	ID	CLASSI DI USO DEL SUOLO
11	Aree urbane	23	Prati
12	Zone industriali	24	Zone agricole eterogenee

13	Zone estrattive cantieri, discariche e terreni artefatti e abbandonati	31	Zone boscate
14	Zone verdi artificiali non agricole	32	Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea
21	Seminativi	41	Zone umide interne
22	Colture permanenti	51	Acque continentali

Tabella 5.3 Classi di uso del suolo riconosciute nell'area sub-comunale di Figline.

L'analisi statistica rivela la dominanza delle classi 31, 21 e 22 mentre l'Indice di franosità (Fig.5.3) indica come le aree maggiormente in frana sono, in ordine, le zone agricole eterogenee, le colture permanenti e le zone verdi artificiali non agricole (classi 24, 22 e 14) seguite poi dai terreni artefatti e abbandonati, seminativi e aree boscate (classi 13, 21 e 31) con valori comparabili tra loro. Questi risultati mostrano come le aree caratterizzate da fenomeni di instabilità sono zone attualmente caratterizzate da pratiche agricole. Per queste zone coltivate si ritiene che siano prevalentemente gli erronei sistemi di canalizzazione delle acque superficiali ad incidere in modo negativo sulla stabilità del versante.

- c) Riguardo all'acclività dei versanti, l'indice di franosità maggiore si ha per le classi con pendenze comprese tra 10°-15°, 15°-20° e 40°-50° (Fig.5.4). La ragione per cui anche aree con pendenze abbastanza ridotte sono soggette a franamento è strettamente dipendente dal fatto che le frane mappate tendono a svilupparsi ed evolvere lungo il versante, generalmente fino al fondovalle, e dunque anche le pendenze più basse rientrano nella valutazione statistica, sebbene non siano queste le aree nelle quali si generano direttamente le frane. L'aspetto interessante invece riguarda le pendenze comprese tra 40-50°: nonostante siano poche le aree caratterizzate da queste pendenze, si può osservare come questa classe risulti molto propensa al franamento, poiché le scarpate dei movimenti si impostano su superfici molto acclivi e/o sub-verticali.
- d) L'esposizione dei versanti e la distribuzione dell'indice di franosità indicano come la direzione predominante dei versanti sia piuttosto concorde con quella delle aree in frana, e i versanti esposti tra NE e SE siano i più franosi (Fig.5.5).
- e) L'elevazione è stata suddivisa in 9 classi e mostra una predominanza dell'indice di franosità per quote comprese tra 150-200m e 300-400m s.l.m (Fig.5.6b) nonostante la

classe più diffusa nell'area presa in esame sia quella il cui intervallo è compreso tra 10-150m. Il risultato indica quindi due *range* di elevazione preferenziale alla cui quota si rinvenivano movimenti gravitativi.

- f) In fine, riguardo l'area drenata, le frane tendono ad impostarsi su aree in cui il valore di tale parametro è compreso tra 2-5 pixels. Tuttavia il valore assunto dal relativo valore di IF% (Fig.5.7) è compreso tra 25-100 pixels, a differenza della piccola area studio di Figline, dove varia tra 2-5 pixels. Confrontando l'andamento di tale parametro per l'area studio e quella comunale di Figline si deduce come, probabilmente, mentre le frane della piccola area di studio si impostano in prossimità delle zone di crinale, e dunque nei dintorni degli spartiacque, quelle a scala comunale sono distribuite anche in zone di raccordo delle linee di flusso, più distanti dagli spartiacque e caratterizzate anche da una maggiore estensione areale.

I parametri che sembrano dunque incidere maggiormente sono: litologia, acclività ed elevazione. Al fine di comprendere il motivo della somiglianza alla propensione al dissesto di tre diverse pendenze (10-15°, 15-20° e 40-50°) si è analizzata la relazione tra due fattori predisponenti: acclività e litologia.

La distribuzione dell'acclività è piuttosto conforme alla distribuzione della litologia e strettamente dipendente dalle caratteristiche geotecniche dei litotipi analizzati (Fig.5.13). I depositi alluvionali, così come quelli eluvio colluviali, quelli limoso-siltoso-argillosi, posti di solito alla base dei versanti, negli impluvi o nelle zone sub-orizzontali del crinale, sono quelli caratterizzati da pendenze minori, invece i litotipi più competenti come quelli a componente arenacea dominante e quelli ciottolosi (UAM e UCI), tendono ad essere distribuiti su versanti più acclivi. L'unità con componente marnaceo-pelitica (UMA) è anch'esse distribuita su versanti poco acclivi.

Dunque si può osservare come le unità UCM, USL e UCI sono le più abbondanti proprio nella classe di pendenze compresa tra 10-15°, che è risultata essere la classe di acclività più suscettibile alle frane. Perciò la distribuzione delle classi di pendenza più franose riflette la ripartizione delle unità litologiche a loro volta più franose.

Combinando tra loro litologia ed elevazione è possibile stabilire l'esistenza di una relazione tra le litologie affioranti nell'area di studio e le elevazioni (Fig.5.14), quest'ultime caratterizzate dalla prevalenza di due intervalli, ovvero 150-200m e 300-400m s.l.m.. In particolare le litologie marnoso-pelitiche e quelle calcareo-marnose (UMA e UCM) sono distribuite a quote elevate del bacino, rispettivamente più abbondanti negli intervalli 500-

600m e 300-400m, mentre i litotipi sabbiosi e argillosi (USL e ULA) sono tipici di quote inferiori e abbondano nella classe di elevazione tra 150-200m. La classe di elevazione compresa tra 150-200m risulta molto franosa poiché caratterizzata dai litotipi della classe USL, al secondo posto tra le classi litologiche più suscettibili alla franosità. Anche la classe di elevazione compresa tra 300-400m risulta prona al franamento perché rappresenta l'intervallo di quote dove è più diffusa la classe UCM, ovvero la classe litologica con valori più alti di indice di franosità.

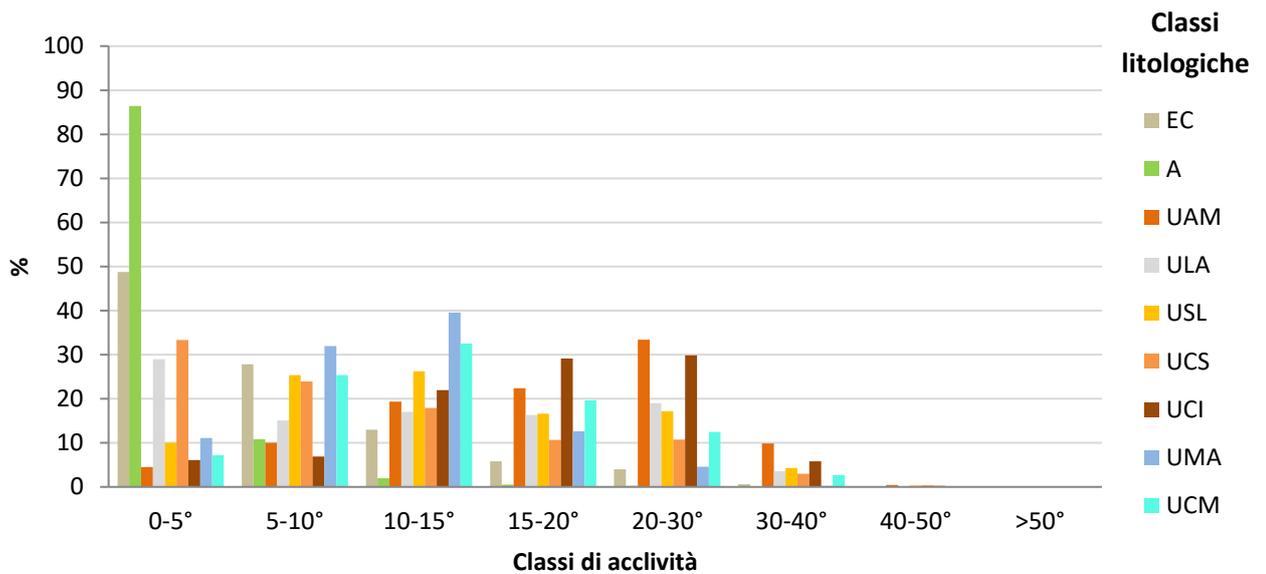


Fig.5.13 Distribuzione delle classi litologiche rispetto all'acclività.

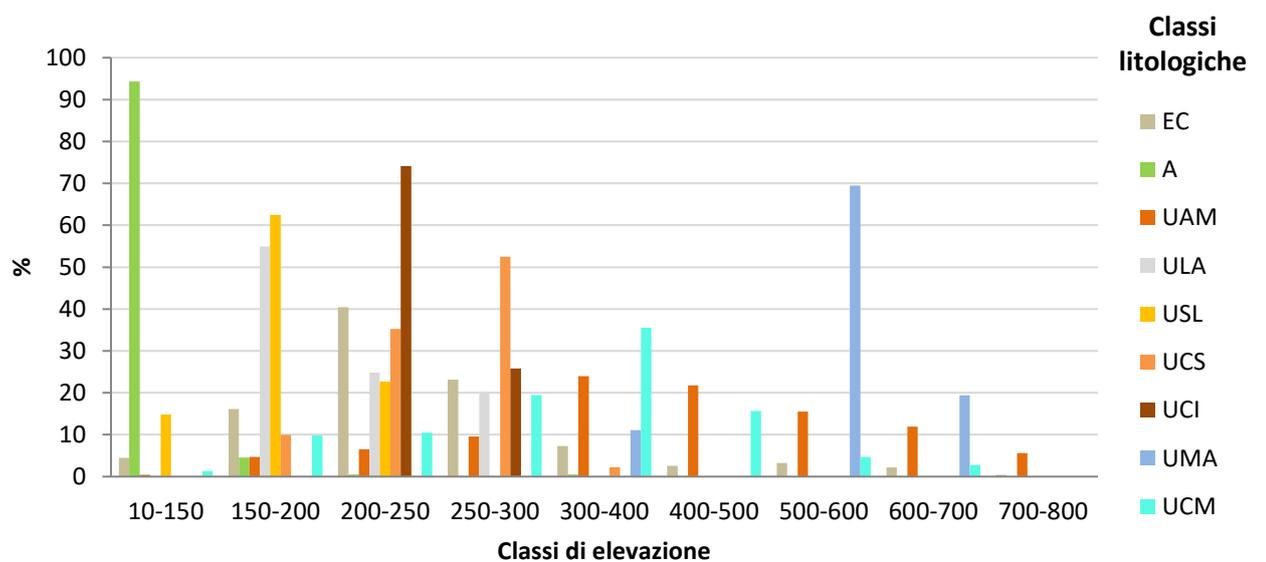


Fig.5.14 Distribuzione delle classi litologiche rispetto all'elevazione.

5.5 Corella

5.5.1 Corella area di studio

- a) Nell'area studio di Corella sono 2 le classi litologiche identificate: 1) UAM (*Flysh* a componente arenacea prevalente), 2) UMA (*Flysh* a componente pelitica dominante). L'analisi statistica descrittiva sottolinea la dominanza della classe UAM tuttavia, se si considera l'indice di franosità (IF%) (Fig.5.2) allora la classe più prona al franamento è UMA. Queste litologie sono caratterizzate da marne prevalenti, anche se non mancano livelli di peliti alternati a strati arenacei. L'alternanza di litologie a diversa competenza spiega il caratteristico aspetto a gradini dei versanti di Corella, e la presenza di litologie argilloso-pelitico-marnose incrementa l'occorrenza di movimenti gravitativi complessi, la cui porzione terminale tende ad evolvere in colamento.
- b) L'uso del suolo è stato suddiviso in 10 classi (Tab. 5.4).

CLASSI DI USO DEL SUOLO		CLASSI DI USO DEL SUOLO	
11	Aree urbane	24	Zone agricole eterogenee
12	Zone industriali	31	Zone boscate
14	Zone verdi artificiali non agricole	32	Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea
21	Seminativi	33	Zone aperte con vegetazione rada o assente
22	Colture permanenti	51	Acque continentali

Tabella 5.4 Classi di uso del suolo riconosciute nell'area studio di Corella.

L'analisi statistica rivela la netta dominanza delle classi 31 e 21 (Fig.5.3). mentre l'Indice di franosità indica come le aree più suscettibili di frana sono, in ordine, quelle caratterizzate da seminativi, vegetazione arbustiva e/o erbacea, e zone aperte con vegetazione rara o assente (classi 21, 32 e 33). Questi risultati mostrano quindi come le aree caratterizzate da fenomeni di instabilità sono attualmente abbandonate e lasciate incolte. Di conseguenza, come visto anche per Montespertoli, si può presumere che in molti casi sia stata l'attività continuativa dei movimenti franosi ad aver limitato le pratiche agricole; perciò nelle aree non più coltivate la vegetazione è cresciuta in modo spontaneo, dando origine a boschi e zone arbustive. Inoltre, anche le aree caratterizzate

da acque continentali hanno un indice di franosità elevato, probabilmente perché la maggior parte delle frane si sviluppa sino al fondovalle e in concomitanza dei numerosi torrenti e rivoli superficiali.

- c) L'acclività dei versanti all'interno dell'area di studio è distribuita soprattutto tra due intervalli specifici: tra 20-30° e tra 10-15° (Fig.5.4). Tuttavia, l'indice di franosità più elevato si ha per la classe compresa tra 10-15° testimoniando come in generale siano proprio le aree a più bassa pendenza ad essere le più suscettibili.
- d) L'esposizione dei versanti e la distribuzione dell'indice di franosità indicano come ci sia un sostanziale accordo tra la direzione predominante dei versanti e quella delle aree in frana. L'IF% maggiore si ha per i versanti esposti verso i quadranti S, SO ed O (Fig.5.5).
- e) L'elevazione è stata suddivisa in 6 classi e le principali quote dell'area di studio sono comprese tra i 400-500m seguite poi da quelle tra 500-600m s.l.m.. La distribuzione dell'elevazione mostra che l'indice di franosità più elevato si ha per quote comprese tra 400-500m s.l.m. (Fig.5.6c).
- f) Infine, riguardo all'area drenata, le frane tendono ad impostarsi su aree in cui il valore di tale parametro è compreso tra 5-10 pixels mentre l'indice di franosità (Fig.5.7) è maggiore per la classe compresa tra 25-100 pixels. Considerando il valore assunto da questo parametro e dal relativo valore di IF% nelle altre aree di studio (Montespertoli e Figline), si nota una somiglianza con Montespertoli, dettata dal fatto che le frane di Corella sono di estensione piuttosto elevata e sono distribuite in aree di raccordo del flusso idrico.

I parametri che sembrano dunque incidere maggiormente sono: litologia e acclività. Per comprendere il motivo per cui sono proprio i versanti a più bassa pendenza ad essere i più suscettibili, si sono analizzate le relazioni tra i due parametri predisponenti: acclività e litologia.

La distribuzione dell'acclività è conforme alla distribuzione della litologia e strettamente dipendente dalle caratteristiche geotecniche dei litotipi analizzati (Fig.5.15). I litotipi marnoso-pelitico arenacei, sono collocati su versanti con pendenze minori rispetto a quelli marnoso-arenacei, che tendono ad essere distribuiti su versanti più acclivi e in generale, sulle aree distribuite in destra idrografica della valle di Corella. Perciò la distribuzione

dell'acclività riflette bene la ripartizione delle unità litologiche, le quali sono il fattore che determina la distribuzione stessa delle pendenze.

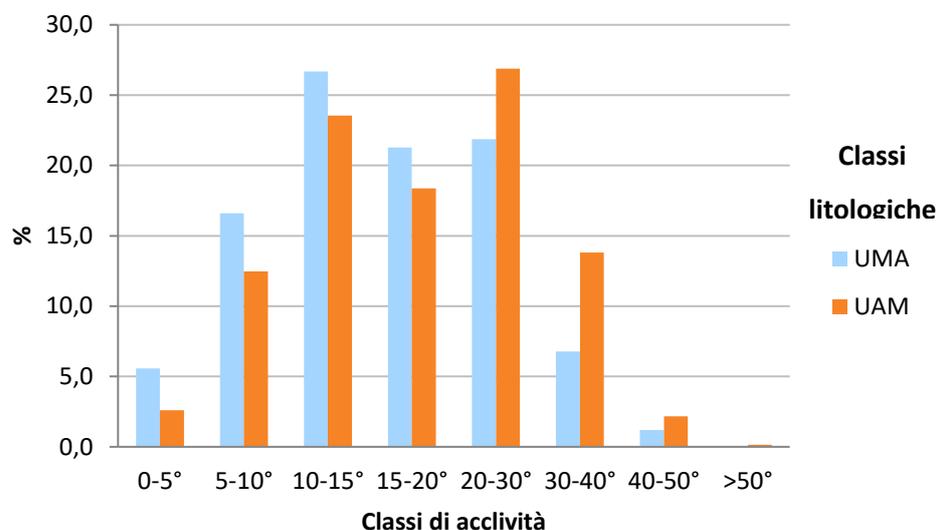


Fig.5.15 Distribuzione delle classi litologiche rispetto all'acclività.

5.5.2 Corella area sub-comunale

- a) A scala sub-comunale, sono state individuate un totale di 4 classi litologiche: 1)UAM (*Flysch* a dominanza arenacea), 2)UMA (*Flysch* a dominanza pelitica), 3)EC, 4) A. Il litotipo nettamente dominante nell'area considerata è UMA.

Grazie agli Indici di franosità percentuale è possibile considerare le litologie appartenenti alla classe UMA tra le più coinvolte nelle frane (Fig.5.2). I litotipi pelitico-argillosi hanno generalmente bassi valori di resistenza al taglio e sono caratterizzati da un assetto strutturale abbastanza inclinato, perciò tendono a dar origine facilmente a fenomeni franosi di varia tipologia, dal colamento a movimenti complessi.

- b) Nel caso dell'uso del suolo sono state identificate 12 diverse classi (Tab.5.5).

CLASSI DI USO DEL SUOLO		CLASSI DI USO DEL SUOLO	
11	Aree urbane	23	Prati
12	Zone industriali	24	Zone agricole eterogenee
13	Zone estrattive cantieri, discariche e terreni artefatti e abbandonati	31	Zone boscate

14	Zone verdi artificiali non agricole	32	Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea
21	Seminativi	33	Zone aperte con vegetazione rada o assente
22	Colture permanenti	51	Acque continentali

Tabella 5.5 Classi di uso del suolo riconosciute nell'area sub-comunale di Corella.

L'analisi statistica rivela la predominanza delle classi 31, 21 e 22 mentre l'Indice di franosità (Fig.5.3) indica come le aree più suscettibili di frana sono, in ordine, quelle caratterizzate da zone agricole eterogenee, seminativi e colture permanenti (classi 24, 21, 22). Questi risultati mostrano come le aree caratterizzate da fenomeni di instabilità sono attualmente oggetto di pratiche agricole. Di conseguenza, si può presumere che in molti casi lo stato di attività quiescente di alcuni movimenti abbia consentito di compiere le lavorazioni agricole, senza incidere in modo drastico sulle attività antropiche svolte, e che, anche in presenza di frane attive, il tasso di movimento è sufficientemente lento da non compromettere la fruibilità dei campi. Per questi settori prони al franamento si può ipotizzare che le attività agricole svolte tendono a destabilizzare il versante; in molti casi sono gli erronei sistemi di drenaggio che tendono a convogliare l'acqua in modo dannoso verso i settori più instabili del versante o direttamente all'interno dell'ammasso in frana.

- c) Riguardo all'acclività dei versanti le classi di acclività prevalenti sono quelle comprese tra 20-30° e 15-20° mentre l'indice di franosità maggiore si ha per la classe compresa tra 10-15° (Fig.5.4). In generale, sono proprio le aree a più bassa pendenza ad essere quelle più suscettibili.
- d) L'esposizione dei versanti e la distribuzione dell'indice di franosità indicano come ci sia un sostanziale accordo tra la direzione predominante dei versanti e quella delle aree in frana. In generale, le aree più franose sono quelle dei versanti esposti verso i quadranti O, SO ed S.
- e) L'elevazione è stata suddivisa in 6 classi. Le due classi più diffuse nell'area sono quelle il cui intervallo è compreso tra 150-300m e 400-500m s.l.m.. La distribuzione dell'elevazione mostra che è la classe compresa tra 400-500m s.l.m. ad avere indice di franosità maggiore (Fig.5.6c) e, più in generale, sono le aree comprese tra 300 e 600 m di quota ad essere particolarmente prone al franamento.

f) Infine, riguardo all'area drenata, il valore dell'indice di franosità (IF%) è compreso tra 25-100 pixels (Fig.5.7). Considerando il valore assunto da questo parametro e dal relativo valore di IF% nelle altre aree di studio (Montespertoli e Figline, l'andamento di tale parametro sembra correlato con la dimensione delle frane ad esempio maggiore nell'area di Corella rispetto a quella delle frane presenti sul territorio di Figline. Questo spiegherebbe il diverso valore predominante dell'intervallo relativo all'area di alimentazione

I parametri che sembrano dunque incidere maggiormente sono i medesimi visti in precedenza per l'area di studio di Corella, ovvero la litologia e l'acclività. A questi due parametri si aggiunge l'elevazione, che mostra intervalli preferenziali per l'innescò delle frane. Per prima cosa, al fine di comprendere se è la distribuzione litologica a guidare la pendenza degli strati, si sono analizzate le relazioni tra i parametri litologia e acclività (Fig.5.16).

La distribuzione dell'acclività è conforme alla distribuzione della litologia e strettamente dipendente dalle caratteristiche geotecniche dei litotipi analizzati. I litotipi marnoso-pelitico arenacei, sono collocati su versanti con pendenze minori rispetto a quelli marnoso-arenacei, che tendono ad essere distribuiti su versanti più acclivi. Difatti, le pendenze comprese tra 10-15°, che sono quelle risultate più prone al franamento, sono caratterizzate dalle litologie marnose e dai depositi eluvio-colluviali.

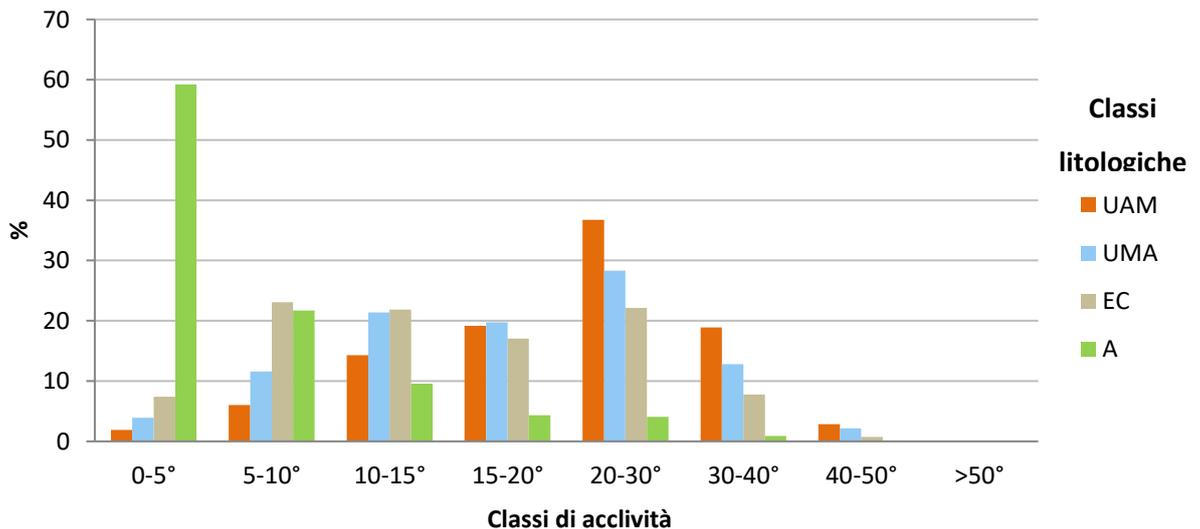


Fig.5.16 Distribuzione delle classi litologiche rispetto all'acclività.

Dopodiché, dato che la litologia sembra guidare la distribuzione delle pendenze e anche l'elevazione sembra essere un parametro che incide significativamente sulla distribuzione delle frane, si è valutato il rapporto tra litologia e elevazione (Fig.5.17).

Le aree con elevazioni più prone al franamento, ovvero quelle comprese in generale tra 300-600m s.l.m., mostrano una distribuzione di litotipi così ripartita: a quote maggiori corrispondono litotipi prevalentemente arenacei (UAM), mentre a quote inferiori prevalgono quelli marnosi (UMA). L'intervallo tra 400-500m, che ha indice di franosità maggiore, mostra come litologia dominante quella dei depositi eluvio-colluviali, seguiti da quelli arenacei. È importante considerare che l'unità marnoso-arenacea è caratterizzata da livelli pelitici che si intercalano a banconi arenacei di maggiore spessore. La differenza tra le proprietà geotecniche di questi litotipi può essere considerato uno dei fattori causali dei movimenti gravitativi.

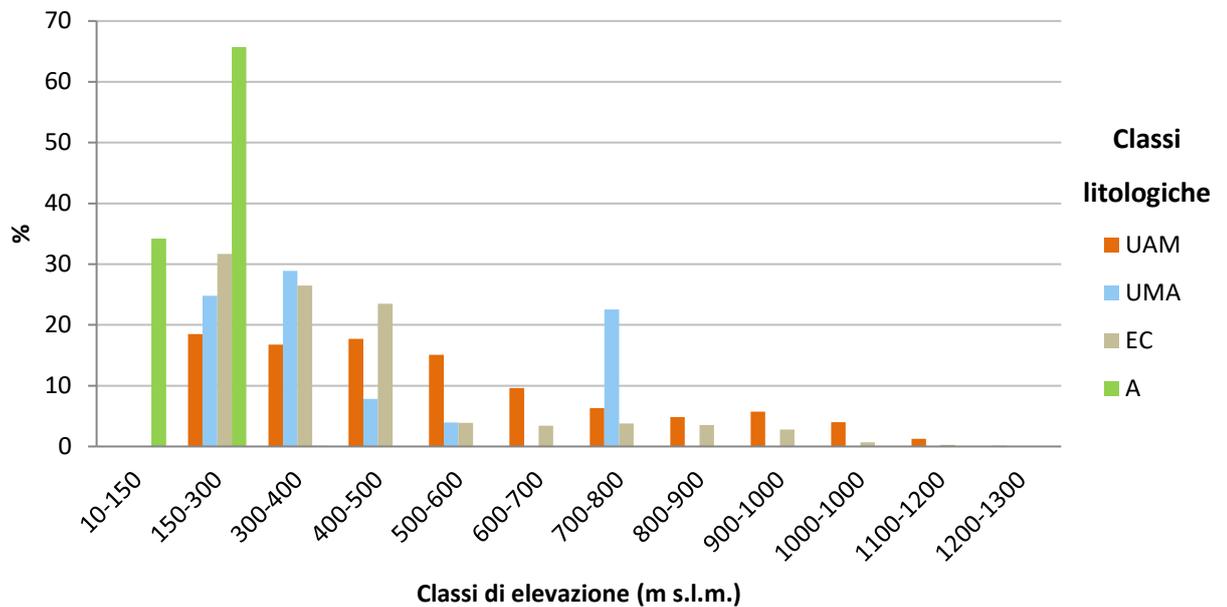


Fig.5.17 Distribuzione delle classi litologiche rispetto all'elevazione.

5.6 Variabilità dei parametri predisponenti

Al fine di rappresentare e mettere a confronto la distribuzione statistica dei parametri nelle diverse aree di studio si è fatto ricorso ad una tipologia di grafico ampiamente utilizzata nelle analisi dei dati esplorativi e nella preparazione di sommari visivi di ricerche statistiche. Si tratta del diagramma a scatola e baffi, detto anche *box plot*, che consente di esprimere i caratteri quantitativi di una serie di dati a partire da 5 numeri di sintesi:

- il valore minimo (min),
- il primo quartile (Q1),
- la mediana (o secondo quartile, Q2),
- il terzo quartile (Q3),
- il valore massimo (max).

Questa tipologia di rappresentazione grafica fu proposta per la prima volta dallo statistico americano J. W. Tukey (1977) e successivamente descritta da McGill et al. (1978) e consente, appunto, di rappresentare graficamente la distribuzione di frequenze secondo un carattere quantitativo. Successivamente è stata utilizzata in molteplici studi che ne hanno apprezzato il vantaggio di consentire una rappresentazione grafica semplificata dei dati analizzati (Williamson et al. 1989, Potter et al. 2006).

La linea interna alla scatola (Fig. 18) rappresenta la mediana della distribuzione, mentre le linee estreme rappresentano il primo ed il terzo quartile. La distanza tra il terzo ed il primo quartile, distanza interquartilica, è una misura della dispersione della distribuzione. Il 50% delle osservazioni si trovano comprese tra questi due valori. Se l'intervallo interquartilico è piccolo, tale metà delle osservazioni si trova fortemente concentrata intorno alla mediana; all'aumentare della distanza interquartilica aumenta la dispersione del 50% delle osservazioni centrali intorno alla mediana.

Le distanze tra ciascun quartile e la mediana, invece, forniscono informazioni relative alla forma della distribuzione: se una distanza è diversa dall'altra allora la distribuzione è asimmetrica. Le linee che si allungano dai bordi del rettangolo (detti "baffi") individuano gli intervalli in cui sono posizionati i valori rispettivamente minori di Q1 e maggiori di Q3 i punti estremi dei "baffi" evidenziano i valori adiacenti, ovvero si tratta dei valori minimo e massimo della distribuzione (detti valore adiacente inferiore e superiore).

Definita $r = (Q3-Q1)$ la differenza interquartilica, il valore adiacente inferiore è il valore più piccolo tra le osservazioni che risulta maggiore o uguale a $Q1-1,5r$. Il valore adiacente superiore, invece, è il valore più grande tra le osservazioni che risulta minore o uguale a $Q3+1,5r$. Pertanto se gli estremi della distribuzione sono contenuti tra $Q1-1,5r$ e $Q3+1,5r$ essi coincideranno con gli estremi dei "baffi", altrimenti come estremi verranno usati i valori $Q1-1,5r$ e $Q3+1,5r$.

I valori esterni rispetto ai valori adiacenti sono chiamati valori anomali (o *outliers*) e vengono segnalati come punti individuali nel box-plot per evidenziare la loro presenza e posizione. Questi valori, infatti, costituiscono una "anomalia" rispetto alla maggior parte dei valori osservati, quindi la loro identificazione consente di analizzare le caratteristiche e le eventuali cause che li hanno determinati; dunque forniscono informazioni ulteriori sulla dispersione e sulla forma della distribuzione. Se i valori adiacenti (superiore e inferiore) coincidono con gli estremi della distribuzione, allora non comparirà alcun valore fuori limite (*outlier*).

I valori adiacenti inferiore e superiore forniscono informazioni sulla dispersione e sulla forma della distribuzione ed anche sulle code della distribuzione.

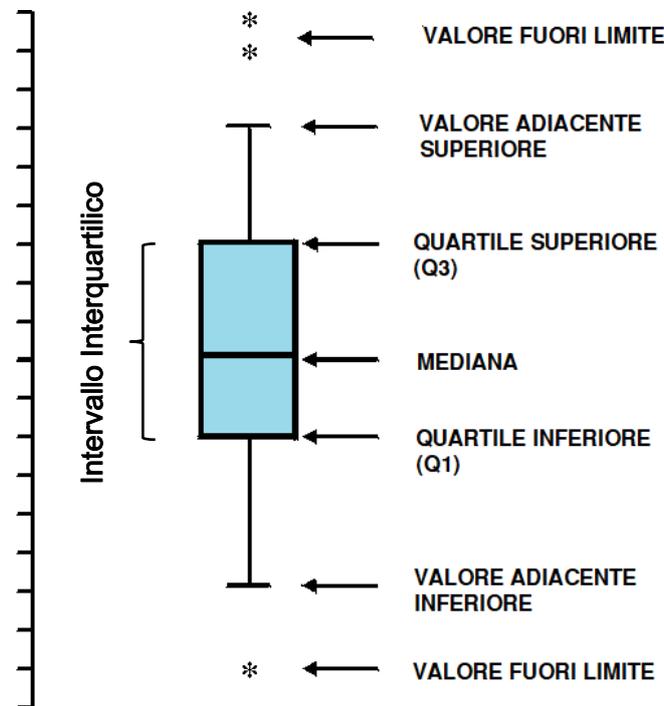


Fig.5.18 Sintesi dei caratteri quantitativi espressi da un box plot

Il motivo per cui si è deciso di ricorrere ad una rappresentazione mediante box plot è che questa tipologia di grafico consente una rappresentazione univoca della distribuzione, a differenza dell'istogramma che può dare rappresentazioni diverse a seconda degli estremi e dell'ampiezza delle classi scelte.

Il box-plot permette di fare osservazioni relativamente alla dispersione e alla asimmetria della distribuzione e consente di mettere a confronto, nel medesimo grafico, due o più distribuzioni. Esso sintetizza mediante pochi numeri molte informazioni sulla distribuzione di frequenze: la mediana riassume la tendenza centrale della distribuzione, i quartili danno un'indicazione sulla variabilità (con essi si calcola lo scarto interquartile e si ha una misura del campo di variazione), la posizione della mediana rispetto ai quartili fornisce altre utili informazioni sulla asimmetria della distribuzione, mentre gli estremi forniscono indicazioni non solo sul valore massimo e valore minimo ma soprattutto sull'eventuale presenza di dati con caratteristiche anomale.

La variabilità del parametro acclività, ad esempio, ci dà delle informazioni riguardo alla distribuzione delle pendenze all'interno delle frane che contraddistinguono le diverse aree

di studio (Fig.5.19). Nell'area di Montespertoli, sia a scala di area studio che di comune, si osserva che le pendenze sono concentrate attorno ad un intervallo specifico, compreso tra i 14-18°, mentre per Figline e Corella la lunghezza della scatola a baffi è sensibilmente maggiore (~10-24°), indicando come le frane siano distribuite con una variabilità di pendenze maggiore e, in generale, in settori più acclivi.

Riguardo al parametro esposizione (Fig.5.20), invece, si osserva come:

- a Montespertoli, che è caratterizzata da un assetto stratigrafico sub-orizzontale, le aree in frana sono orientate in modo variabile verso tutti i quadranti e non sembra esserci la prevalenza di una direzione principale. Tuttavia, mediante la precedente analisi di statistica descrittiva, si è evidenziata una dominanza dei versanti esposti a nord e nord-ovest tra quelli più franosi;
- a Figline Valdarno prevalgono, invece, le frane orientate verso NE, E, SE; si assiste dunque ad un'orientazione principale dei movimenti gravitativi, secondo il parametro esposizione, che privilegia i versanti esposti ad oriente tra quelli più franosi;
- a Corella, infine, prevalgono le zone in frane esposte a S, SO, O. Questo sembra essere in accordo con l'andamento dei lineamenti strutturali dell'area analizzata, che hanno direzione principale NO-SE.

Per ciò che concerne l'elevazione (Fig.5.21), è possibile osservare per Montespertoli e Corella un sostanziale accordo tra la variazione di questo parametro, sia a scala di area di studio (M1 e C1), sia a scala di area comunale (M2 e C2). Nel territorio di Montespertoli sono le aree collocate a basse quote (tra 150 e 220m s.l.m.) quelle maggiormente in frana, mentre per Corella si ha una concentrazione dei movimenti gravitativi a quote più elevate (soprattutto tra i 400 e i 500 m s.l.m.). Per il territorio di Figline, invece, si può notare come a scala di area di studio (F1) la maggior parte delle frane siano collocate tra i 150 e i 180 m s.l.m., mentre a scala comunale (F2) le frane risultano distribuite a quote maggiori (180 - 350 m s.l.m.). Questo andamento è da attribuire prevalentemente al fatto che nell'area di studio di Figline, l'intervallo di quote considerato è piuttosto limitato e l'elevazione media dell'area indagata è piuttosto bassa (solitamente < a 150m), mentre a scala comunale le frane sono collocate sia a basse quote che a quote maggiori e ciò si riflette come un incremento dell'ampiezza dell'intervallo interquartile (Fig.5.21, F1 e F2).

Riguardo alla variabilità del parametro area drenata, paragonando i diversi box-plot (Fig. 5.22) vediamo che c'è una situazione di asimmetria positiva in tutte le distribuzioni, dato che la linea che rappresenta la mediana non si trova nel centro della scatola ma è un po' spostata verso il primo quartile. Questo andamento riflette quanto detto in precedenza nell'analisi di statistica descrittiva, ovvero, nelle aree di Montespertoli e Corella le frane sono distribuite in zone di convergenza del flusso idrico e caratterizzate da un areale più ampio rispetto al territorio di Figline, nel quale, a scala di area di studio (F1), prevalgono frane di piccole dimensioni e collocate in prossimità del crinale e, dunque, dello spartiacque (che ha valore di "area drenata" pari a 0).

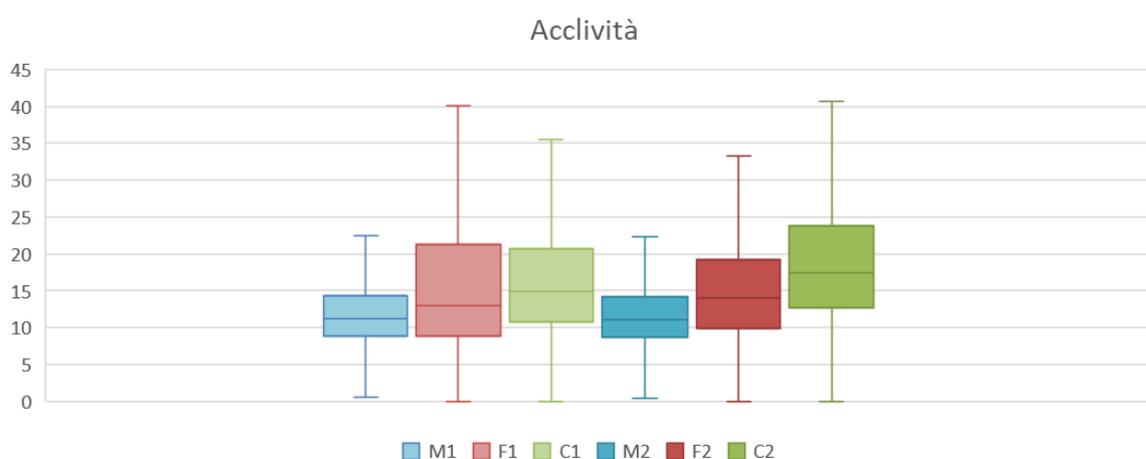


Fig.5.19 Box plot relativo al parametro acclività nelle 6 aree analizzate: M1 - Montespertoli area di studio, F1 - Figline Valdarno area di studio, C1 - Corella area di studio, M2 - Montespertoli area sub-comunale, F2- Figline Valdarno area sub-comunale, C2 - Corella area sub-comunale.

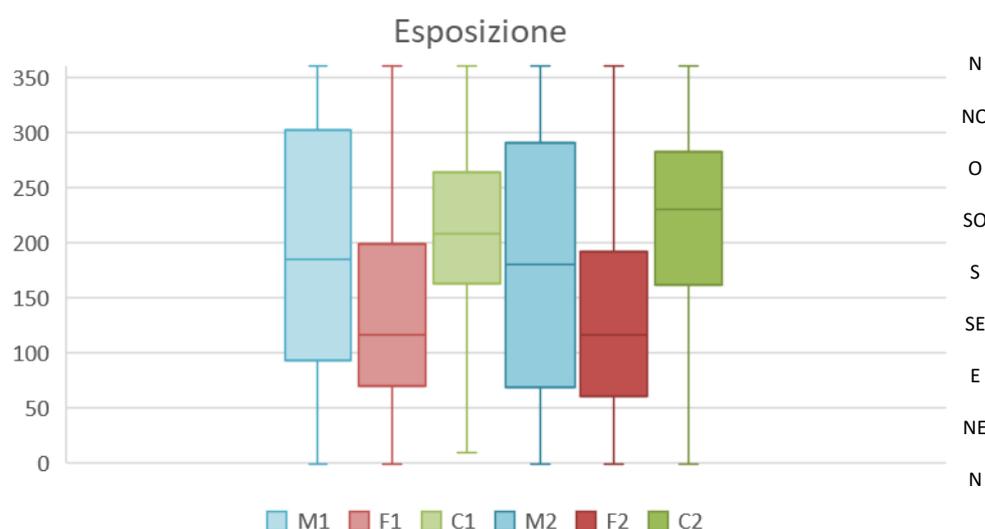


Fig.5.20 Box plot relativo al parametro esposizione nelle 6 aree analizzate: M1 - Montespertoli area di studio, F1 - Figline Valdarno area di studio, C1 - Corella area di studio, M2 - Montespertoli area sub-comunale, F2- Figline Valdarno area sub-comunale, C2 - Corella area sub-comunale.

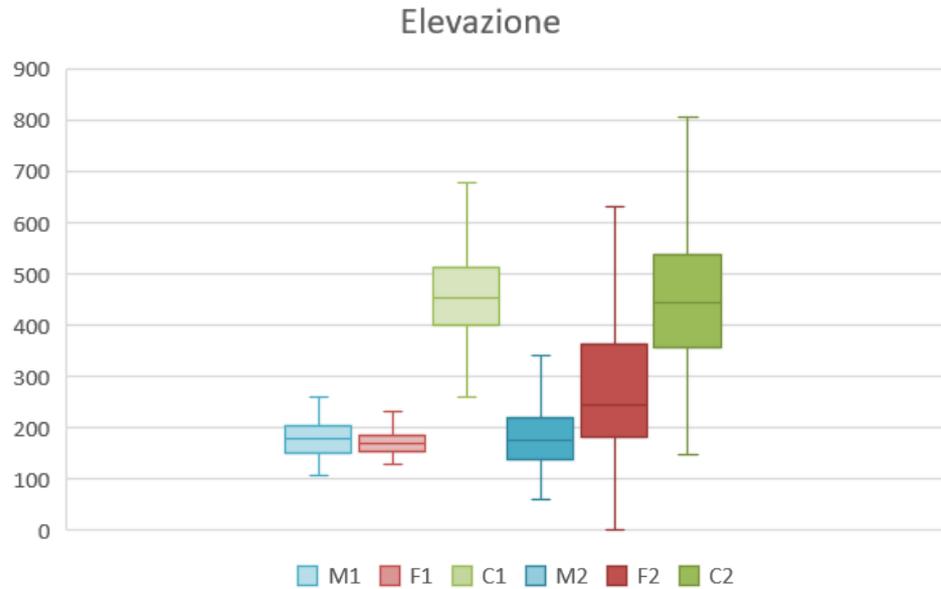


Fig.5.21 Box plot relativo al parametro elevazione nelle 6 aree analizzate: M1 - Montespertoli area di studio, F1 - Figline Valdarno area di studio, C1 - Corella area di studio, M2 - Montespertoli area sub-comunale, F2- Figline Valdarno area sub-comunale, C2 - Corella area sub-comunale.

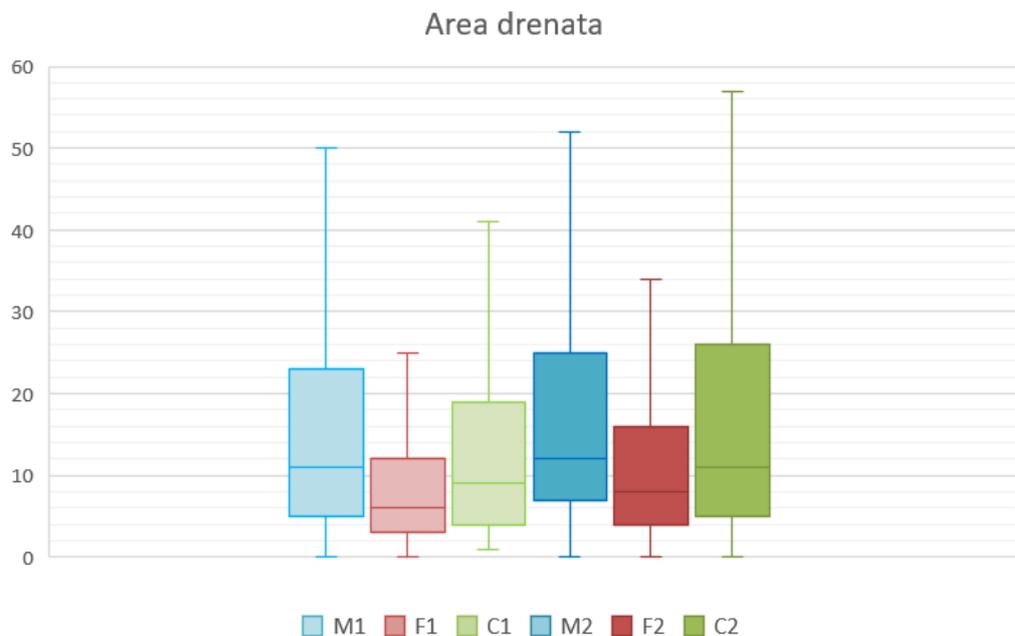


Fig.5.22 Box plot relativo al parametro area drenata nelle 6 aree analizzate: M1 - Montespertoli area di studio, F1 - Figline Valdarno area di studio, C1 - Corella area di studio, M2 - Montespertoli area sub-comunale, F2- Figline Valdarno area sub-comunale, C2- Corella area sub-comunale.

La variabilità relativa alla distribuzione dei parametri in ciascuna frana di ogni area di studio è stata riassunta mediante box plot relativi alla rappresentazione della variabilità della deviazione standard (STD) per ciascun parametro morfometrico (Fig. 5.23).

- Nell'area studio di Figline Valdarno (F1), ad esempio, si nota una maggiore variabilità della deviazione standard del parametro acclività (Fig.5.23a), rispetto alle altre aree di studio. Questo può essere spiegato dal fatto che le frane di F1 sono prevalentemente frane per colamento che si generano sul bordo del crinale (in zone piuttosto acclivi), mentre il piede del movimento si diffonde sino al fondovalle, interessando così anche zone più pianeggianti.
- Riguardo al parametro esposizione (Fig.5.23b), invece, è possibile osservare come le frane sia dell'area studio sia di quella comunale di Corella (C1 e C2), siano caratterizzate da una ridotta variabilità, ovvero i movimenti gravitativi risultano orientati preferenzialmente verso una direzione specifica, sottolineando come questo parametro, in alcuni territori, sia di grande importanza nella determinazione della distribuzione e sviluppo di movimenti gravitativi.
Per quanto riguarda l'area comunale di Corella, le ragioni che inducono le frane a svilupparsi prevalentemente verso i quadranti occidentali, può essere direttamente legata alla disposizione delle strutture tettoniche principali, i cui lineamenti hanno un'orientazione preferenziale NO-SE.
- Nel caso del parametro elevazione (Fig.5.23c) si osserva come, mentre per le frane di Figline Valdarno la deviazione standard ha valori ridotti (mediamente attorno a 10m), nel caso di Corella le variazioni di quota sono caratterizzate da valori di deviazione standard molto maggiori (la mediana è ~ 30m), dovute alle caratteristiche topografiche e geografiche (l'area è collocata in un settore appenninico con un dislivello che va da 0 a 1300m s.l.m.) e alla distribuzione geologica dei litotipi in frana (Fig.5.10 e 5.14).
- Infine, riguardo al parametro area drenata, possiamo notare come i valori maggiori di STD si abbiano per le frane che caratterizzano le aree di Montespertoli e di Corella, mentre le frane di Figline mostrano una ridotta variabilità di tale parametro (Fig.5.23d). Come già descritto in precedenza tale comportamento sembra attribuibile sia alla dimensione delle frane sia alla loro distribuzione lungo il versante: frane di piccole dimensioni (nell'ordine di centinaia di m² fino a poche migliaia) e distribuite in prossimità di crinali e/o spartiacque, mostrano bassi valori di area drenata, mentre movimenti gravitativi di estensione maggiore (superiori alle decine di migliaia di m²)

che si sviluppano verso zone di fondovalle hanno valori di area drenata sensibilmente maggiori.

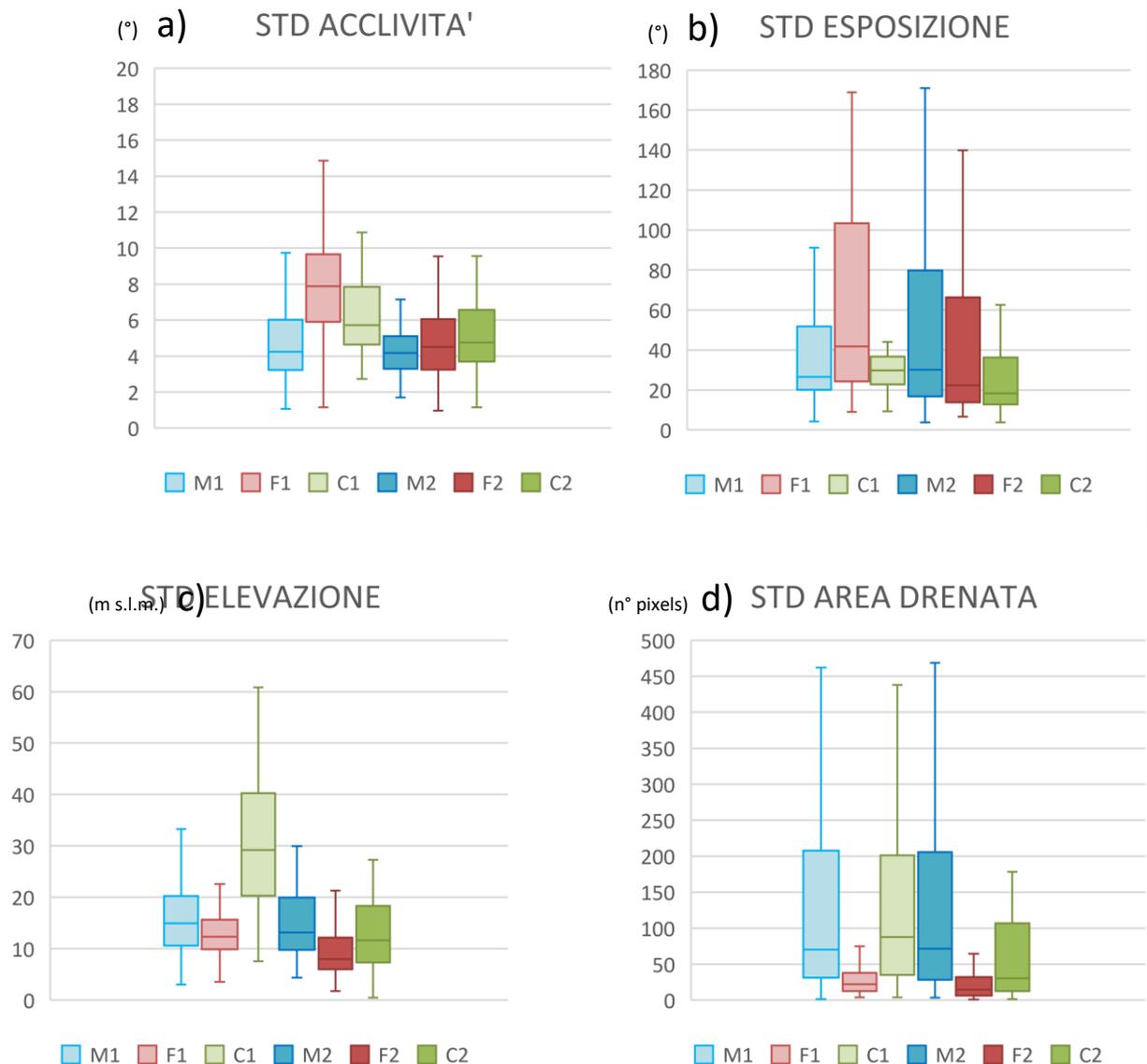


Fig.5.23 Box plot della deviazione standard (STD) delle quattro variabili morfometriche considerate nelle sei aree di studio: a) STD acclività, b) STD esposizione, c) STD elevazione, d) STD area drenata. M1 - Montespertoli area di studio, F1 - Figline Valdarno area di studio, C1 - Corella area di studio, M2 - Montespertoli area sub-comunale, F2- Figline Valdarno area sub-comunale, C2 - Corella area sub-comunale).

Per terminare l'analisi dei parametri predisponenti, riguardo alla litologia e all'uso del suolo si può riassumere quanto segue:

- **LITOLOGIA:** i movimenti gravitativi coinvolgono prevalentemente litologie sabbioso limose (USL), marnoso-arenacee (UMA) e calcareo-marnose (UCM). Le prime, particolarmente diffuse nei territori di Montespertoli e Figline Valdarno, sono caratterizzate da depositi prevalentemente sabbiosi e limosi, di ambiente continentale

e marino, che si alternano tra di loro. Le litologie classificate come UMA sono invece tipiche delle zone di Corella e in parte anche di Figline, mentre le UCM sono state individuate unicamente nel territorio di Figline. Sia le unità marnoso-arenacee, sia quelle calcareo-marnose, dunque, sono caratterizzate da un'alternanza variabile di livelli argilloso-marnoso-pelitici e prevalentemente arenacei o calcarenitici.

La presenza di alternanze con livelli a diversa competenza e con caratteristiche geotecniche diverse sembra essere dunque un fattore di rilievo nella propensione al franamento. Alcune litologie come quelle arenacee e sabbiose promuovono l'infiltrazione di acqua verso le parti più profonde dei depositi o dell'ammasso, mentre i livelli argillosi e/o pelitici, date le loro caratteristiche impermeabili, favoriscono il ristagno delle acque; quest'ultime litologie sono solitamente i livelli lungo i quali si impostano le superfici di taglio dei movimenti gravitativi.

- **USO DEL SUOLO:** le frane sono concentrate nei terreni il cui uso del suolo è dedicato all'agricoltura e i campi sono coltivati con seminativi e varie tipologie di colture (24 - Zone agricole con vari tipi di colture, 21 - Seminativi, 22 - Colture permanenti, come oliveti, frutteti e vigneti), o in aree dove la vegetazione dominante è di natura erbacea (32 - Vegetazione arbustiva e/o erbacea e pascoli).

Il fatto che siano proprio le aree attualmente coltivate ad essere maggiormente in frana è riconducibile verosimilmente sia ad erronei sistemi di drenaggio superficiale, sia alla mancanza di apparati radicali profondi che servono solitamente da fattori stabilizzanti del pendio.

In definitiva, si può osservare un sostanziale accordo tra le distribuzioni dei parametri nelle aree di studio e le rispettive aree comunali, indicando come i dati ottenuti dalle singole aree di studio possano essere presi come riferimento ed estrapolati anche a scala comunale.

Capitolo 6

6 Suscettibilità da frana

La suscettibilità da frana è la probabilità che si verifichi una frana in una certa area, sulla base delle condizioni locali (Brabb 1984) ma può anche essere definita come una valutazione quantitativa o qualitativa della classificazione, del volume (o dell'area) e della distribuzione spaziale delle frane esistenti o potenzialmente presenti in un'area (Fell et al. 2008). In particolare, essa rappresenta il grado per cui una certa area può essere soggetta a futuri movimenti di versante, localizzando dove è più probabile che si verifichino (Guzzetti et al., 1999, 2005, 2006 a, b). Ovvero la suscettibilità si occupa solamente della probabilità di occorrenza geografica delle frane, nel senso di stima del grado di instabilità di un versante rispetto ad un altro, e non della probabilità di occorrenza temporale o della magnitudo delle frane attese, che restano campi di pertinenza delle valutazioni di pericolosità.

Inoltre, il passato ed il presente vengono considerati chiavi di lettura per il futuro (Carrara et al. 1991, Hutchinson 1995), perciò i movimenti gravitativi futuri potrebbero avvenire sotto le stesse condizioni (caratteristiche geologiche, geomorfologiche, vegetazionali e antropiche simili) in cui si sono verificati fenomeni di instabilità passati. Questo criterio è molto utilizzato in quanto consente di prevedere le zone potenzialmente instabili sulla base dell'osservazione delle condizioni che hanno determinato il manifestarsi di eventi simili.

L'occorrenza di frane di prima generazione, che avvengono laddove non sono mai avvenute, è assai inferiore rispetto alle frane riattivate e varia a seconda della zona analizzata in funzione, appunto, della suscettibilità da frana. Le mappe di suscettibilità da frana possono essere, quindi, strumenti utili per la pianificazione e la gestione territoriale e offrono un valido sostegno nell'ambito dei sistemi d'allerta per l'occorrenza di frane.

L'analisi di suscettibilità da frana eseguita nel presente elaborato di tesi ha consentito di individuare i settori che presentano analogie con altri, già oggetto di fenomenologie gravitative, permettendo di concentrare l'attenzione sui diversi fattori che predispongono al dissesto e, soprattutto, su quelli che poi ne determinano l'innescio.

I metodi proposti e descritti nel seguente capitolo sono paragonabili a quelli comunemente adottati per le analisi di suscettibilità da frana. I vantaggi di far ricorso a tali metodologie possono essere così riassunti:

- Permettono di limitare la soggettività dell'analisi;
- La struttura del geodatabase, utilizzato come punto di partenza per l'analisi, è relativamente semplice e aggiornabile in qualunque momento con nuovi dati ed attributi;
- Le procedure utilizzate non necessitano di specifiche conoscenze in ambito statistico ed informatico, e possono essere realizzate anche da un'unica persona;
- È possibile integrare i dati raccolti durante il rilevamento di campagna con quelli ottenuti mediante fotointerpretazione e con le complesse tecniche di analisi spaziale in ambiente GIS, permettendo di produrre ed implementare modelli di suscettibilità che si adeguano a diversi contesti geologico-strutturali, di differenti aree di studio, e alle diverse esigenze di pianificazione territoriale per la gestione del rischio da frana;
- Utilizzano tecnologie economicamente vantaggiose.

Tra gli svantaggi vanno sicuramente evidenziati il largo impiego di memoria per l'immagazzinamento dei dati (immagini aeree e mappe in formato *raster*) e l'impossibilità di considerare la possibile correlazione reciproca tra i fattori predisponenti.

6.1 Analisi di suscettibilità

Le valutazioni relative alla propensione al dissesto di un dato territorio possono essere realizzate seguendo diversi metodi. Tra le metodologie proposte in letteratura troviamo sia metodi diretti che indiretti, qualitativi e quantitativi. Degli approcci qualitativi fanno parte tutte quelle metodologie soggettive che definiscono la suscettibilità in modo descrittivo mentre i metodi quantitativi consentono una stima numerica della probabilità di accadimento di una frana. Svariati sono i metodi esistenti per la valutazione della suscettibilità (Carrara et al. 1995, Soeters & van Westen 1996, Van Westen 1997, Chung & Fabbri 1999, Guzzetti et al. 1999, 2005, 2006a,b, Dai & Lee 2002, Yilmaz 2009, Yalcin et al. 2011, Lee & Pradhan 2007, Pradhan 2010, Pradhan & Lee 2010, Shahabi et al. 2014, Wang et al. 2015), alcuni sono basati sull'esperienza

dell'operatore che svolge l'analisi e dunque caratterizzati da un forte contributo soggettivo, altri invece consentono una valutazione più oggettiva delle caratteristiche e dei fattori predisponenti l'instabilità e consentono anche una facile riproducibilità e applicazione su aree di studio diverse rispetto a quella per cui sono stati testati.

Un primo metodo è rappresentato dalla mappatura geomorfologica, che cartografa i fenomeni di instabilità attuali e potenziali sulla base delle conoscenze ottenute con il rilevamento di campagna e in base all'esperienza dell'operatore. Un altro metodo consiste nell'analisi degli inventari franosi; in questo caso ciò che viene valutata è la distribuzione spaziale delle frane passate ed attuali per predire la localizzazione di futuri movimenti gravitativi ed è di fondamentale importanza la completezza dell'inventario franoso utilizzato (frane di ogni dimensione, da pochi metri cubi a centinaia di migliaia).

I metodi euristici, valutano qualitativamente il contributo apportato dai singoli parametri predisponenti al dissesto di un'area perciò è importante considerare correttamente i parametri causali, valutando attentamente quali siano effettivamente i più incisivi nell'innescare delle frane e attribuendo a questi fattori il giusto peso (Nielsen & Brabb 1977, Ruff & Czurda 2008).

Un altro metodo è rappresentato dagli approcci statistici, che consentono di valutare le relazioni tra parametri predisponenti e la distribuzione dei movimenti gravitativi; svariate metodologie sono state create per questo genere di valutazioni, al fine di ridurre il più possibile il contributo soggettivo apportato alla valutazione della suscettibilità (Carrara 1983, Guzzetti et al. 1999, Van Westen et al. 1997, 2008).

Infine, esistono metodi deterministici, definiti anche fisicamente basati, che consentono di creare dei modelli semplificati e schematici dell'area di studio, al fine di analizzare le condizioni di instabilità a scala di versante o per zone di più ampia estensione (Montgomery & Dietrich 1994, Alvioli & Baum 2016).

Per poter suddividere un territorio in base alla sua suscettibilità è dunque necessario utilizzare delle unità che servano da riferimento per l'analisi. Queste unità possono essere sia basate sulle forme e processi geomorfologici che caratterizzano un versante, sia su celle o griglie più o meno regolari create appositamente per condurre l'analisi. Il concetto fondamentale è che ogni unità deve essere distinguibile dalle altre e da quelle vicinali sulla base di specifiche condizioni di terreno.

Di seguito si fornisce una breve descrizione degli approcci più utilizzati e delle loro peculiarità. Verranno poi approfondite maggiormente le tematiche associate alle metodologie statistiche e a quelle di tipo deterministico che sono state trattate nel presente lavoro di tesi.

6.2 Approccio qualitativo: metodo euristico e metodo geomorfologico

Questo tipo di approccio viene eseguito basandosi sui dati raccolti sia durante le fasi di rilevamento geomorfologico di campagna sia mediante fotointerpretazione. Viene definito un metodo “qualitativo” e i risultati ottenuti sono affetti da una certa soggettività, poiché dettati secondo criteri basati sull’esperienza personale e le abilità del singolo operatore nel comprendere, definire e caratterizzare l’evoluzione dei fenomeni e dei processi geomorfologici. Si basa, dunque, su una conoscenza a-priori di tutti i possibili fattori predisponenti la franosità esistenti nell’area di studio. Il lavoro degli esperti consiste nel valutare direttamente sul campo la suscettibilità, sulla base dei fenomeni osservati e delle peculiarità geologiche e geomorfologiche dell’area. I risultati sono generalmente espressi in termini di probabilità di accadimento di un certo fenomeno franoso.

Indubbiamente, questa metodologia consente di fare una valutazione piuttosto rapida ed economica delle condizioni di stabilità di un’area. A partire da un certo numero di fattori predisponenti e da una mappa inventario delle frane si può realizzare una predizione in termini spaziali per identificare aree potenzialmente instabili. Ciò che assume un peso importante nella fase di valutazione della suscettibilità è dunque, senza dubbio, la “qualità” dei dati disponibili.

L’approccio geomorfologico è un metodo diretto e qualitativo che permette una valutazione, a basso costo, della stabilità in una data area, prendendo in considerazione un certo numero di fattori e la carta inventario delle frane, inoltre può essere adattato a qualsiasi scala. Tra gli esempi in letteratura possono essere citati Radbruch-Hall & Crowther (1973), Carrara & Merenda (1976), Brabb (1984), Hansen (1984), Bosi et al. (1985), Zhou et al. (2002). Il metodo prevede di suddividere il territorio in aree adatte a classificare la suscettibilità, come ad esempio le unità geomorfologiche, che si basano sulle relazioni esistenti tra forme e processi geomorfologici di versante. I limiti vengono definiti su base morfologica e perciò riflettono le variazioni geologiche, geomorfologiche, idrologiche e di uso e copertura del suolo. Il problema legato agli approcci geomorfologici nasce dal fatto che la soggettività dell’analisi, nei termini di interpretazione del dato e dei fattori predisponenti, è diversa da esperto a esperto, perciò comparare analisi diverse condotte da persone differenti può essere difficoltoso; inoltre questi metodi non consentono di aggiornare in modo rapido ed efficiente i dati pregressi (Leroi 1996).

Ricorrendo però all’utilizzo di strumenti e tecniche GIS, le problematiche esposte da Leroi (1996) e generate dalla difficoltà di aggiornare con nuovi dati il database di partenza,

così come le difficoltà nel comparare analisi svolte da operatori differenti, possono essere facilmente superate.

L'approccio euristico, infatti, è basato su una conoscenza a priori di tutti i fattori d'instabilità nell'area indagata, è un metodo indiretto e prevalentemente qualitativo, che dipende dalla capacità dell'operatore di comprendere i processi geomorfologici in atto. I fattori predisponenti sono classificati e pesati in funzione della loro importanza relativa nell'innescare dei movimenti di versante (Nilsen & Brabb 1977; Mejia-Navarro et al. 1994), riducendo così parzialmente la soggettività dell'analisi.

L'unità cartografica di base utilizzata per la valutazione della pericolosità da frana non è altro che una porzione territoriale elementare. L'unità cartografica di riferimento può essere costituita da una griglia di celle, che divide il territorio in maglie regolari di grandezza predefinita (van Westen 1993) e per ciascun parametro predisponente viene poi realizzato un file *raster*. Oppure può essere un'unità di terreno, molto usata dai geomorfologi, che consiste nell'individuare porzioni di terreno omogenee che dipendono dalle caratteristiche geomorfologiche e geologiche dell'area di studio (Meijerink 1988). Tra le unità cartografiche utilizzate esistono anche le unità a condizione unica (Chung et al., 1995), che prevedono di classificare in diverse categorie le carte tematiche di ciascun fattore predisponente; successivamente attraverso procedure di *overlay* cartografici vengono sovrapposti tutti gli strati informativi al fine di ottenere un certo numero di domini omogenei, detti appunto "a condizione unica". Infine, possono essere individuate anche le unità di versante, che vengono ottenute in modo automatico a partire da modelli digitali del terreno e consentono di suddividere il territorio in funzione delle linee di drenaggio e degli spartiacque (Carrara et al., 1991).

6.3 Approccio quantitativo: metodo statistico e metodo deterministico

6.3.1 Metodi statistici

I metodi statistici consentono di confrontare i fattori predisponenti l'instabilità, i cui parametri sono rappresentati mediante mappe tematiche, con la distribuzione dei fenomeni franosi, dedotta a partire dall'inventario franoso realizzato con il rilevamento geomorfologico. In generale, si fa ricorso agli approcci statistici quando si vuole aumentare l'oggettività dell'analisi nella valutazione dei parametri predisponenti e nel ruolo che questi svolgono

all'interno della stabilità del pendio. Di fondamentale importanza sono la quantità e qualità dei dati disponibili, poiché sono caratteristiche fortemente incisive sull'accuratezza del risultato finale.

Il contributo relativo di ciascun fattore predisponente (peso) può essere ottenuto considerando l'influenza che ognuno di questi esercita sull'instabilità del versante e l'utilizzo di software GIS semplifica notevolmente le operazioni di *overlapping* (sovrapposizione) delle diverse mappe tematiche, consentendone una facile applicabilità e ripetibilità anche su aree di vasta estensione. I fattori predisponenti e la franosità sono correlati tramite valori di densità da frana e a partire da questi valori, è possibile estendere le condizioni di suscettibilità da frana anche ad aree non ancora instabili ma che presentano le stesse condizioni.

La scelta del metodo più appropriato dipende strettamente dalla scala dell'analisi ed è collegata a una serie di fattori quali: le caratteristiche del fenomeno, la conoscenza e l'esperienza degli operatori, la qualità e l'accuratezza dei dati disponibili (geomorfologici, geotecnici, idrogeologici, topografici, geofisici, geologici strutturali, dati climatici) da cui dipende la validità dei risultati ottenuti. I risultati dei metodi statistici possono essere generalizzati alle aree attualmente non interessate dalle frane ma suscettibili di instabilità futura. Questo concetto si basa sull'ipotesi che nuove frane avvengano in presenza delle stesse condizioni di frane passate. Quindi il punto cruciale è definire correttamente i meccanismi di frana e valutare i diversi fattori che contribuiscono all'instabilità del pendio.

Queste analisi hanno il vantaggio di fornire informazioni dettagliate, oggettive e riproducibili; inoltre, i dati disponibili possono essere aggiornati in qualsiasi momento all'interno di database creati in ambiente GIS.

Tra i diversi approcci statistici esistenti, si sono presi in considerazione quelli relativi alla statistica bivariata (van Westen 1993, 1997 a,b, Rautela & Lakhera 2000, Uromeihy & Mahdaviifar (2000), Süzen & Doyuran 2004, Yalcin 2008), i quali prevedono di creare una mappa per ogni fattore casuale considerato, da confrontare poi con la mappa inventario delle frane.

In dettaglio, nel presente lavoro di tesi è stato proposto un approccio basato sulla statistica bivariata implementata tramite il metodo dell'Indice statistico (W_i) proposto da van Westen (1997), rivisitato alla luce delle peculiarità geologiche e geomorfologiche delle diverse aree di studio, al fine di ottenere informazioni sulla suscettibilità da frana in aree di ampia estensione (Capitolo 7).

Ogni fattore predisponente è suddiviso in diverse classi e a ciascuna classe vengono attribuiti valori numerici detti “pesi” proporzionali al contributo relativo di ciascun parametro predisponente nell’innescare dei movimenti gravitativi. In particolare, il valore pesato delle classi viene determinato sulla base della densità di frana in ciascuna classe individuale.

La densità da frana è una funzione importante poiché consente di rappresentare la correlazione probabilistica tra parametri predisponenti e franosità, ed è obiettiva poiché rappresenta un dato “reale” rilevato sul campo (Magiulo et al. 2009).

Lo svantaggio dei metodi bivariati è principalmente quello di non tenere conto delle reciproche relazioni tra i diversi fattori causali, relazione che invece viene stimata dalle procedure di statistica multivariata. Nell'analisi statistica multivariata, infatti, i pesi indicano il contributo relativo di ciascuno dei fattori predisponenti al grado di rischio all'interno di un'unità territoriale definita (Süzen & Doyuran, 2004a).

In generale, in base ai valori di densità di frana stimati per ciascun valore dei singoli fattori predisponenti (statistica bivariata) o della combinazione dei fattori (statistica multivariata), è possibile estendere le condizioni di suscettibilità da frana calcolate per le aree di studio, anche a nuove aree, purché quest’ultime presentino condizioni similari in termini di parametri predisponenti e assetto geologico-strutturale.

Uno dei vantaggi offerti dai metodi statistici è quello di essere più oggettivi rispetto a quelli qualitativi e il processo di valutazione dei pesi risente poco dell'esperienza personale dell'operatore. Inoltre, i metodi bivariati sono piuttosto semplici da applicare, a differenza di quelli multivariati che richiedono una conoscenza più approfondita della statistica, dei software e delle procedure matematiche (Magiulo et al. 2009). Talvolta i risultati di questi metodi, applicati alle medesime aree di studio, hanno dato luogo a risultati comparabili tra loro, come evidenziato da Süzen & Doyuran (2004b) in uno studio condotto nel nord-ovest della Turchia. Gli autori hanno sottolineato come l'approccio basato sulla statistica bivariata e l'approccio basato su statistiche multivariate abbiano prodotto mappe di suscettibilità similari, che convergono nell'80% di area di studio, dimostrando come i metodi bivariati possano essere (per certe realtà geologiche) validi strumenti di analisi.

6.3.2 Metodi deterministici (o fisicamente basati)

I metodi deterministici descrivono in grado di instabilità a scala di versante, ma possono essere utilizzati, talvolta, anche a scala di bacino. Questo approccio, a differenza del precedente euristico, è un metodo quantitativo che esprime la pericolosità da frana in termini

numerici, mediante il Fattore di Sicurezza (FoS), che viene calcolato utilizzando i parametri geotecnici del pendio (es. resistenza al taglio e pressione neutra). Questi parametri possono essere determinati *in situ* o da prove di laboratorio. Di solito le metodologie fisicamente basate, quando applicate agli studi di suscettibilità, accoppiano al modulo geo-tecnico anche quello idrologico. In particolare si basano sull'assunzione che il pendio sia costituito da materiale rigido e che le possibili superfici di rottura possano avvenire lungo un singolo piano di taglio. I metodi all'equilibrio limite (come quelli relativi al pendio infinito), sono tra quelli più largamente utilizzati. Consistono nel valutare le relazioni tra fattori destabilizzanti (ad es. la gravità) e stabilizzanti (ad es. angolo di attrito interno), ovvero comparano la resistenza al taglio agente lungo la superficie di scivolamento e con la resistenza al taglio del materiale resistente lungo la stessa superficie. Il fattore di sicurezza (formula 6.1) esprime dunque un rapporto tra sforzi contrastanti lungo il piano di taglio e viene definito come un numero adimensionale dato da:

$$FS = \frac{\tau_r}{\tau_a} \quad [6.1]$$

dove FS = Fattore di Sicurezza, τ_r = sforzo di taglio resistente lungo la superficie di rottura τ_a = sforzo di taglio agente lungo la superficie di rottura. In particolare, quando FS assume un valore è prossimo a 1, il pendio raggiunge la sua condizione limite, detta appunto equilibrio limite, in concomitanza della quale avviene la rottura. Il "metodo del pendio infinito" è particolarmente appropriato nel caso di frane superficiali, dove la superficie di taglio è approssimata parallela all'andamento del pendio e nel corpo di frana il rapporto lunghezza-profondità è molto elevato, perciò le forze agenti lateralmente tra concio e concio possono essere ignorate.

Chiaramente queste metodologie sono piuttosto complesse, e spesso onerose, poiché necessitano di considerare numerosi parametri geotecnici e idrogeologici del terreno. In generale, perciò, i modelli deterministici vengono preferiti per analisi a scala di versante o comunque per aree di limitata estensione, per le quali si disponga di una buona quantità di dati geologici e geotecnici.

Recentemente sono stati creati dei metodi prevalentemente deterministici che consentono di fare studi di suscettibilità su aree anche di grande estensione (nell'ordine delle centinaia di Km²). Un esempio è il modulo *r.slope.stability* (Mergili et al., 2014b), testato nel presente elaborato di tesi per l'area studio di Montespertoli (Capitolo 8), al fine di valutare

l'applicabilità di tale metodologia a diversi contesti geologici e in aree con estensione ridotta, rispetto al territorio per il quale tale modello è stato costruito.

6.4 Validazione dei modelli e Curva ROC

L'analisi delle Curve ROC (*Receiver Operator Characteristic or Relative Operating Characteristic*) è una metodologia sviluppata durante la seconda Guerra mondiale con lo scopo di analizzare il segnale radar, e in particolare, era utilizzata per misurare l'abilità dei ricevitori radar nel predire correttamente la presenza di aerei giapponesi a partire dal loro segnale radar. Successivamente è stata applicata ad altri campi, come la psicologia, la fisica e la medicina; all'interno di quest'ultima, la curva ROC è stata utilizzata per quantificare l'affidabilità delle risposte delle immagini radiografiche, interpretate da diversi operatori (Goodenough et al. 1974, Hanley et al. 1982). La curva ROC, in tempi più recenti, è stata ampiamente utilizzata anche nelle tecniche di *machine learning* e di laboratorio, per valutare l'accuratezza diagnostica di un test.

Dunque, la curva ROC può essere definita come un classificatore binario in grado di valutare la capacità predittiva di un modello. Lo schema ottenuto consente di discriminare tra due classi, ad esempio tra popolazione malata e sana, utilizzando la posizione di un valore di riferimento, chiamato valore "*cut-off*", per decidere il risultato.

Nella realtà la curva ROC non è composta da due curve separate per popolazione malata e sana, ma è piuttosto caratterizzata dalla loro parziale sovrapposizione, ed è proprio questa sovrapposizione a dare origine all'incertezza dei risultati (Fig.6.1a).

Quindi, in base alla posizione del valore di *cut-off*, è possibile ottenere quattro risultati diversi:

- a) TP - vero positivo, quando sia il risultato della previsione che il valore reale sono positivi;
- b) FP - Falso positivo, se il risultato della previsione è positivo ma il valore reale è negativo;
- c) TN - Vero negativo, quando sia il risultato della previsione sia il valore reale sono falsi;
- d) FN - Falso negativo, se il risultato della previsione è negativo e il valore reale è positivo.

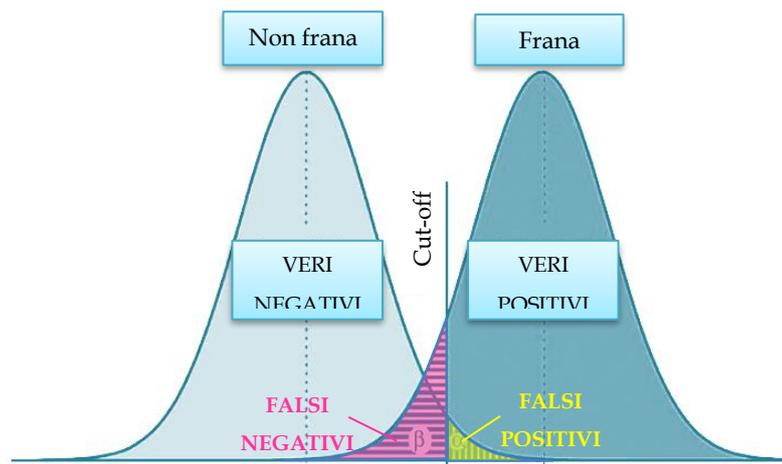
Per mezzo della tabella di contingenza (Fig.6.1b), è possibile rappresentare il risultato del test. Le colonne rappresentano la distinzione tra soggetti sani e malati, mentre le righe rappresentano il risultato del test. Un risultato qualitativo del test viene stimato considerando il numero di falsi positivi e negativi: meno ce ne sono e più il test è valido.

La capacità del classificatore di distinguere tra popolazione sana e malate (accuratezza del modello) viene valutata mediante l'area sottesa dalla curva ROC e definita AUC (*Area Under the Curve*). Il valore di AUC varia tra 0 e 1.

L'asse verticale della curva ROC (Fig.6.1c) rappresenta la sensibilità (True Positive Rate - TPR = $TP / (TP + FN)$) che corrisponde alla proporzione di pazienti con test positivo tra tutti quelli che hanno la malattia, cioè la proporzione di veri positivi; quello orizzontale riporta 1-specificità (False Positive Rate - FPR = $TN / (TN + FP)$) ovvero la proporzione di pazienti con test negativo tra tutti quelli che sono sani, cioè la proporzione di veri negativi. Quest'ultimo viene indicato talvolta come probabilità di falsi allarmi.

In Fig.6.1c viene riportato il grafico tipo per le curve ROC. La curva passa per i punti di coordinate (0,0) e (1,1); la retta passante per l'origine che taglia a 45° gradi il grafico è caratterizzata da un valore AUC = 0.5, che indica il caso di un classificatore casuale, ovvero la situazione in cui non è possibile fare nessuna predizione e il modello è guidato dalla casualità. Più la curva è vicina all'asse sinistro e al margine superiore del grafico ROC, più accurato è il test (Fig. 6.2) o, in altre parole, maggiore è la tendenza della curva a 1, maggiore è la capacità predittiva del modello (al valore di 1 corrispondono il 100% di sensibilità e assenza di falsi negativi, il 100% di specificità e assenza di falsi positivi). Valori prossimi a 0.5 rappresentano, come già detto, una predizione casuale e, in generale, un test non accurato.

Quando tale curva viene utilizzata per classificare aree suscettibili da frana, ciò che si cerca di ottenere è un risultato ad elevata sensibilità, ovvero si cerca di minimizzare i falsi negativi che corrispondono alle aree che nel modello vengono predette come stabili ma che nella realtà sono in frana. La capacità del classificatore di distinguere e separare le due classi è indicata dalla pendenza del primo tratto della curva: più è inclinata più la sensibilità sarà elevata (a parità di 1-specificità).



		Valore vero	
Predizione	Veri positivi (TP)	Vero positivo (TP)	Falso positivo (FP)
	Falso negativo (FN)	Falso negativo (FN)	Vero negativo (TN)

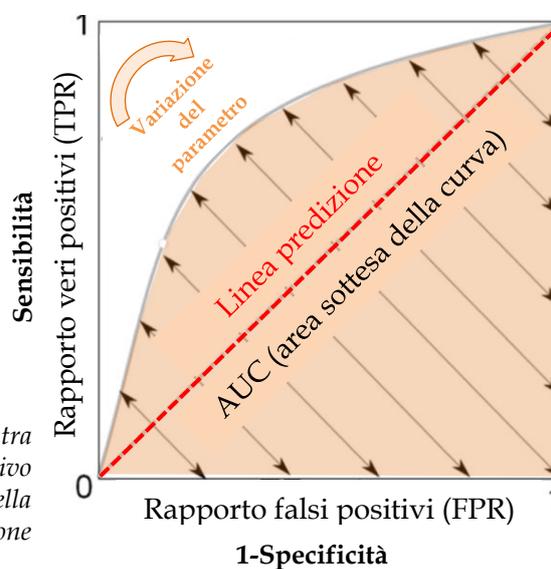


Fig.6.1 a) Curve discriminanti tra popolazione sana e malata e relativo valore di cut-off di riferimento; b) Tabella di contingenza per la rappresentazione del risultato del test; c) Curva di ROC.

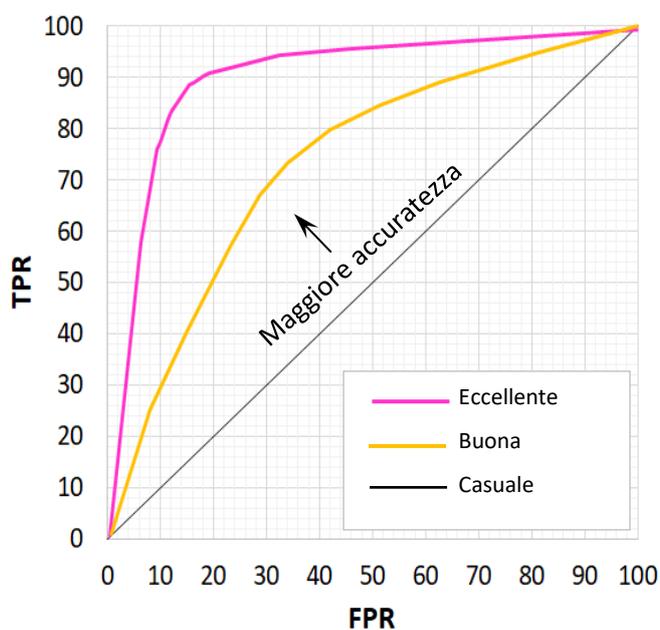


Fig.6.2 Valutazione dell'accuratezza della Curva di ROC.

Capitolo 7

7 Modelli statistici bivariati (Metodo dell'*Information Value*)

La maggior parte degli approcci utilizzati nella valutazione e mappatura della suscettibilità da frana si basa su un'accurata valutazione della distribuzione spaziale dei fattori predisponenti e dei movimenti franosi, al fine di evidenziare la distribuzione di pendii potenzialmente instabili. I recenti software di tipo GIS (*Geographic Information Systems*) rappresentano un potente strumento nella valutazione della suscettibilità da frana e rendono possibile l'elaborazione e l'interpretazione di una grande quantità di dati, oltreché l'aggiornamento costante dei database relativi agli inventari franosi.

Nel presente lavoro di tesi è stato proposto un approccio basato sulla statistica bivariata, implementata tramite il metodo dell'Indice statistico (W_i) proposto da van Westen (1997) per ottenere informazioni sulla suscettibilità da frana in aree di ampia estensione. Questo metodo è stato scelto perché consente un approccio rapido ed economicamente vantaggioso, permettendo di combinare la soggettività della scelta dei fattori causali (determinati dagli esperti) con l'oggettività dei dati ottenuti mediante le analisi statistiche effettuate in ambiente GIS. Inoltre, è stato applicato con successo in molte analisi di suscettibilità da frana (Van Westen 1993, Lee et al. 2002, van Westen et al. 2008, Lee & Choi 2004, Suzen & Doyuran 2004, Neuhäuser & Terhorst 2007, Thiery et al. 2007, Blahut et al. 2010) poiché si basa sull'assunto che gli stessi fenomeni predisponenti che hanno indotto la formazione di movimenti gravitativi nel passato influenzeranno la disposizione spaziale dell'innescò di nuovi movimenti in aree che sono, ad oggi, prive di frane.

Gli approcci statistici consentono di analizzare le relazioni tra i fattori predisponenti e la distribuzione delle frane in modo oggettivo, a differenza degli approcci qualitativi, che sono di semplice applicazione ma fortemente soggettivi poichè basati sull'esperienza e le conoscenze personali dell'operatore. Perciò, quando possibile, gli approcci quantitativi di tipo deterministico o statistico sono da preferire.

7.1 Tematismi utilizzati

Identificare e mappare un set di parametri predisponenti adeguato alle condizioni di instabilità richiede conoscenze a priori delle principali cause d'innescò delle frane (Guzzetti et al., 1999) e rappresenta la fase principale in qualsiasi lavoro di suscettibilità. Questi fattori includono generalmente litologia, immersione e direzione degli strati, sismicità, pendenza e morfologia, evoluzione del drenaggio, condizioni delle falde acquifere, clima, copertura vegetale, uso del suolo e attività antropiche.

La mappa inventario delle frane rappresenta lo strumento principale di tale analisi poichè consente di identificare e valutare le aree maggiormente soggette al franamento e, dunque, di conoscere la distribuzione spaziale delle frane esistenti. Inoltre, per alcuni movimenti in cui i limiti del corpo di frana sono difficili da definire, la fotointerpretazione costituisce uno strumento aggiuntivo di analisi.

Lo strato informativo relativo alla distribuzione delle frane, adoperato per l'analisi statistica bivariata, è stato ottenuto tramite un dettagliato rilevamento di campagna ed integrato poi con l'analisi multitemporale (ortofoto 1954 - 1988 - 1996 - 2013). I dati raccolti sono stati digitalizzati, georeferenziati e aggiornati mediante strumenti GIS. L'inventario franoso utilizzato è il medesimo di quello impiegato per l'analisi statistica descrittiva (Capitolo 5).

Sono state utilizzate sia le frane attive sia quelle quiescenti, considerando all'interno dell'areale in frana sia la zona di accumulo che quella di distacco di ciascun movimento.

Litologia, pendenza, esposizione, uso del suolo, elevazione e area drenata sono i 6 parametri predisponenti considerati, comuni a tutte le aree di studio. Per poter applicare l'approccio statistico bivariato è stato progettato e costruito un *geodatabase* spaziale dal quale sono stati ricavati i tematismi necessari per ciascuno dei fattori predisponenti. Lo sviluppo crescente di strumenti informativi geografici come i software GIS consente di eseguire

facilmente e rapidamente procedure di *overlay* delle carte tematiche relative ai diversi fattori predisponenti. Le carte tematiche utilizzate, quindi, sono rappresentate da:

- Lir (Inventario Franoso)
- Dem
- Litologia
- Uso del Suolo
- Esposizione
- Acclivita'
- Elevazione
- Area Drenata

Le mappe relative ad acclività, esposizione ed elevazione sono state ricavate direttamente dal DEM, all'interno del software GIS. In particolare le prime due variabili morfometriche sono state ottenute attraverso le rispettive funzioni (*Spatial Analyst Tools - Surface - Aspect, Slope*), l'elevazione, invece, è stata ricavata direttamente dal DEM, suddividendolo in classi di quota.

Riguardo alla litologia, le diverse classi sono state estrapolate dalle unità litotecniche rilevate durante il lavoro di campagna e, anche per l'area comunale, sono state accorpate sotto la stessa unità tutte le formazioni e sintemi che presentavano caratteristiche granulometriche e tessiture simili tra loro.

L'uso del suolo è stato ricavato dai file disponibile online sul sito della Regione Toscana (UCS 2013 - <http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/cartoteca.html>) prendendo in considerazione il secondo livello di dettaglio.

Infine, l'area drenata è stata ricavata mediante l'utilizzo di alcuni software che hanno consentito l'estrapolazione della mappa della *flow accumulation* (o area drenata) secondo il modello D-Infinity, ovvero mediante una riclassificazione della direzione per ciascun grado su un totale di 360 gradi.

7.2 Metodo di Van Westen

Nel presente lavoro di tesi si è testato l'utilizzo di un approccio statistico bivariato per eseguire un'analisi di suscettibilità da frana sia a scala di area studio (estensione di pochi km²) sia di comune (estensione nell'ordine di centinaia di km²). Il metodo adottato è quello dell'Indice statistico W_i proposto da Van Westen (1997), noto anche come "*Information Value*

Method". Tale metodo si basa sulla correlazione statistica tra la mappa inventario delle frane e le mappe dei fattori predisponenti individuati nell'area di studio. In questo metodo il valore "pesato" per una certa classe di un parametro viene definito in base al logaritmo naturale della densità di frana di quella stessa classe diviso per la densità da frana riferita all'intera area di studio (Van Westen, 1997; van Westen et al., 1997). Mediante specifiche funzioni presenti sui software Gis è possibile sovrapporre, combinare e riclassificare (*raster calculator, combine, reclassify*) differenti mappe di parametri al fine di ottenere una tabella degli attributi in cui è possibile sintetizzare la densità da frana per ogni classe di parametri. Per poter applicare questa metodologia su altre aree di studio e confrontarne i risultati, è molto importante standardizzare i valori di densità da frana riferendoli alla densità complessiva dell'intera area (Oztekin & Topal, 2005). La formula adottata per la stima del W_i è la medesima proposta da Van Westen (1993, 1997) e da Van Westen et al. (1997):

$$\ln W_i = \ln \left(\frac{\text{Densclas}}{\text{Densmap}} \right) = \ln \left(\frac{\frac{\text{Npix}(S_i)}{\text{Npix}(N_i)}}{\frac{\sum \text{Npix}(S_i)}{\sum \text{Npix}(N_i)}} \right) \quad [7.1]$$

dove, W_i = peso attribuito ad una certa classe del parametro (es. classe litologica o di acclività); Densclas = densità da frana all'interno della classe del parametro; Densmap = la densità da frana all'interno dell'area totale; $\text{Npix}(S_i)$ = n° di pixels che contengono aree in frana, all'interno di una certa classe di un parametro; $\text{Npix}(N_i)$ = n° totale di pixels in una certa classe di parametro.

Il logaritmo naturale è utilizzato per determinare l'influenza di una certa classe nell'innesco delle frane. Valori negativi di W_i indicano che la presenza in quella particolare classe di un dato parametro ha poco effetto sull'innesco di frane, mentre valori positivi indicano una certa rilevanza tra la presenza di quella classe e l'occorrenza delle frane (Yin & Yan 1988, Zezere 2002, Tating et al. 2015).

Tutte le mappe sono state georeferenziate e trasformate in formato *raster*, con una dimensione di cella pari a 10X10m. Ciascun parametro predisponente è stato suddiviso in un numero di classi rappresentative a cui, successivamente, è stato attribuito un "peso" relativo, ovvero l'Indice statistico W_i . Infine, le diverse mappe dei fattori predisponenti sono state riclassificate secondo i W_i di ciascun parametro (step 3 Fig.7.1 - *look up*) e sovrapposte tra di

loro (step 4 Fig.7.1 - *Raster calculator*) al fine di ottenere un'unica carta di suscettibilità, che rappresenta la somma di tutti i valori W_i stimati per ciascuna classe.

La carta così ottenuta è stata poi suddivisa in cinque classi di suscettibilità: 1) molto bassa, 2) bassa, 3) moderata, 4) elevata, 5) molto elevata).

Sebbene alcuni autori definiscano le classi utilizzando talvolta metodi automatici (ad es. quello degli intervalli naturali o "*natural breaks*" presente in ArcGIS, Tating et al., 2015) per il presente lavoro di tesi si è deciso di definire manualmente le classi di suscettibilità, che sono state delimitate in modo tale da essere identiche per tutte le aree di studio e rendere comparabili i risultati delle diverse analisi per le diverse aree investigate.

Questa caratteristica rappresenta sicuramente un elemento di innovazione rispetto alle analisi realizzate in precedenza da altri autori (Yin & Yan 1988, Zezere 2002, Tating et al. 2015) poiché dimostra come la procedura realizzata e la suddivisione delle classi utilizzata sia valida e applicabile ad una casistica di territori piuttosto ampia in termini di contesti geologici diversi e di estensione dell'area di studio.

Nel dettaglio, le classi di suscettibilità 1 e 2 (suscettibilità molto bassa e bassa), caratterizzate da valori negativi, o prossimi allo zero, di indice W_i ($1=[<0]$ e $2=[0,0.3]$), sono generalmente prive di frane, sebbene talvolta possano essere caratterizzate da sporadici fenomeni gravitativi. La classe 3 (suscettibilità moderata), rappresentata da valori di indice W_i compresi nell'intervallo $[0.3, 0.6]$, rappresenta zone per le quali c'è la probabilità che possano accadere fenomeni gravitativi, ma la loro frequenza e densità restano comunque abbastanza ridotte. Infine, le classi 4 e 5 (suscettibilità elevata e molto elevata) sono caratterizzate da valori positivi più elevati di indice W_i ($4=[0.6, 1.0]$ e $5=[>1.0]$), e dunque sono le classi dove l'occorrenza delle frane ha la più alta frequenza.

Al fine di stimare la bontà con cui il modello si adatta al caso reale, per ciascuna mappa di suscettibilità prodotta è stata stimata la *success rate curve*, o curva del tasso di successo, che viene creata sovrapponendo l'inventario delle frane alla mappa della suscettibilità (Chung & Fabbri 1999,2003; Van Westen et al. 2003, Brenning 2005). In pratica, tale curva consente di valutare la percentuale delle aree in frana che ricade all'interno delle aree a più elevata suscettibilità.

L'intera procedura di statistica bivariata svolta per il presente lavoro di tesi è riportata in Fig.7.1, dove il diagramma di flusso riassume tutti i passaggi eseguiti per la realizzazione della carta della suscettibilità.

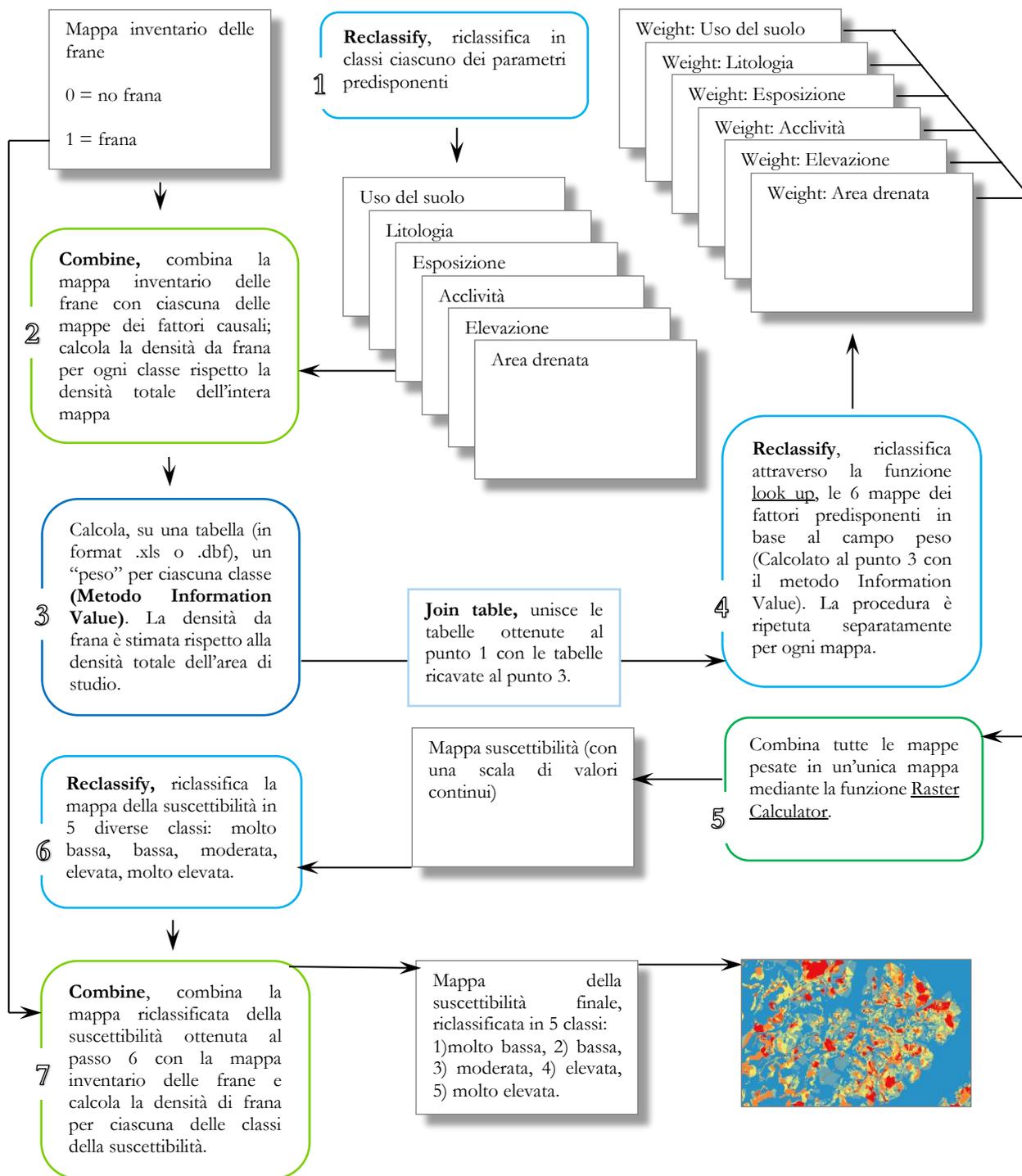


Fig.7.1 Diagramma di flusso relativo alla procedura utilizzata per la metodologia di Information Value

Esempi di riclassificazione (a scala sub-comunale) dei parametri predisponenti utilizzati per il presente lavoro di tesi sono riportati nelle Figure 7.2, 7.3, 7.4.

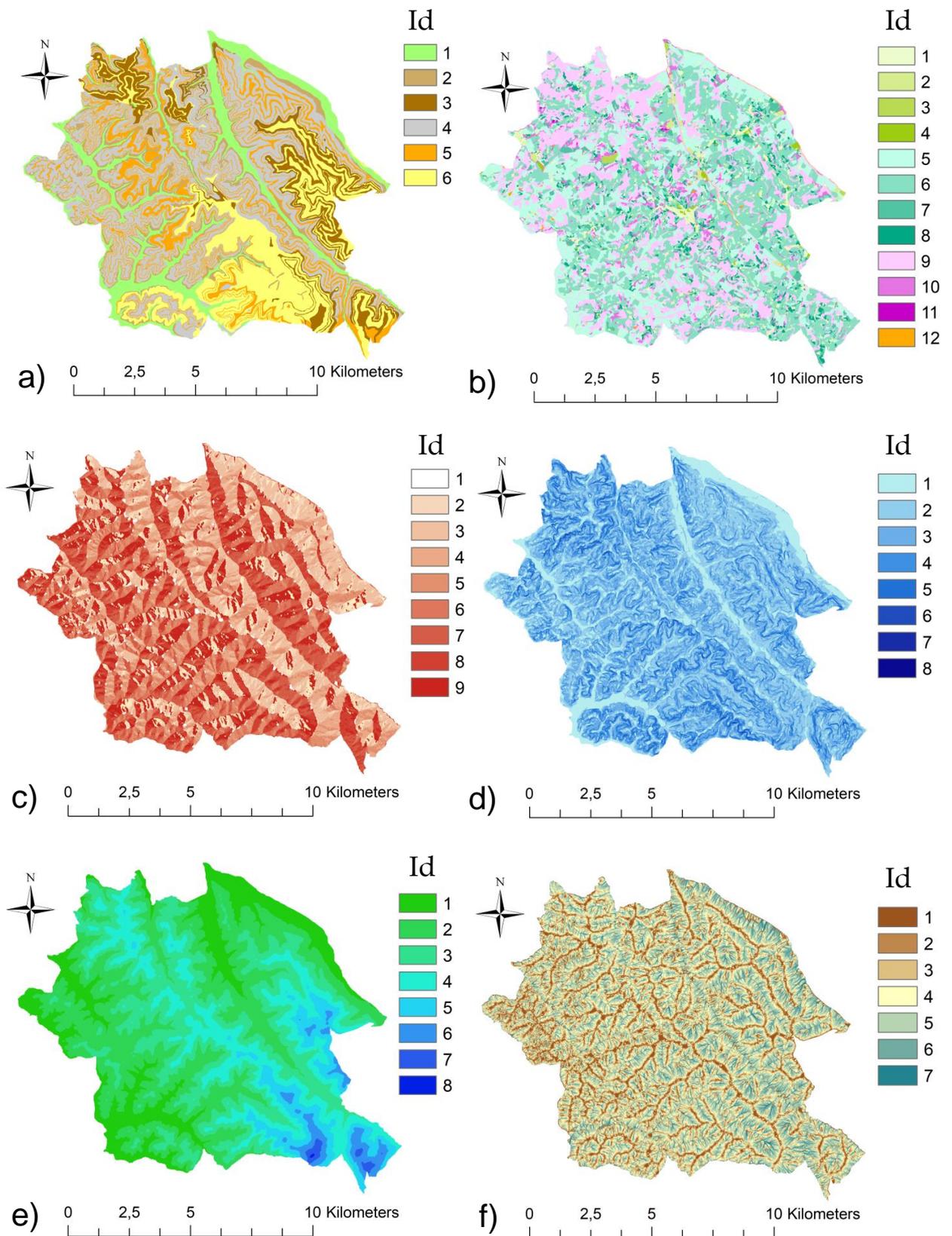


Fig.7.2 Riclassificazione dei parametri predisponenti per l'area di Montespertoli: a) Litologia, b) Uso e copertura del suolo, c) Esposizione, d) Acclività, e) Elevazione, f) Area drenata.

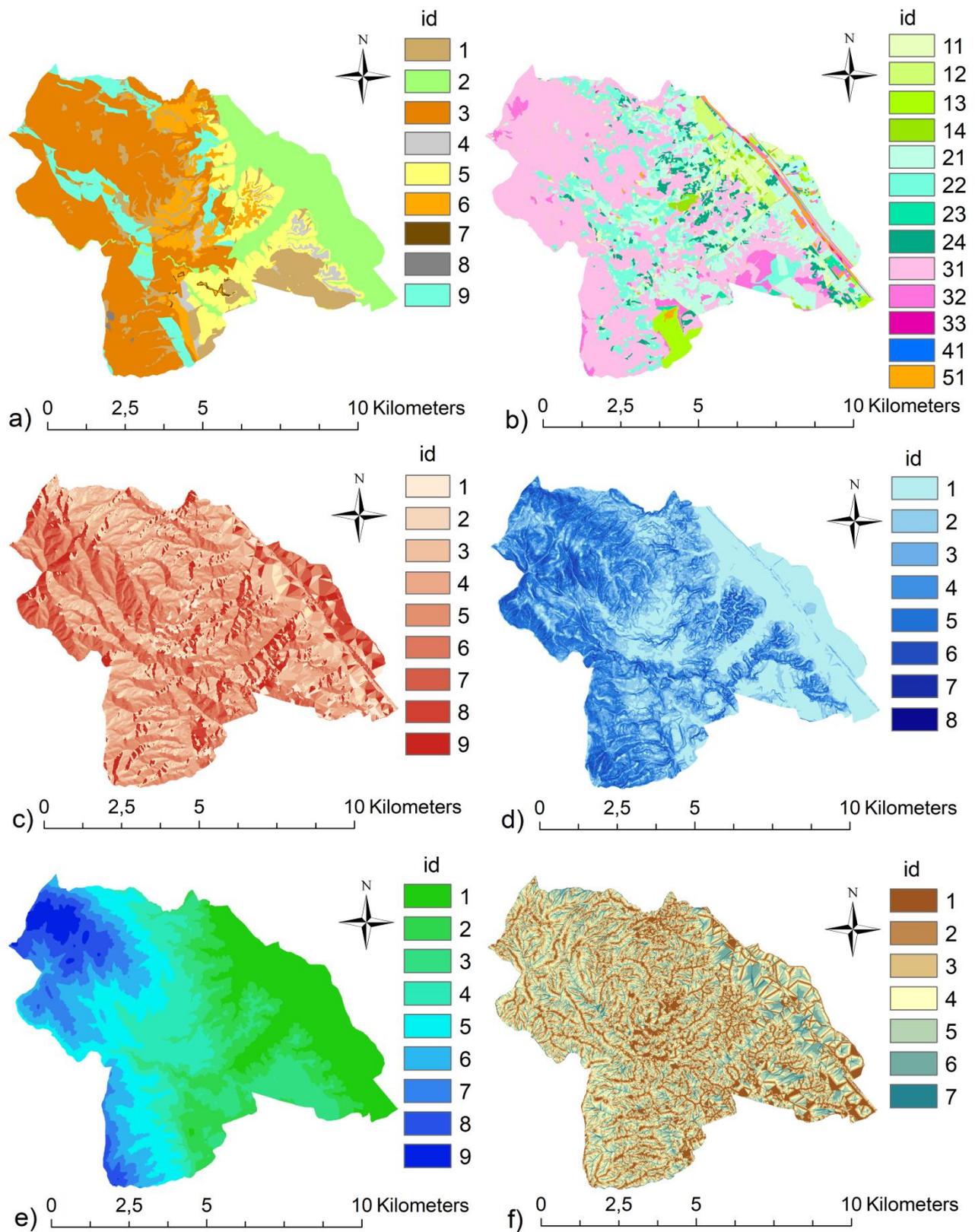


Fig.7.3 Riclassificazione dei parametri predisponenti per l'area di Figline Valdarno: a) Litologia, b) Uso e copertura del suolo, c) Esposizione, d) Acclività, e) Elevazione, f) Area drenata.

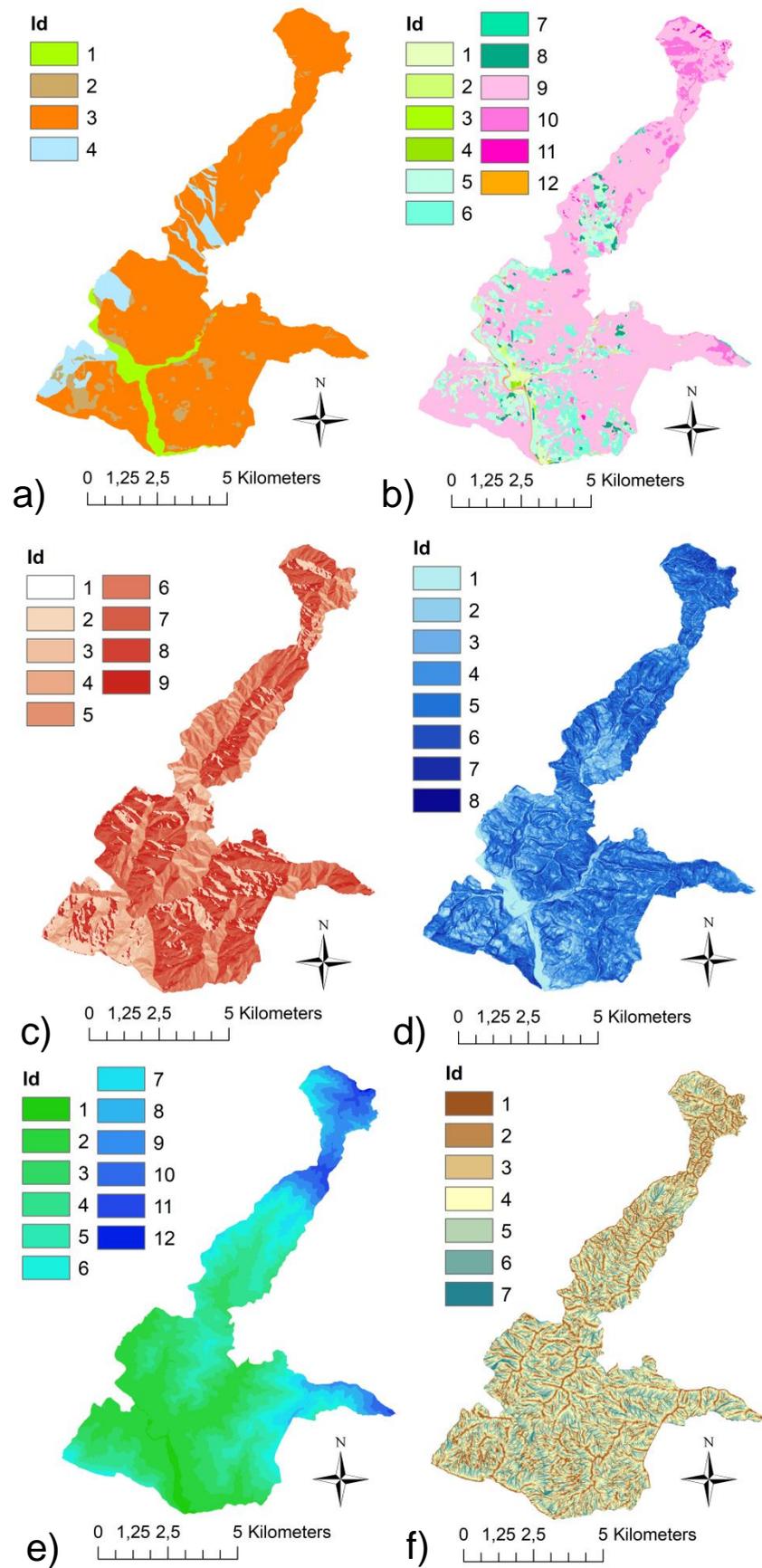


Fig.7.4 Riclassificazione dei parametri predisponenti per l'area di Corella: a) Litologia, b) Uso e copertura del suolo, c) Esposizione, d) Acclività, e) Elevazione, f) Area drenata.

7.3 Analisi dei risultati

Nelle seguenti pagine vengono descritti i risultati dell'analisi statistica bivariata relativi sia alle aree di studio sia alle aree sub-comunali. Per ciascuna area analizzata sono stati testate diverse configurazioni di parametri predisponenti al fine di valutare quale mappa della suscettibilità fosse la migliore per capacità predittiva. In particolare si sono confrontati i risultati ottenuti tra la mappa S4, a cui è associata la combinazione di tutti e 6 i parametri predisponenti considerati (Tab.7.1), con le altre mappe, ottenute variando di volta in volta il numero e il tipo di parametri predisponenti considerati. In Tab.7.1 si riassumono i fattori predisponenti considerati in ciascuna mappa della suscettibilità.

Mappa suscettibilità	Acclività	Litologia	Uso del suolo	Esposizione	Elevazione	Area drenata
S1	x	x	x			
S2	x	x	x	x		
S3	x	x	x	x	x	
S4	x	x	x	x	x	x
S5	x	x	x	x		x
S6	x	x	x			x
S7	x		x	x	x	x

Tab 7.1. Mappe della suscettibilità realizzate prendendo in considerazione diverse combinazioni di parametri predisponenti.

7.3.1 Montespertoli (area di studio)

Le relazioni tra distribuzione delle frane e parametri predisponenti sono riportati in Tab.7.2, in particolare al campo "Information value" è associato il peso W_i stimato per ogni classe in cui sono stati riclassificati i fattori causali. L'intervallo in cui varia il parametro W_i per l'area di studio di Montespertoli va da -4,458 a 0,494.

Litologia				W_i
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	ULA	34177	18991	0,1769837
2	USC	13580	8669	0,3157268
3	UCI	5961	2104	-0,2768265
4	USL	25278	8722	-0,2995144
5	EC	5280	2455	-0,0012279
6	A	7552	1808	-0,6650197
Uso del suolo				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	11	7873	1261	-1,066963
2	12	4220	758	-0,952336
3	13	41	0	-4,468483
4	14	1058	259	-0,642736
5	21	11446	6124	0,139147
6	22	28210	10774	-0,197969
7	23	3811	1843	0,038075

8	24	5801	2838	0,049641
9	31	20893	13463	0,325102
10	32	8063	5405	0,364610
11	33	41	22	0,142042
12	51	371	2	-4,458483
Esposizione				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	flat	2381	84	-2,577620
2	N	13547	7208	0,135865
3	NE	13760	4993	-0,246890
4	E	11950	5593	0,007623
5	SE	11722	5565	0,021868
6	S	8055	3991	0,064588
7	SO	8852	4104	-0,001842
8	O	7901	3608	-0,016997
9	NO	13651	7502	0,168196
10	N	13547	7208	0,135865
Acclività				
ID	CLASS	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	0-5°	13304	2064	-1,09658
2	5-10°	31461	14187	-0,02958
3	10-15°	31285	17303	0,17458
4	15-20°	10642	6085	0,20786
5	20-30°	4547	2645	0,22504
6	30-40°	555	352	0,31150
7	40-50°	25	12	0,03287
8	>50°	0	0	-1,19658
Elevazione				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	10-100	46	0	-1,942774
2	100-150	23824	10181	-0,104330
3	150-200	33121	19987	0,240754
4	200-250	32920	12349	-0,234665
5	250-300	1908	131	-1,932774
Area drenata				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	0-1	9292	1449	-1,091441
2	1-2	7199	2047	-0,490728
3	2-5	20241	7174	-0,270408
4	5-10	21686	10010	-0,006243
5	10-25	20393	12321	0,262952
6	25-100	9675	7364	0,493897
7	>100	3333	2283	0,388456

Tab.7.2 Pesi W_i ottenuti per tutte le classi dei parametri predisponenti tramite il metodo dell'Information Value.

La qualità della mappa finale ottenuta dipende da diversi fattori e il principale resta la qualità dei parametri utilizzati. I valori di W_i ricavati dalla procedura di *Informarion Value* permettono di distinguere quali sono le classi maggiormente coinvolte nel franamento, che corrispondono a quelle caratterizzate da valori più elevati di W_i (W_i positivi):

- nel caso della litologia è la classe USC ($W_i = 0,3157268$);
- per quanto riguarda l'uso del suolo è la classe 32 ($W_i = 0,364610$);
- per l'esposizione è la classe NO ($W_i = 0,168196$);
- nel caso dell'acclività è la classe compresa tra 30-40° ($W_i = 0,31150$);

- e) per l'elevazione è la classe compresa tra 150-200 m s.l.m. ($W_i = 0,240754$);
- f) per l'area drenata è la classe compresa tra 25-100 ($W_i = 0,493897$).

Anche i valori negativi di W_i ci danno un'indicazione delle classi che non sembrano avere correlazione con le aree instabili. I depositi ciottolosi ubicati sul crinale così come quelli alluvionali presenti sul fondovalle, caratterizzati generalmente da basse pendenze, hanno i valori negativi più elevati sia per quanto riguarda la litologia che l'acclività, così come le aree urbane, estrattive ed industriali per l'uso del suolo; anche i versanti esposti a NE e le aree caratterizzate da elevazioni molto basse (10-100m) hanno valori negativi di W_i , così come le aree drenate con un numero di pixels inferiore a 10.

Per la procedura di verifica è stata calcolata e stimata, per ciascuna classe di suscettibilità, la densità di frana (DF - Fig.7.5), definita come:

$$\frac{n^{\circ} \text{pixels in frana}}{n^{\circ} \text{pixels non in frana}} * 100 \quad [7.1]$$

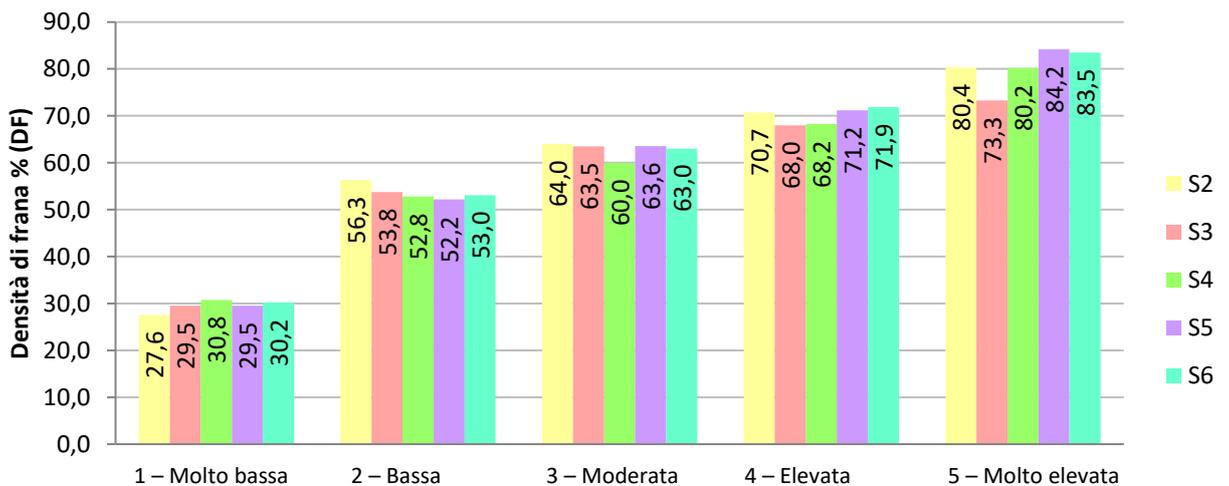


Fig.7.5 Istogramma di confronto della ripartizione delle classi di suscettibilità in funzione della densità di frana, per le diverse mappe ottenute per l'area studio di Montespertoli.

Per ciascuna mappa di suscettibilità (Fig.7.6), è stata stimata la *success rate curve*, o curva delle percentuali di successo (Fig.7.7), che si basa sul confronto e sovrapposizione tra l'immagine di previsione (mappa suscettibilità) e l'inventario delle frane utilizzato nella modellazione (Chung & Fabbri 2003).

Le curve di successo non danno una stima qualitativa della previsione del modello, tuttavia, esprimono la bontà con cui il modello si adatta al caso reale. La pendenza del tratto iniziale della curva (Fig.7.7) è tanto maggiore quanto maggiore è la percentuale delle aree in frana che ricade all'interno delle aree a più elevata suscettibilità.

In Fig.7.6 si sono confrontati i risultati ottenuti per la mappa S4 (derivata dalla combinazione di tutti i parametri predisponenti) e la migliore (in base al valore di densità di frana, DF%) tra le restanti mappe ottenute, ovvero la mappa S5, che è priva del parametro "elevazione".

Come si osserva in Fig.7.7 l'area sottesa dalle curve ottenute per i due scenari è identica ($S4 = 0,75$; $S5 = 0,75$). Perciò si può concludere che il parametro elevazione non incide significativamente nell'innesco dei fenomeni gravitativi dell'area studio di Montespertoli.

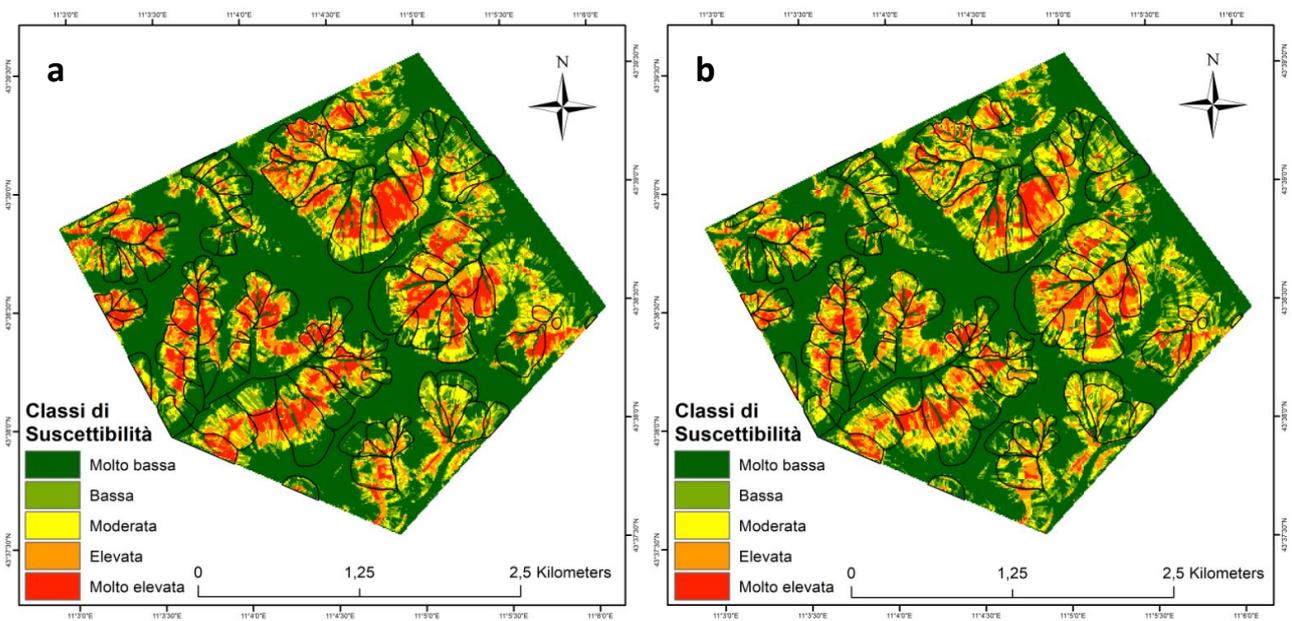


Fig.7.6 Mappe della suscettibilità: a) S4 (6 parametri predisponenti), b) S5 (5 parametri predisponenti da cui è stata esclusa l'elevazione).

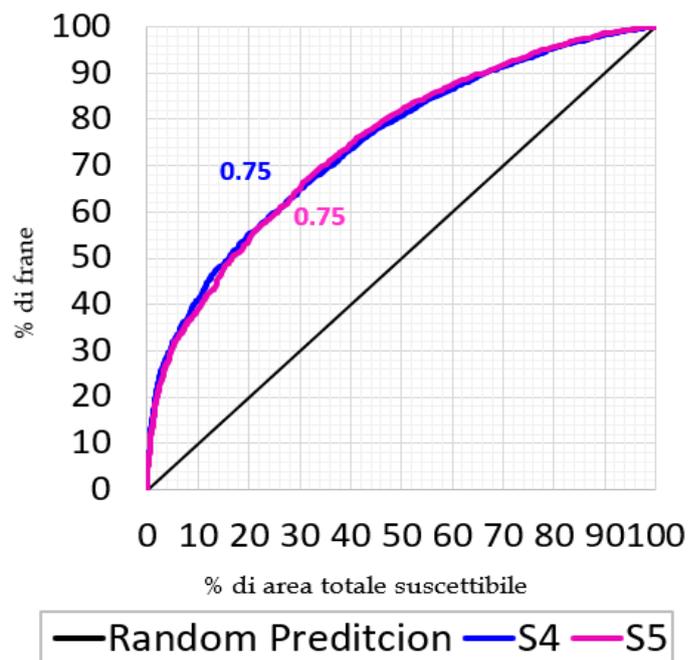


Fig.7.7 Success rate Curve: comparazione tra le mappe S4 e S5.

7.3.2 Montespertoli (area comunale)

Le relazioni tra distribuzione delle frane e parametri predisponenti sono riportati in Tab.7.3, in particolare al campo "Information value" è associato il peso W_i stimato per ogni classe in cui sono stati riclassificati i fattori causali. L'intervallo in cui varia il parametro W_i , per l'area sub-comunale di Montespertoli va da -2,705 a 0,611.

Litologia				W_i
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	A	156506	10398	-1,26716
2	EC	94215	14208	-0,44745
3	UCI	125563	30098	0,015973
4	ULA	437262	104791	0,015758
5	USC	198068	55694	0,175584
6	USL	238855	79804	0,348039
Uso del suolo				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	11	51010	4232	-1,04502
2	12	37042	3605	-0,88541
3	13	3322	224	-1,25235
4	14	3514	276	-1,09979
5	21	280277	61120	-0,07862
6	22	395739	93867	0,005446
7	23	46919	15652	0,346498
8	24	40975	12153	0,228936
9	31	334887	86758	0,093652
10	32	52418	16982	0,317226
11	33	868	18	-2,4315
12	51	3498	106	-2,05219
Esposizione				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	flat	21363	337	-2,70447
2	N	161710	47365	0,216943
3	NE	185328	48711	0,108641
4	E	127785	32814	0,08537
5	SE	131156	31063	0,004494
6	S	122856	24033	-0,18672
7	SO	154410	28144	-0,25741
8	O	168980	34660	-0,13933
9	NO	176888	47708	0,134446
10	N	161710	47365	0,216943
Acclività				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	0-5°	199009	11229	-1,42999
2	5-10°	414996	103810	0,059157
3	10-15°	408455	118702	0,209098
4	15-20°	152863	42015	0,153348
5	20-30°	68689	17706	0,089178
6	30-40°	6178	1339	-0,08421
7	40-50°	282	33	-0,70054
8	>50°	4	1	0,058569
Elevazione				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	10-100	185455	12173	-1,23623
2	100-150	394382	84398	-0,05441
3	150-200	343475	93589	0,187165
4	200-250	202273	64185	0,339518
5	250-300	85664	29196	0,410966

6	300-350	32795	10089	0,308536
7	350-400	6220	1196	-0,16142
8	400-450	212	9	-1,672
Area drenata				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	0-1	116494	6423	-1,41059
2	1-2	97122	9775	-0,80877
3	2-5	269742	42236	-0,36683
4	5-10	297132	68704	0,022998
5	10-25	292744	96594	0,378585
6	25-100	136480	56826	0,611182
7	> 100	40762	14277	0,438266

Tab.7.3 Pesi W_i ottenuti per tutte le classi dei parametri predisponenti tramite il metodo dell'Information Value.

I valori di W_i ricavati dalla procedura di *Informarion Value* permettono di distinguere quali sono le classi maggiormente in frana, che corrispondono a quelle caratterizzati dai valori più elevati di W_i (W_i positivi):

- nel caso della litologia è la classe USL ($W_i = 0,348039$);
- per quanto riguarda l'uso del suolo è la classe 23 ($W_i = 0,346498$);
- per l'esposizione è la classe N ($W_i = 0,216943$);
- nel caso dell'acclività è la classe compresa tra 10-15° ($W_i = 0,216943$);
- per l'elevazione è la classe compresa tra 250-300 m s.l.m. ($W_i = 0,410966$);
- per l'area drenata è la classe compresa tra 25-100 ($W_i = 0,611182$).

I valori negativi di W_i ci danno un'indicazione delle classi che non sembrano avere correlazione con le aree instabili. I depositi eluvio-colluviali così come quelli alluvionali presenti sul fondovalle, caratterizzati generalmente da basse pendenze, hanno i valori negativi più elevati sia per quanto riguarda la litologia che l'acclività, così come le aree urbane, estrattive e con vegetazione arbustiva per l'uso del suolo; anche i versanti esposti a S - SO e le aree caratterizzate da elevazioni molto basse (10-100m) e molto elevate (400-500m) hanno valori negativi di W_i , così come le aree drenate da un n° di pixels inferiore a 5.

Per la procedura di verifica è stata calcolata e stimata, per ciascuna classe di suscettibilità, la densità di frana (DF%). Il risultato è riportato nell'istogramma di Fig.7.8, dove si confrontano le diverse mappe.

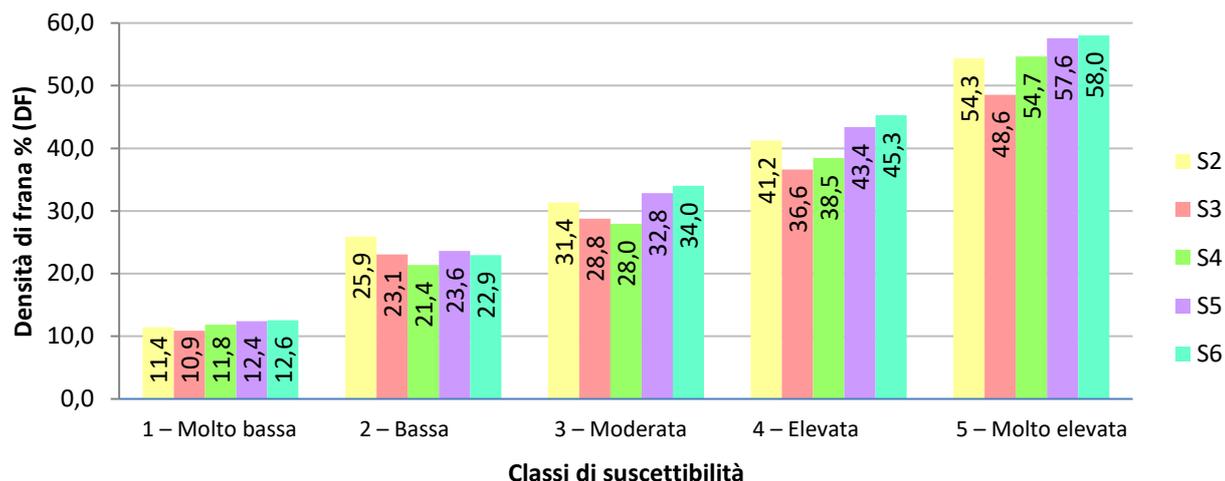


Fig.7.8 Istogramma di confronto della ripartizione delle classi di suscettibilità in funzione della densità di frana, per le diverse mappe ottenute per l'area sub-comunale di Montespertoli.

Per ciascuna mappa di suscettibilità (Fig.7.9) è stata stimata la *success rate curve* (Fig.7.10). In Fig.7.9 si sono confrontati i risultati ottenuti per la mappa S4 (derivata dalla combinazione di tutti i parametri predisponenti) e la migliore (in base al valore di densità di frana) tra le restanti mappe ottenute, ovvero la mappa S6, che è priva dei parametri "elevazione" ed "esposizione".

Come si osserva in Fig.7.10 l'area sottesa dalle curve ottenute per i due scenari è simile ($S4 = 0,73$; $S6 = 0,72$). Perciò si può concludere che il parametro elevazione assieme all'esposizione non incidono in modo significativo nell'innesco dei fenomeni gravitativi dell'area sub-comunale di Montespertoli.

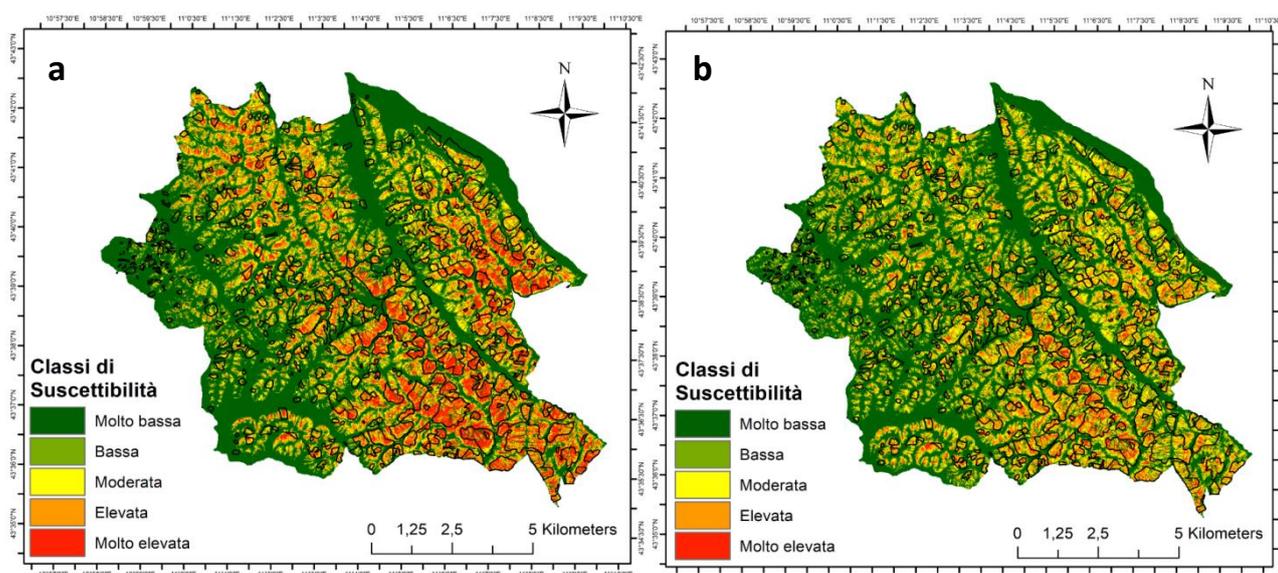


Fig.7.9 Mappe della suscettibilità: a) S4 (6 parametri predisponenti), b) S6 (4 parametri predisponenti, sono stati esclusi elevazione ed esposizione).

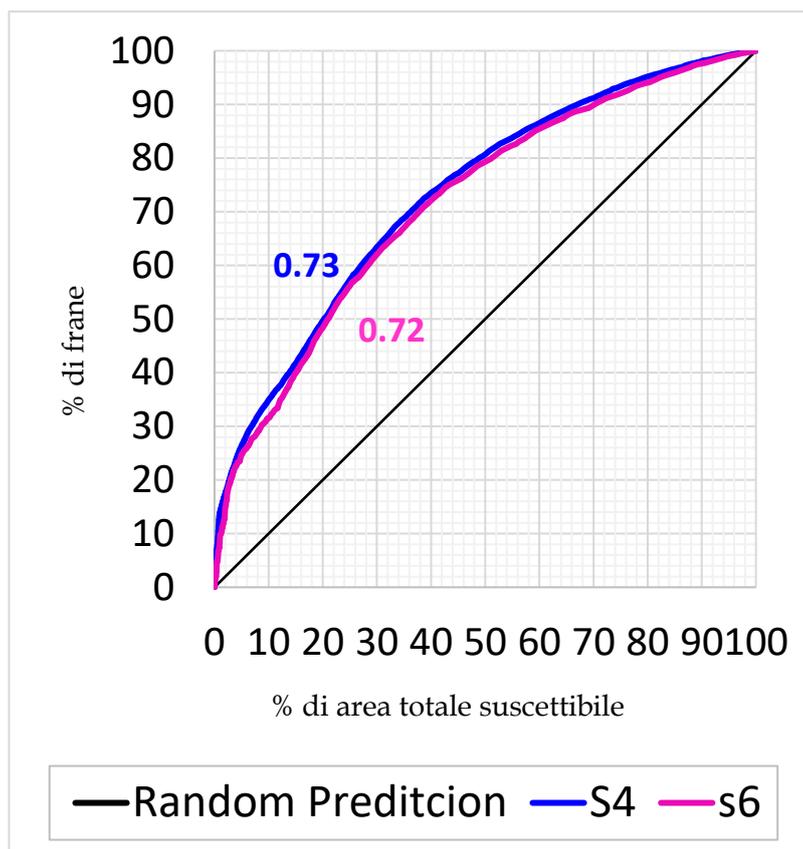


Fig.7.10 Success rate Curves: comparazione tra le mappe S4 e S6.

7.3.3 Figline Valdarno (area di studio)

Le relazioni tra distribuzione delle frane e parametri predisponenti sono riportati in Tab.7.4, in particolare al campo "Information value" è associato il peso W_i stimato per ogni classe in cui sono stati riclassificati i fattori causali. L'intervallo in cui varia il parametro W_i , per l'area di studio di Figline Valdarno va da -3,863 a 0,865.

Litologia				W_i
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	EC	2501	732	0,104877
2	A	26542	802	-2,16583
3	UAM	318	150	0,582126
4	ULA	542	3	-3,86311
5	USL	21793	10948	0,64511
6	UCS	5016	2311	0,55859
Uso del suolo				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	11	15402	1925	-0,74603
2	12	6430	372	-1,51629
3	13	344	99	0,08802
4	14	2263	251	-0,86545
5	21	10798	3539	0,218025
6	22	1256	459	0,326905
7	23	530	204	0,378785

8	24	6727	2670	0,409491
9	31	12253	5279	0,491508
10	32	225	120	0,704933
11	51	484	28	-1,51634
Esposizione				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	flat	995	124	-0,74726
2	N	7249	2483	0,263806
3	NE	11624	2036	-0,40688
4	E	11751	3170	0,024995
5	SE	10165	2746	0,026397
6	S	3910	1069	0,038388
7	SO	2621	770	0,110281
8	O	3553	991	0,058369
9	NO	4847	1533	0,184069
10	N	7249	2483	0,263806
Acclività				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	0-5°	26691	1310	-1,6791
2	5-10°	9289	3623	0,393674
3	10-15°	7391	3972	0,714209
4	15-20°	4661	2013	0,495598
5	20-30°	5964	2585	0,499186
6	30-40°	2348	1244	0,69997
7	40-50°	363	170	0,576598
8	>50°	8	5	0,865198
Elevazione				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	10-150	33105	3438	-0,92959
2	150-200	18661	9954	0,706741
3	200-250	4949	1530	0,161284
Area drenata				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	0-1	9328	1499	-0,49468
2	1-2	6694	1740	-0,01378
3	2-5	13242	4445	0,241928
4	5-10	9961	3298	0,228181
5	10-25	9494	2460	-0,01696
6	25-100	6437	1191	-0,35373
7	>100	1559	289	-0,35183

Tab.7.4 Pesi W_i ottenuti per tutte le classi dei parametri predisponenti tramite il metodo dell'Information Value.

I valori di W_i ricavati dalla procedura di *Informarion Value* evidenziano quali sono le classi maggiormente in frana, che corrispondono a quelle caratterizzati dai valori più elevati di W_i (W_i positivi):

- nel caso della litologia è la classe USL ($W_i = 0,64511$);
- per quanto riguarda l'uso del suolo è la classe 32 ($W_i = 0,704933$);
- per l'esposizione è la classe N ($W_i = 0,263806$);
- nel caso dell'acclività è la classe $> 50^\circ$ ($W_i = 0,865198$);
- per l'elevazione è la classe compresa tra 150-200 m s.l.m. ($W_i = 0,706741$);
- per l'area drenata è la classe compresa tra 5 - 10 ($W_i = 0,241928$).

I valori negativi di W_i ci danno un'indicazione delle classi che non sembrano avere correlazione con le aree instabili. I depositi limoso argillosi così come quelli alluvionali presenti sul fondovalle, caratterizzati generalmente da basse pendenze, hanno i valori negativi più elevati sia per quanto riguarda la litologia che l'acclività, così come le aree urbane, estrattive ed verdi artificiali per l'uso del suolo; anche i versanti esposti a NE e le aree caratterizzate da elevazioni molto basse (10-100m) hanno valori negativi di W_i , così come le aree drenate da un n° di pixels inferiore a 5 e superiori a 25.

Per la procedura di verifica, è stata stimata la densità di frana (DF%, formula 7.1) per ciascuna classe di suscettibilità. Il risultato è riportato nell'istogramma di Fig.7.11, dove si confrontano le diverse mappe.

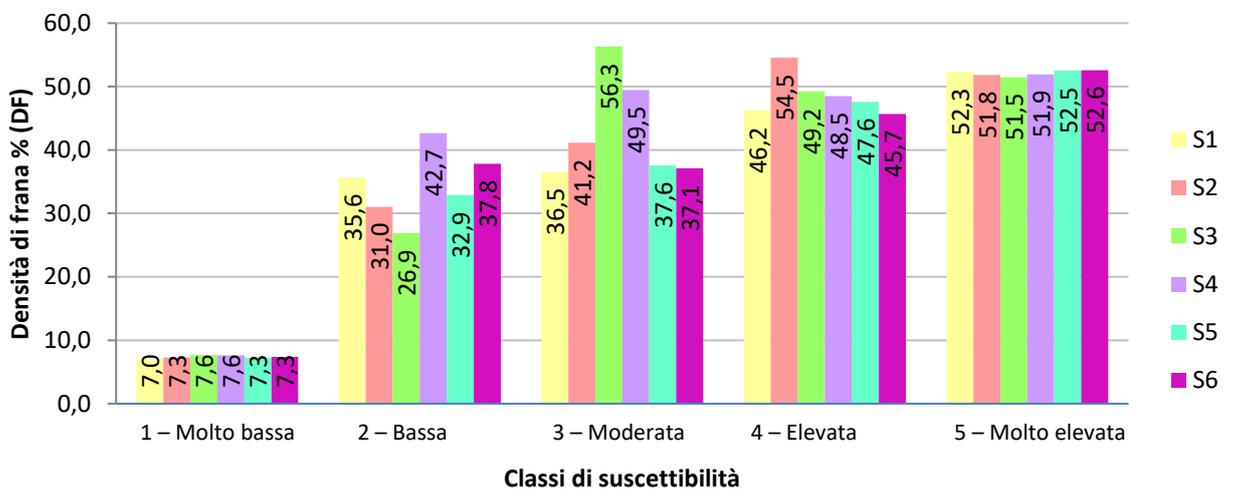


Fig.7.11 Iistogramma di confronto della ripartizione delle classi di suscettibilità in funzione della densità da frana, per le diverse mappe ottenute per l'area studio di Figline Valdarno.

Per ciascuna mappa di suscettibilità (Fig.7.12) è stata stimata la *success rate curve* (Fig.7.13). In Fig.7.12 si sono confrontati i risultati ottenuti per la mappa S4 (derivata dalla combinazione di tutti i parametri predisponenti) e la migliore (in base al valore di densità di frana) tra le restanti mappe ottenute, ovvero la mappa S2 che è priva dei parametri "elevazione" e "area drenata" (Fig.7.12). Come si osserva in Fig.7.13 l'area sottesa dalle curve ottenute per i due scenari è simile ($S4 = 0,84$; $S2 = 0,82$). Perciò si può concludere che i parametri elevazione e area drenata non incidono in modo significativo nell'innesco dei fenomeni gravitativi dell'area studio di Figline.

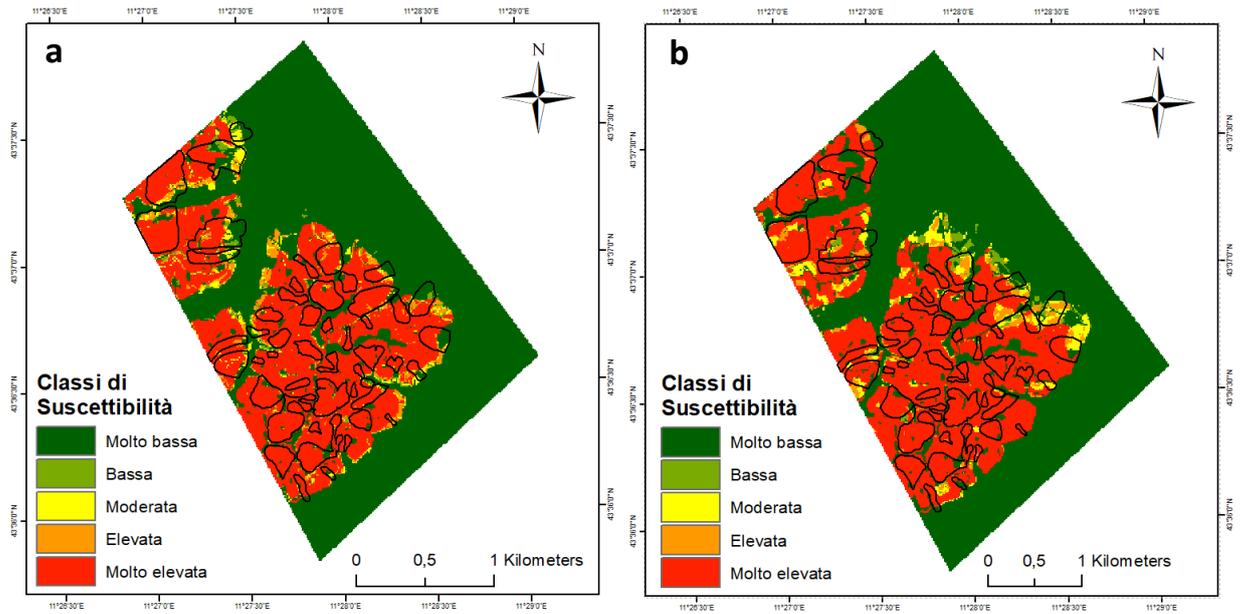


Fig. 7.12 Mappe della suscettibilità: a) S4 (6 parametri predisponenti), b) S2 (4 parametri predisponenti, sono stati esclusi elevazione ed area drenata).

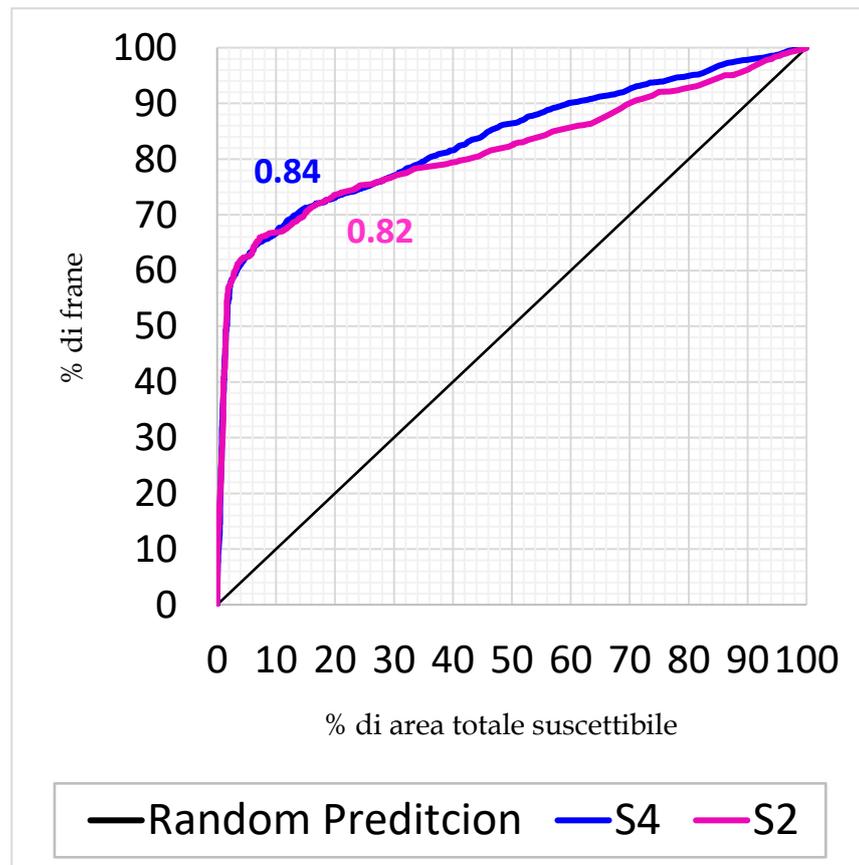


Fig.7.13 Success rate Curve: comparazione tra le mappe S4 e S2.

7.3.4 Figline Valdarno (area comunale)

Le relazioni tra distribuzione delle frane e parametri predisponenti sono riportati in Tab.7.5, in particolare al campo "Information value" è associato il peso W_i stimato per ogni classe in cui sono stati riclassificati i fattori causali. L'intervallo in cui varia il parametro W_i , per l'area sub-comunale di Figline va da -2,677 a 0,995.

Litologia				W_i
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	EC	80965	2339	-1,6088
2	A	136404	1914	-2,33093
3	UAM	288258	36881	-0,12066
4	ULA	15648	2705	0,180255
5	USL	77424	25691	0,83234
6	UCM	55839	10316	0,24672
7	UCS	1533	379	0,53805
8	UCI	991	90	-0,46341
9	UMA	59080	23062	0,99479
Uso del suolo				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	31	338905	47180	-0,03625
2	12	32528	1520	-1,12789
3	21	126006	18335	0,007978
4	13	16363	2387	0,010511
5	32	34220	2243	-0,7895
6	51	8455	84	-2,6762
7	22	75769	17441	0,46663
8	14	6520	1369	0,374702
9	11	39933	3864	-0,4
10	23	4928	207	-1,23447
11	24	31827	8735	0,642519
12	33	627	12	-2,02054
13	41	61	0	-2,68
Esposizione				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	flat	24374	553	-1,85017
2	N	87711	14490	0,135156
3	NE	130260	20406	0,082042
4	E	125197	20938	0,147422
5	SE	108043	18413	0,166273
6	S	76829	10900	-0,01707
7	SO	63345	6032	-0,41577
8	O	44456	4191	-0,42582
9	NO	55946	7431	-0,08298
10	N	87711	14490	0,135156
Acclività				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	0-5°	205998	4862	-1,81067
2	5-10°	116903	21655	0,249637
3	10-15°	121801	30600	0,554356
4	15-20°	103456	22175	0,395564
5	20-30°	129915	19716	0,050295
6	30-40°	36242	4012	-0,26518
7	40-50°	1827	329	0,221372
8	>50°	19	5	0,600744
Elevazione				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	10-150	146033	6983	-1,10461

2	150-200	101054	31414	0,767344
3	200-250	100831	17442	0,18118
4	250-300	90837	10716	-0,20158
5	300-400	98141	18973	0,292357
6	400-500	74041	11374	0,062456
7	500-600	50809	3150	-0,84493
8	600-700	37898	2095	-0,9596
9	700-800	16517	1207	-0,68051
Area drenata				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	0-1	110929	6429	-0,91258
2	1-2	81411	8395	-0,33638
3	2-5	182321	24993	-0,05168
4	5-10	145209	24381	0,151126
5	10-25	114963	22926	0,323157
6	25-100	57365	12521	0,413469
7	>100	23963	3709	0,069747

Tab.7.5 Pesi W_i ottenuti per tutte le classi dei parametri predisponenti tramite il metodo dell'Information Value.

I valori di W_i ricavati dalla procedura di *Informarion Value* permettono di distinguere quali sono le classi più prone al franamento, che corrispondono a quelle caratterizzati dai valori più elevati di W_i (W_i positivi):

- nel caso della litologia è la classe UMA ($W_i = 0,99479$);
- per quanto riguarda l'uso del suolo è la classe 33 ($W_i = -2,02054$);
- per l'esposizione è la classe SE ($W_i = 0,166273$);
- nel caso dell'acclività è la classe $> 50^\circ$ ($W_i = 0,600744$) e compresa tra 10-15 ($W_i = 0,554356$);
- per quanto riguarda l'elevazione è la classe compresa tra 150-200 m s.l.m. ($W_i = 0,767344$);
- per l'area drenata è la classe compresa tra 25-100 ($W_i = 0,413469$).

I valori negativi di W_i ci danno un'indicazione delle classi che non sembrano avere correlazione con le aree instabili. I depositi ciottolosi così come quelli eluvio-colluviali e alluvionali presenti sul fondovalle, caratterizzati generalmente da basse pendenze, hanno i valori negativi più elevati sia per quanto riguarda la litologia che l'acclività, così come le zone industriali, i prati e le zone aperte con vegetazione rada o assente per quanto riguarda l'uso del suolo; anche i versanti esposti a S e O e le aree caratterizzate da elevazioni molto basse (10-100m) o elevate (classi > 500 m) hanno valori negativi di W_i , così come le aree drenate da un n° di pixels inferiore a 5.

Per la procedura di verifica, è stata stimata la densità di frana (DF%, formula 7.1) per ciascuna classe di suscettibilità. Il risultato è riportato nell'istogramma di Fig.7.14, dove si confrontano le diverse mappe.

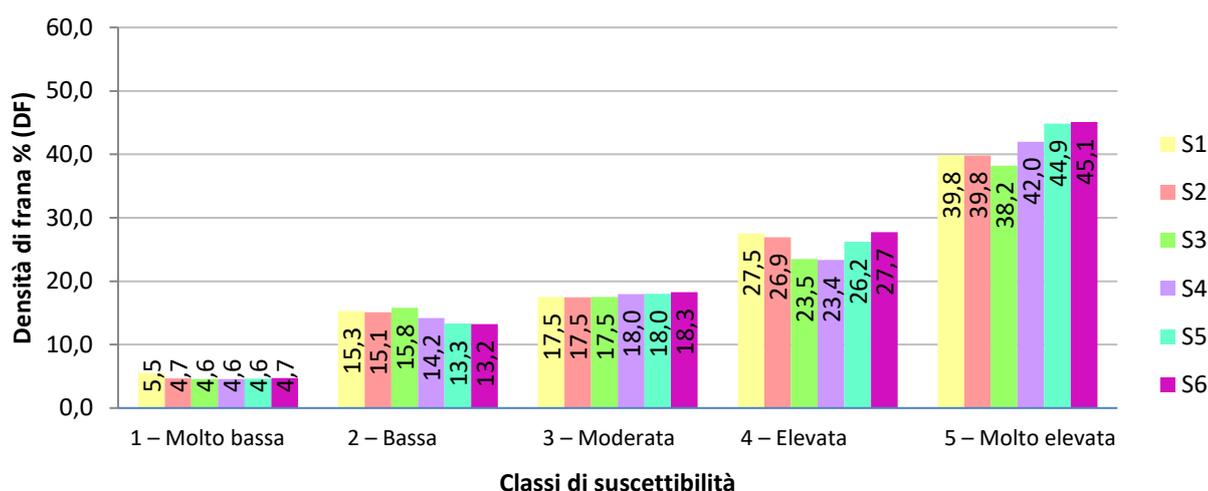


Fig.7.14 Istogramma di confronto della ripartizione delle classi di suscettibilità in funzione della densità da frana, per le diverse mappe ottenute per l'area sub-comunale di Figline Valdarno.

Per ciascuna mappa di suscettibilità (Fig.7.15) è stata stimata la *success rate curve* (Fig.7.16). In Fig.7.15 si sono confrontati i risultati ottenuti per la mappa S4 (derivata dalla combinazione di tutti i parametri predisponenti) e la migliore (in base al valore di densità di frana) tra le restanti mappe ottenute, ovvero la mappa S6 che è priva dei parametri "elevazione" ed "esposizione". Come si osserva in Fig.7.16 l'area sottesa dalle curve ottenute per i due scenari è simile (S4 = 0,81; S6 = 0,80). Perciò si può concludere che i parametri elevazione ed esposizione incidono poco nell'innescare dei fenomeni gravitativi dell'area sub-comunale di Figline.

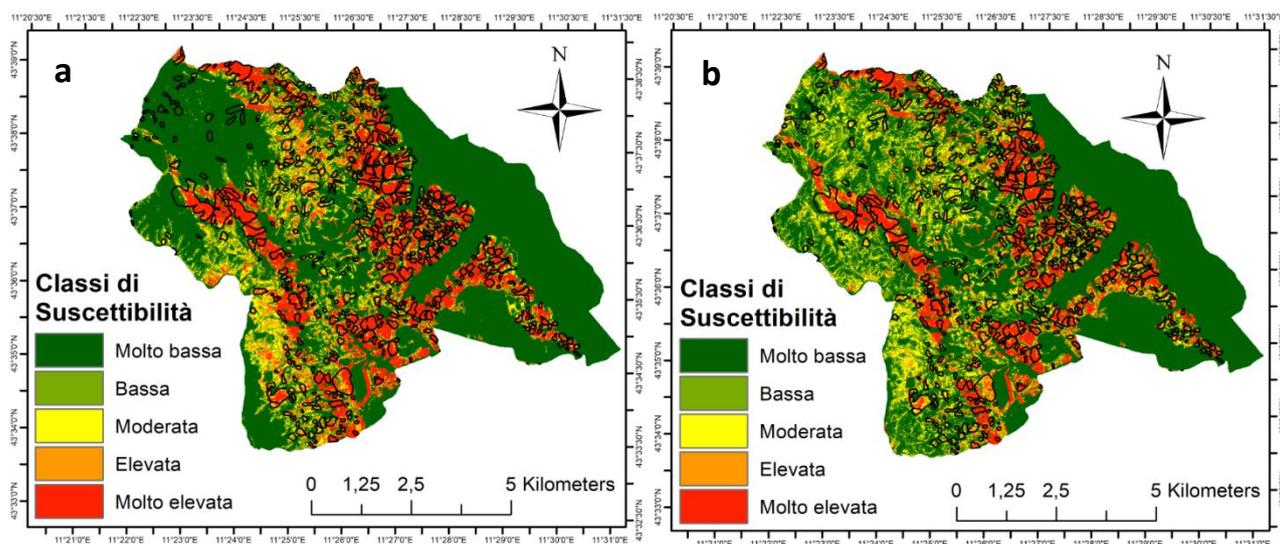


Fig.7.15 Mappe della suscettibilità: a) S4 (6 parametri predisponenti), b) S6 (4 parametri predisponenti, sono stati esclusi elevazione ed esposizione).

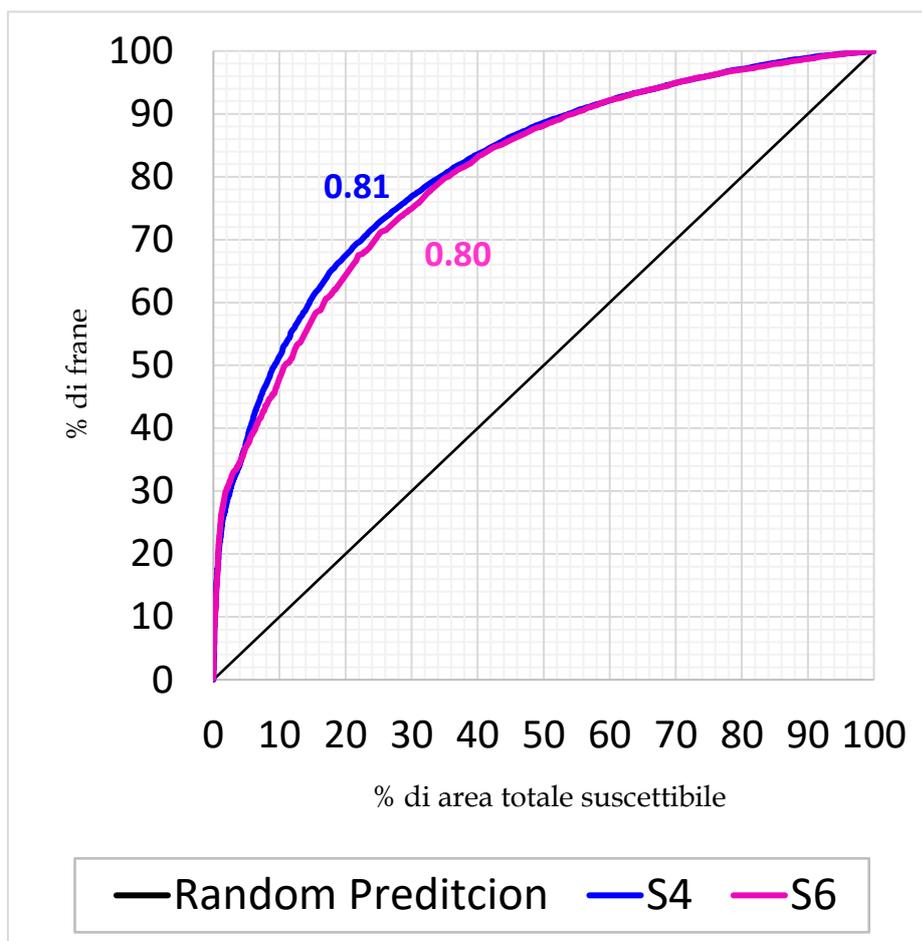


Fig.7.16 Success rate Curve: comparazione tra le mappe S4 e S6.

7.3.5 Corella (area di studio)

Le relazioni tra distribuzione delle frane e parametri predisponenti sono riportati in Tab.7.6, in particolare al campo "Information value" è associato il peso W_i stimato per ogni classe in cui sono stati riclassificati i fattori causali. L'intervallo in cui varia il parametro W_i per l'area di studio di Corella va da -1,242 a 0,671.

Litologia				W_i
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	UAM	43986	20686	-0,08303
2	UMA	18024	11001	0,177671
Uso del suolo				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	11	1889	797	-0,19156
2	12	1491	659	-0,14509
3	14	18	0	-0,2
4	21	14523	10286	0,326439
5	22	3806	1936	-0,00457
6	24	3428	1659	-0,05437

7	31	33086	14218	-0,17321
8	32	3341	1906	0,110126
9	33	423	221	0,02218
10	51	5	5	0,671389
Esposizione				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	flat	337	117	-0,38676
2	N	1530	698	-0,11366
3	NE	2592	720	-0,60979
4	E	7338	2523	-0,39647
5	SE	8829	4052	-0,10768
6	S	13440	7468	0,083539
7	SO	11673	6701	0,116126
8	O	10002	5747	0,11704
9	NO	6254	3661	0,135662
10	N	1530	698	-0,11366
Acclività				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	0-5°	2157	962	-0,13631
2	5-10°	8508	5304	0,198602
3	10-15°	15154	9611	0,215791
4	15-20°	11905	7068	0,149766
5	20-30°	15751	6592	-0,1999
6	30-40°	7287	1861	-0,69383
7	40-50°	1168	267	-0,80465
8	>50°	65	22	-0,4122
Elevazione				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	150-300	1731	763	-0,14805
2	300-400	11444	7041	0,185432
3	400-500	22563	14548	0,232289
4	500-600	16240	7092	-0,15736
5	600-700	8601	2034	-0,77073
6	700-800	1416	209	-1,24211
Area dreanata				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	0-1	6397	1658	-0,67907
2	1-2	6280	2050	-0,44838
3	2-5	16206	6703	-0,21168
4	5-10	13757	7717	0,093025
5	10-25	10607	7243	0,289669
6	25-100	5830	4361	0,380832
7	>100	2918	1955	-0,689

Tab.7.6 Pesi W_i ottenuti per tutte le classi dei parametri predisponenti tramite il metodo dell'Information Value.

I valori di W_i ricavati dalla procedura di *Informarion Value* permettono di distinguere quali sono le classi più prone al franamento, che corrispondono a quelle caratterizzati dai valori più elevati di W_i (W_i positivi):

- nel caso della litologia è la classe UMA ($W_i = 0,177671$);
- per quanto riguarda l'uso del suolo è la classe 21 ($W_i = 0,326439$);
- per l'esposizione è la classe NO ($W_i = 0,135662$) seguita dalla classe SO ($W_i = 0,116126$);
- nel caso dell'acclività è la classe compresa tra 10-15° ($W_i = 0,215791$);
- per quanto riguarda l'elevazione è la classe compresa tra 400-500 m s.l.m. ($W_i = 0,232289$);

f) per l'area drenata è la classe compresa tra 25-100 ($W_i = 0,380832$).

I valori negativi di W_i ci danno un'indicazione delle classi che non sembrano avere correlazione con le aree instabili. Tutte le pendenze superiori 20° hanno valori negativi così come le zone urbane, industriali e aree boscate per quanto riguarda l'uso del suolo; anche i versanti esposti a NE, E e SE e le aree caratterizzate da elevazioni molto basse (10-100m) o elevate (classi > 500m) hanno valori negativi di W_i , così come le aree drenate da un n° di pixels inferiore a 5 e superiori a 100. Per quanto riguarda la litologia, l'unità UAM presenta un valore di poco negativo.

Per la procedura di verifica, è stata stimata la densità di frana (DF%, formula 7.1) per ciascuna classe di suscettibilità. Il risultato è riportato nell'istogramma di Fig.7.17, dove si confrontano le diverse mappe.

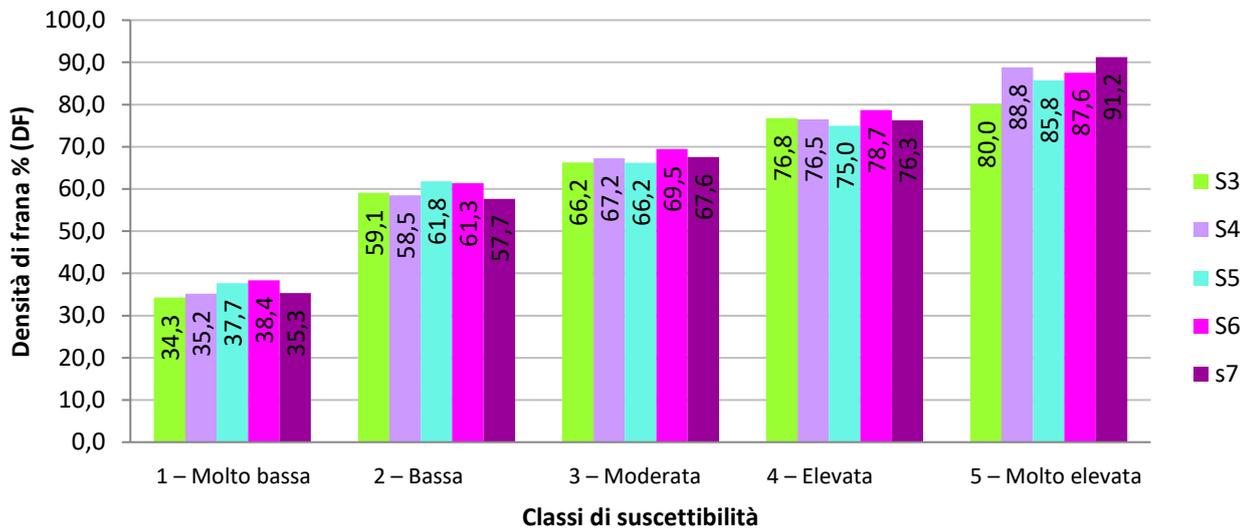


Fig.7.17 Istogramma di confronto della ripartizione delle classi di suscettibilità in funzione della densità di frana, per le diverse mappe ottenute per l'area studio di Corella.

Per ciascuna mappa di suscettibilità (Fig.7.18) è stata stimata la *success rate curve* (Fig.7.19). In Fig.7.18 si sono confrontati i risultati ottenuti per la mappa S4 (derivata dalla combinazione di tutti i parametri predisponenti) e la migliore (in base al valore di densità di frana) tra le restanti mappe ottenute, ovvero la mappa S6 che è priva dei parametri "esposizione" e "elevazione". Come si osserva in Fig.7.19 l'area sottesa dalle curve ottenute per i due scenari è uguale ($S4 = 0,74$; $S6 = 0,74$). Perciò si può concludere che i parametri esposizione ed elevazione incidono, ma in modo ridotto, nell'innesco dei fenomeni gravitativi dell'area studio di Corella.

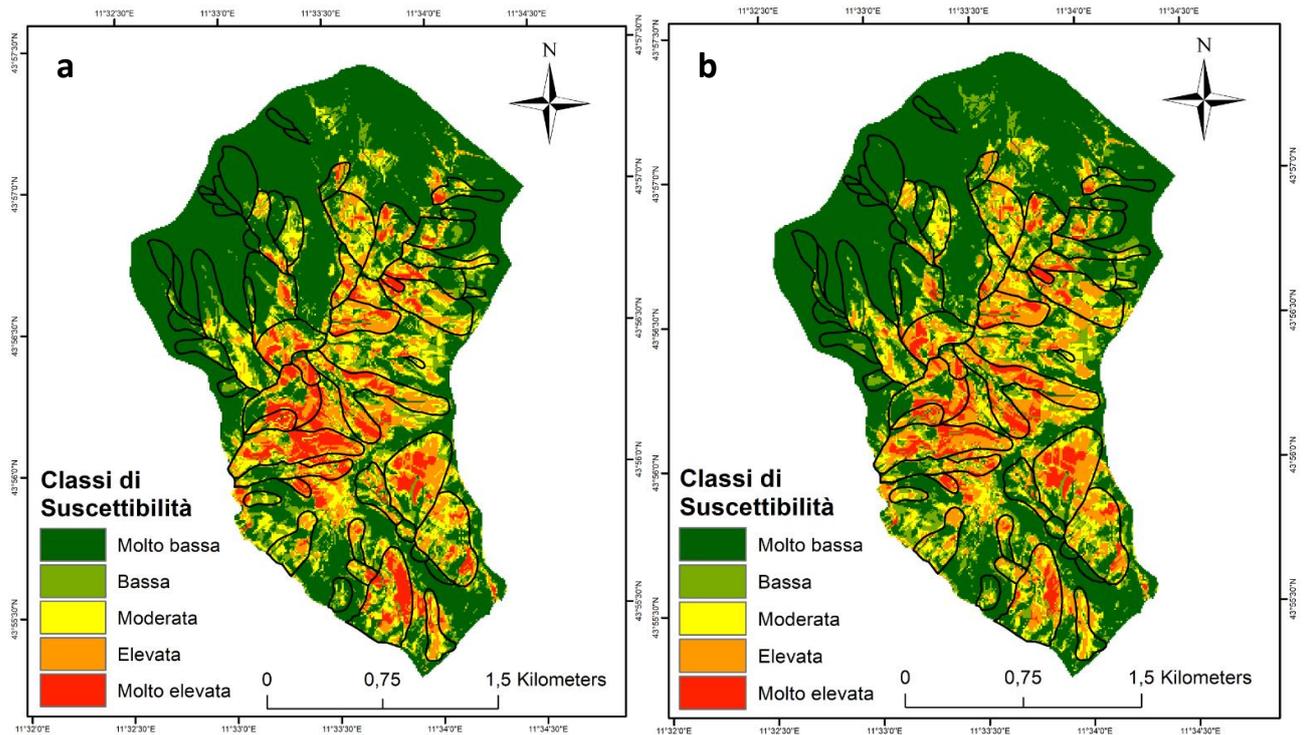


Fig.7.18 Mappe della suscettibilità: a) S4 (6 parametri predisponenti), b) S6 (4 parametri predisponenti, sono stati esclusi elevazione ed esposizione).

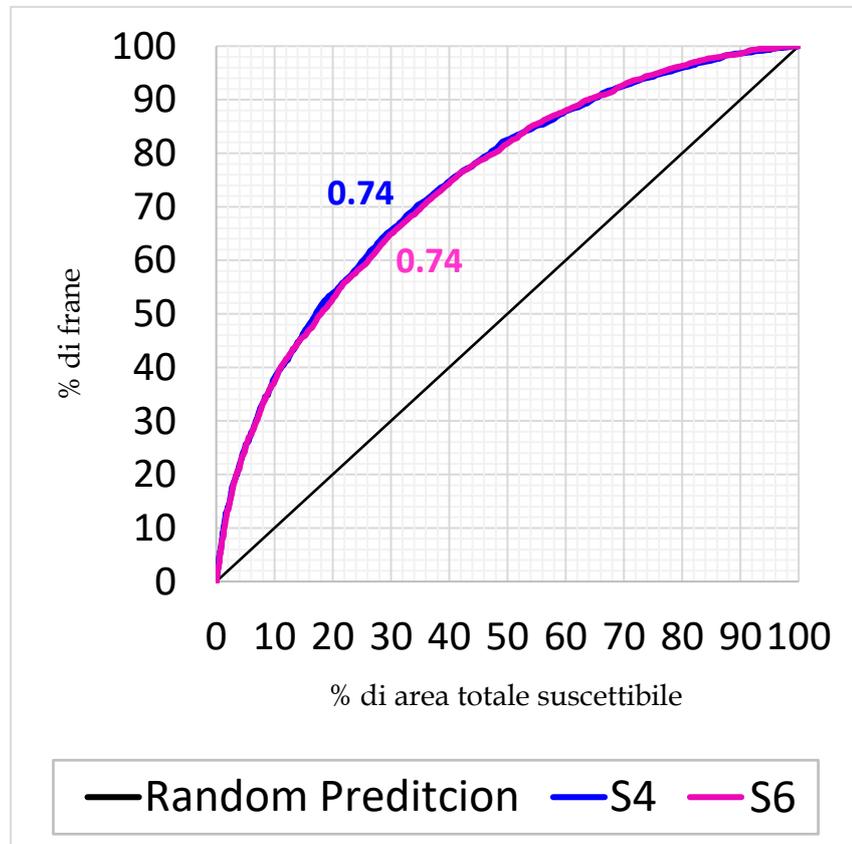


Fig.7.19 Success rate Curve: comparazione tra le mappe S4 e S2.

7.3.6 Corella (area comunale)

Le relazioni tra distribuzione delle frane e parametri predisponenti sono riportati in Tab.7.7, in particolare al campo "Information value" è associato il peso W_i stimato per ogni classe in cui sono stati riclassificati i fattori causali. L'intervallo in cui varia il parametro W_i , per l'area sub-comunale Corella va da -3,68273 a 0,640.

Litologia				W_i
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	UAM	507163	79272	0,025875
2	UMA	47210	13517	0,631165
3	EC	33596	779	-1,88233
4	A	28153	285	-2,7111
Uso del suolo				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	11	17445	1596	-0,50973
2	12	12290	1360	-0,31948
3	13	220	0	-0,999
4	14	1166	66	-0,98986
5	21	66194	17113	0,529071
6	22	43238	9518	0,368287
7	23	1098	157	-0,06318
8	24	10333	3576	0,820725
9	31	426768	53577	-0,1933
10	32	32701	6222	0,222508
11	33	2495	418	0,09526
12	51	2240	250	-0,31095
Esposizione				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	flat	2164	191	-0,54504
2	N	66829	9103	-0,11114
3	NE	48148	5350	-0,31479
4	E	54819	5234	-0,46646
5	SE	61951	7136	-0,27879
6	S	88979	14229	0,049278
7	SO	105808	18586	0,143179
8	O	106094	20397	0,233459
9	NO	81369	13569	0,09119
10	N	66829	9103	-0,11114
Acclività				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	0-5°	31005	1835	-0,94471
2	5-10°	50016	9836	0,256103
3	10-15°	92570	23514	0,512028
4	15-20°	113433	22127	0,247983
5	20-30°	208065	26926	-0,16236
6	30-40°	104723	8413	-0,63914
7	40-50°	15870	1080	-0,80507
8	>50°	479	64	-0,13042
Elevazione				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	10-150	9924	38	-3,68273
2	150-300	139355	13830	-0,42779
3	300-400	105581	19762	0,206679
4	400-500	111180	28701	0,528178
5	500-600	81379	15096	0,197709
6	600-700	51983	6083	-0,26302
7	700-800	33359	5139	0,011928

8	800-900	25880	2253	-0,55881
9	900-1000	29957	1799	-0,93014
10	1000-1000	20499	1081	-1,06009
11	1100-1200	6634	13	-4,35262
12	1200-1300	430	0	-4,36
Area drenata				
ID	CLASSE	n°PIX TOT	n°PIX FRANA	INFORMATION VALUE
1	0-1	57255	3824	-0,82382
2	1-2	57479	4622	-0,6382
3	2-5	152572	15991	-0,37321
4	5-10	140900	20455	-0,04743
5	10-25	119317	25390	0,334968
6	25-100	59938	17298	0,639677
7	>100	28700	6215	-0,83

Tab.7.7 Pesi W_i ottenuti per tutte le classi dei parametri predisponenti tramite il metodo dell'Information Value.

I valori di W_i ricavati dalla procedura di *Informarion Value* permettono di distinguere quali sono le classi più prone al franamento, che corrispondono a quelle caratterizzati dai valori più elevati di W_i (W_i positivi):

- nel caso della litologia è la classe UMA ($W_i = 0,631165$);
- per quanto riguarda l'uso del suolo è la classe 24 ($W_i = 0,820725$);
- per l'esposizione è la classe O ($W_i = 0,233459$);
- nel caso dell'acclività è la classe compresa tra 10-15° ($W_i = 0,512028$);
- per quanto riguarda l'elevazione è la classe compresa tra 400-500 m s.l.m. ($W_i = 0,528178$);
- per l'area drenata è la classe compresa tra 25-100 ($W_i = 0,639677$).

I valori negativi di W_i ci danno un'indicazione delle classi che non sembrano avere correlazione con le aree instabili. I depositi eluvio-colluviali e alluvionali presenti sul fondovalle, caratterizzati generalmente da basse pendenze, hanno i valori negativi più elevati sia per quanto riguarda la litologia che l'acclività; per quest'ultimo parametro anche le pendenze superiori a 20° presentano valori negativi di W_i , così come le zone urbane, industriali e le zone boscate per quanto riguarda l'uso del suolo. Anche i versanti esposti da N a E e le aree caratterizzate da elevazioni molto basse (10-100m) o elevate (classi > 800m) hanno valori negativi di W_i , così come le aree drenate da un n° di pixels inferiore a 10 e superiori a 100.

Per la procedura di verifica, è stata stimata la densità di frana (DF, vedi formula 7.1) per ciascuna classe di suscettibilità. Il risultato è riportato nell'istogramma di Fig.7.20, dove si confrontano le diverse mappe.

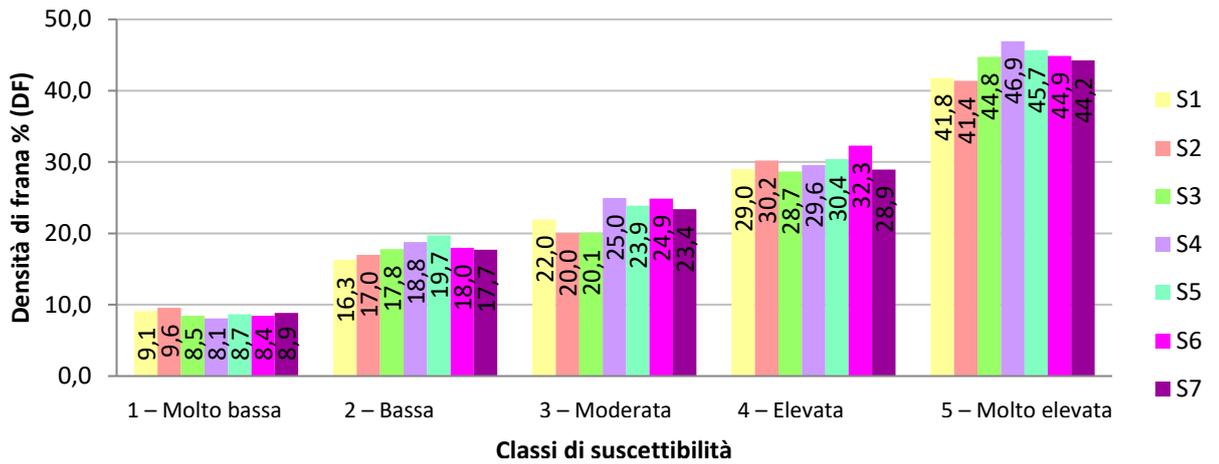


Fig.7.20 Istogramma di confronto della ripartizione delle classi di suscettibilità in funzione della densità di frana, per le diverse mappe ottenute per l'area sub-comunale di Corella.

Per ciascuna mappa di suscettibilità (Fig.7.21) è stata stimata la *success rate curve* (Fig.7.22). In Fig.7.21 si sono confrontati i risultati ottenuti per la mappa S4 (derivata dalla combinazione di tutti i parametri predisponenti) e la migliore (in base al valore di densità di frana) tra le restanti mappe ottenute, ovvero la mappa S6 che è priva dei parametri "esposizione" e "elevazione". Come si osserva in Fig.7.22 l'area sottesa dalle curve ottenute per i due scenari è simile ($S4 = 0,76$; $S6 = 0,73$). Perciò si può concludere che i parametri esposizione ed elevazione incidono, ma in modo ridotto, nell'innesco dei fenomeni gravitativi dell'area sub-comunale di Corella.

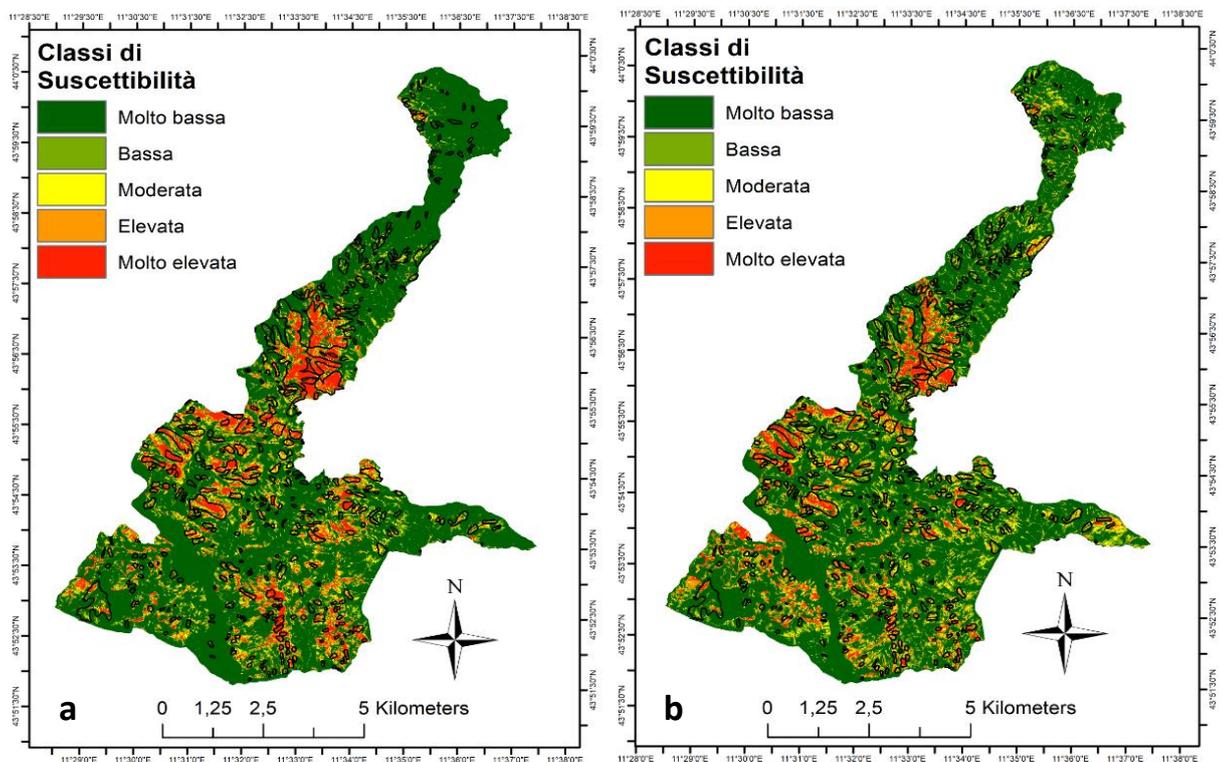


Fig.7.21 Mappe della suscettibilità: a) S4 (6 parametri predisponenti), b) S6 (4 parametri predisponenti, sono stati esclusi elevazione ed esposizione).

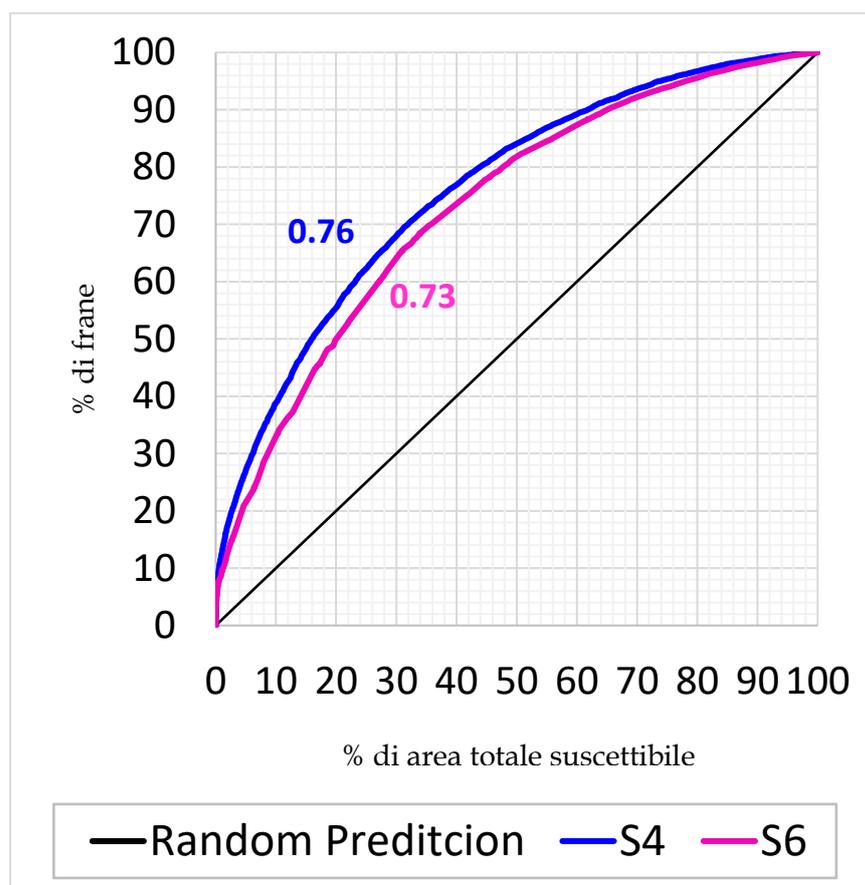


Fig.7.22 Success rate Curve: comparazione tra le mappe S4 e S6.

7.4 Python Script

Al fine di render più agevoli le procedure di riclassificazione e sovrapposizione cartografica, e ridurre il tempo richiesto per la gestione manuale della grande quantità di dati necessari alla procedura dell'Information Value è stato creato appositamente uno script, basato sul linguaggio Python, che può eseguire in modo semiautomatico l'intera procedura. Python viene descritto come "un linguaggio di programmazione dinamico orientato agli oggetti utilizzabile per molti tipi di sviluppo software". Esso è distribuito con licenza Open-Source e pertanto, dato che il suo utilizzo è gratuito e libero, chiunque può sviluppare codici con diverse funzioni computazionali.

Questo linguaggio fu creato da Guido van Rossum, nel dicembre 1989, come un progetto di programmazione fatto per "hobby"; il nome deriva da un famoso gruppo di comici britannici per cui Van Rossum nutriva grande passione e già a partire dal 1991 fu resa disponibile la prima versione di questo linguaggio. Il concetto base di Python è quello di voler

essere un linguaggio dinamico, semplice e flessibile, in modo tale da potersi applicarsi a svariati campi, dallo sviluppo di applicazioni, allo *scripting* e computazione numerica.

Il motivo per cui si è deciso di realizzare questo script risiede nella ripetitività di molte funzioni che vengono utilizzate tramite il software GIS (ArcaGis 10.5) per realizzare la procedura di *Information value*. Le diverse funzioni, infatti, devono essere ripetute per ognuno dei *raster* relativi ai fattori predisponenti, in ciascuna delle aree di studio. Anche se gli strumenti GIS consentono all'utente di creare specifiche funzioni (*toolbox*), mediante diagrammi di flusso realizzati nell'editor grafico denominato *ModelBuilder* (Fig.7.23), in molti casi tali diagrammi non sono sufficienti a realizzare tutte le attività richieste.

Perciò l'ambiente GIS prevede la possibilità di convertire automaticamente il diagramma di flusso nel linguaggio Python e integrare il codice del programma con altre costruzioni e comandi del programma stesso. Tuttavia viene lasciata anche la possibilità di scrivere l'intero codice in un linguaggio Python, senza fare riferimento alla funzione del *ModelBuilder*. In quest'ultimo caso, è importante considerare che lo script Python differirà leggermente da quello esportato direttamente dal *ModelBuilder*.

In altre parole, esistono sostanzialmente due modi per creare uno script in linguaggio Python che può essere eseguito in ambiente GIS: a) esportando in Python il modello esistente nel *ModelBuilder*, b) creando direttamente uno script in un ambiente di sviluppo integrato. Quest'ultimo è sicuramente più complesso da utilizzare per i principianti, tuttavia, una volta che si comprende come impostare i comandi e gestire le variabili e i moduli, Python permette di gestire e manipolare a proprio piacimento lo script.

Infatti, come evidenziato da Dobesova (2011), gli script creati in Python hanno più vantaggi dei modelli costruiti nel *ModelBuilder*: a) innanzitutto si possono utilizzare strutture iterative come i cicli *for* e *while*, strutture di controllo condizionale come *if* ed *else*, b) è possibile evitare errori durante l'esecuzione di un programma e qualsiasi errore imprevisto può essere gestito e risolto (*try* ed *except*), c) possono essere aggiunti alla finestra dei risultati dei messaggi di notifica che avvisano e aggiornano gli utenti sul flusso dell'elaborazione dei dati. Questi messaggi di notifica sono punti importanti dello script, perché danno all'utente la possibilità di controllare che ogni passaggio sia eseguito e completato correttamente, prima di passare all'esecuzione del codice successivo.

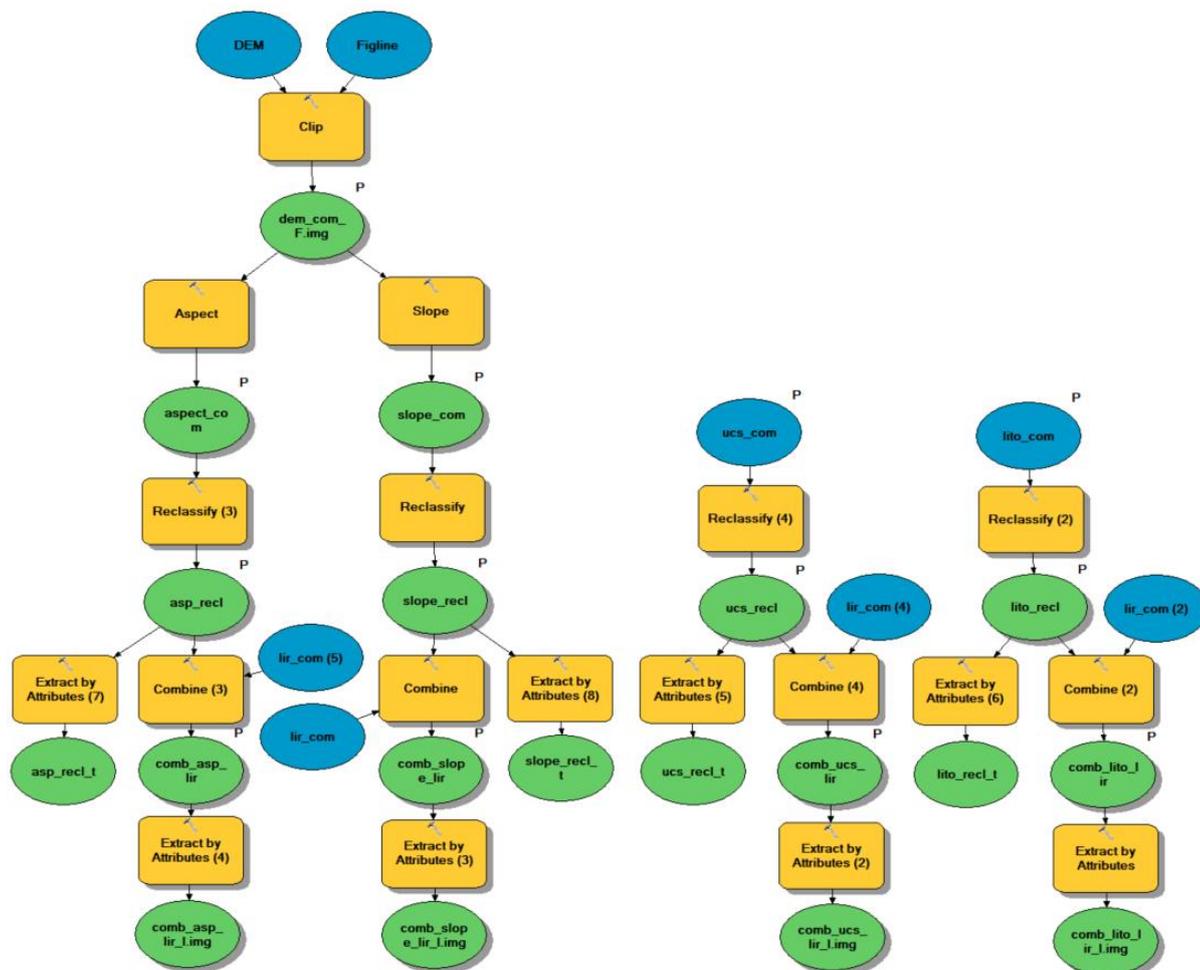


Fig.7.23 Esempio di editor grafico ModelBuilder: vengono rappresentati i primi 3 passaggi del modello (vedi Fig.7.1) per i parametri esposizione (aspect), acclività (slope), uso del suolo (ucs_com) e litologia (lito_com).

Lo script creato dunque consente di eseguire tutti i passaggi della procedura di *Information Value*, riportati in Fig.7.1. Prima di eseguire lo script è necessario impostare correttamente il valore degli intervalli assegnati alle classi dei parametri predisponenti, che rappresentano i parametri di *input* del modello. Ogni area di studio avrà una propria riclassificazione, che è necessario impostare correttamente, sin dall'inizio, per poter eseguire il modello.

Numerosi vantaggi sono stati ottenuti dalla automatizzazione della procedura e i più importanti sono sicuramente da riferire alla riduzione del tempo necessario per la realizzazione delle mappe e la riduzione di eventuali errori in cui si potrebbe incorrere se si realizzasse manualmente l'intera procedura. Infatti, all'interno dello script sono stati inseriti

una serie di messaggi di *output* che consentono di tenere sotto controllo il modello durante la sua esecuzione e di verificare in tempo reale eventuali errori e la loro esatta ubicazione.

È importante sottolineare come senza le conoscenze dei siti ricavate dall'approccio geomorfologico non sarebbe stato possibile realizzare con precisione la suddivisione litologica operata all'interno delle aree studiate e, dato che il parametro litologia risulta sempre uno dei fattori più importanti nella determinazione della distribuzione spaziale delle frane e nel loro relativo innesco, senza tali dati l'analisi sarebbe risultata molto meno precisa e dettagliata. I nuovi dati geologici ricavati con il rilevamento di campagna hanno, infatti, implementato l'affidabilità del *geodatabase* utilizzato per le analisi realizzate nel presente elaborato di tesi, consentendo anche di migliorare l'affidabilità dei dati di *input* riportati nello script.

Nell'ambito di procedure automatiche, che consentono l'estrazione del valore relativo al peso di ciascun parametro predisponente, esistono altri script di questo tipo. Un esempio è ben rappresentato dallo script realizzato dalla *Faculty of Geo-information Science and Earth Observation (ITC - University of Twente)* al fine di valutare la suscettibilità da frana su scala nazionale. Van Westen (2016) riporta l'esempio di Grenada, un piccolo Stato insulare nel mar dei Caraibi sud-orientale, nel quale è stato applicato tale script. In modo simile rispetto allo script ideato per il presente elaborato di tesi, quello creato dall'ITC consente di calcolare il peso di ciascun fattore predisponente, e contiene una serie di comandi che consentono l'esecuzione automatica di una sequenza di passaggi di calcolo per diverse mappe. Tale script è contenuto all'interno del software ILWIS (*Integrated Land and Water Information System*), un software di tipo GIS e Remote Sensing, sviluppato da ITC, che comprende un pacchetto completo di elaborazione delle immagini, analisi spaziale e mappatura digitale e fornisce una guida completa on-line con *tutorial* e casi di studio diversi. La sua versione aggiornata *open source* (ILWIS Open), è disponibile liberamente grazie all'iniziativa "52° Nord", (licenza GPL - <https://52north.org/software/software-projects/ilwis/>).

A differenza però dello script utilizzato dall'ITC, quello ideato per questo lavoro di tesi si adatta perfettamente alle aree di studio e può essere applicato anche ad aree diverse da quelle investigate, purché venga realizzata una specifica suddivisione del parametro litologia, ovvero dando priorità alle caratteristiche litologiche e tessiturali dei depositi piuttosto che alla formazione o sintema di appartenenza (così come effettuato per il presente lavoro, vedi "Unità_lito" - Tab. 2.3).

7.5 Considerazioni finali

Il modello statistico di tipo bivariato è stato applicato al fine di valutare la propensione al dissesto del territorio in funzione di una serie di fattori predisponenti, che sono i medesimi considerati per l'analisi statistica descrittiva. Inoltre il modello utilizzato è stato esportato e replicato in tre diverse aree di studio, e a diverse scale di analisi, da aree con estensione di pochi Km² (corrispondenti alle aree analizzate durante il rilevamento di campagna) ad aree di grande estensione, nell'ordine delle decine o centinaia di Km².

Ciò sottolinea come questa metodologia sia attendibile e semplice da replicare anche per eventuali nuove aree di studio, senza risentire troppo della scala alla quale viene condotta l'analisi.

Proprio al fine di stimare la bontà con cui il modello si adatta al caso reale, per ciascuna mappa di suscettibilità è stata stimata la *success rate curve*, o curva dei tassi di successo (Chung & Fabbri 1999, 2003; Van Westen et al. 2003, Brenning 2005). Essa si basa sul confronto e sovrapposizione tra l'immagine di previsione (ovvero la mappa della suscettibilità) e l'inventario delle frane utilizzato nella modellazione. Nel grafico relativo alle curve di successo, in ordinata sono riportati i valori di % di area in frana e in ascissa i valori di % di area totale predetta come suscettibile. La pendenza del tratto iniziale della curva è tanto maggiore quanto maggiore è la percentuale delle aree in frana che ricade all'interno delle aree a più elevata suscettibilità.

Confrontando i risultati ottenuti per le diverse aree di studio (Tab.7.8) si osserva che, in generale, maggiore è il numero di parametri predisponenti considerati, migliore è la capacità di predizione spaziale del modello. Infatti, i valori stimati per le *Success rate Curves* (SrC) delle mappe S4 (suscettibilità stimata con sei parametri predisponenti), vanno da un minimo di 0.73, ottenuto per l'area sub-comunale di Montespertoli, ad un massimo di 0.84, ottenuto per l'area studio di Figline Valdarno.

AREA DI STUDIO	MAPPE SUSCETTIBILITA'	SrC	MAPPE SUSCETTIBILITA'	SrC
M1	S4	0,75	S5	0,75
M2	S4	0,73	S6	0,72
F1	S4	0,84	S2	0,82
F2	S4	0,81	S6	0,80
C1	S4	0,74	S6	0,74
C2	S4	0,76	S6	0,73

Tab.7.8 Tabella riassuntiva dei risultati ottenuti con le *Success rate Curve* (SrC) per le mappe di Suscettibilità, con il metodo statistico bivariato (*Information Value Method*). M1- Montespertoli area di studio, M2 - Montespertoli area comunale, F1 -Figline Valdarno area di studio, F2 - Figline Valdarno area comunale, C1 - Corella area di studio, C2 - Corella area comunale.

L'utilizzo di descrittori di suscettibilità espressi in termini quantitativi, mediante mappe e valori numerici, presenta il vantaggio di agevolare il confronto della suscettibilità individuata con riferimento ad aree differenti. Sono proprio le classi di suscettibilità più elevata quelle che presentano il maggior numero di pixel in frana (Fig.7.24), perciò i risultati ottenuti dall'elaborazione di tutte le informazioni mostrano un buon grado di correlazione tra la realtà geomorfologica e le caratteristiche legate all'instabilità dei versanti.

Le classi dei parametri predisponenti che hanno valori di W_i più elevati e che risultano, quindi, le classi dove l'occorrenza delle frane ha la più alta frequenza sono riassunte in Tab. 7.9. Inoltre, in Tab.7.10 si riportano i risultati ottenuti dalla procedura di statistica descrittiva (Cap. 5 - Indice di Franosità, IF%). Dal confronto delle due tabelle (Tab. 7.9 e Tab. 7.10) emerge un sostanziale accordo tra le classi caratterizzate da W_i maggiori e quelle caratterizzate da IF% più elevato; gli unici valori le cui classi non concordano sono evidenziati in giallo in Tab. 7.10. Questa minima differenza può essere superata e spiegata dal fatto che i valori più ricorrenti per le diverse classi, talvolta, presentano differenze minime tra di loro

La definizione manuale delle classi di suscettibilità, che sono state delimitate in modo tale da essere identiche per tutte le aree di studio, rappresenta l'elemento di innovazione di tale procedura. A dispetto di autori che in passato hanno suddiviso automaticamente tali classi (Yin & Yan 1988, Zezere 2002, Tating et al. 2015), nel presente elaborato di tesi, si sono definiti specifici intervalli che discriminano tra le diverse classi di suscettibilità, in modo tale da ottenere una procedura valida ed esportabile ad aree studio differenti in termini di contesti geologici ed estensione di area studio.

In particolare, le classi di suscettibilità 1 e 2 (suscettibilità molto bassa e bassa), sono quelle contraddistinte da valori negativi, o prossimi allo zero, di indice W_i , ($1=[<0]$ e $2=[0,0.3]$) e corrispondono ad aree prive di frane o caratterizzate da sporadici fenomeni gravitativi. La classe 3 (suscettibilità moderata), caratterizzata da valori moderati di indice W_i ($3=[0.3, 0.6]$) rappresenta zone per le quali c'è la probabilità che possano accadere fenomeni gravitativi, ma la loro frequenza e densità restano comunque abbastanza ridotte. Infine, le classi 4 e 5 (suscettibilità elevata e molto elevata) sono caratterizzate da valori dell'indice W_i più elevati ($4=[0.6, 1.0]$ e $5=[>1.0]$) e dunque sono le classi dove l'occorrenza delle frane ha la più alta frequenza.

Infine, per quanto riguarda l'efficacia del modello bivariato utilizzato nel presente elaborato, la possibilità di fare riferimento allo script appositamente creato in linguaggio Python ne implementa notevolmente la gestione e l'applicazione, poiché ne riduce non solo il

tempo computazionale necessario per svolgere l'intera procedura, ma ne limita anche gli errori umani a cui si può andare incontro durante l'esecuzione di procedure lunghe, complesse e ripetitive.

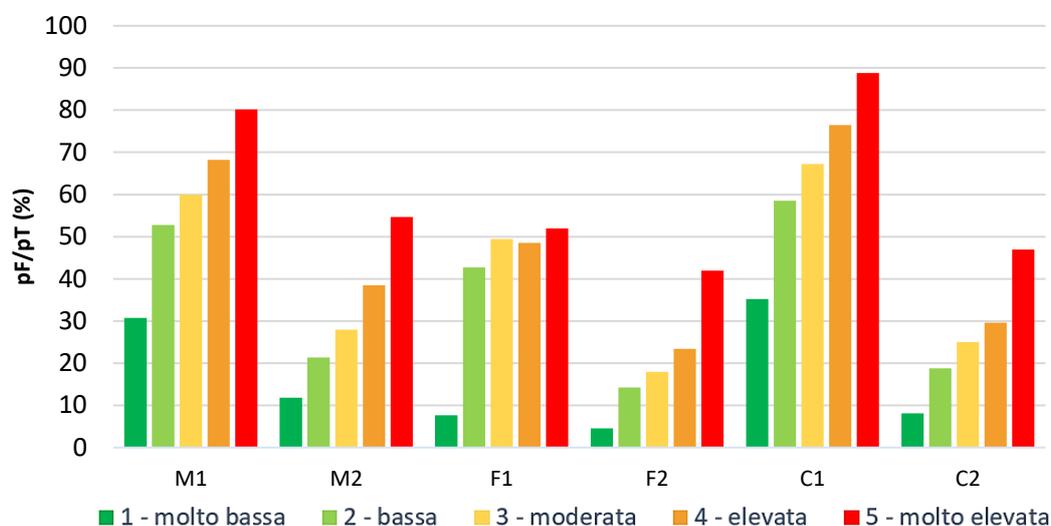


Fig.24 Percentuale di area in frana per ciascuna classe di suscettibilità (mappe suscettibilità S4): M1-Montespertoli area di studio, M2 – Montespertoli area comunale, F1 -Figline Valdarno area di studio, F2 – Figline Valdarno area comunale, C1 – Corella area di studio, C2 – Corella area comunale. pF – pixel in frana per classe, pT – pixel totali per classe

	M1	M2	F1	F2	C1	C2
Litologia	USC	USL	USL	UMA	UMA	UMA
Uso del suolo	32	23	32	33	21	24
Esposizione	NO	N	N	SE	NO-SO	O
Acclività	30-40°	10-15°	>50°	10-15°	>50°	10-15°
Elevazione	150-200	250-300	150-200	150-200	400-500	400-500
Area drenata	25-100	25-100	5-10	25-100	25-100	25-100

Tab.7.9 Tabella riassuntiva dei risultati ottenuti per W_i tramite la procedura di Informarion Value. Vengono riportate solo le classi caratterizzate da valori W_i maggiori.

	M1	M2	F1	F2	C1	C2
Litologia	USC	USL	USL	UCM/USL	UMA	UMA
Uso del suolo	32	23	32	24	21	24
Esposizione	NO	N	N	SE	NO-SO	O
Acclività	30-40°	10-15°	10-15°	10-15°	10-15°	10-15°
Elevazione	150-200	250-300	150-200	150-200	300-400	400-500
Area drenata	25-100	25-100	5-10	25-100	25-100	25-100

Tab.7.10 Risultati ottenuti per IF% più elevati tramite la procedura di analisi di statistica descrittiva (Cap.5). Se confrontati con quelli ottenuti per mezzo della procedura di Informarion Value (W_i -Tab.7.9), tali risultati sono simili e presentano differenze minime tra di loro (evidenziate in giallo).

Capitolo 8

8 Modelli prevalentemente deterministici (*modulo r.slope.stability*)

Recentemente sono stati creati metodi di tipo prevalentemente deterministico, che possono essere applicati su ampia scala, facendo ricorso all'uso combinato di specifici script e software GIS open source. Un esempio è il modulo *r.slope.stability* (Mergili et al., 2014b), descritto nel presente lavoro di tesi, che è stato testato nell'area studio di Montespertoli. Si tratta di un metodo creato appositamente per studi di tipo deterministico-probabilistico su aree anche di grande estensione (nell'ordine del centinaio di Km²) che necessita di conoscere l'intervallo di variazione dei parametri geotecnici e non il loro valore esatto, per poter calcolare il Fattore di Sicurezza (FoS) e stimare così la suscettibilità da frana nell'area di interesse.

In questo capitolo si valutano, quindi, i risultati ottenuti per l'applicazione di tale metodologia all'area studio di Montespertoli, un'area caratterizzate da movimenti gravitativi con superfici di scivolamento più profonde rispetto a quelle dell'area studio in cui è stato testato il modello (Collazzone, Umbria; Mergili et al., 2014). Si evidenzia come questo modulo, se sufficientemente riadattato per potersi adeguare ad aree studio diverse rispetto a quella per la quale è stato creato, possa costituire un valido strumento di analisi per realizzare mappe di suscettibilità da frana mediante procedure economicamente vantaggiose che fanno ricorso a software *open source*, e dunque fruibili gratuitamente da chiunque sia interessato.

8.1 Modulo *r.slope.stability*

Il codice *open source r.slope.stability* è un modulo *raster* del pacchetto software open source GRASS GIS 6.4 (Neteler and Mitasova, 2007; GRASS Development Team, 2014). Il

modulo è disponibile e scaricabile gratuitamente online sul sito internet dedicato (<http://www.slopestability.org/>).

Scritto principalmente secondo il linguaggio di programmazione C e, in parte, in *Python*, questo modello valuta la suscettibilità da frana tramite un approccio prevalentemente deterministico e fornisce una stima del Fattore di Sicurezza (FoS) e della Probabilità di rottura (Pf). Il modulo è stato testato per la prima volta nell'area di Collazzone, Umbria (Italia centrale), in un'area di 89.5km² caratterizzata dall'affioramento di sedimenti continentali Plio-Pleistocenici, con caratteristiche abbastanza simili dal punto di vista litologico con i terreni di Montespertoli. Quindi, in virtù di somiglianze sia litologiche che morfologiche, è stato ritenuto opportuno testare l'applicabilità di questo modello all'interno dell'area studio di Montespertoli, prendendo in considerazione movimenti gravitativi con superfici di scivolamento relativamente profonde (5-30m).

Il modello rappresenta un passo in avanti rispetto alla classica applicazione degli approcci deterministici. Tali modelli, come visto in precedenza, possono essere applicati solamente ad aree di piccola estensione, generalmente a scala di versante, e necessitano della conoscenza dettagliata di un gran numero di parametri geotecnici. Inoltre, l'applicazione è limitata alla specifica area per cui il modello viene creato, e se si vuole applicare lo stesso modello ad un'area diversa si devono reimpostare le condizioni al contorno e i nuovi parametri. Invece, *r.slope.stability* è un modello fisicamente basato, che può essere applicato ad aree di ampia estensione.

Esso valuta la condizione di stabilità dei versanti facendo riferimento ad una grande quantità di superfici di scivolamento, selezionate in modo casuale, la cui geometria è preferenzialmente ellissoidale (Mergili et al., 2014b). Tuttavia il modello è implementato anche per poter prendere in considerazione delle superfici di rottura superficiali e impostantesi in concomitanza sia della superficie del suolo, sia di elementi strutturali o tettonici come giunti o faglie. Tali superfici corrispondono nel modello a degli ellissoidi troncati, in cui la superficie di rottura segue la linearità delle strutture esistenti. Di conseguenza, dato che anche le discontinuità presenti possono essere considerate possibili superfici di scivolamento, è possibile che più di una superficie di taglio sia associata allo stesso ellissoide e che più ellissoidi troncati possano intersecare la medesima superficie.

Per quanto riguarda la geometria delle superfici ellissoidali, quest'ultime vengono definite in funzione delle coordinate geografiche del centro dell'ellissoide stesso, la semi-lunghezza dei tre semiassi (a_e , b_e , c_e), l'esposizione alfa, l'inclinazione beta e la distanza tra il centro dell'ellissoide e la superficie del terreno. Il semiasse a_e è orientato secondo la direzione

di massima pendenza e c_e è allineato perpendicolare alla superficie del terreno. a_e , b_e e c_e sono ricavati a partire dalla lunghezza (L) e larghezza (W) della frana, dalla massima profondità della porzione basale dell'ellissoide (D), da β e da z_b (Fig.8.1). Numeri pseudo casuali semplici, generati separatamente per ogni parametro di ciascun ellissoide, vengono utilizzati per definire le coordinate del centro e i valori di L , W , D e z_b ; il valore di ciascun parametro varia all'interno di un intervallo vincolato da minimi e massimi definiti dall'utente.

L'importante è poter testare un numero di ellissoidi sufficientemente grande per poter sia analizzare ellissoidi di dimensioni differenti sia ripartire gli ellissoidi stessi in modo omogeneo all'interno dell'area di studio. Per pixels di piccola dimensione ($< 5 \times 5 \text{m}$) e dunque migliore risoluzione, le superfici di scorrimento che vengono considerate approssimano l'ellissoide ideale; invece, nel caso di pixels di ampie dimensioni, la forma geometrica delle superfici di scivolamento tendono a somigliare a sistemi di superfici piane discrete, che dipendono molto dalla ripartizione dei pixels. Ecco perché, nel caso di modelli che prevedono superfici di rottura piuttosto superficiali, si fa ricorso ai summenzionati ellissoidi troncati.

Il modello consente di calcolare sia il fattore di sicurezza (FoS) che la probabilità di rottura (P_f).

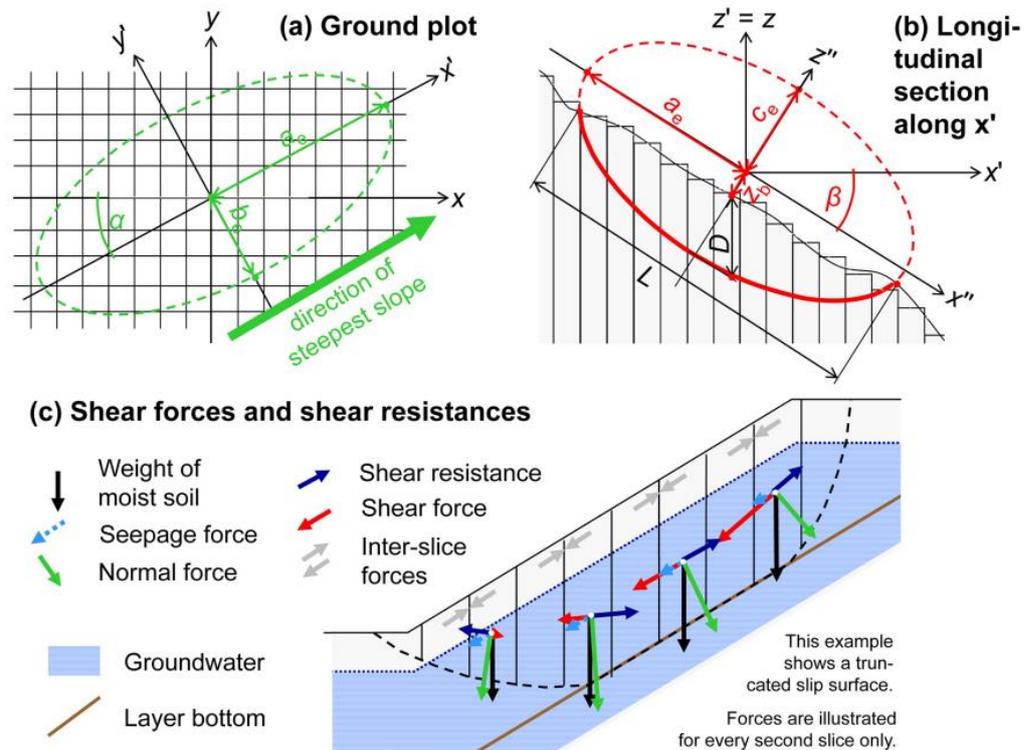


Fig.8.1 Ellissoide di riferimento utilizzato come superficie di scivolamento nel modulo *r.slope.stability*: a) Plot del suolo; b) sezione longitudinale; c) forze agenti su ciascun concio. (Da mergili et al. 2014b)

La descrizione dettagliata del modello, dell'implementazione computazionale e della parametrizzazione vengono descritte ampiamente da Mergili et al. (2014). Per quanto riguarda il metodo utilizzato per il calcolo del fattore di sicurezza (FoS), si fa ricorso ad una versione modificata del modello per superfici di scivolamento 3D proposto da Hovland (1977) rivisto e implementato in tempi più recenti da Xie et al. (2004,2006).

$$\text{FoS} = \frac{\Sigma (c' \cdot A + (G' \cos \beta_c + N_s) \tan \phi') \cos \beta}{\Sigma (G' \sin \beta_m + T_s) \cos \beta_m} \quad [8.1]$$

con c' ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$) è la coesione efficace, A (m^2) è l'area 3-D della superficie di scivolamento sul pixel considerato, G' (N) è il peso di suolo umido, β_c è di inclinazione della superficie di scivolamento sul concio considerato, ϕ' è l'angolo di attrito interno efficace e β_m è l'immersione apparente della superficie di scivolamento sul concio formato verso la direzione α . N_s e T_s (N) sono due parametri che esprimono il contributo dato dall'infiltrazione (*seepage*) allo sforzo normale e di taglio.

Quindi, esattamente come quanto visto per i metodi deterministici, il fattore di Sicurezza altro non è che il rapporto tra forze resistenti (numeratore Eq. (8.1)) e forze agenti (denominatore Eq. (8.1)).

La probabilità di rottura P_f viene calcolata automaticamente, in aggiunta al fattore di sicurezza e la sua stima si basa sulla distribuzione statistica dei parametri c' , ϕ' e d (quest'ultimo considerato solamente nel caso di ellissoidi troncati ad una certa profondità). Per consentire questa valutazione possono essere utilizzate quattro diverse tipologie di funzioni di densità di probabilità (PDFs): rettangolare, normale, log-normale o esponenziale. La stima dei PDF rappresenta una delle innovazioni di questo modello, giacché consente di tenere in considerazione l'enorme variabilità naturale che caratterizza i parametri geotecnici di uno stesso tipo di terreno.

Questo approccio consente di considerare l'intera gamma di valori misurati, in termini di c' , ϕ' ; le proprietà statistiche dei parametri sono assunte costanti nello spazio. Inoltre, nel caso di movimenti gravitativi superficiali di incerta profondità, è possibile considerare l'intervallo di variazione delle profondità degli ellissoidi troncati.

Dato che *r.slope.stability* è un modello fisicamente basato, i parametri di input sono molteplici. Innanzitutto è necessario utilizzare un modello del terreno, che nel caso del presente lavoro di tesi è consistito nel DEM (*Digital Elevation Model*) ritagliato sull'area studio

di Montespertoli e la cui risoluzione corrisponde ad un pixel di dimensione 10X10m. Gli altri parametri necessari per il modello sono costituiti da una serie di parametri geotecnici, dal *geodatabase* relativo alla distribuzione delle frane e delle litologie affioranti nell'area studio e, infine, dai valori di profondità presunta della superficie di scivolamento dei movimenti.

Il valore da attribuire a ciascuno dei parametri geotecnici è ottenuto da prove di laboratorio, e nel caso del presente lavoro di tesi, si è fatto ricorso a prove geotecniche e relazioni geologiche pregresse, realizzate nell'area di studio. Il modello richiede di conoscere l'intervallo di valori entro cui un determinato parametro tende a variare, per ciascuna unità litologica identificata. Perciò si ha la necessità di avere una buona quantità di dati disponibili per poter considerare un *range* di valori il più possibile rappresentativo per ciascuna unità litologica.

Per quanto riguarda la profondità della superficie di rottura, essa è stata ipotizzata durante la fase di rilevamento geomorfologico e inserita all'interno del database, come uno degli attributi fondamentali per la definizione delle frane. Tale profondità è stata solamente ipotizzata, poiché non si hanno prove dirette e sondaggi a disposizione per ciascuno dei movimenti gravitativi cartografati. Dunque, a partire dall'altezza della scarpata principale del movimento si è ipotizzato lo spessore minimo del corpo di frana e anche la presumibile ubicazione della superficie di scivolamento.

Riguardo alla distribuzione delle frane, è stato preso in considerazione l'inventario prodotto durante la fase di rilevamento di campagna, tuttavia non tutti i movimenti gravitativi sono stati utilizzati per l'esecuzione del modello. In particolare si sono considerate due tipologie di frane: scivolamenti e movimenti complessi (dominati dalla porzione in scivolamento), purché avessero superfici di scivolamento abbastanza profonde, collocate ad una profondità compresa tra 5 e 30m, ovvero la profondità tipica della maggior parte delle frane cartografate a Montespertoli.

Dato che *r.slope.stability* è stato testato su di un'area caratterizzata da frane superficiali prevalentemente di tipo traslativo, il fine del presente lavoro è stato quello di osservare la capacità predittiva del modello anche per frane con superficie di rottura più profonda (ma comunque inferiore ai 30 m).

A partire dai suddetti parametri, è necessario calcolare la media aritmetica, la deviazione standard, il minimo e il massimo per i parametri c' , φ e d . Il numero di campioni statistici da considerare per ciascuna combinazione di parametri viene definito direttamente dall'utente. Dopodiché il modello varia i parametri c' , φ e d in funzione sia degli intervalli sia del valore minimo e massimo stimato in precedenza. Quest'ultimo passaggio è fondamentale poiché consente di esplorare l'intera gamma di valori che un parametro può assumere.

Il calcolo di FoS viene ripetuto per ciascuna combinazione, applicando la formula riportata in Eq. 8.1. Infine, si calcola la probabilità di rottura (P_f) nel caso in cui il valore di FoS sia inferiore a 1, mediante la seguente formula:

$$P_f = \sum_{i=1}^n f_i \cdot w_i \quad [8.2]$$

con $f_i = 1$ per $FoS_i < 1$, $f_i = 0$ per $FoS_i \geq 1$, e w_i che corrisponde al peso assegnato alla combinazione di parametri (la cui somma totale è 1). Il valore rappresentativo di P_f sarà il valore più grande associato ad una sola tra tutte le superfici di scivolamento passanti per il pixel.

La possibilità di poter applicare questo modello ad aree di studio che ricoprono areali piuttosto estesi prolunga il tempo richiesto per le procedure computazionali. Difatti, il numero di superfici ellissoidali che vengono testate è piuttosto elevato e può superare il milione. Affinché il tempo computazionale richiesto per esaminare l'enorme mole di dati non risulti troppo elevato, così come la memoria a disposizione del computer per poter eseguire tali calcoli, vengono combinate due diverse strategie. Le problematiche connesse con lo spazio in memoria del calcolatore vengono ridotte ricorrendo ad una libreria GRASS GIS, nota come "*Segment Library*" (GRASS Development Team, 2014) che consente di immagazzinare e utilizzare un gran numero di data sets *raster* senza considerare la memoria disponibile del computer.

Inoltre, al fine di ridurre il tempo computazionale richiesto, *r.slope.stability* consente di suddividere l'area di studio in un certo numero di conci o settori che vengono processati in parallelo qualora il codice venga eseguito su una macchina multiprocessore o multi-core. In questo caso il modulo *r.slope.stability-main* viene fatto girare separatamente per ciascun concio; il risultato finale viene ottenuto successivamente, combinando tra loro i risultati raggiunti per i singoli conci.

Per accertarsi di ricoprire interamente tutta l'area di studio i conci sono suddivisi in modo tale da sovrapporsi parzialmente. La procedura di *processing* in parallelo viene eseguita mediante il modulo *Python*, sfruttando la libreria *Python* detta "*Threading*" (un'interfaccia di alto livello) e il modulo *Python* detto "*Queue*".

Infine, gli output del modello sono prodotti utilizzando R, un software *open source*, che viene utilizzato appositamente per le analisi computazionali statistiche e la produzione di

grafici (R Core Team, 2014). Tra gli output ottenuti è presente anche la curva ROC (*Receiver Operator Characteristic*), che consente di definire la capacità predittiva del modello. In particolare la capacità di discriminare tra veri e falsi positivi è proporzionale all'area sottesa dalla curva ROC (AUC) e compresa in un intervallo che va da 0 a 1; al tendere della curva a 1, aumenta la capacità predittiva del modello, mentre valori prossimi a 0.5 rappresentano valori casuali e dunque l'impossibilità del modello di fare una predizione attendibile. Per valori di AUC prossimi a 0.7 si considera accettabile la capacità discriminante del modello (Sweets, 1988). Inoltre, tra gli output vengono creati una serie di file che riassumono le informazioni relative al processamento dei dati, come i valori utilizzati per la parametrizzazione, il tempo computazionale impiegato e le stime dei rapporti tra veri e falsi positivi, veri e falsi negativi (rTP, rFP, rTN, rFN).

8.2 Parametrizzazione del modello

I parametri sono stati impostati tenendo conto della loro variabilità spaziale naturale, in modo tale da definire un intervallo che fosse il più possibile rappresentativo delle condizioni reali (Tab.8.1). I parametri geotecnici più sensibili e decisivi per il risultato del modello sono la coesione e l'angolo di attrito interno efficaci (c' , φ'), la profondità d della superficie di rottura, il peso specifico del terreno asciutto (γ_d) e il contenuto d'acqua saturo θ_s .

ID	Litologia	c' (N/m ²)				φ' (°)				θ_s (vol%)	γ_d (N/m ³)
		Min	Max	Media	Dev.St.	Min	Max	Media	Dev.St.	Media	Media
1	ULA	7000	12000	9500	2500	14	24	19	5	35	16
2	USC	11000	14000	12500	1500	27	35	31	4	35	17
3	UCI	11000	16000	13500	2500	29	42	35,5	6,5	35	18
4	USL	9000	14000	11500	2500	22	33	27,5	5,5	35	16
5	EC	9000	14000	11500	2500	18	28	23	5	35	16
6	A	80000	120000	100000	20000	70	90	80	10	35	16

Tab.8.1 Parametri geotecnici estrapolati per ciascuna unità litologica dell'area studio di Montespertoli ed utilizzati per la calibrazione del modello. c' = coesione efficace (N/m²), φ' = angolo di attrito interno efficace (°), θ_s = contenuto d'acqua saturo (vol%), γ_d = peso specifico del terreno asciutto (N/m³). I valori attribuiti ai parametri della litologia A (ID =6) sono stati appositamente definiti molto elevati in modo tale da impedire al modello di prevedere frane in all'interno dei depositi alluvionali.

Per calcolare successivamente la P_f è necessario definire le funzioni di densità di probabilità (PDF) da applicare a ciascun parametro. In particolare, facendo riferimento a quanto riportato in Mergili et. al (2014b), si è scelto di rappresentare la variabilità dei parametri geotecnici come segue:

- Per c' è stata assunta una distribuzione di tipo esponenziale;
- Per ϕ' e d una distribuzione di tipo log-normale;
- Per i parametri idraulici si sono considerate le condizioni più sfavorevoli possibili, ovvero il caso in cui il terreno sia totalmente saturo con infiltrazione parallela al versante.

Infine si è definito il numero medio di ellissoidi da testare per ciascun pixel (d_e). Tale valore è stato fissato a 2500 poiché dopo vari tentativi, si è appurato che la differenza tra il risultato ottenuto con questo valore e con un numero molto superiore di ellissoidi testati (10000) era talmente esigua da poter essere ignorata, favorendo peraltro una notevole riduzione del tempo computazionale richiesto (~30 min per 2500 ellissoidi contro ~ 90 min per 10000).

All'interno del modello *r.slope.stability* sono inoltre presenti una grande variabilità di funzioni (dette anche "flag") che possono di volta in volta essere considerate per adattarsi a contesti geologico-strutturali e geomorfologici diversi, a seconda dell'area di studio scelta.

Per costruire il modello è quindi essenziale scegliere quale set di funzioni si adattano maggiormente al caso studiato, impostando per ciascuna i parametri desiderati.

In Tab.8.2. si riportano le funzioni selezionabili per il modello con le relative caratteristiche.

Funzione	Descrizione
a	inserisce raster output opzionali
c	metodo classi di suolo
d	inserisce file di resoconto relativi ai parametri e al FoS testati per ciascun ellissoide
i	metodo del pendio infinito (usato per frane superficiali)
l	metodo layers geologici
m	processing multi-core (suddivide in concetti l'area di studio per ridurre il tempo computazionale)
p	probabilità di rottura del pendio
s	utilizzo della "Segment Library" (per data sets molto grandi)
t	superfici ellissoidali troncate
v	visualizzazione e rappresentazione grafica dei risultati
z	separa i risultati di ciascun concetto (consente di risparmiare il tempo computazionale)

Tab.8.2 Funzioni selezionabili per il codice relativo a *r.slope.stability*.

Per poter essere inseriti all'interno del modello, i parametri relativi alla litologia, distribuzione delle frane e il DEM devono essere trasformati in file raster con estensione ".ascii". Questo passaggio è fondamentale perché lo script possa lavorare in modo combinato con il software GRASS GIS.

Nell'area studio di Montespertoli si sono state testate due diverse combinazioni di funzioni:

1) c - p - v

2) l - t - v

Nel dettaglio, la funzione "c" (che rappresenta il *soil class mode*) consente di suddividere orizzontalmente l'area di studio in un certo numero di classi di suolo. Ogni classe di suolo è associata ad un numero definito di *layers* o strati (che può essere diverso per differenti classi di suolo) e a ciascun *layer* sono associate le informazioni relative alla profondità (d) e ai parametri geotecnici (c' , φ' , γ_d , θ_s).

La funzione "i" è associata al modello del pendio infinito e viene utilizzata quando si devono analizzare aree caratterizzate da frane superficiali.

La funzione "l" (che rappresenta il *layer mode*) permette di considerare un certo numero di *layers* geologici ed è definito da un set di mappe *raster* che riproducono andamento topografico 2d del bottom di ciascun *layer*. Si possono considerare oltre 50 *layers* con superfici sia orizzontali che non. È però necessario attribuire ad ogni *layer* la classe di suolo corrispondente con i relativi parametri geotecnici. Se si decide di utilizzare questa funzione non è possibile considerare simultaneamente anche la funzione "c" perché i parametri richiesti sono leggermente diversi.

La funzione "m" (relativa al *multi-core processing*), consente di suddividere l'area in un numero finito di conci. La stabilità del versante viene calcolata separatamente per ciascun concio utilizzando, se disponibili, i multi-core. Alla fine i risultati ottenuti per ciascun concio vengono combinati tra di loro. Questa funzione consente di utilizzare una strategia computazionale funzionale quando si lavora su aree di ampia estensione, poiché riduce notevolmente i tempi computazionali.

La funzione "p" viene utilizzata quando oltre al FoS, si vuole calcolare anche la P_f su ciascun pixel.

La funzione "v" serve per rappresentare graficamente i risultati del modello. Nello specifico, vengono prodotte sia la mappa relativa alla distribuzione del fattore di sicurezza (FoS) e della probabilità di rottura (P_f), sia il grafico riguardante le curve ROC.

Infine, la funzione "z" viene usata per il processamento multi-core, quando si vogliono separare i risultati dei diversi conci individuati mediante la summenzionata funzione "m".

8.3 Applicazione e risultati

La prima triade di funzioni (c - p - v) testata per l'area studio di Montespertoli prende in considerazione tre diversi parametri (Fig.8.2 a), che sono relativi a :

- 1) Mappa inventario delle frane (vengono considerate solo le frane profonde, con superfici di scivolamento comprese tra 5-30 m) in formato *raster*. Alle aree in frana è associato il codice 1 mentre alla restante area di studio non soggetta a instabilità il codice 0;
- 2) Mappa delle classi di suolo. Il *raster* è suddiviso in funzione delle diverse unità litologiche, ciascuna caratterizzata da un proprio ID. Ad ogni unità vengono quindi attribuiti i relativi parametri geotecnici (riportati in Tab.8.1);
- 3) Modello di elevazione del terreno (DEM).

La funzione *c* consente di considerare simultaneamente tutte le classi di suolo individuate poiché permette di far ricorso ad una sola mappa nella quale tutte le litologie sono riportate così come affiorano nell'area di studio (Fig.8.2a, mappa 2). Si possono, inoltre, valutare le condizioni indotte dalla presenza di acqua nel terreno (definita *seepage* nel modello) ovvero è possibile assumere due diverse condizioni: suolo è asciutto (*seepage* = 0, assenza di infiltrazione), infiltrazione parallela al versante (*seepage* = 1).

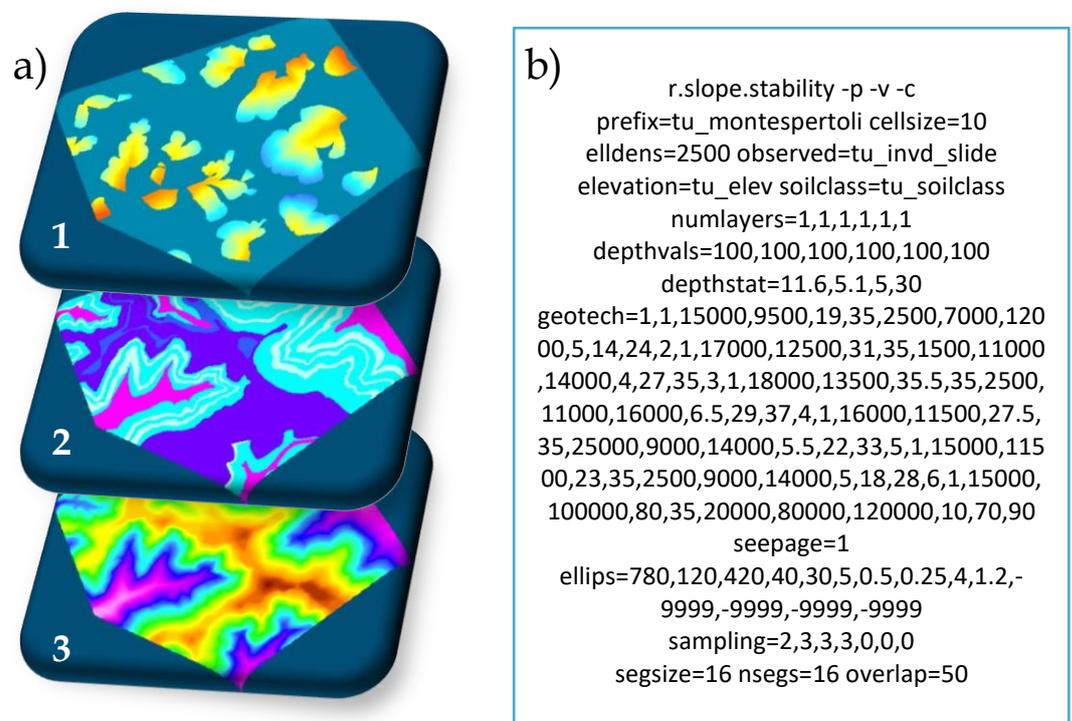


Fig.8.2 a) Esempio di raster utilizzati per l'esecuzione del modello: 1) mappa inventario delle frane, 2) mappa delle classi di suolo, 3) DEM. b) Impostazione del codice di calcolo necessario per l'esecuzione del modello *r.slope.stability*.

Per poter eseguire il modello è necessario assicurarsi che tutti i file *raster* abbiano esattamente la stessa estensione, dopodiché i file *raster* dovranno essere trasformati in formato .ascii, come richiesto dal modulo.

Una volta eseguito il codice del modello relativo all'area studio (Fig. 8.2b), si ottengono una serie di output (grazie all'ausilio del Software R; R Core Team, 2014) tra i quali vengono riportati i grafici relativi a: il P_f per ogni pixel, il valore medio di FoS e la curva ROC relativa alla P_f delle frane osservate (Fig. 8.3).

Le aree che presentano fattore di sicurezza minore, e dunque maggiore probabilità di rottura (Fig. 8.3), sono soprattutto quelle associate alle zone in cui, nel corso del rilevamento geomorfologico, sono state riconosciute le scarpate principali dei movimenti franosi. In generale i risultati del modello sono quindi paragonabili con i dati ottenuti in campagna. L'attendibilità del modello è evidenziata dal valore di probabilità associato alla curva ROC, e ricavato direttamente come output dal modello. Il valore ottenuto è $A_{ROC} = 0.673$. Tale risultato è ritenuto soddisfacente anche se ci sono delle aree nelle quali il modello non sembra concordare con la distribuzione della franosità reale e questo può essere spiegato come segue:

- per alcuni parametri geotecnici inseriti all'interno del modello è possibile che non sia stato valutato l'intervallo di valori che meglio ne approssima il valore reale e, dunque, non sarebbe stata rappresentata la reale variabilità spaziale di tali parametri;
- le condizioni idrogeologiche esistenti possono essere diverse da quelle considerate.

Alla luce delle precedenti considerazioni si sono individuate delle aree nelle quali è possibile sottolineare le limitazioni del modello. Queste zone corrispondono a falsi negativi e falsi positivi (Fig.8.4), che identificano in sostanza delle aree per le quali il modello non è in grado di generare una predizione attendibile.

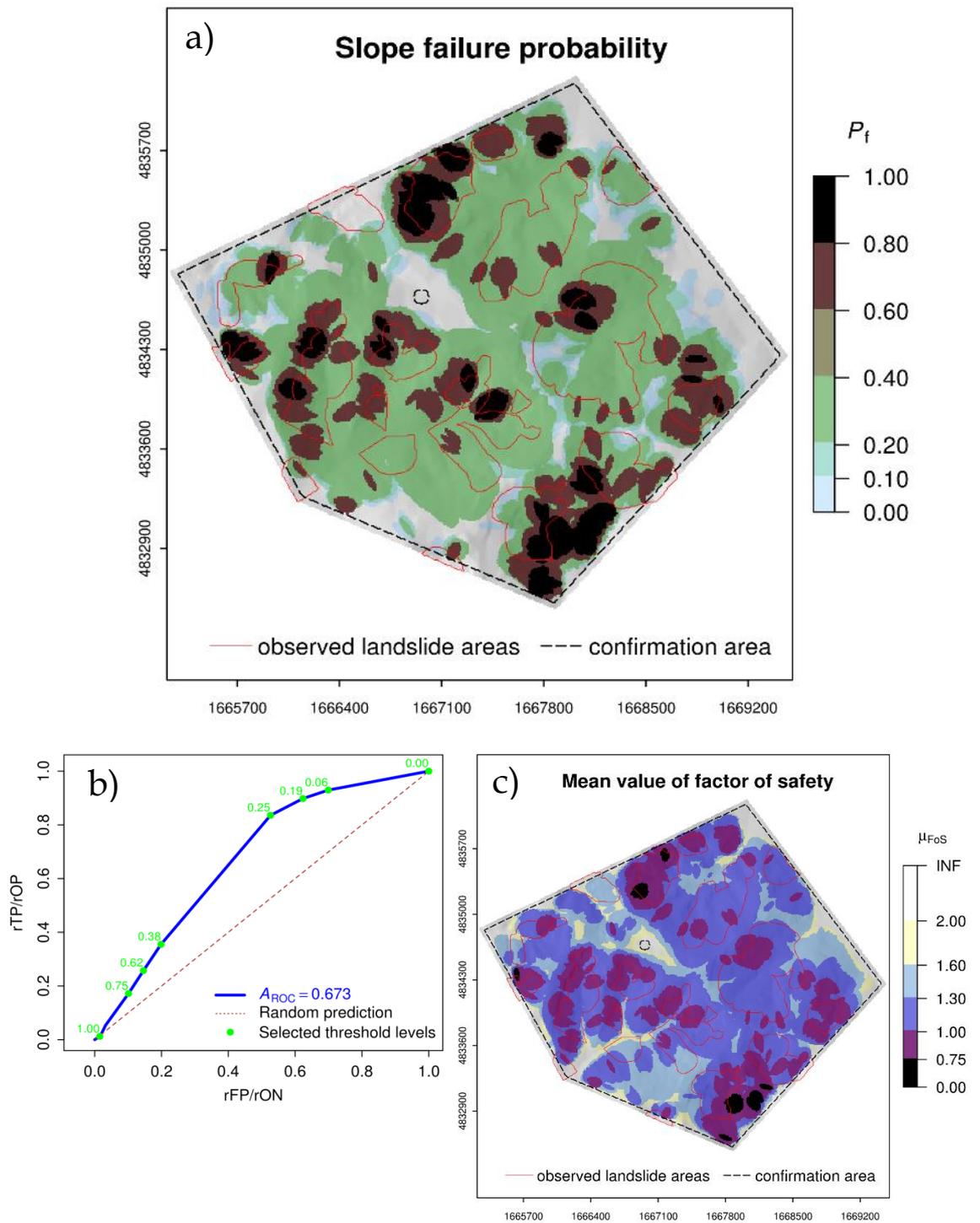


Fig.8.3 Area studio di Montespertoli: a) Mappa relativa alla distribuzione della probabilità di rottura (P_f); b) curva ROC relativa alla P_f delle frane osservate; c) valore medio di FoS.

False negativo:

la frana esiste realmente ma il modello non è in grado di prevederla. Può essere dovuto a:

- condizioni reali che non rappresentano adeguatamente il modello (ad es. la geologia è più complessa rispetto a quella ipotizzata);
- parametri del modello non soddisfacenti;

False positivo:

la frana non esiste realmente ma il modello la prevede. Può essere dovuto a:

- condizioni reali che non rappresentano adeguatamente il modello (ad es. la geologia è più complessa rispetto a quella ipotizzata);
- parametri del modello non soddisfacenti;
- aree non ancora franate ma suscettibili a frane di neo-formazione.

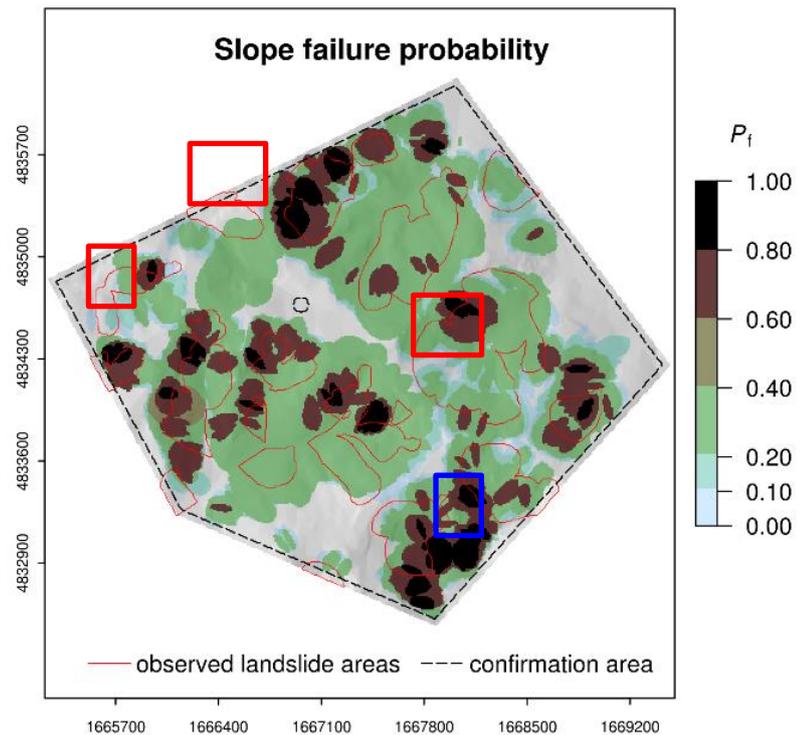


Fig.8.4. Mappa relativa alla distribuzione della probabilità di rottura (P_f) con evidenziate le aree dove la predizione fatta dal modello è in contrasto con il caso reale.

Ai falsi negativi sono associate aree che ricadono in zone in frana ma che il modello prevede come stabili (rettangoli rossi in Fig.8.4). Questo risultato può essere interpretato con un duplice significato: i falsi negativi possono corrispondere ad aree stabili che sono state mappate in modo errato come aree in frana, oppure possono essere effettivamente aree in frana ma con caratteristiche, legate ai fattori predisponenti, diverse rispetto alle altre frane.

Ai falsi positivi, invece, sono associate aree che non sono in frana ma che il modello prevede come tale. Queste aree sono importanti e vanno tenute sotto controllo perché potrebbero corrispondere ad aree che non sono ancora franate ma che in futuro potrebbero essere interessate da movimenti gravitativi e frane di neo-formazione, oppure possono corrispondere ad aree che durante la fase di rilevamento di campagna non sono state correttamente mappate. Inoltre, come detto anche per i falsi negativi, talvolta è possibile che queste aree corrispondano a zone per le quali il modello non è in grado di sviluppare una predizione attendibile perché le condizioni considerate (specialmente quelle geologiche) non corrispondono a quelle reali.

La seconda triade di funzioni (l - t - v) prende in considerazione più parametri e un numero assai maggiore di file *raster* (Fig. 8.5) rispetto alla combinazione (c - p - v).

La funzione "I", infatti, permette di considerare un certo numero di *layers* geologici mediante un set di mappe *raster* che riproducono andamento topografico 2d del limite inferiore di ciascuno strato (Fig. 8.5, 2). Inoltre è possibile valutare le condizioni indotte dalla presenza di una falda idrica assumendo tre diverse condizioni: suolo è asciutto (*seepage* = 0, assenza di infiltrazione), infiltrazione parallela al versante (*seepage* = 1), infiltrazione parallela alla stratificazione (ovvero ai *layers* del modello; *seepage* = 2). Quest'ultima possibilità è applicabile solamente quando si utilizza la funzione "I" e come vedremo poco più avanti può essere estremamente utile nella valutazione della stabilità dei versanti.

I file *raster* utilizzati per questa analisi sono:

- 1) Mappa inventario delle frane (vengono considerate solo le frane profonde, con superfici di scivolamento comprese tra 5-30 m) in formato *raster*. Alle aree in frana è associato il codice 1 mentre alla restante area di studio non soggetta a instabilità il codice 0;
- 2) Mappe relative alla geometria bidimensionale della superficie basale di ciascuno strato identificato nell'area di studio. Sono suddivise in funzione delle diverse unità litologiche individuate. A ciascuna unità vengono attribuiti i relativi parametri geotecnici riportati in Tab.8.1;
- 3) Mappa relativa all'andamento della superficie piezometrica. Tale andamento è stato ricostruito a partire dal livello statico della falda idrica più superficiale presente a Montespertoli, i cui valori sono stati estrapolati dal BDSRI (Banca Dati del Sottosuolo e della Risorsa Idrica) della Regione Toscana. Il livello statico della falda si attesta prevalentemente tra i 220 e i 230 m di quota s.l.m.
- 4) DEM (*Digital Elevation Model*).

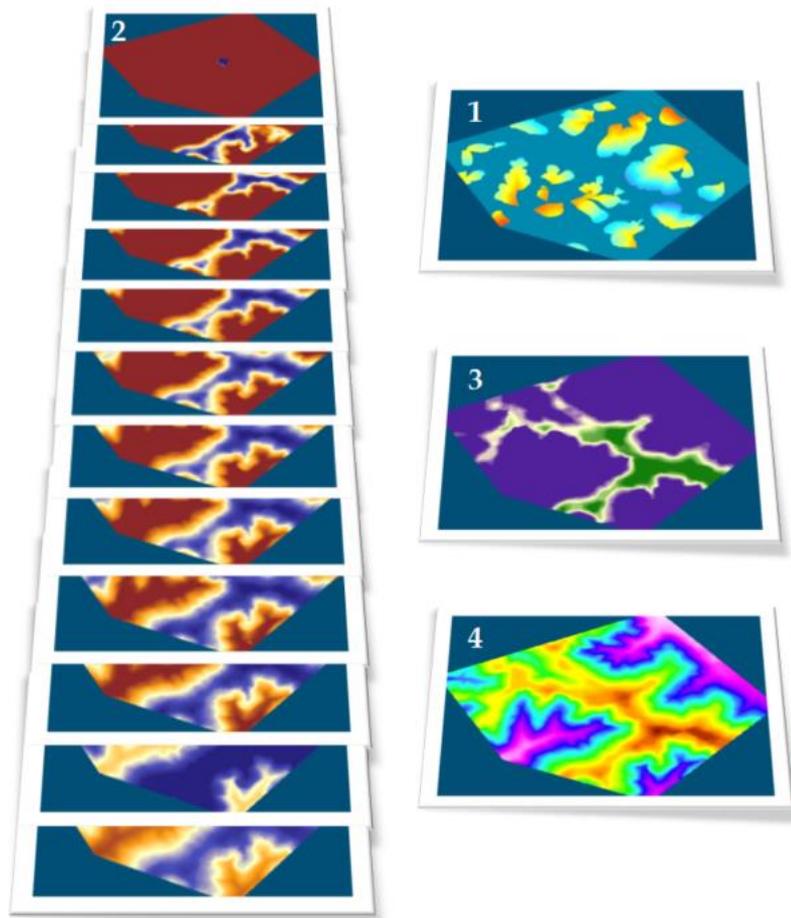


Fig.8.5 Mappe utilizzate per l'esecuzione del modello: 1) mappa inventario delle frane, 2) mappa del bottom di ciascun layer litologico, 3) mappa della superficie piezometrica, 4) DEM.

Come visto in precedenza, per poter eseguire il modello è necessario assicurarsi che tutti i file *raster* abbiano la stessa estensione e siano in formato "ascii", come richiesto dal modulo.

La maggiore limitazione per quest'ultimo modello risiede nella corretta ricostruzione bidimensionale dell'andamento della base degli strati che compongono il substrato dell'area di studio. Difatti è estremamente complesso ricostruire l'ipotetico andamento delle superfici di ciascuno strato (e dell'eventuale falda idrica), soprattutto nei casi in cui i diversi strati abbiano spessori abbastanza ridotti (nell'ordine di qualche decina di metri). La metodologia utilizzata per ricostruire manualmente l'andamento degli strati è riportata di seguito e riassunta in Fig.8.6:

- 1) I poligoni della litologia sono stati convertiti in *features* lineari e poi in *features* poligonali.

- 2) I punti così ottenuti sono stati interpolati con il DEM. Per ciascun *layer* è stata ripetuta questa procedura e al termine, all'interno della tabella degli attributi dei file così ottenuti, è stato creato un nuovo campo nel quale si è calcolata la quota z di ciascun attributo.
- 3) A partire dai *layer* ottenuti al punto 2, si creano tanti *raster* quanti sono gli strati identificati, che rappresentano la superficie bidimensionale passante per tutti i punti, ciascuno con le relative quote z. Tale *raster* è ritagliato (*clip*) con la stessa estensione degli altri raster utilizzati.
- 4) Al DEM si sottraggono i *raster* ottenuti al punto 3, in modo da ottenere dei *raster* che riproducano l'andamento reale della superficie basale di ciascuno strato.
- 5) Per i *raster* con valori negativi di profondità è necessario eguagliare le profondità minime a zero, mentre i valori no data (-9999) vengono lasciati intatti. Nella tool del Raster Calculator si imposta quindi la condizione: `Con(("depth3" < 0) & ("depth3" != -9999),0,"depth3")`.
- 6) L'ultimo passaggio è rappresentato dalla conversione dei *raster* in file "ascii" (estensione .asc).

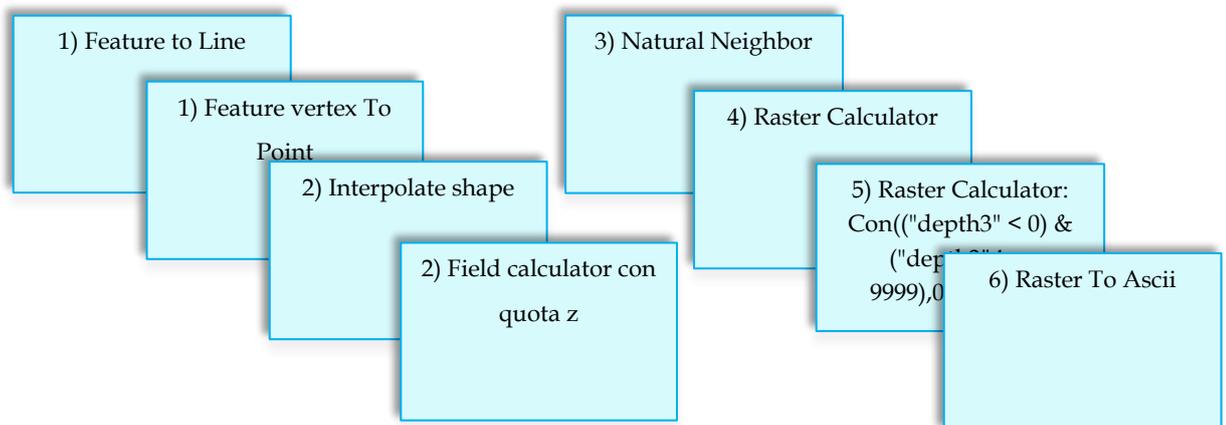


Fig.8.6 Funzioni utilizzate sul software GIS per creare i raster delle superfici basali bidimensionali dei

Utilizzando la triade di funzioni (l - t - v), sono state prodotte due diverse mappe relative al Fattore di Sicurezza: la prima (Fig.8.7) è stata realizzata considerando il parametro $seepage = 1$, ovvero infiltrazione parallela al versante, mentre la seconda considera il $seepage = 2$ e l'infiltrazione parallela alla stratificazione (*layers* bidimensionali).

La mappa relativa al Fattore di Sicurezza (FoS) con condizioni di infiltrazione corrispondenti al valore di $seepage = 1$ è riportata in Fig.8.7. Il terreno è assunto come

completamente saturo. Il valore del FoS ottenuto, che risulta minimo ($FoS < 1$) nelle aree caratterizzate da scarpate particolarmente acclivi (aree in nero in Fig.8.7), è altamente influenzato dalla distribuzione delle pendenze. Le aree con $FoS < 1$ corrispondono, nel modello, alle zone considerate instabili e dunque in frana.

Impostando la variabile $seepage = 1$ e considerando il terreno come completamente saturo (peggiori condizioni che determinano una maggiore instabilità) si incorre in una generale sovrastima delle aree instabili, le quali saranno fortemente dipendenti dall'acclività dei versanti.

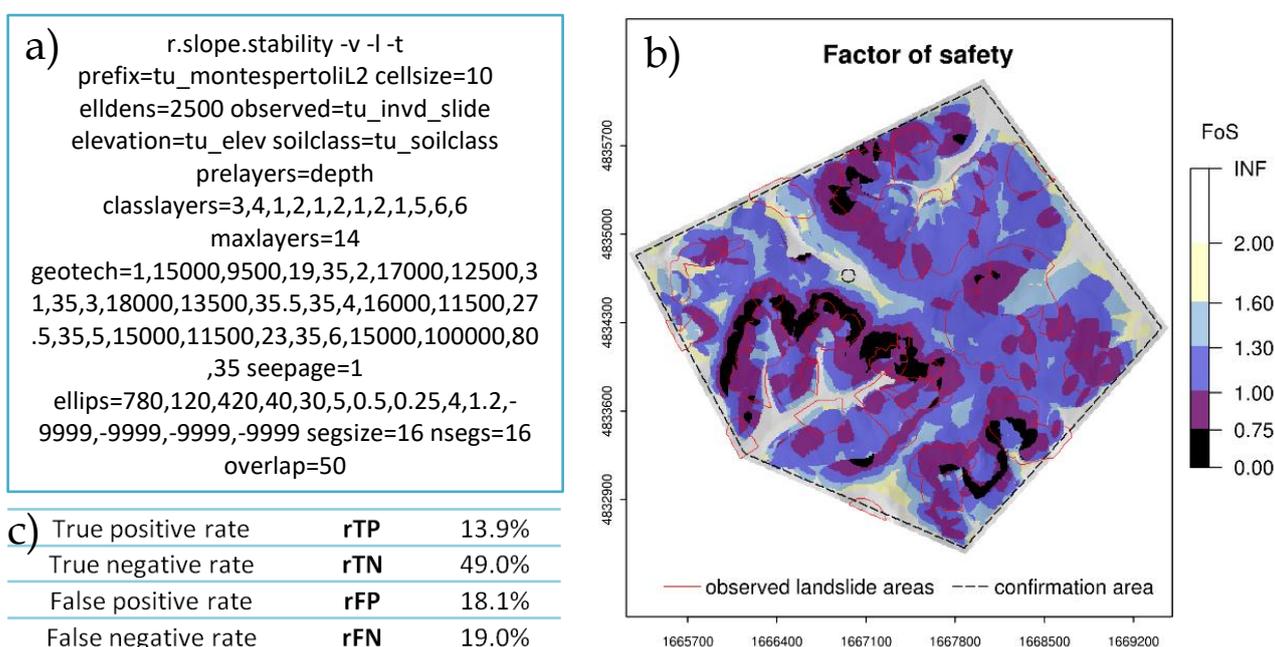


Fig.8.7 a) Impostazione del codice di calcolo necessario per l'esecuzione del modello *r.slope.stability* (funzione *l* e $seepage = 1$); b) Mappa relativa alla distribuzione del Fattore di Sicurezza (FoS); c) rapporti tra veri positivi e negativi (rTP , rTN) e falsi positivi e negativi (rFP , rFN) risultanti dal modello.

Considerando, invece, l'infiltrazione parallela agli strati ($seepage = 2$) si riduce il peso indotto dalla pendenza del versante sul risultato del modello. La mappa finale (Fig.8.8). sarà una mappa in cui, in generale, le condizioni di instabilità saranno meno estese rispetto alle precedenti (Fig.8.7). Questo è dato dal fatto che questo tipo di infiltrazione, essendo determinato dall'andamento degli strati, potrà essere diretto sia verso l'esterno che verso l'interno del versante (strati blandamente a reggipoggio o a franapoggio); nel caso in cui l'infiltrazione sia diretto verso l'interno dei versanti, questa condizione darà origine ad una situazione favorevole per la stabilità. Le aree meridionali, caratterizzate da maggiore

instabilità secondo il modello (aree con FoS ~ 1 , Fig.8.8) sono i settori che si sviluppano in concomitanza dell'emergenza di tale falda e corrispondono, per la maggior parte, alle aree cartografate con frane "attive" durante il rilevamento di campagna.

La presenza, all'interno del modello, di una falda idrica superficiale, determina una notevole variazione dei settori predetti come instabili dal modello, soprattutto se confrontati con la mappa di Fig.8.7.

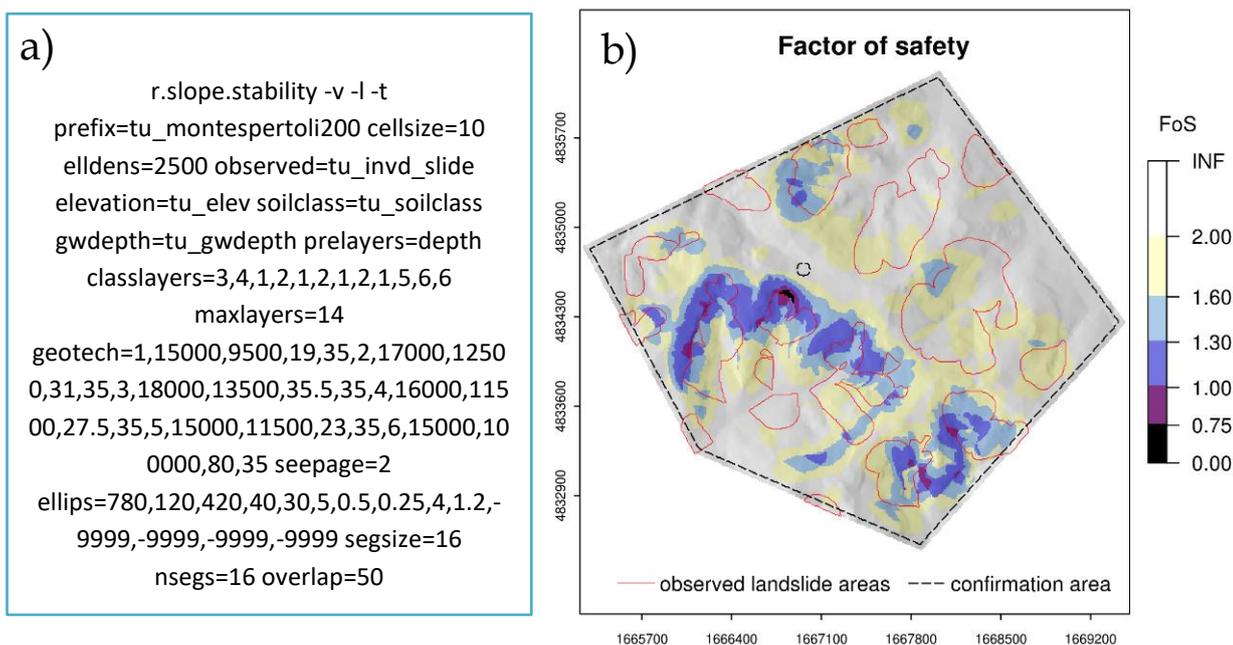


Fig.8.8 a) Impostazione del codice di calcolo necessario per l'esecuzione del modello r.slope.stability (funzione l e seepage = 2; b) Mappa relativa alla distribuzione del Fattore di Sicurezza (FoS).

8.4 Considerazioni finali

Dai risultati ottenuti sembra plausibile applicare tale modello di stabilità di versante al territorio di Montespertoli e c'è una buona corrispondenza, seppur con delle lacune, tra i movimenti gravitativi profondi osservati nell'area di studio e quelli predetti dal modello. L'analisi è stata condotta prendendo in considerazione solamente le frane in cui il tipo di movimento dominante è lo scivolamento e in cui il piano di taglio è stato ipotizzato ad una profondità compresa tra 5-30 m.

Il metodo associato al modulo *r.slope.stability* nasce come un approccio deterministico, tuttavia è presente anche una certa componente probabilistica, che si esprime nella valutazione di tutte le possibili superfici ellissoidali. In particolare, per definire il numero di ellissoidi sul quale elaborare l'analisi ($d_e = 2500$), si sono eseguiti vari test al fine di ricercare il risultato

migliore in termini di rapporto tra quantità di tempo computazionale impiegato per la procedura e attendibilità del risultato ottenuto.

Le incertezze maggiori risiedono nella definizione dell'intervallo dei valori da assegnare ai parametri geotecnici, poiché all'interno dello stesso strato geologico le proprietà possono essere estremamente variabili. Tuttavia la possibilità di utilizzare le funzioni di densità di probabilità (PDF, prevalentemente di tipo log-normale) per i parametri c' , φ' e d consente di valutarne tutte le possibili combinazioni, rispettando e tenendo in considerazione la naturale variabilità delle proprietà geotecniche del terreno. Inoltre, determinare i corretti *range* di variazione dei parametri geotecnici associati a ciascuna unità litologica è di fondamentale importanza al fine di ridurre l'intervallo di campioni statistici da prendere in considerazione e il relativo tempo computazionale.

Riguardo le condizioni idrogeologiche, si sono considerati due diversi casi: infiltrazione parallela al versante e parallela alla stratificazione.

La prima combinazione di funzioni (c-p-v) ha evidenziato una discreta capacità predittiva del modello (AROC = 0.673); tuttavia bisogna considerare la possibile sovrastima delle condizioni di instabilità del modello generata quando si considera il terreno in condizioni di completa saturazione, con infiltrazione parallela al versante. I valori di probabilità di rottura (Pf) associati a questo caso, infatti, rappresentano il peggior scenario possibile, in termini di condizioni idrauliche, per l'instabilità del versante. Condizioni di saturazione parziale, più realistiche, sarebbero però molto più complesse da trattare dal punto di vista geotecnico e non sono, comunque, applicabili con questo tipo di modello.

Anche la seconda combinazione di funzioni (l-t-v) mostra buoni risultati, giacché le aree caratterizzate da maggiori instabilità risultano quelle collocate in concomitanza delle scarpate di frana realmente attive nell'area studio di Montespertoli (Fig. 8.7). I risultati ottenuti confrontando le due diverse mappe (*seepage* = 1 e *seepage* = 2) sono piuttosto differenti, in termini di valore di FoS. Nel primo caso (*seepage* = 1; Fig. 8.7) sono le pendenze dei versanti a influenzare la valutazione del FoS, mentre nel secondo caso (*seepage* = 2; Fig. 8.8) è l'andamento della superficie piezometrica a determinare quali settori sono più instabili.

Un aspetto che potrebbe essere ulteriormente valutato in futuro è quello relativo a eventuali oscillazioni del livello piezometrico, che potrebbero essere simulate ricostruendo ipotetiche superfici di falda bidimensionali da inserire all'interno del modello, le quali consentirebbero di valutare l'influenza delle precipitazioni sull'innalzamento della falda e, più in generale, sulla stabilità dei versanti.

Capitolo 9

9 Discussione e conclusioni del lavoro

Il presente capitolo riassume gli elementi salienti di questo elaborato di ricerca. In particolare vengono riassunti e discussi i risultati relativi all'analisi geomorfologica, statistica e di suscettibilità, dando risalto agli elementi di originalità e innovazione introdotti dal presente studio e valutandone sia i vantaggi, sia le criticità.

9.1 Discussioni

In una prima fase del lavoro si è analizzata la vasta letteratura presente, ricercando la migliore metodologia da applicare alle diverse aree di studio, ovviamente considerandone non solo le potenzialità ma anche le eventuali limitazioni. Contemporaneamente si sono condotte le campagne di rilevamento geomorfologico nei diversi territori scelti come aree di studio, i cui dati che sono stati integrati con quelli ottenuti dalle analisi di fotointerpretazione. La scelta delle aree di studio è stata guidata dalla volontà di prendere in considerazione contesti geologico-strutturali diversi che hanno però come caratteristica comune quella di essere interessati dallo sviluppo di numerosi movimenti gravitativi distinti per tipologia ed estensione.

Successivamente, è seguita una fase di digitalizzazione in ambiente GIS dei dati acquisiti e la creazione del relativo Geodatabase, che ha lo scopo di consentire la gestione dei dati e la loro manipolazione al fine di realizzare procedure di analisi morfometriche, statistiche e spaziali.

La stesura di carte geomorfologiche (Allegati A, B, C) ha consentito di cartografare i movimenti gravitativi presenti nelle diverse aree di studio e di ricostruire la loro evoluzione temporale mediante fotointerpretazione. Le ortofoto utilizzate appartengono a quattro diversi anni (1954,

1988, 1996, 2013) e la loro analisi, integrata con il rilevamento di campagna, ha consentito di classificare le frane individuate in base alla tipologia di movimento e allo stato di attività, facendo riferimento per quest'ultima ad una classificazione recentemente proposta dal Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente di Siena. La classificazione si propone di identificare quattro diversi stati di attività: a) frane attive di primo livello (evidenze di attività dagli anni '80), b) frane attive di secondo livello (evidenze di attività dagli anni '50), c) frane quiescenti di primo livello (mancanza di evidenze di attività dagli anni '80), d) frane quiescenti di secondo livello (mancanza di evidenze di attività dagli anni '50).

I movimenti gravitativi rilevati sono stati classificati prevalentemente ricorrendo alla classificazione di Cruden e Varnes (1996) e anche a quella di Hungr et al. (2014). I movimenti hanno dimensioni estremamente variabili che vanno da pochi m² a centinaia di migliaia di m², così come gli spessori coinvolti, che vanno da pochi metri e decine di metri (per le frane più profonde e per le DGPV).

La totalità delle frane riconosciute, così come gli elementi geomorfologici salienti del territorio, sono stati cartografati ed inseriti all'interno di un Geodatabase.

A partire da tale database è stato dunque possibile condurre una serie di analisi di statistica descrittiva che hanno avuto come obiettivo quello di caratterizzare i parametri ambientali e morfometrici individuati come fattori predisponenti nelle diverse aree di studio (litologia, uso del suolo, pendenza, esposizione, elevazione e area drenata), e di valutarne la loro relazione con la franosità e la relativa incisività sull'innescò dei movimenti gravitativi. A tal fine, per poter confrontare tra i risultati ottenuti nelle diverse aree di studio è stato utilizzato un apposito indice di franosità percentuale (IF%, formula 5.2) stimato a partire dal rapporto percentuale tra il n° di pixels in frana e il n° totale di pixels. I parametri predisponenti considerati in questa fase sono i medesimi presi in considerazione anche per le valutazioni fatte successivamente riguardo alla suscettibilità da frana nelle diverse aree di studio. Inoltre, mediante l'utilizzo di *box plots* è stato possibile mettere a confronto e rappresentare la distribuzione statistica dei parametri predisponenti e la relativa variabilità per ogni area di studio e per tutte le frane cartografate.

Per l'ultima fase del lavoro, relativa alla stima della suscettibilità da frana, si è applicata a diverse aree studio una procedura di statistica bivariata, nota con il nome di *Information Value Method* (Van Westen, 1997). Tale metodologia si basa sulla correlazione statistica tra la mappa inventario delle frane e le mappe dei fattori predisponenti individuati nell'area di studio e consiste nel riclassificare i fattori causali in diverse classi, attribuendo un valore, detto peso, a

ciascuna delle classi così individuate. Il valore pesato per una certa classe viene definito in base al logaritmo naturale della densità di frana di quella stessa classe diviso per la densità da frana riferita all'intera area di studio (Van Westen, 1997). In questa fase è stato anche creato un apposito codice scritto interamente in linguaggio Python e implementato in ambiente GIS per la stima della suscettibilità da frana tramite il metodo summenzionato. Tale procedura consente di ottenere mappe della suscettibilità già classificate in cinque classi di suscettibilità definite a partire da specifici intervalli di valore W_i (ottenuto dalla procedura di *Information Value*) e applicabili in modo omogeneo alle diverse aree di studio. Inoltre, al fine di stimare la bontà con cui il modello si adatta al caso reale, per ciascuna mappa di suscettibilità è stata stimata la *success rate curve*, o curva dei tassi di successo.

Oltre al metodo di statistica bivariata, sulla sola area studio di Montespertoli, è stato testato anche un approccio di tipo prevalentemente deterministico, valutato a partire dal modulo open source *r.slope.stability*. In questo caso la mappa prodotta consente di caratterizzare i versanti indagati tramite il relativo valore del Fattore di Sicurezza (FoS) e della Probabilità di rottura (P_f). I modelli di tipo fisicamente basati generalmente richiedono di caratterizzare in modo estremamente dettagliato le caratteristiche geotecniche ed idrogeologiche del singolo versante; tuttavia il suddetto modulo permette di estendere l'area di studio anche a scala di bacino e dunque è applicabile anche su aree di ampia estensione. La validazione di questo approccio prevalentemente deterministico è stata effettuata mediante la valutazione delle Curve Roc ed in particolare attraverso la stima dell'area sottesa dalla curva (AUC).

Le diverse aree di studio sono caratterizzate da caratteristiche geologiche, morfologiche e climatiche piuttosto diverse. Tuttavia è possibile stabilire, grazie alla definizione dell'indice di Franosità (Tab. 7.10) e alla rappresentazione mediante *box plot* (da Fig. 5.19 a Fig. 5.20), quale delle classi in cui è stato suddiviso ciascun parametro predisponente, abbia la maggiore propensione al dissesto. In particolare sono la litologia, la pendenza e, talvolta, l'esposizione i parametri predisponenti che risultano incidere maggiormente nell'instabilità dei versanti delle aree studiate.

La scelta dei fattori predisponenti è stata guidata dalla necessità di poter considerare dei parametri predisponenti che fossero comuni a tutte le diverse aree di studio.

Se si analizzano i parametri predisponenti considerati nel presente lavoro di tesi possiamo fare le seguenti considerazioni:

- Per quanto riguarda la litologia, le classi che mostrano gli indici di franosità più significativi sono USL (unità sabbioso-limose) e UMA (unità marnoso-pelitico-arenacea). Le unità sabbiose limose raggruppano sia i litotipi continentali sabbioso-limosi presenti nel territorio di Figline (Limi di Latereto e Pian di Tegna, Pleistocene medio) e quelli marini sabbioso-limosi presenti a Montespertoli (Sintema di San Casciano e San Miniato, Gelasiano). Le unità marnoso-pelitico-arenacee invece raggruppano tutte le litofacies pelitiche dei depositi di *flysch* (litofacies pelitiche all'interno del Macigno e del membro di Montalto a Figline Valdarno; litofacies pelitiche all'interno delle unità dell'Acquerino, quella del Torrente Carigiola e i litotipi prevalentemente marnosi delle Marne Varicolore di Villore). La presenza di alternanze con livelli a diversa competenza e con caratteristiche geotecniche diverse sembra essere dunque un fattore di rilievo nella propensione al franamento. Nel caso delle litologie USL, caratterizzate prevalentemente da frane per scivolamento rotazionale o colamento, la presenza di livelli e lenti argilloso-limose con comportamento impermeabile, intercalate a materiali sabbiosi più permeabili, suggeriscono che l'eventuale piano di scivolamento possa enuclearsi con una geometria piuttosto listrica, al contatto delle variazioni litologiche, come evidenziato anche nelle sezioni geologiche ipotizzate per Montespertoli (Fig.4.17).

Nel caso delle litologie UMA, caratterizzate prevalentemente da frane per scivolamento traslativo, i movimenti gravitativi sono controllati, verosimilmente, da livelli argillosi e marnosi che fungono da superfici di debolezza mentre i banconi arenacei, più competenti, tendono a fratturarsi in blocchi con comportamento indipendente all'interno dell'ammasso in frana. Infatti, i litotipi arenacei sono pervasi da una grande quantità di giunti che promuovono l'infiltrazione di acqua verso settori più profondi dell'ammasso, fino ai livelli argilloso-pelitici che, invece, fungono da superfici impermeabili, favorendo la stagnazione delle acque.

- Per quanto riguarda l'uso del suolo, sono le aree con coltivazioni permanenti, quelle arbustive e quelle agricole ad essere spesso maggiormente interessate da frane, sebbene in questo caso sia importante fare una distinzione tra le diverse aree di studio. Infatti, ciascuna area presenta la predominanza di specifiche classi nella propensione al franamento: per Montespertoli, ad esempio, sono le zone caratterizzate da bosco o vegetazione arbustiva, ad essere maggiormente coinvolte nel franamento, per Figline e Corella, in aggiunta a quelle citate per Montespertoli, anche le zone agricole eterogenee e coltivate risultano prone al franamento.

In generale, si può presumere che sia stata l'attività continuativa dei movimenti franosi, seppur con dinamiche piuttosto lente, ad aver limitato le pratiche agricole; perciò nelle aree non più coltivate la vegetazione è cresciuta in modo spontaneo, dando origine a boschi e zone arbustive. Per le zone coltivate si ritiene, invece, che siano stati prevalentemente gli erronei sistemi di canalizzazione e drenaggio superficiale, assieme alla mancanza di apparati radicali profondi, ad incidere in modo negativo sulla stabilità del versante.

- Per quanto riguarda l'esposizione, talvolta la distribuzione delle frane segue la distribuzione di questo parametro, perciò capita che le direzioni di esposizione più prone al franamento siano anche quelle più comuni nell'area investigata. I versanti più prone al franamento (caratterizzati da IF% maggiore) sono quelli esposti a N-NO a Montespertoli, NO-S-SO per Corella, e generalmente E-SE per il comune di Figline. Tuttavia, in un caso, ovvero nell'area studio di Figline, è stato possibile osservare uno specifico *trend* dell'indice di Franosità, che risulta più elevato per i versanti orientati a N-NO nonostante la maggior parte dei versanti sia orientata verso i settori orientali, ad indicare come talvolta questo parametro non sia direttamente correlato con la distribuzione delle aree in frana.
- Per quanto riguarda la pendenza o acclività, spesso si è notato che anche pendenze abbastanza ridotte (10-15°) sono soggette a franamento e ciò è strettamente dipendente dal fatto che le frane mappate nell'inventario tendono a svilupparsi ed evolvere lungo il versante, generalmente fino al fondovalle. Inoltre, nelle aree di studio di Figline Valdarno e Montespertoli si sono notati due classi di pendenza principali. Questo doppio picco presente nel grafico relativo all'Indice di franosità (Cap.5) può essere spiegato con il fatto che a pendenze minori sono associati fenomeni di tipo complesso, che evolvono per colamento verso le zone pianeggianti di fondovalle, mentre le frane per scivolamento (a Montespertoli) o per colamento e *debris-flow* (a Figline) che si impostano a partire dalla sommità del crinale mediante scarpate nette e sub-verticali, sono quelle caratterizzate da pendenze maggiori (30-40° sino a > 50°).
- Per quanto riguarda l'elevazione si può dire che a Montespertoli e Figline, le quote con indice di franosità maggiore, sono comprese generalmente tra 150-200m, o comunque al di sotto dei 300m, mentre a Corella è la classe compresa tra 400-500m quella più suscettibile.

Talvolta è stata osservata una certa concordanza tra la distribuzione della litologia e l'elevazione; nel territorio di Montespertoli, ad esempio, le quote più franose sono quelle in cui affiorano, a loro volta, le litologie più franose.

- Per quanto riguarda l'area drenata, tale parametro sembra correlato sia alla dimensione delle frane sia alla loro distribuzione lungo il versante. Infatti, se osserviamo la ripartizione delle diverse classi di area drenata, notiamo che a Figline sono dominanti intervalli con un numero di pixels compreso tra 5-10 mentre per Montespertoli e Corella prevale la classe tra 25-100 pixels. Frane di piccole dimensioni (nell'ordine di centinaia di m² fino a poche migliaia) e distribuite in prossimità di crinali e/o spartiacque, mostrano bassi valori di area drenata, mentre movimenti gravitativi di estensione maggiore (superiori alle decine di migliaia di m²) che si sviluppano verso zone di fondovalle hanno valori di area drenata sensibilmente maggiori.

Per quanto riguarda i diversi approcci utilizzati per la stima della suscettibilità da frana nell'area di studio, quello di statistica bivariata e quello di tipo prevalentemente deterministico, i risultati possono essere riassunti come segue.

Il modello statistico di tipo bivariato è stato applicato al fine di valutare la propensione al dissesto del territorio in funzione di una serie di fattori predisponenti, che sono i medesimi considerati per l'analisi statistica descrittiva. Inoltre, il modello utilizzato risulta applicabile per analisi sia a scala di area studio sia di bacino.

Confrontando i risultati ottenuti tramite le *Succession rate Curve* per le diverse aree di studio (vedi Tab.7.8) si osserva che maggiore è il numero di parametri predisponenti considerati, migliore è la capacità di predizione spaziale del modello. Infatti, i valori stimati per le mappe S4 (con sei parametri predisponenti), vanno da un minimo di 0.73, ottenuto per l'area sub-comunale di Montespertoli, ad un massimo di 0.84, ottenuto per l'area studio di Figline Valdarno. I risultati ottenuti utilizzando le altre mappe di suscettibilità sono di poco inferiori ai valori ottenuti per le mappe S4, poiché alcuni dei parametri predisponenti non incidono in modo significativo nell'insorgere dei fenomeni gravitativi.

Le mappe di suscettibilità così ottenute si propongono come strumenti utili per realizzare una prima analisi della propensione al dissesto del territorio, consentendo di individuare le aree caratterizzate da maggiore suscettibilità da frana, anche in territori dove dati geotecnici di dettaglio sono assenti e/o è necessario ricorrere a tecnologie economicamente vantaggiose per mancanza di fondi.

Nel presente elaborato di tesi, gli specifici intervalli che discriminano tra le diverse classi di suscettibilità non sono stati ottenuti mediante procedure automatiche (Yin & Yan 1988, Zezere 2002, Tating et al. 2015) ma sono stati definiti manualmente, in modo tale da considerare intervalli del valore W_i identici per tutte le aree di studio. Questo elemento rappresenta la vera innovazione apportata in tale procedura, che ne dimostra la validità ed esportabilità ad aree studio caratterizzate da estensione areale ed inquadramenti geologici diversi rispetto a quelle utilizzate in partenza. Il modello, infatti, è stato replicato non solo in tre diverse aree di studio, ma anche a diverse scale di analisi.

In particolare, le classi di suscettibilità 1 e 2 (suscettibilità molto bassa e bassa), sono contraddistinte da valori negativi, o prossimi allo zero, di indice W_i ($1=[<0]$ e $2=[0,0.3]$), la classe 3 (suscettibilità moderata) è caratterizzata da valori moderati di indice W_i ($3=[0.3, 0.6]$), mentre le classi 4 e 5 (suscettibilità elevata e molto elevata) sono caratterizzate da valori dell'indice W_i più elevati ($4=[0.6, 1.0]$ e $5=[>1.0]$). Il valore dell'indice W_i consente quindi di discriminare tra aree prive di movimenti gravitativi, zone per le quali c'è la probabilità che possano accadere frane e territori dove l'occorrenza di fenomeni gravitativi è piuttosto frequente.

Inoltre, un vantaggio proprio della procedura di statistica bivariata, è quello di essere facilmente aggiornabile man mano che nuovi dati sono disponibili. La possibilità di fare riferimento allo script in Python (appositamente creato durante il presente lavoro di ricerca e che può quindi essere considerato un ulteriore elemento di innovazione), implementa notevolmente la gestione e applicazione di tale modello, poiché ne riduce non solo il tempo computazionale necessario per svolgere l'intera procedura, ma ne limita anche gli errori indotti umani a cui si può andare incontro durante l'esecuzione di procedure lunghe, complesse e ripetitive. Sebbene esistano altre tipologie di script simili che consentono di calcolare il peso di ciascun fattore predisponente mediante procedure automatiche (es. *ILWIS Open*), quello ideato per il presente lavoro di tesi si adatta perfettamente alle aree di studio e può essere applicato anche ad aree diverse da quelle investigate, utilizzando la specifica suddivisione litologica utilizzata per questo elaborato, che classifica la geologia non tenendo conto del sintema o della formazione geologica di appartenenza, così come dell'età del deposito, ma, piuttosto, raggruppa all'interno della medesima unità tutte quei depositi caratterizzati da caratteristiche litologiche e tessiturali simili.

Il motivo per cui il semplice modello statistico bivariato ben si è adattato per la realizzazione di questo lavoro è legato principalmente al fatto che i fenomeni gravitativi analizzati, così come i meccanismi che stanno alla loro origine, sono risultati fortemente

controllati dalla litologia, e in particolare dipendono dalle scarse proprietà di resistenza delle formazioni argillose e marnoso-pelitiche (USL - Unità sabbioso-limoso-argillosa e UMA - Unità marnoso-pelitica), intercalate a formazioni geologiche generalmente più competenti (USC - Unità sabbioso-ciottolose e UMA - Unità arenaceo-marnose). Quindi, considerando tali contesti geologici, l'analisi di un ampio insieme di variabili morfometriche, della litologia e dell'uso del suolo attraverso dei modelli di statistica multivariata non offrirebbe vantaggi significativi rispetto al più semplice, e sicuramente economico, approccio bivariato.

Il modello prevalentemente deterministico basato sul modulo *r.slope.stability* è stato utilizzato al fine di valutare la possibilità di applicare questo tipo di approccio anche ad aree caratterizzate da movimenti gravitativi con superfici di scivolamento abbastanza profonde, comprese tra 5-30m, generalmente più profonde rispetto a quelle dell'area studio in cui è stato testato il modello (Collazzone, Umbria; Mergili et al., 2014). Tali risultati confermano la buona capacità previsionale e l'adeguatezza del modello per questo tipo di elaborazioni. Inoltre, va sottolineato come la maggior parte dei modelli fisicamente basati siano realizzati solitamente per studi a scala di versante e richiedano una dettagliata caratterizzazione geotecnica ed idrogeologica del territorio. Il modello usato nel presente elaborato di tesi, invece, ne consente l'applicazione anche ad aree di vasta estensione mantenendo una certa affidabilità dell'analisi, che può essere verificata direttamente dopo il processo di validazione, consultando gli output generati automaticamente dal modello. La procedura di validazione viene effettuata mediante la valutazione delle Curve Roc e, in particolare, l'accuratezza del modello è funzione dell'area sottesa dalla curva. Il valore stimato dalla A_{ROC} , per la configurazione del modello secondo la triade di funzioni c-p-v, è di 0,673. Tale risultato, il migliore ottenuto tramite il metodo *r.slope.stability* per l'area studio di Montespertoli, ha una discreta accuratezza ed è ritenuto soddisfacente anche se ci sono delle aree nelle quali il modello non sembra concordare perfettamente con la distribuzione della franosità reale: ciò sembra dovuto sia all'intervallo dei valori usati per i parametri geotecnici, che potrebbero non essere rappresentativi della loro reale variabilità spaziale, sia dalle condizioni idrogeologiche considerate. Di fondamentale importanza è la valutazione dei falsi positivi generati dal modello, poiché quest'ultimi consentono di valutare quali aree potrebbero potenzialmente essere influenzate, in futuro, da fenomeni di instabilità e, dunque, da neo-formazione di frane. Infatti, ai falsi positivi sono associate tutte quelle aree che non sono state cartografate in frana ma che il modello prevede come tale. Queste sono le aree più importanti da tenere sotto controllo perché potrebbero

corrispondere ad aree che non sono ancora franate ma che in futuro potrebbero essere interessate da movimenti gravitativi e/o frane di neo-formazione.

Al fine di superare l'eventuale criticità del modello, associata alla presenza di falsi positivi, si possono offrire due diverse soluzioni: la prima consiste in una più dettagliata analisi di campagna, al fine di determinare se i settori caratterizzati dai falsi positivi siano aree realmente affette da frane, la seconda, meno economica, potrebbe prevedere indagini geognostiche mirate a caratterizzare dal punto di vista geotecnico i depositi presenti nel territorio circostante l'abitato. In quest'ultima situazione, i dati ottenuti da prove puntuali sarebbero poi essere estrapolati per l'intero territorio in esame, senza che questa generalizzazione influisca in modo negativo sull'applicabilità del modello. Infatti, si ricorda che i valori associati alle variabili geotecniche prese in considerazione dal modello *r.slope.stability* non sono legate a valori unici, ma piuttosto utilizzano i dati contenuti in un intervallo continuo di valori. La possibilità di far ricorso ad ulteriori dati geotecnici, consentirebbe a sua volta, di ridurre gli errori associati anche ai falsi negativi, che corrispondono ad aree realmente in frana ma che il modello prevede come stabili. Queste aree coincidono a zone per le quali il modello non è in grado di sviluppare una predizione attendibile soprattutto perché le condizioni considerate (specialmente quelle geologiche) non corrispondono a quelle effettive e reali.

In definitiva, il rilevamento geomorfologico e l'analisi multitemporale, si sono rivelate molto utili per individuare i limiti dei movimenti franosi, il loro grado di attività e la loro evoluzione nel tempo. Le analisi statistiche hanno consentito di individuare la variabilità dei parametri predisponenti nelle diverse aree di studio e di indicare quali classi, tra i parametri, sono caratterizzate dal maggior numero di frane e, dunque, più prone al franamento. In base a tali analisi statistiche e ai risultati delle mappe di suscettibilità, i fattori predisponenti che influenzano maggiormente la distribuzione spaziale dei movimenti franosi nelle aree investigate sono: litologia e pendenza.

Si può inoltre affermare che: a) gli studi di suscettibilità effettuati per le diverse aree di studio con la metodologia di statistica bivariata mostrano un'elevata percentuale di aree in frana ricadenti all'interno delle aree predette a più elevata suscettibilità e possono essere applicati sia a piccola sia a grande scala, per diverse tipologie di frane; b) i risultati ottenuti per il modulo *r.slope.stability* sono piuttosto attendibili e rappresentativi della situazione reale, come dimostrato dai risultati della validazione tramite la stima di A_{ROC} .

L'opportunità, poi, di utilizzare software GIS, non solo per la manipolazione dei dati ma anche per il loro aggiornamento e per l'esecuzione automatica delle procedure bivariate (ad es.

attraverso il codice in linguaggio Python creato durante questo lavoro di tesi), incrementa notevolmente la possibilità di estendere queste analisi a nuove e diverse aree di studio, con costi pressoché nulli.

9.2 Conclusioni

Le analisi contenute nel presente elaborato di tesi costituiscono uno strumento conoscitivo di base, indispensabile per tutte quelle zone in cui i movimenti franosi o altre dinamiche inducono pericolosità geologica interferendo con l'ambiente e le strutture antropiche, consentendo una buona conoscenza, anche di territori con estensione piuttosto ampia, a costi molto ridotti.

Tutte le procedure e software utilizzati nel presente lavoro sono disponibili *open-source* e fruibili gratuitamente online. Uno degli aspetti più importanti del presente lavoro è, quindi, il vantaggio economico determinato da questo tipo di analisi; l'innovazione risiede innanzitutto nel costo delle procedure e software utilizzati, che risulta praticamente ridotto a zero (sia per l'analisi di suscettibilità da frana, sia per la cartografia prodotta), e nell'utilizzo di un geodatabase aggiornato interamente dalla scrivente, con dati derivanti dal rilevamento di campagna integrati con analisi multitemporale di dettaglio. Tale geodatabase, infatti, per le aree oggetto di studio, può essere considerato il più attuale inventario informatizzato di riferimento per i movimenti franosi.

Inoltre, va sottolineata la possibilità di applicare tale modello sia a piccole aree di studio (nell'ordine della decina di km²) sia ad aree a scala di bacino (nell'ordine di centinaia di km²). Lo script realizzato in linguaggio Python consente, poi, sia di velocizzare le procedure di calcolo ed elaborazione cartografica, sia di estrapolare in modo semplice le analisi di suscettibilità ad aree diverse da quelle prese in considerazione nel presente lavoro di ricerca, apportando solo limitate modifiche.

La suddivisione delle classi di suscettibilità mediante intervalli definiti manualmente (Capitolo 7, metodo dell'*Information Value*), consente di uniformare, generalizzare e confrontare i risultati relativi alle analisi effettuate in aree diverse.

Inoltre, la realizzazione di una cartografia di suscettibilità da frana mediante l'utilizzo di tecniche di elaborazione GIS ha il vantaggio di integrare i dati raccolti durante il rilevamento di campagna con quelli ottenuti mediante fotointerpretazione e con le complesse tecniche di analisi spaziale, permettendo quindi di produrre e implementare modelli di suscettività che si

adeguano alle più disparate caratteristiche geologiche delle aree studiate e alle diverse esigenze di pianificazione territoriale per la gestione del rischio da frana. I risultati ottenuti dall'elaborazione di tutte le informazioni attraverso le differenti metodologie (statistica descrittiva, modelli bivariati e deterministico-probabilistici), se confrontati con la realtà geomorfologica e le caratteristiche legate all'instabilità dei versanti, mostrano un buon grado di correlazione; dunque, sebbene possano essere compiuti ulteriori approfondimenti (per la comprensione dei vantaggi e delle limitazioni di tale approccio metodologico), in virtù della validità e adattabilità dimostrata dai modelli proposti, è auspicabile un loro utilizzo in ambito di pianificazione territoriale e analisi di suscettibilità da frana.

10 Bibliografia

Abbate E., Bortolotti V, Passerini P.& Sagri M. (1969) Geological Map of the Northern Apennines, 1:500.000 scale. L.A.C., Firenze. In: Sestini G. (Ed.) "Development of the Northern Apennines Geosyncline". *Sediment. Geol.*,4.

Abbate E., Bortolotti V. & Principi G. (1980) Appennine ophiolites: a peculiar oceanic crust. In Rocci G., Ed, and Tethyan Ophiolites-Western Area: *Ofioliti*, Special Issue 5, pp. 115-126.

Abbate E., Bortolotti V., Conti M. et alii (1986) Appennines and Alps ophiolites and the evolution of the Western Tethys. *Mem. Soc. Geol. It.*, 31,23-44.

Abbazzi L, Benvenuti M, Ceci ME, Esu D, Faranda C, Rook L, Tangocci F (2008) The end of the Lago-Mare time in the SE Valdelsa Basin (Central Italy): interference between local tectonism and regional sea-level rise. *Geodiversitas*, 30(3):611-639

Agliardi, F., Crosta, G., & Zanchi, A. (2001). Structural constraints on deep-seated slope deformation kinematics. *Engineering Geology*, 59(1-2), 83-102.

Agnesi, V., Macaluso, T., Monteleone, S., & Pipitone, G. (1984). Fenomeni di deformazione gravitativa profonda (deep-seated gravitational slope deformations) osservati nella Sicilia occidentale. *Italian Journal of Geosciences*, 103(4), 671-679.

Ahmad, F. (2012). Detection of change in vegetation cover using multi-spectral and multi-temporal information for District Sargodha, Pakistan. *Sociedade & Natureza*, 24(3), 557-571.

Alvarez W. (2010) – *Le montagne di San Francesco*. Fazi editore Roma 1-412.

Alvioli, M., & Baum, R. L. (2016). Parallelization of the TRIGRS model for rainfall-induced landslides using the message passing interface. *Environmental Modelling & Software*, 81, 122-135.

Assefa, S., Graziani, A., & Lembo-Fazio, A. (2015). A deep seated movement in a marly-arenaceous formation: analysis of slope deformation and pore pressure influence. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 26, No. 1, p. 012052). IOP Publishing. at the Jurassic escarpment (SW-Germany). *Geomorphology*, 86(1-2), 12-24.

- Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65(1-2), 15-31.
- Ayman HN, Ashraf KH. Integration of Misrsat-1 and SPOT-2 data for quantitative change detection applications. *ICGST-GVIP Journal*, 9(5): 53-59. 2009.
- Bally A.W., Catalano R. & Oldow J.S. (1985) Elementi di tettonica regionale: evoluzione dei Bacini sedimentari e delle Catene montuose. Pitagora Ed., Bologna, 276 pp.
- Barchi, M. (1998). The CROP 03 profile: a synthesis of results on deep structures of the Northern Apennines. *Mem. Soc. Geol. It.*, 52, 383-400.
- Beck, A. C. (1968). Gravity faulting as a mechanism of topographic adjustment. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 11(1), 191-199.
- Beguería, S. (2006). Changes in land cover and shallow landslide activity: a case study in the Spanish Pyrenees. *Geomorphology*, 74(1-4), 196-206.
- Bentivenga M., Coltorti M., Prosser G. (2004) - Il movimento gravitativo profondo di craco (Basilicata Ionica). *Il Quaternario* 17,(2/2), 613-625.
- Benvenuti M., Dominici S. (1992) Facies analysis, paleoecology and sequence stratigraphy in a Pliocene siliciclastic succession, San Miniato (Pisa, Italy). *Bollettino della Società paleontologica italiana* 31 (2), 241-259.
- Benvenuti M & Degli Innocenti D (2001) The Pliocene deposits in the Central-Eastern Valdelsa Basin (Florence, Italy), revised through facies analysis and unconformity-bounded stratigraphic units. In: *Paleontology and Stratigraphy*, 107(2).
- Benvenuti, M., Bertini, A., Conti, C. & Dominici, S. (2007) Integrated analyses of litho- and liofacies in a Pliocene cyclothemic, alluvial to shallow marine succession (Tuscany, Italy). *Geobios*, 40, 143-158.
- Benvenuti M, Del Conte S, Scarselli N, Dominici S (2014) Hinterland basin development and infilling through tectonic and eustatic processes: latest Messinian-Gelasian Valdelsa Basin, Northern Apennines, Italy. *Basin Research*, 26(3):387-402
- Bernini M., Bertoldi R., Papani G., Vescovi P., (1994). Evoluzione in regime compressivo del bacino Villafranchiano di Campiano (Parma). *Atti Tic. Sc. Terra*, 37, 155-171.

- Bettelli G., Boccaletti M., Cibin U., Panini F., Poccianti C. & Rosselli S. (2002) Note illustrative della Carta Geologica d'Italia a scala 1:50.000. Foglio 252 "Barberino di Mugello". Serv. Geol. d'It. - Regione Emilia-Romagna, 133 pp.
- Bettini, V. (2007). Telerilevamento e fotointerpretazione per la scoperta di discariche illegali. *GEOmedia*, 11(5).
- Billi, P., Magi, M., & Sagri, M. (1991). Pleistocene lacustrine fan delta deposits of the Valdarno Basin, Italy. *Journal of Sedimentary Research*, 61(2).
- Bini, M., KuKaviCiC, M., & Pappalardo, M. (2012). Interpretazione di immagini satellitari della Pianura di Pisa. *MapPapers*, 5, 212-222.
- Bischetti, G., Simonato, T., & Chiaradia, E. (2004). Valutazione del contributo degli apparati radicali nell'analisi di stabilità e movimenti franosi superficiali. *Rivista di Ingegneria Agraria*, 2004(3), 33-40.
- Bisci, C., & Dramis, F. (1991). Il concetto di attività in Geomorfologia: problemi e metodi di valutazione. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 14, 193-199.
- Bisci, C., Dramis, F., & Gentili, B. (1992). Badlands in the Adriatic side of Central Italy. *Geokoplus*, 3, 55-68.
- Blahut, J., van Westen, C.J., Sterlacchini, S., 2010. Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas. *Geomorphology*, 119(1-2), 36-51.
- Boccaletti M., Coli M., Decandia F.A., Giannini E. & Lazzarotto A.(1981) Evoluzione dell'Appennino Settentrionale secondo un nuovo modello strutturale. *Mem. Soc. Geol.It.*, 21: 359-373.
- Boccaletti M. & Coli M. (Eds) (1982) Carta Strutturale dell'Appennino settentrionale. Scala 1:250.000. C.N.R. Prog. Fin. Geodinamica, Sottoprogramma 5 "Modello Strutturale", Pubbl. n. 429
- Boccaletti M., Cialanfi N., Cosentino D., Deiana G., Gelati R, Lentini F., Massari F., Moratti G., Pescatore T., Ricci Lucchi F. & Tortorici L. (1990a) Palinspastic restoration and paleogeographic reconstruction of the peri-Thyrrhenian area during the Neogene. *Palaeo. Palaeo.*,77:41-50.

Boccaletti M., Calamita F., Deiana G., Gelati R., Massari F., Moratti G. & Ricci Lucchi F. (1990b) Migrating foredeep-thrust belt system in the Northern Apennines and Southern Alps. *Palaeo. Palaeo.*,77:3-14. 104

Boccaletti M., Martelli L. (Coords) 2004. Carta sismo-tettonica della Regione Emilia-Romagna scala 1:250.000 e note illustrative. Selca, Firenze.

Borrelli, L., Greco, R., & Gullà, G. (2007). Weathering grade of rock masses as a predisposing factor to slope instabilities: reconnaissance and control procedures. *Geomorphology*, 87(3), 158-175.

Bortolotti V., Passerini P., Sagri M. & Sestini G. (1970) The miogeosynclinal sequences. In: Sestini G. (Ed). "Development of the Northern Apennines geosyncline". *Sedim. Geol.* 4 (3/4): 341-444.

Bortolotti V., Poccianti G., Principi C. e Sani F. (2010) Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 Foglio 264 "Borgo San Lorenzo" Serv. Geol. d'It. - Regione Emilia-Romagna

Bosi, C., Dramis, F., & Gentili, B. (1985). Carte geomorfologiche di dettaglio ad indirizzo applicativo e carte di stabilità a base geomorfologica. *Geologia Applicata ed Idrogeologia*, 20, 2-53.

Bossio A, Costantini A, Lazzarotto A, Liotta D, Mazzanti R, Mazzei R, Salvatorini G, Sandrelli F (1993a) Rassegna delle conoscenze sul neoautoctono toscano. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, 49:17-98

Bossio A, Mazzei R, Salvatorini, G, Sandrelli F (1993b) Nuovi dati sui depositi Mio-Pliocenici del settore meridionale del Bacino del Fiume Elsa. *Paleopelagos*, 3:97-108

Bouma, A. H., 1962, *Sedimentology of some flysch deposits. A graphic approach to facies interpretation*, 168.

Bourenane, H., Bouhadad, Y., Guettouche, M. S., & Braham, M. (2015). GIS-based landslide susceptibility zonation using bivariate statistical and expert approaches in the city of Constantine (Northeast Algeria). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(2), 337-355).

Bovis, M. J. (1982). Uphill-facing (antislope) scarps in the Coast Mountains, southwest British Columbia. *Geological Society of America Bulletin*, 93(8), 804-812.

Brabb, E.E., 1984. Innovative approaches to landslide hazard mapping: Proceedings 4th International Symposium on Landslides, Toronto, vol. 1, pp. 307-324.

Brenning, A. (2005). Spatial prediction models for landslide hazards: review, comparison and evaluation. *Natural Hazards and Earth System Science*, 5(6), 853-862.

Butler W.H R. (1990) Continental compression. Open university press 1-157.

Byrne, G. F., Crapper, P. F., & Mayo, K. K. (1980). Monitoring land-cover change by principal component analysis of multitemporal Landsat data. *Remote sensing of Environment*, 10(3), 175-184.

Calamita F., Coltorti M., Pieruccini P., Pizzi A., 1999. Evoluzione strutturale e morfogenesi plioquaternaria dell'Appennino umbro-marchigiano tra il pedappennino umbro e la costa adriatica. *Bollettino della Società Geologica Italiana*, 118, 125-139 5.

Cannon, S. H. (2000). Debris-flow response of southern California watersheds burned by wildfire. In *Second International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*.

Cannon, S. H., & Reneau, S. L. (2000). Conditions for generation of fire-related debris flows, Capulin Canyon, New Mexico. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 25(10), 1103-1121.

Capezzuoli, E., Foresi, L.M., Salvatorini, G. & Sandrelli, F. (2005) New data on the Middle Pliocene sedimentation in the southern Valdelsa basin (Siena, Italy). *Boll. Soc. Geol. Ital. Spec. vol.*, 4, 95 - 103.

Capitani, M., Ribolini, A., & Federici, P. R. (2013). Influence of deep-seated gravitational slope deformations on landslide distributions: a statistical approach. *Geomorphology*, 201, 127-134.

Carmignani L, Conti P, Cornamusini G, Meccheri M (2004) The internal Northern Apennines, the northern Tyrrhenian sea and the Sardinia-Corsica block. *Geology of Italy. Special Volume, Italian Geological Society, IGC*, 32:59-77

Carmignani L, Conti P, Cornamusini G, Pirro A (2013) Geological map of Tuscany (Italy). *Journal of Maps*, 9(4):487-497

Carrara, A., & Merenda, L. (1976). Landslide inventory in northern Calabria, southern Italy. *Geological Society of America Bulletin*, 87(8), 1153-1162.

Carrara, A. (1983). Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 15(3), 403-426.

Carrara A., D'Elia B. & Semenza E. (1985) - Classificazione e nomenclatura dei movimenti franosi. *Geologia Applicata e Idrogeologia*, 20, 223-243.

Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., & Reichenbach, P. (1991). GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth surface processes and landforms*, 16(5), 427-445.

Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (1995). GIS technology in mapping landslide hazard. In *Geographical information systems in assessing natural hazards*(pp. 135-175). Springer, Dordrecht.

Carrara, A., Guzzetti, F., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard. *Natural hazards*, 20(2-3), 117-135.

Cavalli, R. M., Merola, P., Pignatti, S., & Poscolieri, M. (2005). Telerilevamento iperspettrale MIVIS per lo studio delle testimonianze antropiche nell'area archeologica di Arpi (FG) Italia. *Riv. Ital. di Telerilevamento*, 33(34), 109-117.

Cavallin, A., Crescenti, U., Dramis, F., Prestininzi, A., & Sorriso, V. (1987). Tipologia e diffusione delle deformazioni gravitative profonde di versante in Italia. *MEMORIE DELLA SOCIETA'GEOLOGICA ITALIANA*, 37, 241-252.

Cerrina Feroni A., Martelli L., Martinelli P., Ottria G. con contributi di Catanzariti R.(2002) Carta geologico-strutturale dell'Appennino emiliano-romagnolo in scala 1:250.000. Regione Emilia-Romagna- C.N.R.- I.G.G.,Pisa, S.EL.CA., Firenze.

Cevik, E., & Topal, T. (2003). GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey). *Environmental geology*, 44(8), 949-962.

Chinaglia, N. A. D. I. A., & Fornero, E. (1995). Ipotesi sulla possibile evoluzione cinematica di un movimento profondo di versante: l'esempio del M. Soran (Trentino meridionale). *Mem. Soc. Geol. Ital*, 50, 101-108.

Chung, C. J. F., Fabbri, A. G., & Van Westen, C. J. (1995). Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation. In *Geographical information systems in assessing natural hazards* (pp. 107-133). Springer, Dordrecht.

Chung, C. J. F., & Fabbri, A. G. (1999). Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 65(12), 1389-1399.

Chung, C. J. F., & Fabbri, A. G. (2003). Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, 30(3), 451-472.

Cibin U., Di Giulio A., Martelli L., Catanzariti R., Poccianti C., Rosselli S. & Sani F. (2004) Factors controlling foredeep turbidite deposition: the case of Northern Appennines (Oligo-Miocene Italy). In : Lomas S. & Joseph P. (Ed) "Confined turbidite systems". Geol. Soc. London Spec. Publ., 222: 115-134.

Coltorti M., Pieruccini P., (1997). The southern east-Tiber Basin (Spoleto, Central Italy): geology and stratigraphy of the Plio-Pleistocene sediments. *Il Quaternario* 10 (2) 159-180.

Coltorti M., Ravani S., Cornamusini G., Ielpi A., & Verrazzani F. (2009). A sagging along the eastern Chianti Mts., Italy. *Geomorphology*, 112(1), 15-26.

Coltorti M, Firuzabadi D, Pieruccini P (2012) Geomorphological map and land units at 1:200,000 scale of the Siena Province (Southern Tuscany, Italy). *Journal of Maps*, 536-551

Conti C. (1993)- Studio biostratigrafico e sedimentologico dei sedimenti pliocenici dell'area nord-orientale del Bacino dell'Elsa (Certaldo). Unpublished Laurea Thesis, Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze, 193 pp.

Cotecchia, V., & Melidoro, G. (1974). Some principal geological aspects of the landslides of southern Italy. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 9(1), 23-32.

Crosta, G.B., Frattini, P., & Agliardi, F. (2013). Deep seated gravitational slope deformations in the European Alps. *Tectonophysics*, 605, 13-33.)

Cruden, D.M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 43(1), 27-29.

Cruden DM, Varnes DJ (1996) Landslides: investigation and mitigation. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides - Investigation and Mitigation*, Washington, DC. National Research Council, Transportation Research Board Special Report, pp 247:36-75

Cruden, D. M. (2000). Some forms of mountain peaks in the Canadian Rockies controlled by their rock structure. *Quaternary International*, 68, 59-65.

Cruden, D. M., Couture, R. (2011). The working classification of landslides: material matters. In Proceedings of 64 th Canadian Geotechnical Conference and (Vol. 14).

Cruden, D., & Lan, H. X. (2015). Using the Working Classification of Landslides to assess the danger from a natural slope. In Engineering Geology for Society and Territory-Volume 2 (pp. 3-12). Springer, Cham.

Dai, F. C., & Lee, C. F. (2002). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42(3-4), 213-228.

Dainelli G. & Videssot P (1930) Il mare pliocenico della Toscana Settentrionale. Mem. Geol. Geogr. di G. Dainelli-PLiocene deposits in Valdeka Basin 285li, 1: Firenze.

Decandia, F. A., Lazzarotto, A., Liotta, D., Cernobori, L., & Nicolich, R. (1998). The CROP3 traverse: insights on post-collisional evolution of Northern Apennines. *Mem. Soc. Geol. It*, 52, 427-439.

Di Maggio, C., Madonia, G., & Vattano, M. (2014). Deep-seated gravitational slope deformations in western Sicily: Controlling factors, triggering mechanisms, and morpho-evolutionary models. *Geomorphology*, 208, 173-189.

Dobesova, Z. (2011, September). Programming language python for data processing. In *Electrical and Control Engineering (ICECE)*, 2011 International Conference on (pp. 4866-4869). IEEE.

Dominici, S. (1994) Regressive-trasgressive cycles from the Pliocene of the San Miniato area (Tuscany, Italy): paleoecology and sequence stratigraphy. In: *Studies on Ecology and Paleocology of Benthic Communities* (Ed. by Matteucci, R., Basso, D. & Tomaselli, V.) *Boll. Soc. Pal. Ital. Spec. vol.*, 2, 117 - 126

Dominici, S., Mazzanti R. & Nencini, C. (1995) Geologia dei dintorni di San Miniato tra l'Arno, l'Elsa e l'Era. *Quad. Mus. St. Nat. di Livorno*, (Suppl. 1), 1 - 35.

Donati, L., & Turrini, M. C. (2002). An objective method to rank the importance of the factors predisposing to landslides with the GIS methodology: application to an area of the Apennines (Valnerina; Perugia, Italy). *Engineering Geology*, 63(3-4), 277-289.

Dramis, F. (1984). Aspetti geomorfologici e fattori genetici delle deformazioni gravitative profonde. *Bollettino della Società Geologica Italiana*, 103(4), 681-687.

- Dramis, F., & Sorriso-Valvo, M. (1995). Deep-seated gravitational slope deformations, related landslides and tectonics. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts* (Vol. 5, No. 32, p. 203A).
- Dramis, F., Govi, M., Guglielmin, M., & Mortara, G. (1995). Mountain permafrost and slope instability in the Italian Alps: the Val Pola landslide. *Permafrost and Periglacial Processes*, 6(1), 73-81.
- Elter, P., Giglia, G., Tongiorgi, M., & Trevisan, L. (1975). Tensional and compressional areas in recent (Tortonian to present) evolution of Northern Apennines. In *Transactions-American Geophysical Union* (Vol. 56, No. 3, pp. 166-166). 2000 Florida Ave NW, Washington, DC 20009: American Geophysical Union.
- Ercanoglu, M., & Gokceoglu, C. (2004). Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey). *Engineering Geology*, 75(3-4), 229-250.
- Ercanoglu, M., Gokceoglu, C., & Van Asch, T. W. (2004). Landslide susceptibility zoning north of Yenice (NW Turkey) by multivariate statistical techniques. *Natural Hazards*, 32(1), 1-23.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102(3), 85-98.
- Finotti, F., Tonelli, A., & Zandonai, F. (2009). Contributo alla fotointerpretazione di rilievi multitemporali a breve periodo in differenti campi applicativi. In *Atti del Workshop in geofisica* (pp. 41-52).
- Fonseca, A., Zêzere, J. L., Madeira, J., Faleh, A., & Sadiki, A. (2010). Deep-seated slope deformation in the headwaters of the Audour River (Central Rif Mountains): morphology, kinematics and present day activity. Conference paper.
- Forcella, F. (1984). The Sackung between Mount Padrio and Mount Varadega, Central Alps, Italy: a remarkable example of slope gravitational tectonics. *Mediterranee*, 51(1), 81-92.
- Goodenough, D. J., Rossmann, K., & Lusted, L. B. (1974). Radiographic applications of receiver operating characteristic (ROC) curves. *Radiology*, 110(1), 89-95.

- Gori S., Falcucci E., Dramis F., Galadini F., Galli P., Giaccio B., Messina P., Pizzi A., Sposato A. & Cosentino D. (2014). Deep-seated gravitational slope deformation, large-scale rock failure, and active normal faulting along Mt. Morrone (Sulmona basin, Central Italy): Geomorphological and paleoseismological analyses. *Geomorphology*, 208, 88-101.
- Grignetti, A., Casacchia, R., & Salvatori, R. (2004). Studio dei cambiamenti di un sistema dunale mediante integrazione di foto aeree e immagini MIVIS e Quickbird. *Studi Costieri*, 8, 111-120.
- Guenther K. & Reutter K.J. (1985) Il significato delle strutture dell'Unità di M. Modino - M. Cervarola tra il passo delle Radici e il M. Falterona in relazione alla tettonica dell'Appennino settentrionale. *Giorn. Geol.*, 47 (1-2): 15-34.
- Guzzetti, F. (2016). Forecasting natural hazards, performance of scientists, ethics, and the need for transparency. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 98(9), 1043-1059.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1), 181-216.
- Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P., & Carrara, A. (2000). Comparing landslide maps: A case study in the upper Tiber River Basin, central Italy. *Environmental management*, 25(3), 247-263.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., Ardizzone, F., (2005). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology* 72, 272-299.
- Guzzetti, F., Galli, M., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., (2006a). Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, central Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 6, 115-131.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., (2006b). Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology* 81, 166-184.
- Hanley, J. A., & McNeil, B. J. (1982). The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. *Radiology*, 143(1), 29-36.
- Hansen, A. (1984). Landslide hazard analysis. *Slope instability*, 523-602.

- Hovland, H. J. (1977). Three-dimensional slope stability analysis method, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 103(GT9), 971-986
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167-194.
- Hutchinson J. N. (1988). General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology: Proc 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, 10-15 July 1988V1, P3-35.
- Hutchinson, J. N. (1995). Landslide hazard assessment. *Landslides*, 1805-1841.
- Jahn, A. (1964). Slope morphological features resulting from gravitation. *Zeitsch. fur Geomorphologie, supplement Band, 5*, 59-72.
- Knapen, A., Kitutu, M. G., Poesen, J., Breugelmans, W., Deckers, J., & Muwanga, A. (2006). Landslides in a densely populated county at the footslopes of Mount Elgon (Uganda): characteristics and causal factors. *Geomorphology*, 73(1-2), 149-165.
- Lee, S., Choi, J., Min, K., (2002). Landslide susceptibility analysis and verification using the Bayesian probability model. *Environmental Geology*, 43(1-2), 120-131.
- Lee, S., Ryu, J. H., Min, K., & Won, J. S. (2003). Landslide susceptibility analysis using GIS and artificial neural network. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 28(12), 1361-1376.
- Lee, S. & Choi, J., (2004). Landslide susceptibility mapping using GIS and the weight-of-evidence model. *International Journal of Geographical Information Science*, 18(8), 789-814.
- Lee, S., & Pradhan, B. (2007). Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, 4(1), 33-41.
- Leroi, E. (1996). Landslide hazard-risk maps at different scales: objectives, tools and developments. *Landslides*, 1, 35-51.
- Magi, M. (1992). Depositi fluviali e di conoidi alluvionali del Pleistocene nell'alta Valle dell'Ombrone (Siena). *Società Geologica Italiana, 76a Riunione Estiva, Riassunti*.

- Magi, M., & Sagri, M. (1996). Aeolian sand sheets and terminal fans: Sedimentological evidences of arid climate conditions in the Plio-Pleistocene Valdarno Basin (Northern Apennines, Italy). In 17th Regional African European Meeting of Sedimentology, IAS Sfax, abstracts (pp. 172-173).
- Magliulo, P., Di Lisio, A., Russo, F., & Zelano, A. (2008). Geomorphology and landslide susceptibility assessment using GIS and bivariate statistics: a case study in southern Italy. *Natural hazards*, 47(3), 411-435.
- Magliulo, P., Di Lisio, A., & Russo, F. (2009). Comparison of GIS-based methodologies for the landslide susceptibility assessment. *Geoinformatica*, 13(3), 253-265.
- Malamud, B. D., Turcotte, D. L., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2004). Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6), 687-711.
- Martelli L. (2002) Note illustrative della Carta Geologica d'Italia a scala 1:50.000. Foglio 265 "Bagno di Romagna". Serv. Geol. d'It. - Regione Emilia-Romagna, 106 pp.
- Martini, I. P., & Sagri, M. (1993). Tectono-sedimentary characteristics of Late Miocene-Quaternary extensional basins of the Northern Apennines, Italy. *Earth-Science Reviews*, 34(3), 197-233.
- McGill, R., Tukey, J. W., & Larsen, W. A. (1978). Variations of box plots. *The American Statistician*, 32(1), 12-16.
- Meijerink A.M.J., 1988. Data acquisition and data capture through terrain mapping units. *ITC Jour.*, v. 1988:1,23-44.
- Meinhardt, M., Fink, M., & Tünschel, H. (2015). Landslide susceptibility analysis in central Vietnam based on an incomplete landslide inventory: Comparison of a new method to calculate weighting factors by means of bivariate statistics. *Geomorphology*, 234, 80-97.
- Mejia-Navarro, M., & Wohl, E. E. (1994). Geological hazard and risk evaluation using GIS: methodology and model applied to Medellin, Colombia. *Bulletin of the association of engineering geologists*, 31(4), 459-481.
- Mergili, M., Marchesini, I., Rossi, M., Guzzetti, F., & Fellin, W. (2014a). Spatially distributed three-dimensional slope stability modelling in a raster GIS. *Geomorphology*, 206, 178-195.

- Mergili, M., Marchesini, I., Alvioli, M., Metz, M., Schneider-Muntau, B., Rossi, M., & Guzzetti, F. (2014b). A strategy for GIS-based 3-D slope stability modelling over large areas. *Geoscientific Model Development*, 7(6), 2969-2982.
- Merla G. & Abbate E. (1967). Note illustrative della Carta Geologica d'Italia. Foglio 114 "Arezzo". Servizio Geol.It., 52 pp
- methods at large scales: Application to a complex mountainous environment. *Geomorphology*, 92(1-2), 38-59.
- Montgomery, D. R., & Dietrich, W. E. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water resources research*, 30(4), 1153-1171.
- Munyati, C. (2000). Wetland change detection on the Kafue Flats, Zambia, by classification of a multitemporal remote sensing image dataset. *International journal of remote sensing*, 21(9), 1787-1806.
- Nandi, A., & Shakoor, A. (2010). A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Engineering Geology*, 110(1-2), 11-20.
- Nappi, R., De Riggi, S., Augusti, V., Pesce, S., & Lombardi, N. (2008, October). Approccio metodologico per l'individuazione di siti potenzialmente inquinati attraverso l'integrazione di dati multiparametrici, in ambiente GIS: un esempio di applicazione al Comune di Marigliano (Napoli). In *Atti 12a Conferenza Nazionale ASITA*.
- Nemčok A. – Pašek J. (1969): Deformácie horských svahov (in Slovak). *Geol. Práce, Spr.* 50, 5-28.
- Nemcok, A. (1972). Gravitational slope deformation in high mountains. *Proc. 24th, Int. Geol. Congr., Motreal, 1972*, 132-141.
- Neuhäuser, B., Terhorst, B., 2007. Landslide susceptibility assessment using "weights-of-evidence" applied to a study area
- Nielsen, T. H., & Brabb, E. E. (1977). Slope stability studies in the San Francisco Bay region, California. *Reviews in Engineering Geology-GSA*, 3, 235-243.
- Ohlmacher, G. C., & Davis, J. C. (2003). Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA. *Engineering geology*, 69(3-4), 331-343.

- Oztekin, B., & Topal, T. (2005). GIS-based detachment susceptibility analyses of a cut slope in limestone, Ankara – Turkey. *Environmental geology*, 49(1), 124-132.
- Pachauri, A. K., & Pant, M. (1992). Landslide hazard mapping based on geological attributes. *Engineering geology*, 32(1-2), 81-100.
- Pascucci V, Merlini S, Martini IP (1999) Seismic stratigraphy of the Miocene-Pleistocene sedimentary basins of the Northern Tyrrhenian Sea and western Tuscany (Italy). *Basin Research*, 11(4):337-356.
- Pellicani, R., Frattini, P., & Spilotro, G. (2014). Landslide susceptibility assessment in Apulian Southern Apennine: heuristic vs. statistical methods. *Environmental earth sciences*, 72(4), 1097-1108.
- Piacentini, D., Troiani, F., Soldati, M., Notarnicola, C., Savelli, D., Schneiderbauer, S., & Strada, C. (2012). Statistical analysis for assessing shallow-landslide susceptibility in South Tyrol (south-eastern Alps, Italy). *Geomorphology*, 151, 196-206
- Pieruccini, P. & Coltorti M. (2010). Il Monte Carpegna (marche settentrionali): un atlante dei grandi movimenti franosi. *Geologia dell' Ambiente*.
- Popescu, M. E. (2002, July). Landslide causal factors and landslide remedial options. In 3rd International Conference on Landslides, Slope Stability and Safety of Infra-Structures (pp. 61-81).
- Potter, K., Hagen, H., Kerren, A., & Dannenmann, P. (2006). Methods for presenting statistical information: The box plot. *Visualization of large and unstructured data sets*, 4, 97-106.
- Pradhan, B. (2010). Landslide susceptibility mapping of a catchment area using frequency ratio, fuzzy logic and multivariate logistic regression approaches. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 38(2), 301-320.
- Pradhan, B., & Lee, S. (2010). Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models. *Environmental Earth Sciences*, 60(5), 1037-1054.
- Radbruch-Hall, D. H., & Crowther, K. C. (1973). Map showing areas of estimated relative amounts of landslides in California (No. 747).

- Radbruch-Hall, D. H., Varnes, D. J., & Savage, W. Z. (1976). Gravitational spreading of steep-sided ridges ("sackung") in Western United States. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 13(1), 23-35.
- Radbruch-Hall, D., Varnes, D. J., & Colton, R. B. (1977). Gravitational spreading of steep-sided ridges ("sackung") in Colorado. *Journal of research of the US Geological Survey*, 5(3), 359-363.
- Rautela, P., & Lakhera, R. C. (2000). Landslide risk analysis between Giri and Tons rivers in Himachal Himalaya (India). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2(3-4), 153-160.
- Rickli, C., & Graf, F. (2009). Effects of forests on shallow landslides—case studies in Switzerland. *For Snow Landsc Res*, 82(1), 33-44.
- Rotaru, A., Oajdea, D., & Răileanu, P. (2007). Analysis of the landslide movements. *International Journal of Geology*, 1(3), 70-79.
- Ruff, M., & Czurda, K. (2008). Landslide susceptibility analysis with a heuristic approach in the Eastern Alps (Vorarlberg, Austria). *Geomorphology*, 94(3-4), 314-324.
- Sanesi G. (1965) *Geologia e morfologia dell'antico bacino lacustre del Mugello (FIRENZE)*. *Boll. Soc.Geol.It.* 84 (3)Pisa.
- Sauchyn, D. J., Cruden, D. M., & Hu, X. Q. (1998b). Structural control of the morphometry of open rock basins, Kananaskis region, Canadian Rocky Mountains. *Geomorphology*, 22(3-4), 313-324.
- Savage, W. Z., & Varnes, D. J. (1987). Mechanics of gravitational spreading of steep-sided ridges («sackung»). *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 35(1), 31-36.
- Serri G., Innocenti F. & Manetti P. (1993) Geochemical and petrological evidence of the subduction of delaminated Adriatic continental lithosphere in the genesis of the Neogene-Quaternary magmatism of Central Italy. *Tectonophysics*, 223: 117-147.
- Serri G., Innocenti F. & Manetti P. (2001) Magmatism from mesozoic to present: petrogenesis, time-space distribution and geodynamic implication. In: Vai G.B., Martini I.P., (Eds) *Anatomy*

of an Orogen: the Appennines and the Adjacent Mediterranean Basins. Kluwer. Dordrecht, The Netherlands, pp. 77-104.

Sestini, A. (1936). *Stratigrafia dei terreni fluvio-lacustri del Valdarno Superiore*. V. Lischi.

Shahabi, H., Khezri, S., Ahmad, B. B., & Hashim, M. (2014). Landslide susceptibility mapping at central Zab basin, Iran: a comparison between analytical hierarchy process, frequency ratio and logistic regression models. *Catena*, 115, 55-70.

Soeters, R., van Westen, C.J., 1996. Slope instability recognition analysis and zonation. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), *Landslide Investigation and Mitigation*, National Research Council. Transportation Research Board Special Report, vol. 247. National Academy Press, Washington, D.C., pp. 129-177.

Sorriso-Valvo, M. (1979). Trench features on steep-sided ridges of Aspromonte, Calabria (Italy). In *Proc. Polish-Italian Seminar on Superficial Mass Movement* (pp. 98-109).

Sorriso-Valvo, M. (1988). Studi sulle deformazioni gravitative profonde di versante in Italia. *Mem. Soc. Geol. Ital*, 41, 877-888.

Steinacher, R., Medicus, G., Fellin, W., & Zangerl, C. (2009). The influence of deforestation on slope (in-) stability. *Austrian journal of earth sciences*, 102(2).

Strahler, A.N. (1952), "Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topology", *Geological Society of America Bulletin* 63 (11): 1117-1142.

Süzen, M. L., & Doyuran, V. (2004a). A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental geology*, 45(5), 665-679.

Süzen M. L. and Doyuran V., (2004b). Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyucatchment, Turkey, *Eng.Geol.*, 71, 303-321.

Swets JA (1988) Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science* 240(4857):1285- 1293. doi:10.1126/science.3287615

Tating, F. F., Hack, H. R. G. K., & Jetten, V. (2015). Landslide susceptibility assessment using information value statistical method: a case study on northern Kota Kinabalu, Sabah. *Malaysian journal of remote sensing and GIS*, 4(2), 92-109.

Terzaghi, K. (1950). *Mechanisms Of Landslides*. Geological Society of America, Berkley, 83-123.

Thierry, Y., Malet, J.P., Sterlacchini, S., Puissant, A., Maquaire, O., 2007. Landslide susceptibility assessment by bivariate

Trigila, A., & Iadanza, C. (2007). *Statistiche nazionali ed elaborazioni dati del Progetto IFFI*. APAT (2007), *Rapporto sulle frane in Italia. Il Progetto IFFI: metodologia, risultati e rapporti regionali*. Rapporti, 78, 2007.

Tsukamoto, Y. (1990). Effect of vegetation on debris slide occurrences on steep forested slopes in Japan Islands. Research needs and applications to reduce erosion and sedimentation in tropical steeplands. *International Association of Hydrological Sciences*, 183-191.

Uromeihy, A., & MahdaviFar, M. R. (2000). Landslide hazard zonation of the Khorshrostan area, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58(3), 207-213.

Van Westen, C. J. (1993). Application of geographic information systems to landslide hazard zonation. ITC publication No. 15, International institute for aerospace and earth res. surv., Enschede, The Netherlands, pp 245

Van Westen, C. J. (1997). Statistical landslide hazard analysis. *ILWIS*, 2, 73-84.

Van Westen, C. J. (2016). National scale landslide susceptibility assessment for Grenada. *Caribbean Handbook on Risk Information Management*, World Bank GFDRR, ACP-EU Natural Disaster Risk Reduction.

Van Westen, C. J., Rengers, N., Terlien, M. T. J., & Soeters, R. (1997). Prediction of the occurrence of slope instability phenomenon through GIS-based hazard zonation. *Geologische Rundschau*, 86(2), 404-414.

Van Westen, C. J., Rengers, N., & Soeters, R. (2003). Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural hazards*, 30(3), 399-419.

Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview. *Engineering geology*, 102(3-4), 112-131.

Varnes, D. J. (1958). Landslide types and processes. *Landslides and engineering practice*, 24, 20-47.

- Varnes DJ (1978). Slope movement types and processes. *Special report*, 176:11-33
- Wang, L. J., Guo, M., Sawada, K., Lin, J., & Zhang, J. (2015). Landslide susceptibility mapping in Mizunami City, Japan: a comparison between logistic regression, bivariate statistical analysis and multivariate adaptive regression spline models. *Catena*, 135, 271-282.
- Wang, Q., Wang, D., Huang, Y., Wang, Z., Zhang, L., Guo, Q., Guo Q., Chen W., Chen W. & Sang, M. (2015). Landslide susceptibility mapping based on selected optimal combination of landslide predisposing factors in a large catchment. *Sustainability*, 7(12), 16653-16669.
- Williams, G. D., Powell, C. M., & Cooper, M. A. (1989). Geometry and kinematics of inversion tectonics. *Geological Society, London, Special Publications*, 44(1), 3-15.
- Williamson, D. F., Parker, R. A., & Kendrick, J. S. (1989). The box plot: a simple visual method to interpret data. *Annals of internal medicine*, 110(11), 916-921.
- WP/WLI (1990) A suggested method for reporting a landslide. *Bull Inter Assoc Eng Geol* 41:5-12
- WP/WLI (1991) A suggested method for a landslide summary. *Bull Intern Assoc Eng Geol* 43:101-110.
- WP/WLI (1993a) A suggested method for describing the activity of a landslide. *Bull Intern Assoc Eng Geol*, 47:53-57.
- WP/WLI (1993b) *Multilingual Landslide Glossary*. Bitech, Richmond, British Columbia.
- WP/WLI (1994) A suggested method for describing the causes of a landslide. *Bull Intern Assoc Eng Geol* 50:71-74.
- WP/WLI (1995) A suggested method for describing the rate of movement of a landslide. *Bull Inter Assoc Eng Geol* 52:75-78.
- Xie, M., Esaki, T., & Zhou, G. (2004). GIS-based probabilistic mapping of landslide hazard using a three-dimensional deterministic model. *Natural Hazards*, 33(2), 265-282.
- Xie, M., Esaki, T., Qiu, C., & Wang, C. (2006). Geographical information system-based computational implementation and application of spatial three-dimensional slope stability analysis. *Computers and Geotechnics*, 33(4), 260-274.

- Yalcin, A. (2008). GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations. *Catena*, 72(1), 1-12.
- Yalcin, A., & Bulut, F. (2007). Landslide susceptibility mapping using GIS and digital photogrammetric techniques: a case study from Ardesen (NE-Turkey). *Natural Hazards*, 41(1), 201-226.
- Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, A. C., & Yomralioglu, T. (2011). A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena*, 85(3), 274-287.
- Yilmaz, I. (2009). Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: a case study from Kat landslides (Tokat–Turkey). *Computers & Geosciences*, 35(6), 1125-1138.
- Yin, K. J. & Yan, T.Z. (1988). Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks. In: Bonnard, C. (Ed.), *Landslides. Proc. 5th Int. Symp. Landslides*, Balkema, Rotterdam, pp. 1269 – 1272.
- Yuan, F., Sawaya, K. E., Loeffelholz, B. C., & Bauer, M. E. (2005). Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) Metropolitan Area by multitemporal Landsat remote sensing. *Remote sensing of Environment*, 98(2-3), 317-328.
- Zezeze, J.L. (2002). Landslide susceptibility assessment considering landslide typology. A case study in the area north of Lisbon (Portugal). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2: 73-82.a
- Zhang, G., Cai, Y., Zheng, Z., Zhen, J., Liu, Y., & Huang, K. (2016). Integration of the statistical index method and the analytic hierarchy process technique for the assessment of landslide susceptibility in Huizhou, China. *Catena*, 142, 233-244
- Zhou, C. H., Lee, C. F., Li, J., & Xu, Z. W. (2002). On the spatial relationship between landslides and causative factors on Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 43(3-4), 197-207.
- Zischinsky, U. (1966). On the deformation of high slopes. In 1st ISRM Congress. International Society for Rock Mechanics.
- Zischinsky, U. (1969). Über sackungen. *Rock Mechanics*, 1(1), 30-52.

Zoran, M., & Anderson, E. (2006). The use of multi-temporal and multispectral satellite data for change detection analysis of the Romanian Black Sea coastal zone. *Journal of optoelectronics and advanced materials*, 8(1), 252.

11 Sitografia

<http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/cartoteca.html>

http://www.regione.toscana.it/bancadati/atti/Contenuto.xml?id=5144092&nomeFile=Decreto_n.4505_del_10-04-2017-Allegato-A

<http://www.slopestability.org/>

12 Pubblicazioni

Tognaccini S. (2019). The proposed Geosite of Volano landslide and a geomorphological itinerary within the Valdelsa basin (Montespertoli, Tuscany, Italy). *Geoheritage*

Tognaccini, S., Tavarnelli, E., and Alessandro Montanari, A., (2019). Synsedimentary deformation in Upper Cretaceous–Lower Paleogene limestones within a thrust anticline of the Umbria-Marche Apennines, Italy, in Koeberl, C., and Bice, D.M., eds.; *Geological Society of America Special Paper 542*, p. 1–16, [https://doi.org/10.1130/2019.2542\(11\)](https://doi.org/10.1130/2019.2542(11)).

Coltorti, M., & Tognaccini, S. (2019). The gravitational landscape of Montespertoli (Valdelsa Basin, Tuscany, Italy): State of activity and characteristics of complex landslides. *Geomorphology*, 340, 129-142.

Ringraziamenti

A prescindere da come andrà questo percorso di Dottorato, vorrei comunque ringraziare le persone che hanno avuto maggiormente significato in questo percorso di ricerca.

Vorrei porgere i miei più sentiti ringraziamenti al Professore Enrico Tavarnelli, per l'enorme supporto fornitomi durante gli anni trascorsi all'Università di Siena. Senza il suo continuo sostegno ed incitamento probabilmente non avrei potuto avere le stesse soddisfazioni e non avrei realizzato molti dei miei sogni nel cassetto. Lo Ringrazio per aver sempre creduto nell'importanza del mio lavoro e per avermi saputo aiutare nel giusto momento, con le giuste parole. Grazie per aver permesso e supportato, anche economicamente, la pubblicazione del mio primo articolo

Un sentito ringraziamento anche a Water Alvarez e alla moglie Milly, per la cordialità e generosità nella condivisione della loro immensa cultura e conoscenza e per avermi incoraggiato a continuare e terminare questo lungo percorso.

Ringrazio anche Alessandro Montanari, ricercatore e docente unico nel suo genere (sempre pronto a condividere aneddoti geologici), che mi ha sostenuta ed incoraggiata nella realizzazione della mia prima pubblicazione.

Infine ringrazio tutti i miei compagni e colleghi di Dottorato, che hanno condiviso con me ogni genere di esperienza, sul campo e fuori. In particolare, un ringraziamento speciale va a Enrico D'Addario, Davide Susini, Laura Pastonchi ed Elisa Mammoliti, che mi hanno dedicato il loro tempo e concesso il loro aiuto. Con loro ho avuto modo di confrontare le mie idee e indecisioni, e mi hanno saputo dare il giusto appoggio nei momenti difficili.

Ringrazio anche chi non ha creduto in me, perché il suo disinteresse e la sua indifferenza mi hanno fortificata, dandomi l'opportunità di spingermi a superare i miei limiti.

Ringrazio infine, mamma, babbo e Nico, che hanno tollerato tutti i miei malumori e che condivideranno con me tutti i miei traguardi futuri.