

# VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DA FRANA NEL TERRITORIO DEL COMUNE DI MESSINA

C. PUGLISI, L. FALCONI, S. GRAUSO, A. SCREPANTI, V. VERRUBBI, A. ZINI  
ENEA - Unità Tecnica Caratterizzazione, Prevenzione e Risanamento Ambientale  
Laboratorio Prevenzione Rischi Naturali e Mitigazione Effetti  
Centro Ricerche Casaccia, Roma

C. CROVATO  
ENEA - Unità Tecnica Caratterizzazione, Prevenzione e Risanamento Ambientale  
Laboratorio di Geochimica  
Centro Ricerche Casaccia, Roma

D. CAMPOLO, G. LEONI, S. LUMACA, S. MALERBA  
Geomineco s.r.l.  
Via Volturmo, 7 - 00185 Roma, Italia

E. BRUSTIA, V. COMERCI, M. LUCARINI  
ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale  
Via Vitaliano Brancati, 48 - 00144 Roma, Italia

R. NAPOLI  
CRA-RPS - Centro di Ricerca per lo Studio delle relazioni fra pianta e suolo  
Via della Navicella, 2-4 - 00184 Roma, Italia

A. TORRE, P. PINO  
Liberi professionisti



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,  
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

# VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DA FRANA NEL TERRITORIO DEL COMUNE DI MESSINA

C. PUGLISI, L. FALCONI, S. GRAUSO, A. SCREPANTI, V. VERRUBBI, A. ZINI  
ENEA - Unità Tecnica Caratterizzazione, Prevenzione e Risanamento Ambientale  
Laboratorio Prevenzione Rischi Naturali e Mitigazione Effetti  
Centro Ricerche Casaccia, Roma

C. CROVATO  
ENEA - Unità Tecnica Caratterizzazione, Prevenzione e Risanamento Ambientale  
Laboratorio di Geochimica  
Centro Ricerche Casaccia, Roma

D. CAMPOLO, G. LEONI, S. LUMACA, S. MALERBA  
Geomineco s.r.l.  
Via Volturmo, 7 - 00185 Roma, Italia

E. BRUSTIA, V. COMERCI, M. LUCARINI  
ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale  
Via Vitaliano Brancati, 48 - 00144 Roma, Italia

R. NAPOLI  
CRA-RPS - Centro di Ricerca per lo Studio delle relazioni fra pianta e suolo  
Via della Navicella, 2-4 - 00184 Roma, Italia

A. TORRE, P. PINO  
Liberi professionisti

### **Autori per capitolo**

- **Capitolo 1** - Falconi, Puglisi
- **Capitolo 2** - Campolo, Lumaca, Pino, Puglisi, Torre
- **Capitolo 3** - Campolo, Leoni, Lumaca, Torre
- **Capitolo 4** - Puglisi, Screpanti
- **Capitolo 5** - Brustia, Comerci, Falconi, Lucarini, Malerba
- **Capitolo 6** - Campolo, Falconi, Leoni, Lumaca, Malerba, Puglisi, Torre
- **Capitolo 7** - Falconi, Leoni, Puglisi
- **Capitolo 8** - Grauso, Leoni, Verrubbi, Zini
- **Capitolo 9** - Falconi, Leoni, Puglisi
- **Capitolo 10** - Crovato, Falconi, Malerba, Napoli

Si desidera ringraziare il dott. Carmelo Gioè, del Comune di Messina, il dott. Biagio Privitera, della Provincia di Messina, il dott. Giuseppe Basile, il dott. Federico Calvi, l'ing. Salvatore Cirone, l'ing. Francesco Falcone e l'ing. Teodoro Vega, della Regione Siciliana, per il gentile e prezioso supporto tecnico e logistico alle attività condotte.

I Rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina <http://www.enea.it/it/produzione-scientifica/rapporti-tecnici>

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia.

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

## **VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DA FRANA NEL TERRITORIO DEL COMUNE DI MESSINA**

C. PUGLISI, E. BRUSTIA, D. CAMPOLO, V. COMERCI, C. CROVATO, L. FALCONI, S. GRAUSO, G. LEONI, M. LUCARINI, S. LUMACA, S. MALERBA, R. NAPOLI, P. PINO, A. SCREPANTI, A. TORRE, V. VERRUBBI, A. ZINI

### **Abstract**

*The project results of the study led by ENEA in the area of the Messina Municipality is presented in this paper. After the disaster occurred on October 1st 2009, the Messina Municipality asked our team to carry on the landslide hazard assessment of its whole territory. The project actions have been addressed to realize a landslide inventory, a triggering areas and runout susceptibility map, an assessment of debris-mud flows intensity and to identify triggering thresholds of debris-mud flows. The study constitutes a contribute to the development of a quantitative geomorphological approach in landslide investigation and an effective decision support system for sustainable urban planning of the area.*

**Key words:** *landslides, susceptibility, inventory, hazard, intensity, rainfall threshold, Peloritani Mountains, Messina, Sicily*

### **Riassunto**

In questo documento viene presentata una sintesi dei risultati del progetto condotto da ENEA nella zona del Comune di Messina. Dopo il disastro del 1° ottobre 2009, il Comune di Messina chiese al nostro team di effettuare una valutazione del pericolo di frana su tutto il suo territorio. Le azioni del progetto sono state mirate a realizzare un inventario dei fenomeni franosi, una mappa della suscettibilità delle aree d'innesco e di recapito, una valutazione dell'intensità delle colate rapide e delle soglie d'innesco delle colate rapide. Lo studio costituisce un contributo allo sviluppo di un approccio geomorfologico quantitativo nello studio delle frane e un efficace sistema di supporto alle decisioni per la pianificazione urbana sostenibile dell'area.

**Parole chiave:** frane, suscettibilità, inventario, pericolosità, intensità, soglie d'innesco pluviometriche, Monti Peloritani, Messina, Sicilia



## INDICE

1. INTRODUZIONE.....	7
2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO.....	10
2.1 Inquadramento geologico-strutturale dei Monti Peloritani .....	10
2.2 Inquadramento geomorfologico del comune di Messina .....	16
2.3 Pericolosità geomorfologica locale .....	17
2.1 Bibliografia.....	18
3. PROGETTO GIS .....	20
3.1 Georeferenziazione e formato dei dati .....	20
3.2 Analisi GIS del rilievo.....	22
3.3 Digitalizzazione cartografia geologica.....	23
3.4 Carta litologica vettoriale .....	23
3.5 Bibliografia.....	26
4. CAMPAGNA GPS .....	27
4.1 Misure di campo.....	27
4.2 Analisi del Rilievo DGPS .....	39
4.3 Bibliografia.....	49
5. ARCHIVIO STORICO .....	50
5.1 L'archiviazione dei fenomeni franosi .....	51
5.2 L'archivio storico delle frane del Comune di Messina .....	51
5.2.1 Le fonti .....	52
5.2.2 Completezza dell'archivio .....	53
5.2.3 Struttura dell'archivio .....	53
5.3 Elaborazione ed analisi dei dati raccolti.....	55
5.3.1 Archivio generale .....	55
5.3.2 Archivio 1908 .....	60
5.4 Bibliografia.....	64
5.4.1 Generale.....	64
5.4.2 Riferimenti bibliografici dei documenti consultati per l'Archivio Generale .....	65
5.4.3 Riferimenti bibliografici dei documenti relativi all'Archivio 1908 .....	65
6. INVENTARIO DEI FENOMENI FRANOSI .....	66
6.1 Crolli.....	68
6.2 Colate rapide .....	71
6.3 Scorrimenti rotazionali .....	79
6.4 Scorrimenti traslazionali .....	82
6.5 Censimento dei fenomeni avvenuti fuori dall'area di studio .....	85
6.6 Bibliografia.....	87
7. SUSCETTIBILITÀ ALL'INNESCO .....	89
7.1 La metodologia ENEA .....	90
7.2 Applicazione nell'ambito dell'Accordo di Programma ENEA – Comune di Messina.....	90
7.2.1 Parametri discriminanti e fattori predisponenti .....	90
7.3 Suscettibilità.....	100
7.3.1 Suscettibilità ai crolli .....	101

7.3.2	Suscettibilità alle colate rapide .....	102
7.3.3	Suscettibilità agli scorrimenti rotazionali .....	102
7.3.4	Suscettibilità agli scorrimenti traslazionali.....	102
7.4	Bibliografia.....	107
8.	ERODIBILITA' DEL SUOLO E COLATE RAPIDE DI FANGO E DETRITO .....	109
8.1	Calcolo dell'indice di erosione .....	110
8.1.1	Descrizione della metodologia .....	110
8.1.2	Carta dell'erosione del Comune di Messina.....	112
8.2	Correlazione con le aree di innesco delle colate rapide .....	117
8.2.1	Considerazioni statistiche preliminari .....	117
8.2.2	Considerazioni sulla tecnica statistica adottata .....	119
8.3	Risultati .....	120
8.3.1	Indici statistici della regressione e accuratezza del modello .....	121
8.3.2	Verifica degli assunti di base.....	122
8.3.3	Validazione.....	124
8.4	Conclusioni.....	128
8.5	Bibliografia.....	128
9.	VALUTAZIONE DELLA DISTANZA DI PROPAGAZIONE ( <i>RUNOUT</i> ) E DELL'INTENSITÀ DELLE COLATE RAPIDE.....	130
9.1	Distanza di propagazione delle colate rapide .....	130
9.2	Intensità .....	133
9.3	Bibliografia.....	135
10.	SOGLIE D'INNESCO DELLE COLATE RAPIDE.....	136
10.1	Soglie pluviometriche giornaliere .....	136
10.2	Soglie pluviometriche e di saturazione del suolo su base oraria.....	146
10.3	Bibliografia.....	158

## 1. INTRODUZIONE

In seguito ai fenomeni avvenuti il 01 ottobre 2009 nell'area del messinese il Laboratorio Prevenzione Rischi Naturali e Mitigazione Effetti dell'Unità Tecnica Caratterizzazione, Prevenzione e Risanamento ambientale (UTPRA-PREV) dell'ENEA, nell'ambito dei rapporti di collaborazione con la Protezione Civile Nazionale, ha inviato il dr. Claudio Puglisi sui luoghi colpiti per effettuare sopralluoghi e valutazioni del rischio residuo a carico delle infrastrutture e dei centri abitati. In questo contesto il dr. Puglisi è stato coinvolto dalla Protezione Civile, dalla Provincia e dal Comune di Messina (Prot: ENEA/2009/ 51707 /ACS PROT PREV) nelle attività relative alla Funzione 1. La collaborazione è stata anche accolta come occasione di sviluppo e verifica delle metodologie messe a punto da oltre un decennio, prima da PROT-PREV, poi da UTPRA-PREV, inerenti la pericolosità da frana. In seguito a tali collaborazioni in atto e pregresse e viste le competenze specifiche esistenti, il giorno 28.02.2011 è stato sottoscritto un Accordo di Programma tra ENEA e Comune di Messina per la realizzazione di uno studio sulla valutazione della pericolosità da frana nel territorio del Comune di Messina.

La metodologia ENEA adottata nello studio, parte dalla definizione della pericolosità da frana proposta nel rapporto UNESCO del 1984, e largamente condivisa dalla comunità scientifica:

"probabilità di occorrenza di un fenomeno di una certa intensità in una determinata area ed in un determinato periodo di tempo".

Come si evince dalla definizione, la valutazione della pericolosità comporta una analisi di tipo predittivo volta, cioè, a potenziali eventi futuri, tramite la risposta a tre domande che la definizione stessa implicitamente contempla:

1. dove in futuro si può verificare un potenziale fenomeno (propensione al dissesto/suscettibilità)?
2. con quale intensità si manifesterà?
3. in che intervallo di tempo?

La soluzione a questi tre interrogativi è materia molto complessa ed è stata affrontata in toto in studi prototipali confinati al mondo della ricerca ed in parte in strumenti di gestione del rischio approntati dalle amministrazioni competenti. Le metodologie sviluppate, tuttavia, non hanno ancora condotto all'identificazione di procedure univoche e condivise a livello nazionale né tantomeno indirizzate a rispondere integralmente alle tre domande sopra riportate.

La prima stesura dei Piani di Assetto Idrogeologico (PAI), ad esempio, redatti dalle varie Autorità di Bacino secondo quanto sancito dal DL 180/98 e successive integrazioni e modificazioni, vennero indirizzati principalmente alla discretizzazione del territorio sulla base del differente grado di propensione al dissesto. Si è proceduto quindi a dare una risposta esclusivamente al primo quesito. È da sottolineare, tuttavia, come questa risposta fosse ancora non completamente esaustiva a causa dell'approccio metodologico imposto dal DPCM 29/09/98, Atto di indirizzo e coordinamento dello stesso DL 180/98. Infatti questo specificava come l'approccio da usare per valutare la pericolosità ed il rischio fosse quello di: "assumere quale elemento essenziale per l'individuazione del livello di pericolosità, la localizzazione (...) di eventi del passato (...)", tralasciando per ragioni di urgenza il calcolo della probabilità di accadimento in aree mai interessate in epoca storica da fenomeni. Questo approccio ha comportato che, contrariamente alla definizione di pericolosità, i primi elaborati redatti dalle Autorità di Bacino indicassero quali aree pericolose esclusivamente quelle interessate da fenomeni di riattivazione. Ciò costituisce una grave limitazione della esaustività degli strumenti di pianificazione territoriale specifici soprattutto quando si fa riferimento a fenomeni quali le colate rapide di fango e detrito, responsabili delle catastrofi geomorfologiche che hanno interessato l'Italia negli ultimi quindici anni, che per loro stesse caratteristiche di evoluzione

geomorfologica si esplicano con meccanismi neofornativi, interessando in ogni attivazione, quasi esclusivamente, parti diverse di versante.

Successivamente, alcune Autorità di bacino, consapevoli della parzialità degli studi precedentemente condotti, hanno aggiornato i Piani di Assetto Idrogeologico sulla base di metodologie più complesse che, seppur difformi fra loro, prendessero in considerazione non solo i fenomeni di riattivazione e permettessero anche di valutare quali aree del territorio italiano fossero suscettibili a fenomeni franosi di neoformazione.

Conformemente al DL 180/98 ed al DPCM 29/09/98, le Autorità di Bacino hanno, con poche eccezioni, tralasciato l'obiettivo di dare risposta agli altri due quesiti. Inoltre, le sostanziali differenze metodologiche utilizzate per la stesura dei PAI hanno reso i risultati degli studi particolarmente difformi e quindi non paragonabili tra loro, con conseguente difficoltà da parte dell'amministrazione centrale dello Stato nel distribuire i fondi per la mitigazione del rischio secondo una scala di priorità oggettive. In ultimo, appare necessario sottolineare che, contrariamente a quanto sancito dal DL 180/98, per valutare la pericolosità occorre effettuare lavori di estremo dettaglio (scala massima 1:10.000), dato che le analisi effettuate a scala non di dettaglio rischiano di avere esclusivamente una valenza statistica generale, ma non possono neanche indicare le aree critiche in cui dettagliare le analisi.

Gli studi condotti da ENEA negli ultimi quindici anni, nascono dall'intento di:

- superare l'approccio esclusivamente inventaristico per la definizione delle aree pericolose, ancora adottato da diverse Autorità di Bacino (ora trasformate in Autorità di Distretto dal Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n.152);
- contribuire a sviluppare una robusta metodologia di analisi della suscettibilità basata su di un insieme complesso di fattori di carattere naturale ed antropico che permettano di valutare la suscettibilità sia per i processi di riattivazione che di neoformazione;
- proporre approcci innovativi capaci di stimare l'intensità in termini energetici sia di eventi occorsi in passato (*back analysis*), sia di eventi che possono innescarsi nelle aree a maggiore suscettibilità;
- fornire un contributo alla definizione delle soglie di innesco utili alla predisposizione di sistemi di allerta rapida.

Il fine ultimo è l'identificazione di metodologie ad uso soprattutto della Pubblica Amministrazione, rigorose dal punto di vista scientifico ma di facile applicazione, in grado di effettuare una valutazione integrale della pericolosità da frana dando risposta alle tre domande sopra riportate. Un approccio quale quello proposto nell' Accordo di Programma tra ENEA e Comune di Messina, conformemente a quanto fin qui esposto, , porta alla redazione di carte di pericolosità intese come dato propedeutico a tutte le successive fasi di valutazione del rischio atteso e quindi costituisce uno strumento di base per:

- le politiche di pianificazione territoriale sostenibile;
- la gestione del rischio (piani di protezione civile);
- l'analisi sitologica;
- la definizione degli interventi strutturali e non volti, alla mitigazione del rischio.

Nell'ambito dell'analisi della pericolosità da frana nel territorio del comune di Messina, una notevole rilevanza ha avuto lo studio dei processi di versante di carattere superficiale denominati "colate rapide di fango e/o detrito". A questo tipo di fenomeni va imputata la quasi totalità di vittime avute in occasione dei più recenti eventi franosi sul territorio nazionale (Langhe 1994, Versilia 1996, Sarno 1998, Cervinara 1999, Piemonte/Valdaosta 2000, Soverato 2000, Ischia 2006, Liguria 2011) oltre che in quello specifico di Messina (2007, 2009 e 2011). Gli studi condotti negli ultimi anni dalla comunità scientifica sui cambiamenti climatici hanno riconosciuto ampiamente la variazione della distribuzione delle piogge nel tempo ed un incremento dell'intensità degli eventi estremi, già in atto anche nell'area mediterranea e sul

territorio italiano. Dato che le colate rapide di fango e detrito si innescano in occasione di precipitazioni di carattere intenso e sporadico (sia spazialmente che temporalmente), è in atto un generale aumento della probabilità di accadimento di tali fenomeni superficiali su tutto il territorio nazionale ed, in particolar modo, in Sicilia.

L'analisi della pericolosità da frana nel territorio del Comune di Messina è stata basata su di un'analisi delle conoscenze specifiche pregresse relative all'area (Capitolo 2). La gestione dei dati territoriali è stata realizzata implementando un progetto GIS (Capitolo 3). La corretta georeferenziazione dei dati territoriali è stata condotta con l'ausilio della tecnologia GPS (Capitolo 4). Complessivamente lo studio ha apportato i seguenti contributi allo stato delle conoscenze relativamente alla pericolosità da frana all'interno del territorio comunale:

- integrazione delle conoscenze relative al censimento dei fenomeni franosi (Capitoli 5 e 6);
- integrazione delle conoscenze relative ai fattori naturali ed antropici determinanti la suscettibilità del territorio relativamente alle distinte tipologie di fenomeni franosi (Capitolo 7);
- valutazione del rapporto statistico tra erodibilità dei suoli e innesco di colate rapide di fango e detrito (Capitolo 8);
- individuazione di curve sito-specifiche per la valutazione delle distanze di propagazione relative alle colate rapide di fango e detrito (Capitolo 9);
- definizione dei livelli di energia raggiunti in eventi di colata rapida di fango e detrito avvenuti nel passato e metodologia per la valutazione degli stessi per fenomeni potenziali (Capitolo 9);
- definizione di soglie di innesco relativamente a fenomeni di colata rapida di fango e detrito sia su base pluviometrica sia su base dello stato di saturazione delle coperture detritiche (Capitolo 10).

Lo studio svolto ha un carattere scientifico e, pur avendo apportato un notevole miglioramento allo stato delle conoscenze, non può essere utilizzato in maniera diretta e acritica per la pianificazione territoriale. L'evoluzione di alcuni fenomeni franosi ed in particolare quelli a lenta evoluzione ed i crolli, necessitano di sistemi di monitoraggio specifici, necessari per comprendere l'evoluzione degli stessi, soprattutto in funzione di eventuali attivazioni parossistiche. È quindi da sottolineare che prima di intraprendere decisioni inerenti la pianificazione territoriale o realizzare opere di qualsiasi tipo, è necessario eseguire studi di dettaglio al fine di valutare le condizioni di stabilità dei versanti e quantificare la loro influenza sulla pericolosità ed il rischio, anche valutando le energie attese, e, qualora necessario, predisporre sistemi di monitoraggio per valutare l'evoluzione temporale e spaziale dei fenomeni stessi.

## 2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-CLIMATICO

### 2.1 Inquadramento geologico-strutturale dei Monti Peloritani

La parte meridionale dell' Arco Calabro-Peloritano è formata dai Monti Peloritani che si sviluppano nella parte nord-orientale della Sicilia attraversando l'intero territorio del comune di Messina e parte della sua provincia. I Monti Peloritani sono costituiti da una pila di falde di ricoprimento SE-vergente, ognuna delle quali caratterizzata da unità metamorfiche di età pre-Alpina coinvolte dai processi orogenici sia Ercinici che "Alpini", tettonicamente sovrapposte alle unità sedimentarie maghrebidi (Lentini et al., 2000). Secondo gli ultimi schemi tettono-stratigrafici e revisioni geologico-petrologiche proposti nella letteratura scientifica, l'edificio peloritano è formato da 7 unità stratigrafico-strutturali sovrapposte, con una geometria di tipo "antiformalstack", secondo un ordine inverso di sequenza metamorfica che vede i termini cristallini di più alto grado metamorfico in posizione geometrica via via più elevata (Vignaroli et al., 2008).

La classificazione in unità stratigrafico-strutturali è basata su criteri tettonici, inerenti l'attuale stato deformato dei terreni, e stratigrafici, relativi al loro originario stato indeformato. I corpi geologici raggruppati su queste basi sono tutti delimitati da contatti tettonici basali estesi a livello regionale e caratterizzati al loro interno da una determinata successione stratigrafica, in modo tale da essere differenziabili rispetto ai terreni circostanti sulla base dei caratteri litologici e della loro posizione geometrica nell'ambito dell'orogene. Nel tentativo di rendere il dato geologico sufficientemente sintetico, le sette suddette Unità vengono raggruppate nel complesso della catena Kabilo-Calabride (Ogniben L. 1960). Queste affiorano in tutto l'Arco Calabro-Peloritano, ma sono state riconosciute, da dati della sismica a mare, lungo tutto il settore meridionale del bacino tirrenico secondo una fascia che si prolunga fino al nord Africa, dove riaffiorano nelle Kabilidi da cui, appunto, deriva la denominazione.

Le sette unità stratigrafico-strutturali sono: Aspromonte, Mela, Mandanici, Ali, San Marco d'Alunzio, Longi-Taormina e Capo Sant'Andrea

Le Unità di Capo Sant'Andrea, Longi-Taormina, San Marco D'Alunzio e Ali rappresentano le unità strutturalmente più profonde. Sono presenti estesamente lungo tutto il bordo meridionale dei Monti Peloritani, ma gli affioramenti più significativi sono ubicati sul versante ionico (Lentini et al., 1996). Sono composte da terreni cristallini caratterizzati da un grado metamorfico molto basso e da una copertura sedimentaria, estremamente lacunosa e condensata, estesa dal Lias inferiore al Cretaceo-Eocene, contraddistinta da una estrema variabilità delle litofacies.

Le unità sopra descritte sono ricoperte tettonicamente dai terreni metamorfici di medio-basso grado dell'Unità di Mandanici (fig. 1; Ogniben, 1969; Atzori & Vezzani, 1974). Questa unità affiora in modo continuo lungo la fascia ionica da Briga-Scaletta Zanclea fino a Sant'Alessio, per poi estendersi attraverso la Fiumara d'Agro verso NW oltre Novara di Sicilia. Riaffiora sul versante tirrenico in diverse finestre tettoniche lungo la Fiumara di Naso e tra Montagnareale e San Piero Patti. Lo spessore varia notevolmente nei due versanti, oscillando da svariate centinaia di metri nel settore ionico fino ad azzerarsi in quello tirrenico. La sequenza è costituita da metamorfiti con locale zoneografia progradata dalla facies a scisti verdi fino all'inizio della facies anfibolitica. Lo spessore dell'intera unità arriva fino a 600-700m.

L'Unità del Mela è stata riconosciuta e istituita solo grazie a studi di dettaglio recenti (Messina et al. 1997) effettuati sui Monti Peloritani nord-occidentali, in un'area precedentemente attribuita alla porzione più meridionale dell'Unità dell'Aspromonte. Essa affiora in una fascia con andamento E-W dal Mar Tirreno, nei pressi di Capo Calavà, fino al Mar Ionio nei pressi di Giampilieri Marina. È costituita da polimetamorfiti con un evento relitto eo-varisico in facies eclogitica ed uno varisico, principale, di tipo barroviano, retrogrado, variabile da condizioni di

media ad alta P in facies anfibolitica. La tettonica alpina ha determinato solo effetti cataclastico-milonitici e retromorfosi. Ha uno spessore di qualche centinaio di metri ed è interposta tra l'Unità dell'Aspromonte a tetto e l'Unità di Mandanici a letto. L'unità del Mela mostra caratteri petrologici peculiari, diversi da quelli dell'Unità dell'Aspromonte, cui, come detto prima, era stata finora ascritta, mentre analoghe sono le caratteristiche geomeccaniche.



Figura 1 – Unità di Mandanici: affioramento di filladi fortemente fratturate ricoperte da materiale detritico di alterazione



Figura 2 – Metamorfiti dell'Unità dell'Aspromonte: paragneiss e micascisti contenenti filoni aplitico pegmatitici

Infine è presente l'unità strutturale più elevata del Complesso Kabilo-Calabride affiorante in Sicilia: l'Unità dell'Aspromonte. Tale Unità affiora estesamente nella parte più settentrionale della Catena Peloritana, a nord dell'allineamento Scaletta Zanclea-Capo d'Orlando, attraverso la Montagna di Vernà (Atzori & Vezzani, 1974; Lentini & Vezzani, 1975). I terreni di questa Unità mostrano analogie con quelli affioranti al di là dello stretto di Messina, in Calabria, nell'omonimo massiccio. Essa è limitata a letto dall'Unità del Mela e dall'Unità di Mandanici e al tetto da depositi oligocenico-quadernari. Essa è formata da metamorfiti erciniche (fig. 2) in

facies anfibolitica di AT e BP con relitti granulitici, con sovrimpronta metamorfica alpina, dalla facies scisti verdi di BP e BT a quella anfibolitica di MP e MT.

Al di fuori della suddivisione in unità stratigrafico-strutturali, vengono invece descritte le formazioni, essenzialmente terrigene, che si sono depositate successivamente alle fasi di ricoprimento tettonico. Tali formazioni sono state classicamente denominate Complesso Tardorogeno (Ogniben, 1960; Lentini & Vezzani, 1978). Presentano giaciture discordanti sulle unità del substrato, anche se a loro volta possono essere coinvolte da strutture sia contrazionali che estensionali, più recenti dei ricoprimenti. Le formazioni che costituiscono il Complesso Tardorogeno, sono:

- Flysch di Capo d'Orlando: alternanza silicoclastica caratterizzata da tre litofacies eteropiche, una conglomeratica prevalentemente basale, una arenitica e subordinariamente una pelitica o pelitico-arenitica (Oligocene sup.-Burdigaliano inf.);
- Argille Scagliose Antisicilidi: argille varicolori scagliettate e a giacitura caotica con frammenti di calcari micritici bianchi e siltiti carbonatiche grigie (Cretaceo sup.);
- Calcareniti di Floresta: biocalcareniti bianco-grigiastre, talora a stratificazione incrociata, a frammenti di alghe e briozoi e arcosi glauconitiche alternate a sottili livelli argilloso-marnosi (Burdigaliano sup.-Langhiano);
- Depositi terrigeni medio-supra miocenici dei Monti Peloritani appartenenti alla Formazione di San Pier Niceto (fig. 3), formati da depositi silicoclastici costituiti da diverse litofacies con frequenti passaggi sia laterali che verticali, discordanti su vari termini del substrato (Serravalliano inf.-Messiniano inf.);
- Biolititi coralgali e breccie carbonatiche (Tortoniano sup.-Messiniano inf.);
- Serie evaporitica costituita da marne e calcari marnosi (Trubi, Pliocene inf.), gessi e argille gessose (Messiniano), calcare evaporitico a volte brecciato (Calcare di Base), alla cui base sono presenti lenti di diatomiti (Tripoli, Messiniano).

I depositi post-orogeni più recenti affiorano in prevalenza nei settori costieri e pedemontani del versante ionico-peloritano e sono rappresentati da:

- Depositi plio-pleistocenici costituiti da alternanze di marne e sabbie passanti a sabbie e calcareniti (Pliocene inf.-Pliocene sup.) e calcareniti e sabbie organogene color giallo-ocra (Pliocene sup.-Pleistocene medio);
- Ghiaie e sabbie di Messina: depositi medio-pleistocenici in facies deltizia e/o di conoide sottomarina legati agli apporti di paleo-fiumare (fig. 4);
- Terrazzi marini e fluviali: i terrazzi fluviali sono costituiti da modesti spessori di ghiaie, sabbie con ciottoli e limi di colore bruno o grigiastro (fig. 5), distribuiti lungo le varie valli su più ordini. I terrazzi marini sono costituiti da sabbie giallo ocra talora ghiaiose, da limi e cineriti rossastre e da ghiaia a ciottoli arrotondati ed appiattiti eterometrici in matrice sabbiosa, o da semplici spianate di abrasione. I clasti sono per lo più cristallini nelle aree attorno ai Peloritani, mentre verso la catena nebrodica abbondano i litici sedimentari. Stratificazione poco evidente e con spessore modesto. Sono presenti a diverse quote (Pleistocene medio-sup.; fig. 6)
- Alluvioni recenti ed attuali costituite da ghiaie e sabbie limose lungo le principali aste fluviali con spessori anche decametrici. I depositi litorali sono prevalentemente sabbiosi sul versante tirrenico, mentre sono prevalentemente ghiaiosi su quello ionico. Alluvioni recenti limoso-sabbiose, talora terrazzate si trovano lungo i corsi d'acqua o nelle pianure costiere (Olocene).



Figura 3 – Litofacies conglomeratica della Formazione di San Pier Niceto



Figure 4 e 5 – Affioramento di ghiaie e sabbie di Messina (a sinistra) e terrazzo marino tirreniano (Pleistocene sup.; a destra)

Riassumendo, le formazioni affioranti nel settore peloritano sono costituite prevalentemente da rocce scistoso-cristalline di diverso grado metamorfico e subordinatamente da depositi sedimentari di copertura. L'evoluzione strutturale delle unità presenti in questo settore mostra una storia deformativa polifasica piuttosto complessa. Le unità cristalline, derivanti da processi orogenici sia ercinici che alpini, risultano essere tettonicamente sovrapposte alle unità sedimentarie maghrebidi. Il quadro tettonico peloritano risulta, quindi, essere controllato da processi di raccorciamento ed ispessimento crostale lungo zone di taglio a cinematica inversa, e da processi di esumazione lungo piani di *detachment* estensionali, con evoluzione da regimi deformativi duttili a regimi deformativi fragili, anche se la peculiarità principale è la struttura embriciata a scaglie e falde tettoniche. Con l'avanzare della storia deformativa, lo stile tettonico diventa gradualmente comune fino ad interessare, in tempi recenti (Plio-pleistocene), tutte le unità, incluse quelle non metamorfiche.



Figura 6 – Terrazzi marini pleistocenici collocati a diverse quote sul livello del mare

## 2.2 Inquadramento climatico del comune di Messina

Il clima del territorio messinese, il più mite ed anche il più piovoso in assoluto della Sicilia, è fortemente influenzato dalla presenza dei Monti Peloritani in prossimità della costa. La vicinanza tra la costa e la catena montuosa si esplica in un'azione mitigatrice del mare relativamente alla temperatura lungo i versanti oltre ad un effetto barriera nei confronti delle masse di aria provenienti dal Tirreno e dallo Ionio.

Le temperature medie annue sono di 18°C- 19°C nei settori costieri e di 10°C-11°C in quelli montani in entrambi i versanti della provincia (Nigro et alii, 2011). I valori dell'evapotraspirazione raggiungono dei massimi di 900-1.000 mm in entrambi i settori costieri ionico e tirrenico, per diminuire progressivamente verso quelli montani dove i valori medi sono compresi tra 600-700 mm. Le precipitazioni medie annue lungo il versante tirrenico della Provincia si attestano mediamente sugli 800-1.000 mm, ad eccezione dell'area metropolitana e del settore di Taormina, dove la media è di 700-800 mm. Lungo il versante tirrenico, la media è di 700-800 mm nei settori costieri e aumenta progressivamente fino a raggiungere i valori di 1.000-1.200 nei settori montani di cresta, per poi tornare a diminuire nel versante meridionale del massiccio montuoso.

L'area è caratterizzata da precipitazioni intense concentrate nella stagione umida tra ottobre ed aprile in cui si registra più dell'80% delle precipitazioni annuali. Tali precipitazioni sono spesso connesse con l'attivazione di fenomeni franosi superficiali. Esempi eclatanti di questa dinamica sono gli eventi del 25 ottobre 2007 e del 1° ottobre 2009 verificatisi nella porzione meridionale del comune di Messina, causati da violenti ed improvvisi nubifragi successivi alle fasi aride estive. In particolare, quello del 2009, iniziato nel pomeriggio e terminato in serata, ha provocato l'attivazione di numerose colate rapide di fango e detrito e l'esondazione di numerosi corsi d'acqua (Del Ventisette et alii, 2012). Tali fenomeni hanno causato la perdita di vite umane, numerosi feriti, l'interruzione della viabilità stradale e ferroviaria, delle linee elettriche e telefoniche, nonché gravi danni alle infrastrutture, e agli edifici pubblici e privati. L'evento calamitoso ha colpito in particolare una zona immediatamente a Sud della città di Messina, lungo la costa ionica e nell'entroterra.

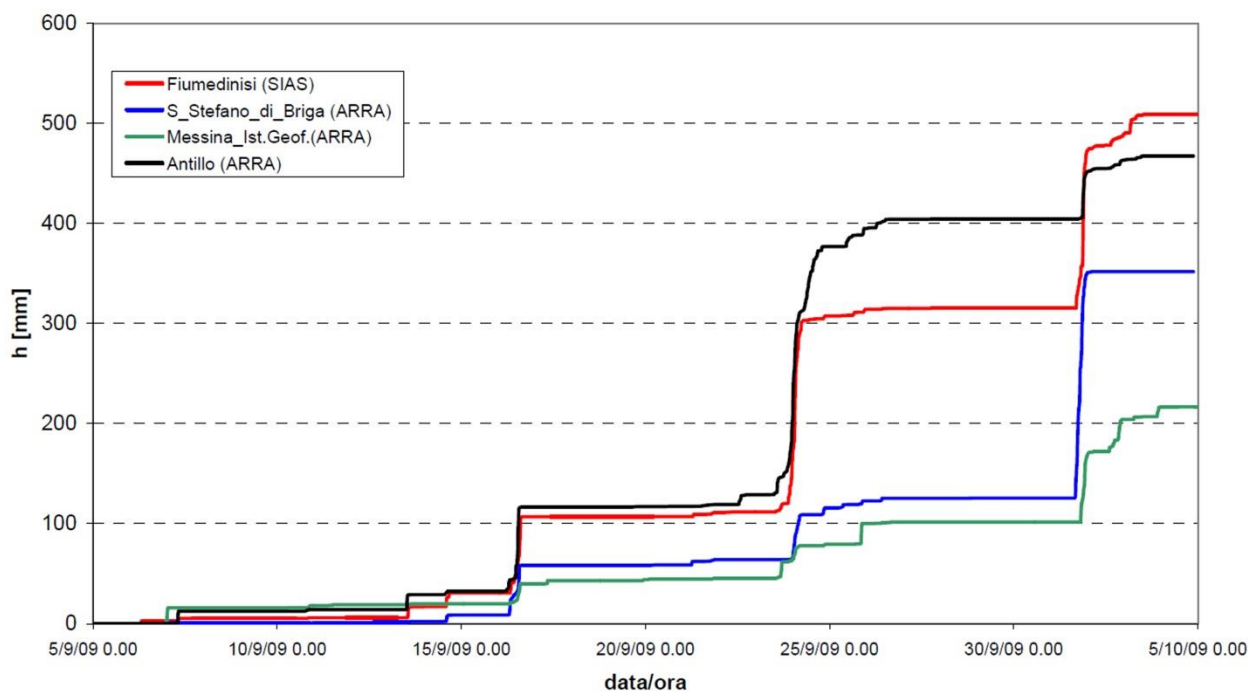


Figura 7 - Cumulata delle precipitazioni registrate nelle stazioni disponibili nel periodo 5 settembre – 5 ottobre 2009 (Regione Sicilia, 2009).

Nel corso del mese precedente l'evento del 1° ottobre, l'area è stata interessata da altri due eventi significativi nei giorni 16 e 23-24 settembre (fig. 7).

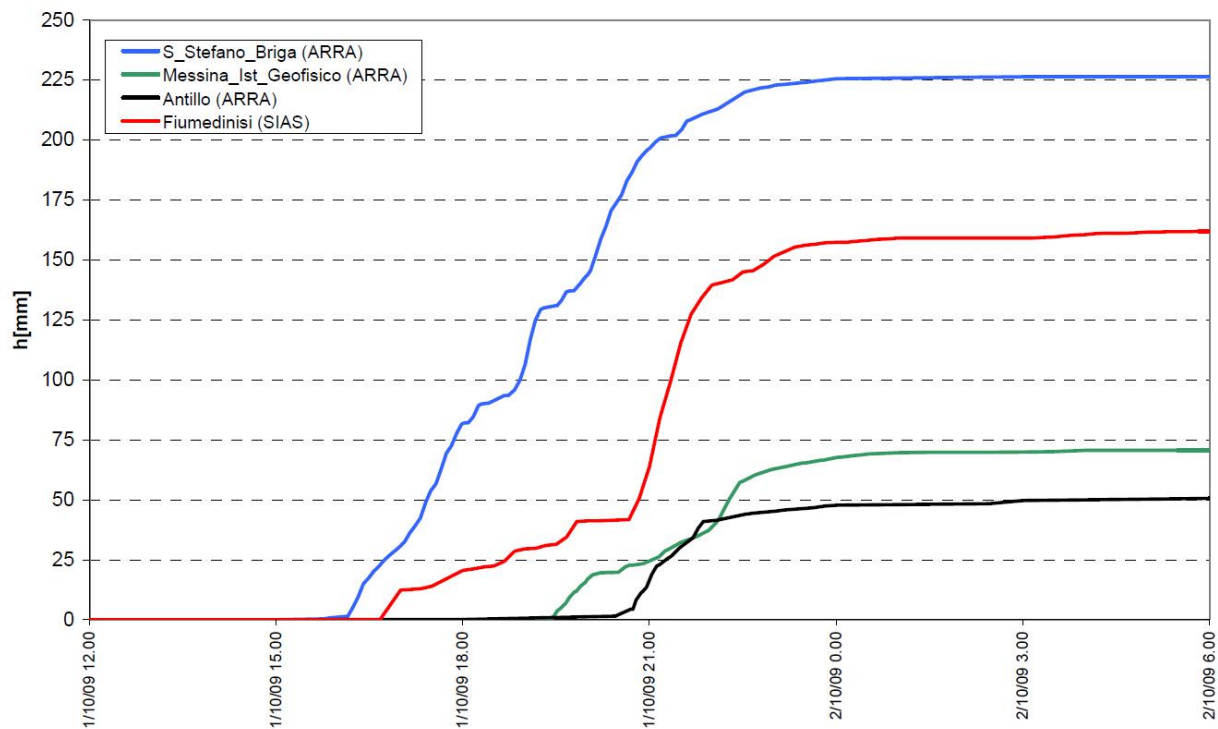


Figura 8 - Dettaglio della cumulata delle precipitazioni registrate nelle stazioni di S. Stefano di Briga, Fiumedinisi, Messina Istituto Geofisico e Antillo a partire dalle ore 12:00 del 1 ottobre fino alle ore 6:00 del 2 ottobre (Regione Sicilia, 2009).

Le stazioni di S. Stefano di Briga e Fiumedinisi, poste rispettivamente a N e a S dell'area colpita maggiormente dai dissesti, hanno registrato le maggiori altezze di precipitazione. In particolare, nella stazione di S. Stefano di Briga le precipitazioni hanno avuto inizio attorno alle ore 16:00 del giorno 1 e sono proseguite pressoché ininterrottamente fino alle ore 24:00 dello stesso giorno, per un totale di 225,50 mm in circa 8 ore (fig. 8; Regione Sicilia, 2009). E' da osservare che le intensità maggiori si sono registrate fino alle 23:00, per un totale di circa 223 mm in 7 ore, corrispondenti ad una intensità media di 31,8 mm/ora. Inoltre dall'analisi dei dati, si evince che durante il corso dell'evento, si sono registrati scrosci di notevole intensità, come ad esempio quello occorso tra le 19:00 e le 19:05 in cui si sono registrati 10,6 mm in 5 minuti corrispondenti ad una intensità di circa 120 mm/ora (Aronica et al., 2012).

Le precipitazioni relativamente modeste registrate nelle stazioni di Antillo e di Messina Istituto Geofisico il 1 ottobre, confrontate con quelle registrate nelle stazioni di Fiumedinisi e S. Stefano di Briga, indicano la natura fortemente localizzata dell'evento. Tale limitata estensione spaziale dell'evento fa sì che la trasposizione delle informazioni pluviometriche disponibili alle zone oggetto dei dissesti è da ritenersi affetta da una qualche incertezza. Tuttavia, alla luce del fatto che la maggior parte dei dissesti si è verificata in una zona compresa tra le stazioni di Fiumedinisi e S. Stefano di Briga, ubicate in zone interessate al più marginalmente da dissesti, è lecito attendersi che le precipitazioni nelle zone colpite potrebbero essere caratterizzate da intensità maggiori di quelle registrate nelle due stazioni.

Un ulteriore evento alluvionale da menzionare è quello del 25 marzo del 2011 che ha colpito il territorio comunale di Saponara (Me) sul versante tirrenico della Provincia messinese.

### **2.3 Inquadramento geomorfologico del comune di Messina**

Il territorio del comune di Messina, esteso per 211,23 kmq, è separato dalla dorsale dei Monti Peloritani in due versanti: quello ionico e quello tirrenico. Possiede quindi carattere orografico prevalentemente montuoso. In particolare sulla costa ionica, nel tratto da Messina a Giampileri Marina, sono presenti solo strette lingue di terra, spesso interrotte dai repentini strapiombi sul mare delle propaggini montuose, che raramente degradano attraverso il passaggio per aree collinari, mentre le aree di pianura e quelle collinari si rinvengono in alcuni tratti della fascia costiera tirrenica.

I rapidi sollevamenti crostali (iniziati già dal Pliocene superiore-Pleistocene inferiore) assieme all'assetto geo-strutturale dei litotipi affioranti hanno morfologicamente condizionato la zona generando, in generale, forti energie di rilievo, strette valli a "V" fortemente incise fino a forre, alvei in continuo approfondimento spesso caratterizzati da gradini e salti morfologici significativi (fig. 9). Il sollevamento in atto nella zona si manifesta con diverse evidenze morfologiche quali creste rettilinee, vette e selle allineate, tratti rettificati dei corsi d'acqua, aree a rapida erosione, accumuli detritici al piede dei versanti, resti di antiche falesie, terrazzi fluviali e marini. La disposizione a gradinata lungo la costa dei diversi ordini di terrazzi marini conferma la chiara tendenza al sollevamento dell'area con ripetute stasi del fenomeno corrispondenti a periodi di modellamento delle Piattaforme (Lentini et al., 1996).

Il profilo e l'andamento dei tronchi fluviali è piuttosto irregolare e con pendenze elevate, denotando caratteristiche spiccatamente montane indicative di uno stadio geomorfologico giovanile, o comunque scarsamente evoluto, che determina fenomeni di erosione particolarmente intensi che, sommati al diffuso stato di alterazione e di degradazione dei litotipi cristallini, così come alla elevata erodibilità dei depositi sedimentari, favoriscono un conseguente stato di dissesto lungo i versanti, particolarmente sviluppato in occasione di eventi idrologici di maggiore intensità e durata. A queste latitudini, infatti, l'azione erosiva delle precipitazioni piovose è sicuramente il più importante tra i processi prodotti dagli agenti climatici.



Figura 9 – Versanti a forte pendenza in prossimità della linea di costa

L'andamento composito, talvolta complicato, dei profili di versante riflette l'estrema variabilità litologica e la relativa resistenza all'erosione che i diversi terreni offrono agli agenti esogeni, legati in particolare, come detto, all'azione delle acque meteoriche e dilavanti. Così, in prima analisi, si può osservare come all'aumentare del grado metamorfico delle rocce di substrato corrispondano pendii sempre più acclivi fino a scarpate subverticali ed aggettanti, impostate solitamente sui marmi o su spessi corpi aplitico-pegmatitici dell'Unità dell'Aspromonte. Sotto l'aspetto morfodinamico, i contesti morfologici di scarpata configurano aree soggette ad elevato potenziale di frane di crollo, mentre i versanti da fortemente a moderatamente acclivi sono interessati da ruscellamento concentrato che comporta forti erosioni d'alveo e di sponda. In occasione di eventi pluviometrici intensi ricorrono fenomeni gravitativi rapidi a carico delle coperture d'alterazione dei rispettivi substrati, classificabili come colate rapide di fango e detrito (*debris-mud flows*).

## 2.4 Pericolosità geomorfologica locale

La cartografia del PAI Sicilia, antecedente al 2007, fornisce una valutazione sullo stato di pericolosità del territorio messinese basata esclusivamente su di un censimento dei fenomeni esistenti (Regione Siciliana, 2011). Come detto nell'introduzione, questo approccio, anche se conforme alla legislazione vigente, fornisce una valutazione parziale della pericolosità escludendo possibili fenomeni di neoformazione.

Antecedentemente all'evento meteorico del 2007, che ha determinato l'attivazione di numerose colate rapide nell'area di studio, nell'ambito del progetto europeo Synarma 2006-2007 (Rasà *et alii*, 2007, Puglisi *et alii*, 2007), l'ENEA ha effettuato uno studio relativo a tutto il territorio regionale in cui sono state evidenziate le diverse condizioni di suscettibilità anche del territorio di Messina. Seppur con un grado di dettaglio minore (1:100.000), adeguato a fornire delle indicazioni di massima non utili a fini di pianificazione territoriale, la metodologia adottata è stata la medesima di quella utilizzata nel presente studio e descritta al capitolo 7. Nello studio sono stati messi in luce anche i diversi fattori climatici che influenzano le diverse tipologie di processi franosi (oscillazioni del livello del mare, oscillazioni delle falde acquifere, processi termo e crioclastici e caratteristiche dei regimi pluviometrici) e sviluppate alcune considerazioni circa la pericolosità da frana in funzione dei futuri scenari climatici descritti in letteratura (Puglisi *et al.*, 2007). Le carte tematiche associate a quel progetto mostravano che l'area di Messina è particolarmente soggetta a crolli e la suscettibilità alle colate rapide di fango e detrito è generalmente elevata, ad eccezione della zona sud del territorio comunale, dove è molto

elevata. Inoltre, sono presenti ampie aree che mostrano una elevata suscettibilità agli scivolamenti rotazionali, mentre la suscettibilità agli scorrimenti traslazionali è generalmente meno significativa. Successivamente al progetto Synarma ed all'evento del 1° ottobre 2009, ENEA ha condotto delle analisi da intendersi come prototipali per il presente studio nella porzione meridionale del territorio del comune di Messina (Puglisi *et alii*, 2011), in cui sono state messe in evidenza le criticità dell'area in particolare relativamente alle colate rapide (Falconi *et alii*, 2011).

## 2.1 Bibliografia

- Aronica G. T., Brigandi G., Morey N. (2012). Flash floods and debris flow in the city area of Messina, north-east part of Sicily, Italy in October 2009: the case of the Giampileri catchment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 1295–1309, 2012
- Atzori P., Vezzani L. (1974). Lineamenti petrografico strutturali della Catena Peloritana. *Geol. Romana*, 13, 21-23.
- Del Ventisette C., Garfagnoli F., Ciampalini A., Battistini A., Gigli G., Moretti S., Casagli N. (2012). An integrated approach to the study of catastrophic debris-flows: geological hazard and human influence. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 2907–2922, 2012
- Falconi L., Campolo D., Leoni G., Lumaca S., Puglisi C. (2011). Geomorphology hazard assessment of Giampileri and Briga river basins after the rainfall event on the October 1, 2009 (Sicily, Italy). *Proceedings of the Second World Landslide Forum – 3-7 October 2011, Rome.*
- Lentini F., Catalano S., Carbone S. & Patanè G. (1996). Studio geologico-morfologico-geofisico dell'area di Taormina. S.EL.CA., Firenze, Carta Geol. 47 pp., 1.
- Lentini F., Catalano S. & Carbone S. (2000). Nota illustrativa della carta geologica della provincia di Messina (Sicilia nord-orientale), scala 1:50000, 70 pp., S.EL.CA., Firenze.
- Lentini F., Carbone S., Catalano S. (2000). Carta geologica della provincia di Messina, in scala 1:50.000. Provincia Regionale di Messina. S.EL.CA., Firenze.
- Lentini F. & Vezzani L. (1975). Le unità cenozoiche della copertura sedimentaria del basamento cristallino Peloritano (Sicilia nord-orientale). *Boll. Soc. Geol. It.*, v. 94, 537-554.
- Lentini F. & Vezzani L. (1978). Tentativo di elaborazione di uno schema strutturale della Sicilia orientale. *Mem. Soc. Geol. It.*, v.19, pp. 495-500.
- Messina A., Perrone V., Giacobbe A. & De Francesco A. M. (1997). The Mela Unit: a medium grade metamorphic unit in the Peloritani Mountains (Calabrian- Peloritani Arc, Italy). *Boll. Soc. It.*, 116,237-252.
- Nigro F., Pisciotta A., Perricone M., Favara R., Renda P., Cusimano G., Torre F. (2011). Stima della pericolosità potenziale al dissesto idrogeologico nella provincia di Messina: valutazione preliminare. *Bollettino dell'Ordine dei Geologi di Sicilia*, vol.3 settembre-dicembre 2011, pagg. 28-46
- Ogniben L. (1960). Nota illustrativa dello schema geologico della Sicilia Nord-orientale. *Riv. Min. Sic.*, 64-65 183-212.
- Ogniben L. (1969). Schema introduttivo alla geologia del confine Calabro-Lucano. *Mem. Soc. Geol. It.*, 8:453-763.
- Puglisi C., Falconi L., Leoni G., Pino P., Rasà R., Tripodo A. (2007). Analisi della suscettibilità da frana in Sicilia (1:250.000): relazioni con scenari climatici futuri. *Atti del Workshop "Cambiamenti climatici e dissesto idrogeologico: scenari futuri per un programma nazionale di adattamento"*; Napoli, 9-10 lug.

- Puglisi C., Campolo D., Falconi L., Leoni G, Lumaca S. (2011). Landslide hazard assessment project in the Messina municipality area (Sicily, Italy). Proceedings of the Second World Landslide Forum – 3-7 October 2011, Rome.
- Rasà R., Tripodo A., Pino P., Puglisi C., Leoni G. (2007): Susceptibility to mass movements in Sicily. 6° Forum Italiano di Scienze della Terra “GEOITALIA 2007”; Rimini, 12-14 Settembre 2007. Epitome, Vol. 2, 2007, ISSN 1972-1552, pp. 426 (abstract).
- Regione Siciliana - Ufficio del commissario delegato, EX O.P.C.M. 10 ottobre 2009, n.3815 (2009). Descrizione dei dissesti e degli interventi immediati nel centro abitato di Giampileri superiore. Relazione preliminare. 23/11/2009
- Regione Siciliana Assessorato del territorio e dell'ambiente - Dipartimento dell'ambiente Servizio III - Assetto del territorio e difesa del suolo. Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico e successivi aggiornamenti (DPR n. 118 del 21/03/2011)
- Vignaroli G., Faccenna C., Jolivet L., Piromallo C., Rossetti F. (2007). Subduction polarity reversal at the junction between the Western Alps and the Northern Apennines, Italy. *Tectonophysics* 450 (2008) 34–50.

### 3. PROGETTO GIS

I Sistemi Informativi Geografici (GIS) sono strumenti ormai ampiamente sperimentati e diffusamente utilizzati nella archiviazione e gestione di dati georeferenziati e nell'esecuzione di analisi territoriali. La velocità di calcolo e la possibilità di continui aggiornamenti contribuisce a rendere questo strumento estremamente utile nelle fasi di catalogazione ed elaborazione dei dati disponibili. Nell'ambito dell'analisi della pericolosità geomorfologica il GIS è particolarmente utile nell'archiviazione dei censimenti dei fenomeni franosi e, grazie alla possibilità di integrare i diversi strati informativi territoriali, nella realizzazione di carte della suscettibilità. Nell'ambito dell'accordo di programma tra l'ENEA ed il Comune di Messina è stato impostato l'ambiente di lavoro relativo al progetto GIS denominato "frana\_ME" finalizzato all'archiviazione ed elaborazione dei dati geografici ed alfanumerici (strati informativi territoriali) ed alla loro restituzione in layout ed elaborati grafici. Il GIS è stato sviluppato in modo da consentire la gestione degli strati informativi georiferiti nei formati di uso più comune (fig. 1): in forma vettoriale (*database* geografico in formato ESRI *shapefile*), *raster* (ESRI GRID, immagini TIFF, immagini ECW) ed archivi alfanumerici (dBASE, MS Excel).

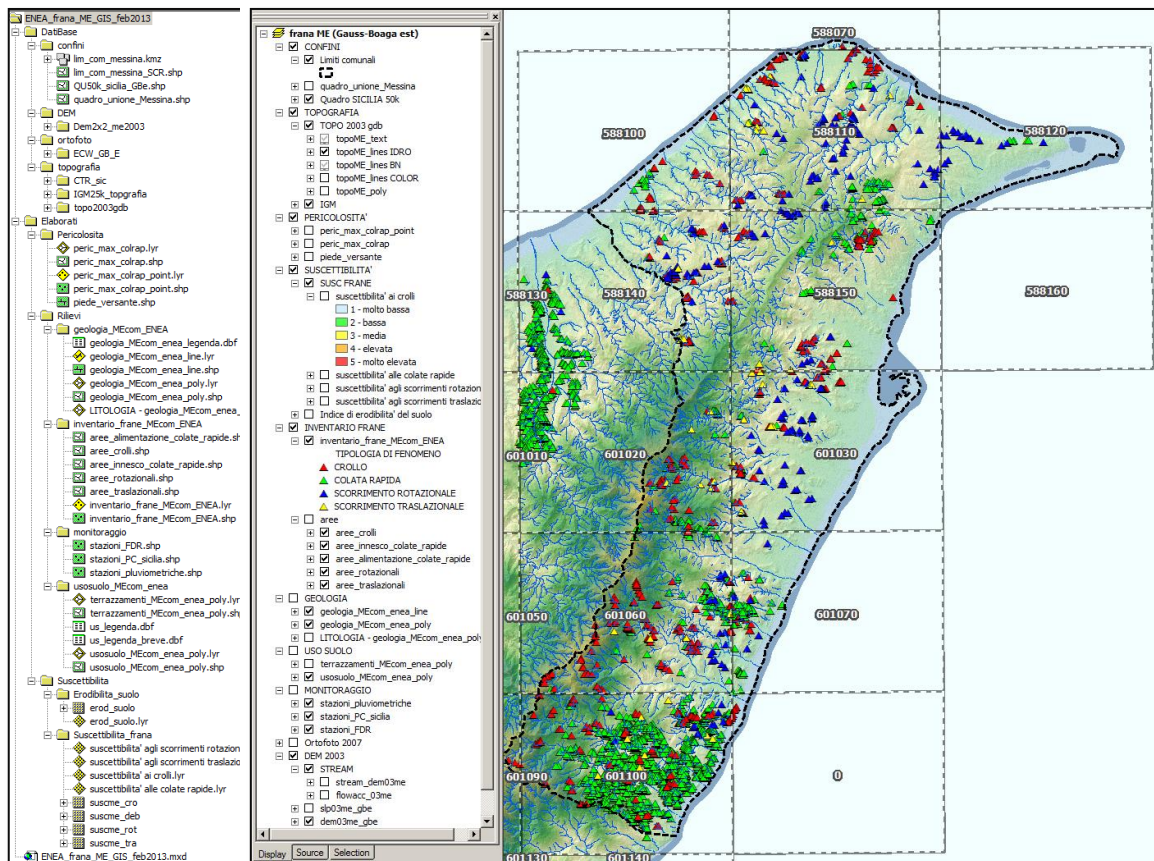


Figura 1 - Struttura dell'archivio digitale e vista del GIS.

#### 3.1 Georeferenziazione e formato dei dati

La base topografica adottata è la Carta Tecnica Regionale in scala 1:10.000 della Regione Sicilia (2003), in formato vettoriale e sistema di riferimento Gauss-Boaga fuso Est. Per omogeneità è stato assunto tale sistema di riferimento anche per l'implementazione degli altri strati informativi territoriali del progetto. Anche per quanto riguarda la campagna topografica

GPS del progetto, tutti i prodotti sono stati georiferiti nel sistema di riferimento Gauss-Boaga fuso Est, impiegando per le trasformazioni il *software* VERTO dell'IGM, con l'opportuno riferimento ai capisaldi della Rete Geodetica Nazionale. Si è proceduto quindi alla verifica del georiferimento di tutti gli strati informativi territoriali presenti. Laddove si è resa necessaria una trasformazione da un sistema di riferimento differente da quello del progetto, si è utilizzato il *software* ReGeo (del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare) che permette la trasformazione fra i sistemi di riferimento in uso in Italia senza le approssimazioni tipiche dei *software* commerciali. Con la base topografica è stata prodotta la cartografia di base necessaria ai rilievi di campo (16 tavole in formato A0, in scala 1:5.000; figg. 2 e 3).

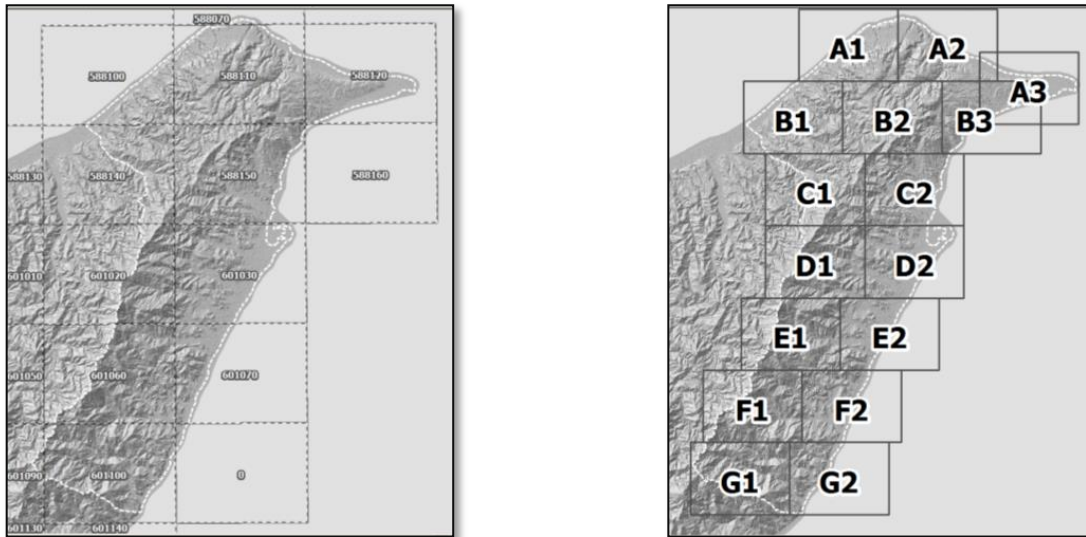


Figure 2 e 3 - Quadro d'unione CTR Sicilia (a sinistra) e quadro d'unione tavole topografiche di progetto, 1:5.000 sezioni 1:10.000 (a destra)

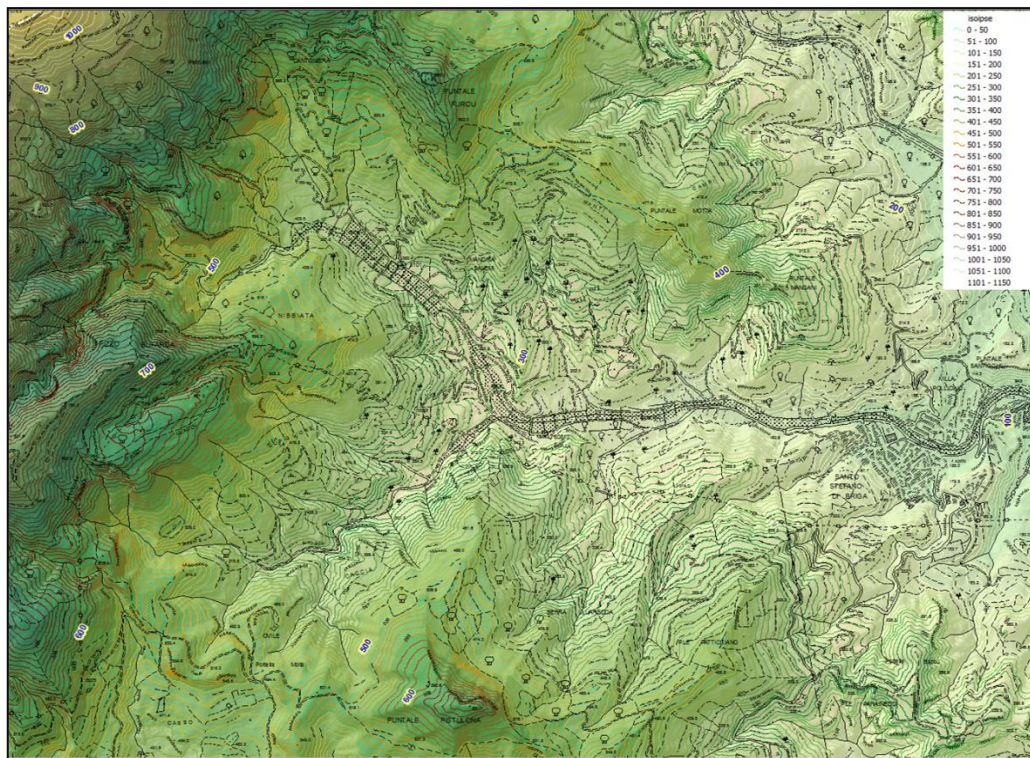


Figura 4 - Stralcio di carta topografica CTR scala 1:10.000 e DEM.

### 3.2 Analisi GIS del rilievo

Per le analisi morfologiche in ambiente GIS è stato impiegato il DEM <dem03me\_gbe>, in formato ESRI GRID, con cella di 2 metri, relativo alla base topografica (fig. 4). Da esso provengono i derivati morfometrici necessari a tutte le successive elaborazioni del rilievo: ombreggiatura, acclività, esposizione e curvatura. Lo stesso DEM è stato trattato con gli strumenti di analisi idrologica del *software* ArcGIS per derivare gli strati informativi necessari all'analisi di pericolosità (fig. 5): mappa del flusso idraulico (*Flow Accumulation*) e relativo reticolo idrografico (*Stream*).

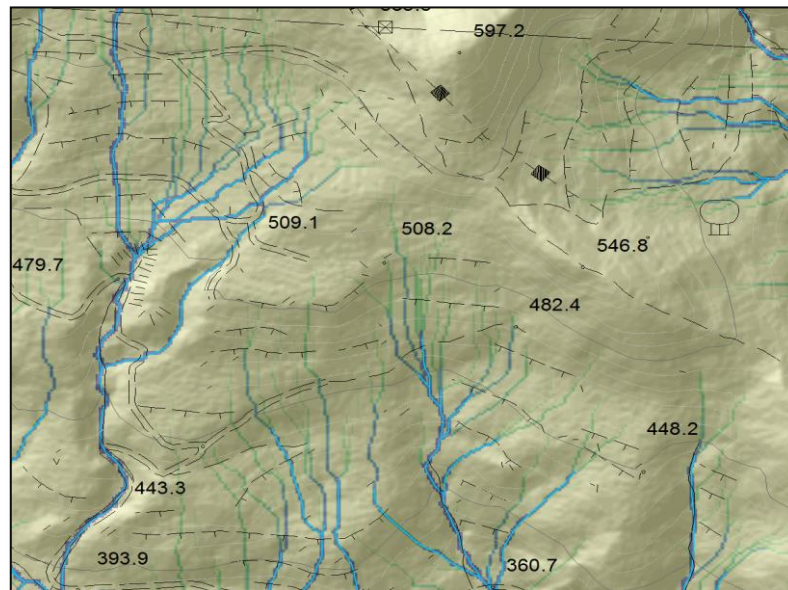


Figura 5 - Esempio di mappa del flusso idraulico (*Flow Accumulation*) in colore giallo-verde-blu, rispettivamente per quantità di deflusso superficiale crescente, e relativo reticolo idrografico (*Stream*) in azzurro.

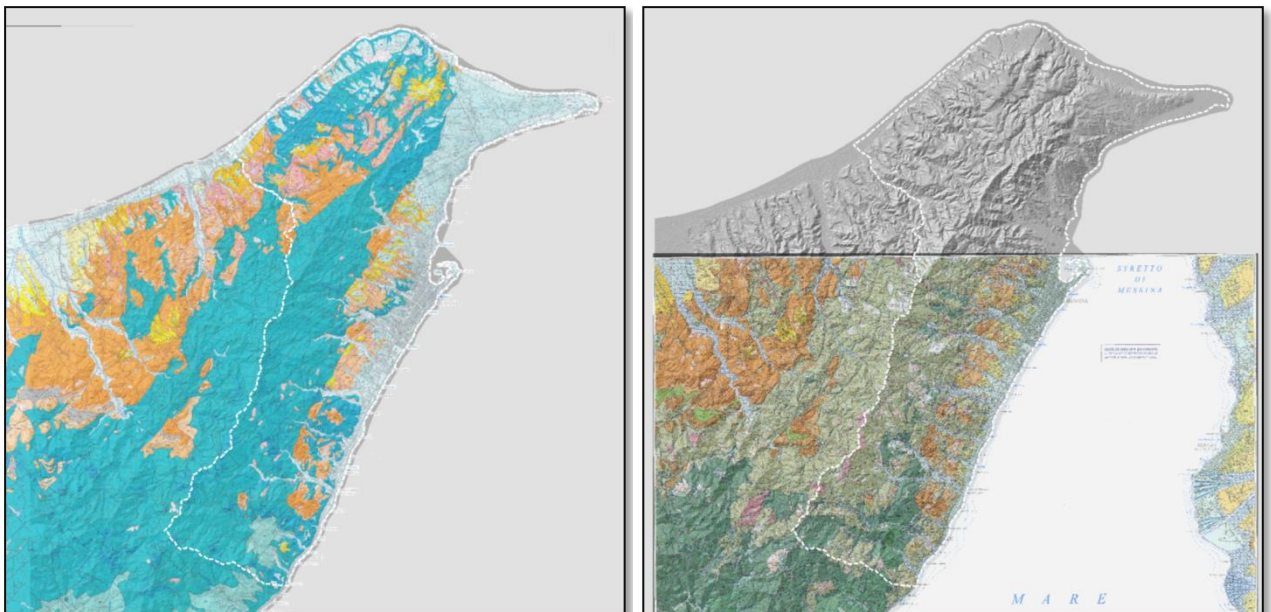


Figure 6 e 7 – Foglio 3 della Carta Geologica Provinciale (a sinistra; scala 1:50.000, provincia Regionale di Messina, Assessorato Territorio – Servizio Geologico) e Foglio 601 CARG della Carta Geologica d'Italia (a destra; scala 1: 50.000, versione preliminare).

### 3.3 Digitalizzazione cartografia geologica

Dalla Carta Geologica a scala 1:50.000 (Provincia Regionale di Messina, Assessorato Territorio – Servizio Geologico; fig. 6) in formato AutoCAD è stata estratta la porzione ricadente nel Comune di Messina, oltre ad un intorno di 1 km. Tale strato informativo territoriale è stato corretto nel georiferimento, tramite due passaggi: un primo riallineamento generale del dato tramite trasformazione polinomiale per punti di controllo ottenuti dalla base topografica, ed un secondo passaggio, zona per zona, per correggere le residue incongruenze geometriche locali, con dettaglio di scala fino ad 1:2.000. Infine al dato geometricamente corretto è stato assegnato il codice litologico corretto, tramite integrazione dall'originale in formato *raster*. L'intera procedura di correzione, geometrica e semantica, è stata svolta contemporaneamente anche sullo strato informativo lineare relativo agli elementi strutturali (tettonica).

Relativamente al Foglio 601 della Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 in formato cartaceo (fig. 7), ne è stata acquisita una bozza preliminare edita dall'Università di Messina. Essa è stata scansionata, georiferita e digitalizzata per procedere alla successiva integrazione con la Carta Geologica della Provincia.

### 3.4 Carta litologica vettoriale

In seguito alla digitalizzazione degli strati informativi geologici (cfr. punto 3.C) si è proceduto all'analisi critica dell'interpretazione geologica attraverso il confronto delle rispettive legende, secondo quanto riportato nella tabella 1.

CARG	descrizione sintetica	Pv. Messina	Note alla Carta Pv. Messina
<b>a1</b>	<u>Deposito di frana.</u> <i>Olocene</i>	frana	<i>Olocene</i>
<b>a</b>	<u>Depositi di versante.</u> Deposito incoerente, massivo; costituito da materiale spigoloso poligenico ed eterometrico in matrice argillosa o metaclastica, localmente a grossi blocchi alle pendici di pareti rocciose. <i>Olocene</i>	detrito	<i>Olocene</i>
<b>b2</b>	<u>Coltre eluvio-colluviale.</u> Limi, ghiaie e sabbie a supporto di matrice terroso-argillosa, a clasti metamorfici prevalenti; coperture detritiche incoerenti e terre rosse di alterazione <i>in situ</i> . <i>Olocene</i>	detrito	<i>Olocene</i>
<b>g2</b>	<u>Depositi di spiaggia.</u> <i>Olocene</i>	<b>a</b>	Alluvioni attuali e spiagge. <i>Olocene</i>
<b>ba</b>	<u>Depositi alluvionali attuali.</u> Ghiaie eterometriche, in formazione in alveo. <i>Olocene</i>		
<b>bb</b>	<u>Depositi alluvionali recenti e depositi di piana litorale.</u> Limi, sabbie e ghiaie, talora terrazzati, lungo i corsi d'acqua o nelle pianure costiere dei maggiori corsi d'acqua. <i>Olocene</i>	<b>ar</b>	Alluvioni recenti e piane litorali. <i>Olocene</i>
<b>gn1-5</b>	<u>Depositi marini terrazzati.</u> Sabbie giallo-ocra talora ghiaiose, limi o cineriti rossastre e ghiaie a ciottoli arrotondati ed appiattiti eterometrici, in matrice sabbiosa. Superfici terrazzate a diverse quote o spianate di abrasione. Età radiometrica 200-600 ka. <i>Pleistocene medio-superiore</i>	<b>tm</b>	Terrazzi marini. <i>Pleistocene medio-superiore</i>

<b>MSS</b>	<u>Ghiaie e sabbie di Messina.</u> Sabbie e ghiaie grigio-giallastre o rossastre con abbondante matrice. Presentano una clinostratificazione ad alto angolo. Facies deltizia e/o conoide sottomarina di paleofiumare. Spessore fino a 250 m. <i>Pleistocene medio</i>	<b>Qg</b>	Ghiaie e sabbie di Messina. <i>Pleistocene medio</i>
<b>ORDa</b>	<u>Calcareniti di San Corrado.</u> Calcareniti organogene colore giallo-bruno a stratificazione incrociata o parallela con sottili livelli sabbiosi-siltosi. <i>Pleistocene medio.</i>	<b>Pq</b>	Calcareniti e sabbie organogene. <i>Pleistocene medio</i>
<b>SPDa</b>	<u>Argille di Spadafora.</u> Argille grigio azzurre. <i>Pleistocene medio.</i>	<b>Qa</b>	Argille marnose grigio azzurre. <i>Pleistocene medio</i>
<b>SPDb</b>	<u>Livelli sabbiosi nella parte alta di SPDa.</u> <i>Pleistocene medio</i>	<b>Qs</b>	Orizzonti sabbiosi coevi alle argille marnose (Qa). <i>Pleistocene medio</i>
<b>ROE</b>	<u>Formazione di Rometta.</u> Calcareniti biodetritiche colore ocra con livelli sabbiosi. <i>Pliocene superiore- Pleistocene Inferiore</i>	<b>Pq</b>	Calcareniti e sabbie organogene. <i>Pliocene superiore- Pleistocene medio</i>
<b>FLS</b>	<u>Formazione di Massa Santa Lucia.</u> Marne sabbiose biancastre micacee, massive, in banchi spessi diversi metri. <i>Pliocene Medio</i>	<b>P</b>	Alternanza di marne e sabbie passanti a sabbie e calcareniti. <i>Pliocene inferiore (parte alta) Pliocene superiore</i>
<b>TBR</b>	<u>Trubi.</u> Marne e calcari marnosi bianco crema con intercalazioni di lenti sabbiose. <i>Pliocene inferiore</i>	<b>Pi</b>	Trubi. Marne e calcari marnosi. <i>Pliocene inferiore</i>
<b>GSb</b>	<u>Gruppo della gessoso- solfifera</u> <u>Gessi e argille gessose.</u> <i>Messiniano superiore</i>	<b>Mg</b>	Gessi e argille gessose. <i>Messiniano</i>
<b>GSa</b>	<u>Gruppo della gessoso- solfifera</u> <u>Calcare evaporitico brecciato.</u> <i>Messiniano superiore</i>	<b>Mc</b>	Calcare evaporitico. <i>Messiniano</i>
<b>PCT</b>	<u>Formazione San Pier Niceto</u> Depositi silicoclastici in diverse litofacies (PCTa, PCTb, PCTc) con frequenti. passaggi laterali e verticali, discordanti su vari termini del substrato sino al basamento. <i>Miocene medio-superiore</i>		Depositi terrigeni medio-supramiocenici dei Monti Peloritani. (Maa, Mar, Mac). <i>Serravalliano inferiore- Messiniano inferiore</i>
<b>PCTa</b>	Marne argillose grigie con sottili intercalazioni di arenarie fine arcosiche. <i>Miocene medio-superiore</i>	<b>Maa</b>	Marne argillose grigie con sottili intercalazioni di arenarie fini. <i>Serravalliano inferiore- Messiniano inferiore</i>
<b>PCTb</b>	Alternanza di arenarie medio-grossolane, di silt argillosi, e sottili livelli di argille marnose. <i>Miocene medio-superiore</i>	<b>Mar</b>	Alternanza di arenarie medio-grossolane, di silt argillosi, e sottili livelli di argille marnose. <i>Serravalliano inferiore- Messiniano inferiore</i>

<b>PCTc</b>	Conglomerati ad elementi eterometrici prevalentemente. cristallini, matrice sostenuti. <i>Miocene medio-superiore</i>	<b>Mac</b>	Conglomerati poligenici. <i>Serravalliano inferiore-Messiniano inferiore</i>
<b>ASI</b>	<u>Argille scagliose dei Monti Peloritani.</u> Argille varicolori scagliettate con frammenti di calcari micritici bianchi e siltiti carbonatiche grigie e con intercalazioni di radiolariti e di calcari diasprigni nerastri. Localmente inglobano lembi di calcari nummulitici e blocchi decametrici di quarzareniti numidiche. <i>Cretacico superiore</i>	<b>AS</b>	Unità delle Argille Scagliose Antisicilidi. <i>Cretaceo Superiore</i>
<b>PMPa</b>	<u>Complesso plutonico tardo varisico.</u> Filoni pegmatitico-aplitici biancastri. <i>Permiano</i>		
<b>PMAa</b>	<u>Complesso metamorfico varisico</u> Paragneiss grigi, passanti a micascisti grigio-scuri. Si associano corpi di gneiss occhiadini, lenti metriche di anfiboliti <i>s.l.</i> , banchi di quarziti e marmi, non cartografa bili. <i>Pre-Carbonifero</i>	<b>UAg</b>	Metamorfiti erciniche dell'Unità dell'Aspromonte: Gneiss occhiadini, paragneiss e micascisti.
<b>MLEa</b>	<u>Unità tettonica del Mela. Metamorfiti del Mela.</u> Paragneiss grigi a grana minuta, passanti a micascisti argentei ricchi in muscovite. Foliazione principale crenulata. Fratture centimetriche. <i>Paleozoico</i>		
<b>MLEb</b>	Anfiboliti (meta-orneblenditi) da verde cupo a verde chiaro. <i>Paleozoico</i>	<b>UA</b>	Metamorfiti erciniche dell'Unità dell'Aspromonte: Anfiboliti
<b>MLEc</b>	Marmi a due miche di colore grigio, grana medio-fine e tessitura fortemente crenulata, con livelli silicatici. Fratture tardive rinsaldate da calcite. <i>Paleozoico</i>	<b>UAc</b>	Metamorfiti erciniche dell'Unità dell'Aspromonte: Marmi impuri
<b>FDNa</b>	<u>Metamorfiti di Mandanici.</u> Marmi a muscovite a bande grigio-chiaro e scuro, grana fine, con quarzo, clorite e albite. <i>Paleozoico</i>	<b>UMm</b>	Metamorfiti erciniche dell'Unità di Mandanici: Marmi grigio-scuri
<b>FDNb</b>	<u>Metamorfiti di Mandanici.</u> Filladi prevalenti passanti a subordinate metareniti; tessitura scistosa. <i>Paleozoico</i>	<b>UM</b>	Metamorfiti erciniche dell'Unità di Mandanici: Filladi

Tabella 1 - Confronto tra le descrizioni delle Unità litologiche delle due basi cartografiche utilizzate nello studio: Foglio CARG e Carta Geologica della Provincia di Messina

La revisione critica delle informazioni analitiche, insieme al confronto GIS delle relative cartografie, ha consentito l'estrapolazione delle informazioni più utili all'interpretazione geologica per gli scopi del progetto; quindi è stata selezionata la legenda della Carta Geologica a scala 1:50.000 (Provincia di Messina) come più significativa dal punto di vista geolitologico, mentre la Carta Geologica CARG mostra maggior attenzione agli aspetti stratigrafici. Dopo aver individuato la legenda utile al progetto si è proceduto alla integrazione delle cartografie vettoriali, riportando su una versione di sintesi - la Carta Litologica di Progetto (<geologia\_MEcom\_ENEA>, poligoni + linee) - l'interpretazione geometrica di miglior dettaglio fra le due versioni di partenza (fig. 8). Contestualmente a questa elaborazione si è proceduto alla completa revisione geometrica delle Unità di Copertura Tardo-orogene e Quaternarie mediante

reinterpretazione dei limiti formazionali e degli elementi strutturali sulla base del riferimento migliore fra base topografica, ortofoto e DEM, con dettaglio fino alla scala di 1:2.000. In molti casi la reinterpretazione ha interessato anche le Unità Orogene Metamorfiche.

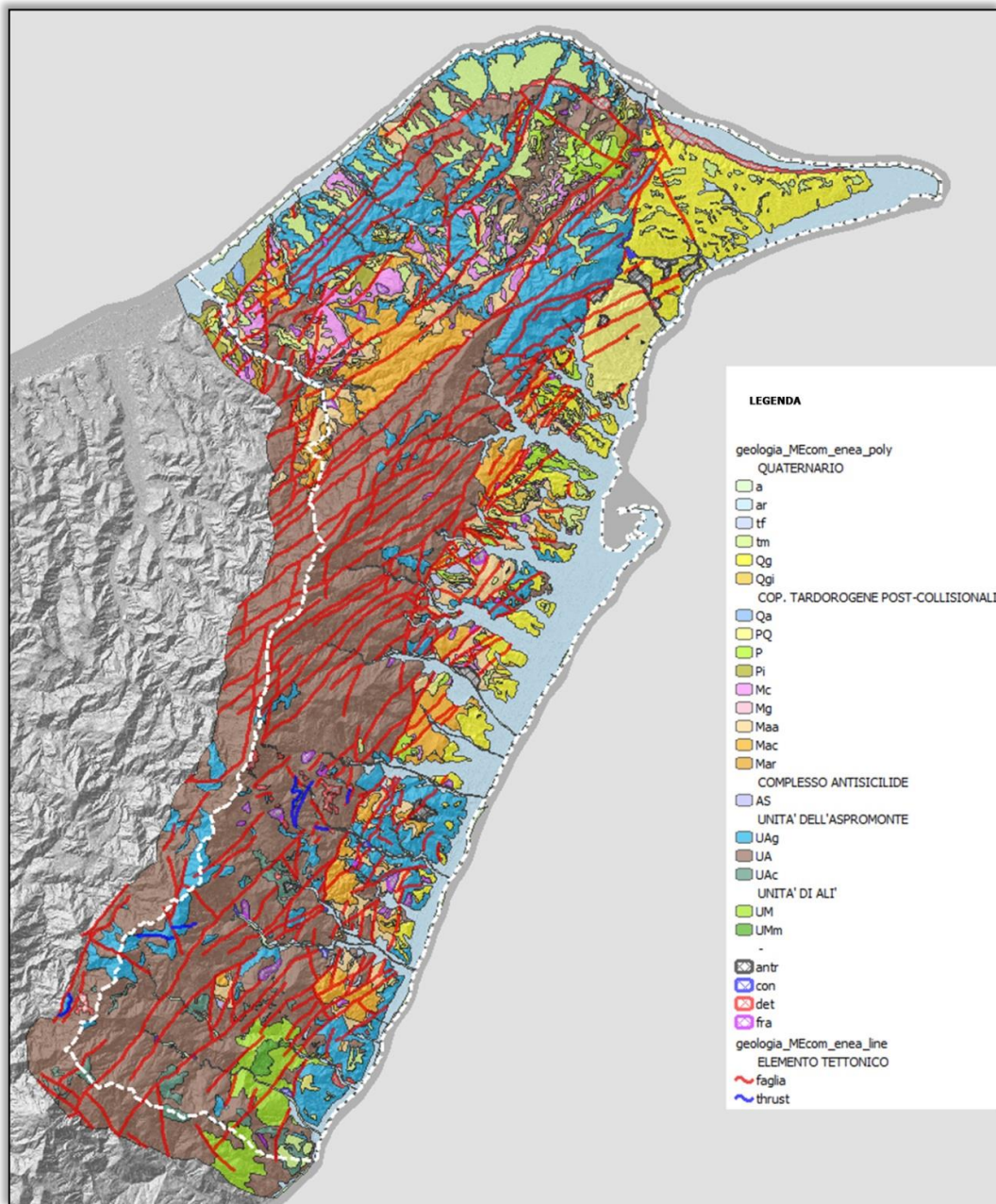


Figura 8 - Carta Litologica di progetto "geologia\_MEcom\_ENEA"

### 3.5 Bibliografia

- Carrara A., Cardinali M., Guzzetti F., Reichenbach P. (1995). GIS Techniques in Mapping Landslide Hazard. In: "Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards", A. Carrara and F. Guzzetti (eds.), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 135-175;
- Bourrough P.A., McDonnell R.A. (1998). Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, New York;
- Gomarasca M.A.(2009). Basics of geomatics. Springer.

## 4. CAMPAGNA GPS

Per le attività da svolgere ed in particolare in supporto alla gestione dei dati informatici, si è ritenuto opportuno condurre una campagna di misure GPS estesa a tutta l'area del comune di Messina. Lo scopo fondamentale è stato quello di verificare la precisione della georeferenziazione dei dati forniti, come le ortofoto a colori ed il DEM con cella a 2 metri. Le stesse stazioni sono poi state usate per la georeferenziazione delle foto aeree CART 2000 e ATA 2008, rispettivamente prima e dopo degli eventi franosi del 2007. La scelta di operare in modalità "fast-static" è stata dettata dalla necessità di avere il massimo della precisione in tempi comunque brevi in relazione al numero elevato di punti da acquisire ed agli spostamenti sul territorio da effettuare.

### 4.1 Misure di campo

Per la campagna di misure topografiche, ci si è avvalsi di un DGPS Trimble 5700, un GPS differenziale a doppia frequenza che ha lavorato in modalità *fast-static*. Il ricevitore base è stato posto sul tetto dell'edificio della Protezione Civile Regionale (Base Locale) a Messina, mentre un secondo ricevitore veniva posizionato sui punti da rilevare. Le coordinate della Base Locale sono state fatte derivare mediante uno statico, con partenza dal punto trigonometrico dell'Istituto Geografico Militare denominato Torre Faro, di cui è stata acquistata la relativa monografia. Sono state rilevate 65 posizioni e il tempo per ciascuno stazionamento è stato settato a 10 minuti con presenza di almeno 6 satelliti. La restituzione delle coordinate rilevate è stata ottenuta con il *software Trimble Business Centre (TBC)*, versione 2,70. Per la trasformazione delle coordinate nel sistema Gauss-Boaga fuso Est e per la conversione dalla quota ellissoidica rilevata dal GPS alla quota ortometrica, è stato usato il *software* dell'Istituto Geografico Militare denominato VERTO. Il rilievo così ottenuto, è stato trasformato in *shapefile* e visualizzato in ambiente GIS. I punti rilevati sono stati numerati progressivamente e nelle figure successive vengono mostrati i 65 stazionamenti del DGPS più la base IGM di partenza. I numeri delle figure corrispondono alla sequenza dei punti rilevati.



Figura 1 - Pilastrino dell'Istituto Geografico Militare.



Figura 2 - Base Locale su Protezione Civile.



Figura 3 - Fine del marciapiede.



Figura 4 - Fine del marciapiede.



Figura 5 - Fine del marciapiede.



Figura 6 - Angolo del marciapiede.



Figura 7 - Fine del muretto.



Figura 8 - Fine del muretto.



Figura 9 - Angolo della piazzola.



Figura 10 - Angolo del marciapiede.



Figura 11 - Fine del muretto.



Figura 12 - Angolo del marciapiede.



Figura 13 - Angolo della terrazza.

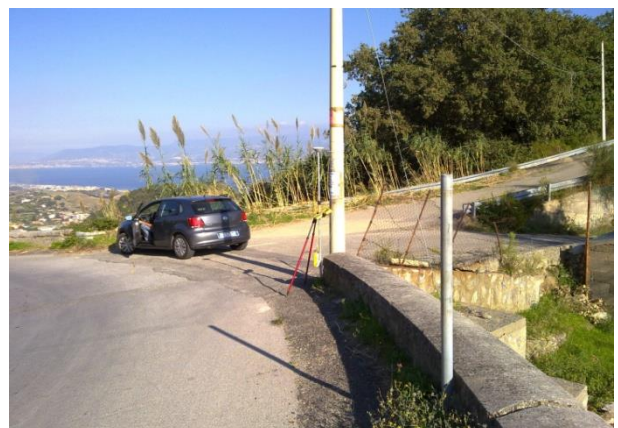


Figura 14 - Fine del muretto.



Figura 15 - Cambio di pavimentazione.



Figura 16 - Fine del marciapiedi.



Figura 17 - Fine del muretto.



Figura 18 - Cambio di pendenza sulla briglia.

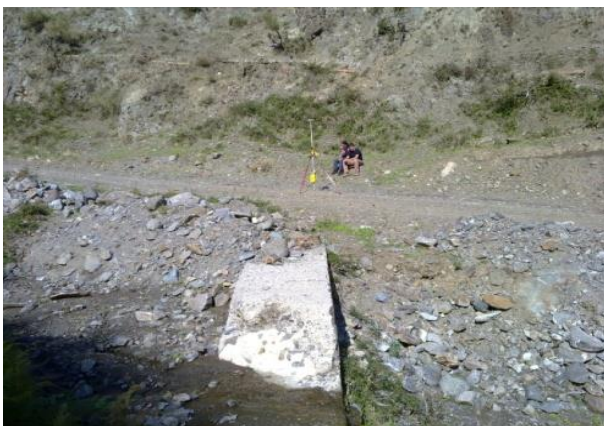


Figura 19- Al centro strada allineato alla briglia.



Figura 20 - Fine dello spartitraffico.



Figura 21 - Incrocio dei muretti.



Figura 22 . Spigolo dell' Edicola.



Figura 23 - Fine del quarto muretto.



Figura 24 - Angolo della piazzola.



Figura 25 - Fine del muretto.



Figura 26 - Fine del muretto.



Figura 27 - Tra due ringhiere: punto materializzato a terra.



Figura 28 - Spigolo della colonna.



Figura 29 - Spigolo del muretto.



Figura 30 - Spigolo del marciapiedi.



Figura 31 - Fine del muretto.



Figura 32 - Spigolo del muretto.



Figura 33 - Fine del muretto. Foto senza antenna GPS.



Figura 34 - Spigolo del muretto.



Figura 35 - Fine del muretto.



Figura 36 - Angolo del marciapiedi.



Figura 37- Fine del muretto.



Figura 38 - Fine del secondo muretto.



Figura 39 - Spigolo del muretto del belvedere.



Figura 40 - Angolo del muretto di recinzione.



Figura 41- Su roccia affiorante.



Figura 42 - Spigolo del rudere.

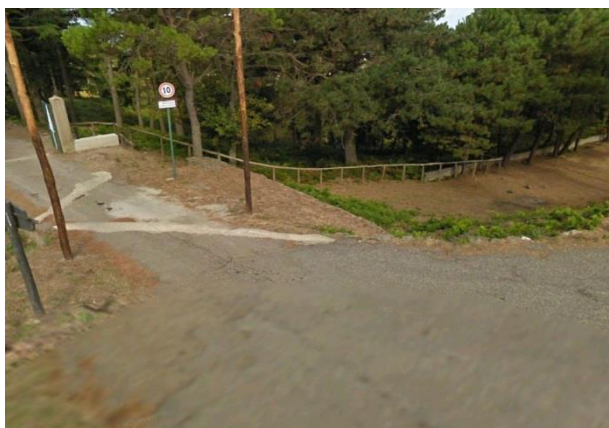


Figura 43- Fine della striscia bianca. Foto senza antenna GPS.



Figura 44 - Angolo del belvedere.



Figura 45- Angolo della piazzola. Foto senza antenna GPS.



Figura 46 - Spigolo del manufatto.



Figura 47 - Cambio di pavimentazione.



Figura 48 - Fine del marciapiedi.



Figura 49 - Spigolo del manufatto.



Figura 50 - Angolo del muretto.



Figura 51 - Angolo del muretto di recinzione.



Figura 51 - Angolo del muro di recinzione.



Figura 52 - Spigolo del muretto.



Figura 53 - Fine del muretto.



Figura 54 - Fine del muretto.



Figura 55 - Spigolo del rudere.



Figura 56 - Fine della striscia segnaletica. piazzola.



Figura 57 - Spigolo del muretto della



Figura 58 - Angolo della fontanella.



Figura 59 - Bivio della strada sterrata.



Figura 60- Spigolo della platea.



Figura 61 - Spigolo della roccia affiorante.



Figura 62 - Spigolo del muretto.

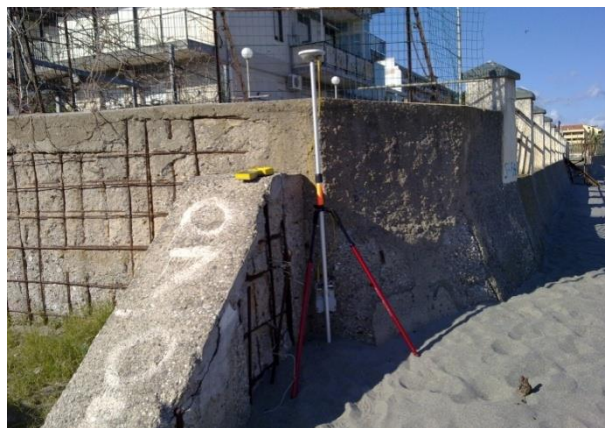


Figura 63 - Angolo del muretto.



Figura 64 – Verifica della quota del livello del mare.

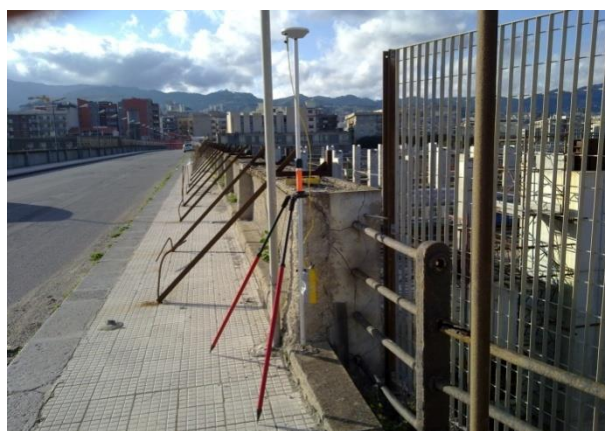


Figura 65 – Su borchia del vertice V5 del Comune di Messina

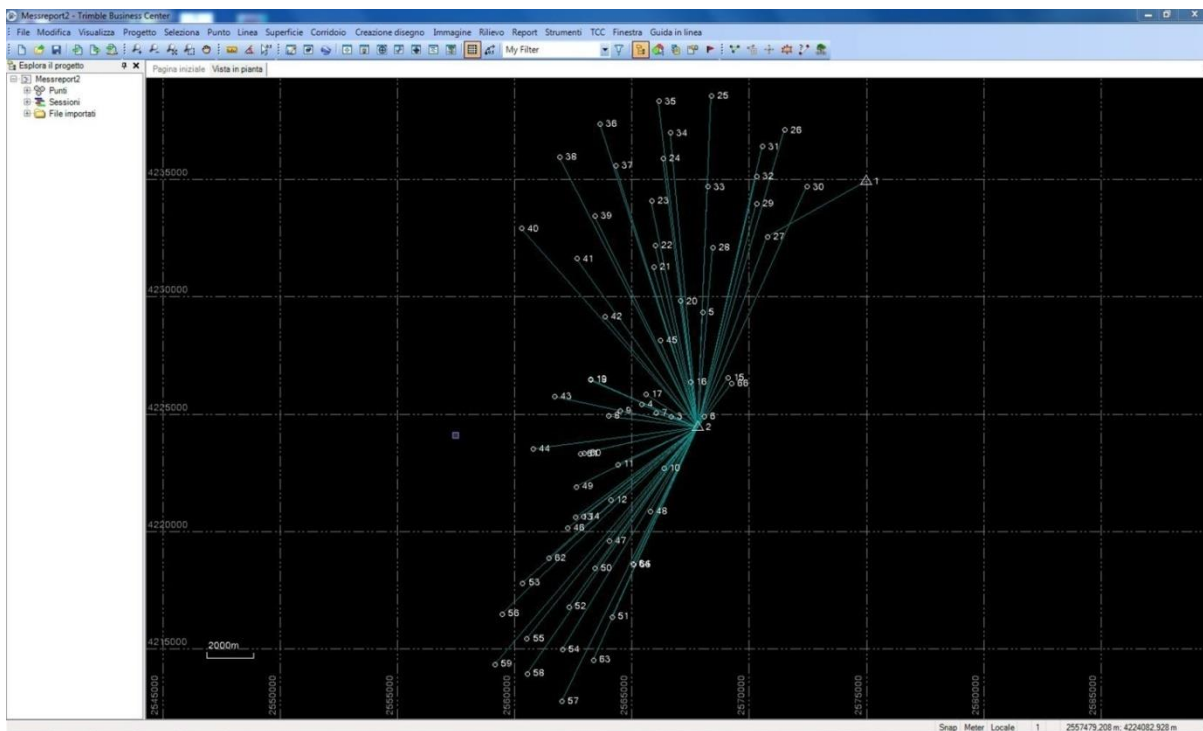


Figura 66 - Schermata riassuntiva del rilievo effettuato ottenuta dal programma TBC

## 4.2 Analisi del Rilievo DGPS

I dati grezzi ottenuti dal rilievo DGPS (fig. 66) consistono in posizioni a coordinate geografiche in gradi, primi e secondi e quota ellissoidica, nel sistema geodetico WGS84. La conversione delle coordinate e della quota effettuato con il *software* VERTO, ha restituito le coordinate metriche in Gauss-Boaga Fuso Est Datum Roma40 utilizzate nel GIS per la visualizzazione cartografica. Anche la quota ellissoidica è stata convertita in ortometrica, per un'analisi dettagliata del DEM a disposizione. Nella tabella 1 viene riportata la sequenza del rilievo e le informazioni relative al giorno e ora in GMT del rilievo, la precisione in metri del rilievo in planimetria (H) e sulla verticale (V), Latitudine e Longitudine in WGS84 e la quota ellissoidica, le coordinate metriche in GB, la quota ortometrica e il  $\Delta H$ , ovvero la differenza tra ellissoide e geoide calcolato con VERTO in maniera puntuale.

La Tabella 1 è stata convertita in *shapefile* (chiamato Rilevato) e visualizzato in un progetto GIS, sovrapponendolo ad una base fotografica georeferenziata. Nella figura 67 è possibile osservare la distribuzione spaziale del rilievo all'interno del Comune di Messina.

Al fine di verificare la qualità della georeferenziazione delle ortofoto, si è provveduto a creare uno *shapefile* manuale (chiamato Osservato), andando a ricercare sull'ortofoto i punti rilevati in campagna. Nella figura 68 è riportato l'esempio del rilievo 31 dove si osserva che la posizione del rilievo ottenuto con DGPS (in rosso) differisce dalla posizione che si desume presumibilmente dall'ortofoto (in verde). In questa maniera si cerca di conoscere di quanto la localizzazione fornita dall'ortofoto sia difforme rispetto alla posizione rilevata e quindi di quanto e in che direzione bisognerebbe spostare l'ortofoto per avere una giusta georeferenziazione.

Nella figura 69, viene mostrato sempre il rilievo 31 con un ingrandimento maggiore, evidenziando i *pixels* di 25x25 centimetri dell'ortofoto. Considerando che il rilievo 31 è stato effettuato alla fine del muretto sullo spigolo verso la strada, la posizione più probabile potrebbe essere quella evidenziata dal pallino verde. Risulta evidente quindi che in questo caso l'ortofoto andrebbe spostata di circa 37 centimetri in direzione 126 gradi.

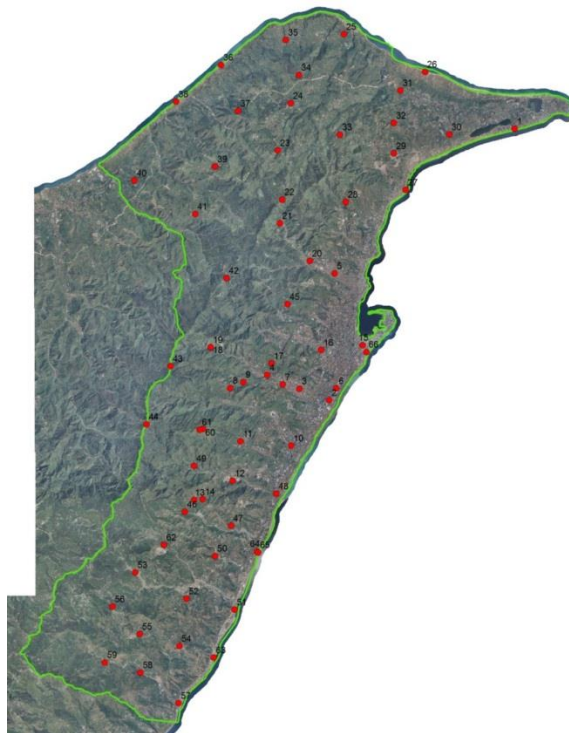


Figura 67 - Distribuzione spaziale del rilievo

	Date_Obs	GMT_Obs	H_Prec	V_Prec	Lat_WGS84	Lon_WGS84	H_ell	N_ROMA40	E_ROMA40	H_GEOID	ΔH
1			0	0	38,153760880	15,374105621	48,170	4234900,004	2574950,696	5,986	42,184
2			0,003	0,005	38,095914526	15,324396837	60,411	4224421,925	2567791,955	18,637	41,774
3	18/10/2011	14:23:15	0,002	0,004	38,101351420	15,315682227	103,402	4224858,145	2566642,159	61,512	41,890
4	18/10/2011	14:40:30	0,003	0,004	38,103103533	15,310575859	173,413	4225391,152	2565396,628	131,393	42,020
5	18/10/2011	15:25:00	0,002	0,004	38,123776880	15,325352797	101,652	4229312,457	2567995,695	59,493	42,159
6	19/10/2011	08:27:00	0,002	0,003	38,101385777	15,325528236	49,453	4224877,022	2568064,589	7,658	41,795
7	19/10/2011	09:27:30	0,003	0,005	38,101901945	15,313052739	128,719	4225024,184	2566001,374	86,770	41,949
8	19/10/2011	10:03:15	0,006	0,016	38,101496499	15,300712186	385,308	4224887,984	2563972,611	343,226	42,082
9	19/10/2011	11:00:15	0,003	0,005	38,102239071	15,302776044	273,589	4225119,594	2564473,549	231,525	42,064
10	19/10/2011	11:41:15	0,002	0,004	38,090230777	15,314353972	72,098	4222661,557	2566331,467	30,408	41,690
11	19/10/2011	12:08:15	0,003	0,006	38,090815405	15,302298198	175,575	4222830,819	2564369,767	133,711	41,864
12	19/10/2011	12:40:30	0,004	0,014	38,081887820	15,301019031	180,345	4221310,340	2564066,664	138,601	41,744
13	19/10/2011	13:09:15	0,002	0,005	38,075498877	15,290885904	428,089	4220566,070	2562577,515	386,293	41,796
14	19/10/2011	13:30:15	0,005	0,015	38,075615834	15,292258366	367,661	4220603,873	2562911,457	325,889	41,772
15	20/10/2011	07:39:30	0,002	0,006	38,110763702	15,333728468	46,776	4226540,734	2569076,612	4,900	41,876
16	20/10/2011	08:15:45	0,002	0,004	38,110208210	15,323152664	92,466	4226360,012	2567477,868	50,504	41,962
17	20/10/2011	08:42:15	0,003	0,004	38,104549752	15,311292426	275,230	4225837,887	2565568,478	233,186	42,044
18	20/10/2011	09:06:00	0,017	0,008	38,110585147	15,293658566	417,842	4226452,439	2563221,251	375,607	42,235
19	20/10/2011	09:34:45	0,005	0,011	38,110613934	15,293640613	419,230	4226461,288	2563216,836	376,994	42,236
20	20/10/2011	10:56:00	0,005	0,007	38,125362555	15,321445965	158,878	4229795,641	2567042,746	116,638	42,240
21	20/10/2011	11:14:45	0,003	0,004	38,134100828	15,312761187	302,729	4231249,576	2565895,249	260,349	42,380
22	20/10/2011	11:38:00	0,004	0,007	38,141053390	15,313121092	490,885	4232160,129	2565977,598	448,463	42,422
23	20/10/2011	12:30:45	0,002	0,005	38,151223544	15,312459809	474,883	4234061,028	2565806,096	432,376	42,507
24	20/10/2011	13:00:30	0,002	0,009	38,161126218	15,314557082	346,614	4235883,300	2566305,464	304,049	42,565
25	20/10/2011	13:26:45	0,002	0,005	38,173728320	15,331070321	116,232	4238546,817	2568358,344	73,669	42,563

26	20/10/2011	13:55:15	0,018	0,029	38,164945295	15,351913011	44,536	4237091,783	2571487,417	2,138	42,398
27	12/03/2012	09:10:30	0,013	0,028	38,142182710	15,344721529	46,455	4232536,626	2570740,447	4,229	42,226
28	12/03/2012	12:03:15	0,003	0,008	38,140723777	15,331200490	283,519	4232072,792	2568428,586	241,206	42,313
29	12/03/2012	13:06:15	0,005	0,008	38,150757447	15,342898336	182,148	4233943,924	2570288,488	139,829	42,319
30	12/03/2012	13:26:15	0,005	0,006	38,153074202	15,355720120	86,731	4234671,612	2572428,076	44,469	42,262
31	12/03/2012	14:00:45	0,008	0,013	38,162660118	15,343983651	206,492	4236381,403	2570537,115	164,076	42,416
32	12/03/2012	14:20:00	0,007	0,014	38,154567822	15,342918142	281,599	4235118,423	2570286,028	239,221	42,378
33	12/03/2012	14:38:45	0,004	0,010	38,153147545	15,330321057	404,981	4234667,958	2568199,361	362,536	42,445
34	12/03/2012	15:06:15	0,013	0,035	38,164655577	15,315878555	291,128	4236972,995	2566620,328	248,546	42,582
35	12/03/2012	15:30:30	0,003	0,008	38,173042660	15,313818760	140,636	4238322,362	2566112,186	98,016	42,620
36	12/03/2012	15:53:45	0,002	0,005	38,165960534	15,295526512	47,854	4237358,505	2563617,071	5,209	42,645
37	13/03/2012	09:17:45	0,009	0,024	38,160191641	15,302193073	342,418	4235583,876	2564274,613	299,818	42,600
38	13/03/2012	09:53:15	0,002	0,003	38,161395593	15,284362640	46,210	4235942,271	2561883,859	3,581	42,629
39	13/03/2012	10:19:00	0,004	0,007	38,145247458	15,294472335	305,001	4233438,593	2563381,890	262,448	42,553
40	13/03/2012	11:00:15	0,004	0,008	38,143536437	15,273661439	136,833	4232895,152	2560270,581	94,255	42,578
41	13/03/2012	11:31:30	0,003	0,007	38,135319853	15,291296292	390,499	4231607,455	2562619,489	347,988	42,511
42	13/03/2012	11:56:45	0,003	0,008	38,123265624	15,300215053	592,207	4229131,305	2563828,755	549,834	42,373
43	13/03/2012	12:35:00	0,004	0,008	38,104266162	15,283259962	892,513	4225729,542	2561668,272	850,249	42,264
44	13/03/2012	12:54:15	0,002	0,003	38,093020307	15,275402516	1151,554	4223491,449	2560740,946	1109,387	42,167
45	13/03/2012	13:58:15	0,002	0,003	38,115945736	15,313871370	288,823	4228121,050	2566182,972	246,634	42,189
46	13/03/2012	15:27:45	0,002	0,010	38,074026430	15,285431725	281,717	4220110,387	2562225,844	239,939	41,778
47	13/03/2012	15:50:45	0,003	0,009	38,072263509	15,300726707	135,722	4219576,427	2564004,878	94,156	41,566
48	14/03/2012	07:49:15	0,006	0,009	38,080245007	15,311892979	63,260	4220813,225	2565742,855	21,713	41,547
49	14/03/2012	08:28:15	0,005	0,009	38,083769223	15,290935826	391,419	4221882,343	2562582,778	349,507	41,912
50	14/03/2012	09:05:30	0,003	0,006	38,064469142	15,294160735	103,573	4218403,575	2563386,337	62,079	41,494
51	14/03/2012	09:25:45	0,003	0,006	38,053737395	15,301209317	44,658	4216332,711	2564139,969	3,485	41,173

52	14/03/2012	10:06:15	0,005	0,010	38,055148288	15,285614526	225,802	4216757,763	2562287,762	184,382	41,420
53	14/03/2012	10:34:45	0,003	0,006	38,062474369	15,273509192	392,275	4217772,916	2560308,487	350,565	41,710
54	14/03/2012	11:32:30	0,003	0,007	38,045225257	15,284414519	261,474	4214930,665	2562004,890	220,263	41,211
55	14/03/2012	11:51:45	0,012	0,036	38,050743777	15,274202187	346,087	4215391,041	2560489,098	304,659	41,428
56	14/03/2012	12:17:00	0,002	0,005	38,054192216	15,265874612	575,740	4216448,743	2559429,718	534,097	41,643
57	14/03/2012	13:15:30	0,008	0,010	38,034083230	15,284274106	56,021	4212729,194	2561982,023	15,103	40,918
58	14/03/2012	13:33:00	0,005	0,009	38,041928749	15,274249151	187,145	4213907,022	2560507,918	145,899	41,246
59	14/03/2012	14:13:15	0,004	0,008	38,043220608	15,264603260	319,640	4214298,475	2559130,365	278,213	41,427
60	15/03/2012	09:01:45	0,001	0,003	38,092391552	15,292368768	701,833	4223308,877	2562924,055	659,820	42,013
61	15/03/2012	09:22:30	0,002	0,005	38,092308249	15,291832297	716,179	4223282,513	2562793,628	674,160	42,019
62	15/03/2012	11:35:15	0,003	0,009	38,065886582	15,282087778	263,261	4218830,221	2561418,193	221,541	41,720
63	15/03/2012	13:52:00	0,004	0,007	38,043750357	15,293845477	46,870	4214483,001	2563330,413	5,868	41,002
64	15/03/2012	14:21:00	0,004	0,009	38,065030832	15,304805039	45,050	4218585,480	2565003,397	3,689	41,361
65	15/03/2012	14:34:00	0,003	0,007	38,064888589	15,304965280	41,535	4218541,854	2565042,660	0,183	41,352
66	15/03/2012	15:06:15	0,005	0,015	38,105907074	15,334342057	54,532	4226277,603	2569227,483	12,689	41,843

Tabella 1 - Le colonne illustrano la sequenza del rilievo, le informazioni relative al giorno e ora in GMT del rilievo, la precisione in metri del rilievo in planimetria (H) e sulla verticale (V), Latitudine e Longitudine in WGS84 e la quota ellissoidica, le coordinate metriche in GB, la quota ortometrica e il  $\Delta H$ , ovvero la differenza tra ellissoide e geoida calcolato con VERTO in maniera puntuale.

Questo tipo di elaborazione è stata condotta solo per quei punti per i quali si poteva ottenere una posizione univoca controllando l'ortofoto. I punti per i quali l'incertezza era tale da non permettere una soddisfacente collocazione, sono stati esclusi dall'elaborazione. Pertanto sono stati utilizzati solo 54 rilievi (tab. 2) ed eliminati i rilievi contrassegnati con la seguente numerazione: 18; 19; 23; 27; 41; 46; 47; 59; 61; 63; 65 e 66. Su questi dati (*shapefile* Osservato), è stata condotta un'analisi geostatistica, con spazializzazione sia della distanza che dell'azimut. La spazializzazione della distanza è riassunta nella figura 70, dove viene messo in risalto come la differenza tra rilevato/osservato è compresa tra un minimo di circa 7 centimetri, fino a un massimo di 84 centimetri. La distribuzione dello spostamento, che è di pochi centimetri vicino alla Base Locale, aumenta con l'aumentare della distanza dalla Base Locale. La media delle eventuali correzioni da apportare all'ortofoto è di appena 37 centimetri. Analoga spazializzazione è stata condotta sul valore azimut, il risultato è schematizzato in figura 71. Qui è possibile osservare come l'ortofoto per avere un'ottima georeferenziazione, dovrebbe essere traslata soprattutto nei quadranti a Sud, mancando quasi nella totalità eventuali spostamenti tra i 270 e i 90 gradi. La media degli azimut risulta essere di 159 gradi.

<b>Point</b>	<b>NEAR_DIST</b>	<b>AZIMUT</b>	<b>Point</b>	<b>NEAR_DIST</b>	<b>AZIMUT</b>
1	0,558	215	32	0,384	7
2	0,241	183	33	0,834	216
3	0,149	176	34	0,625	119
4	0,269	88	35	0,47	135
5	0,178	120	36	0,51	129
6	0,13	197	37	0,409	84
7	0,224	259	38	0,384	316
8	0,63	150	39	0,318	4
9	0,174	32	40	0,12	320
10	0,101	351	42	0,233	66
11	0,232	210	43	0,109	88
12	0,38	143	44	0,184	117
13	0,614	266	45	0,486	21
14	0,43	213	48	0,495	320
15	0,225	260	49	0,323	81
16	0,481	283	50	0,34	255
17	0,423	350	51	0,252	209
20	0,398	18	52	0,125	199
21	0,393	108	53	0,577	146
22	0,364	276	54	0,842	45
24	0,283	135	55	0,257	115
25	0,224	75	56	0,605	138
26	0,352	145	57	0,596	105
28	0,617	210	58	0,075	54
29	0,303	216	60	0,551	159
30	0,19	171	62	0,457	151
31	0,365	126	64	0,215	18

Tabella 2 - Valori per ogni coppia di punti rilevati (in rosso) e osservati (in verde), la distanza in metri e l'azimut in gradi.

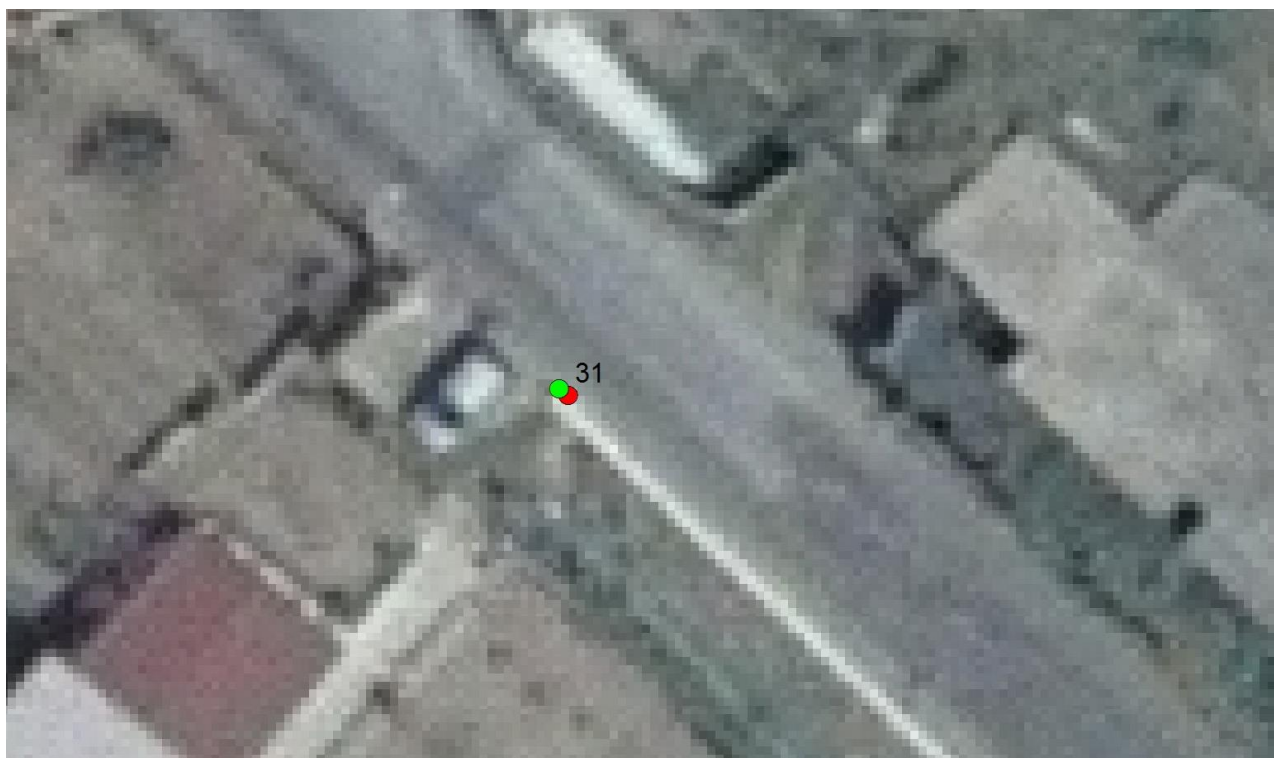


Figura 68 - Esempio del rilievo 31: in rosso la posizione del rilievo ottenuto con DGPS, in verde posizione del punto sull'ortofoto.

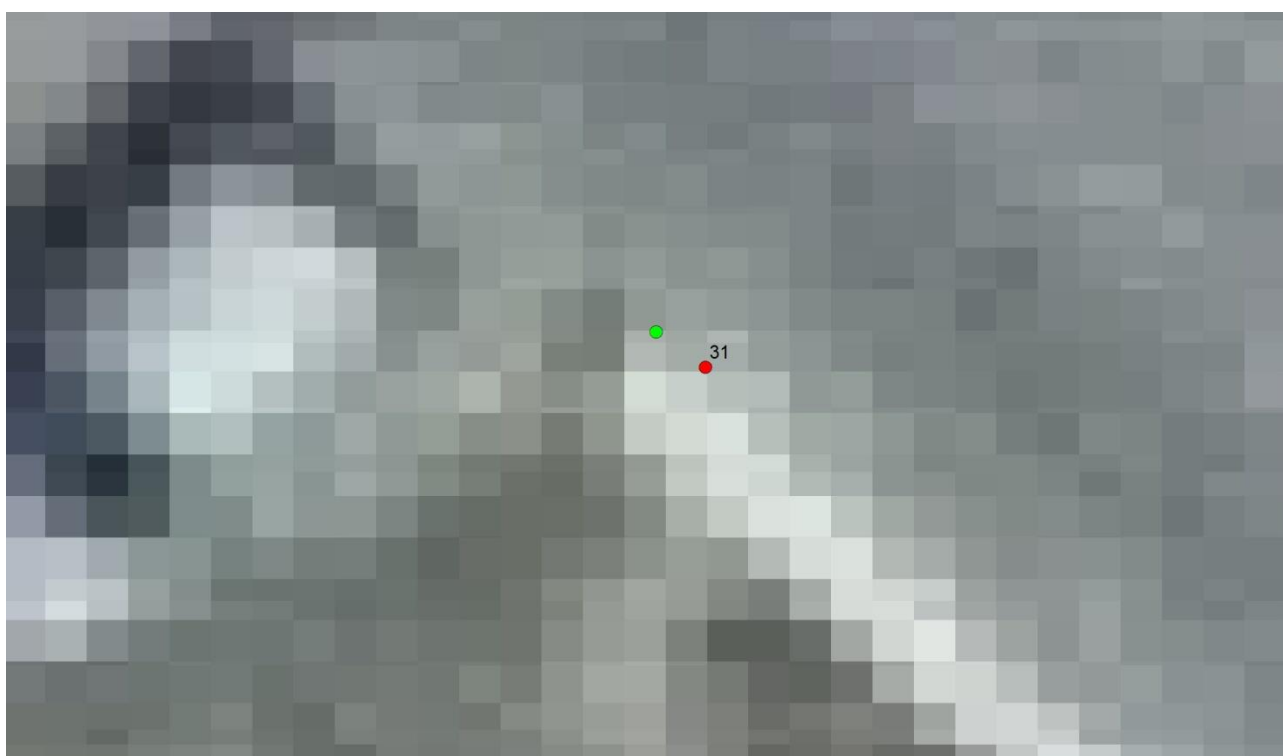


Figura 69 - Rilievo 31 con un ingrandimento maggiore, evidenziando i *pixels* di 25x25 centimetri dell'ortofoto. Considerando che il rilievo 31 è stato preso alla fine del muretto sullo spigolo verso la strada, la posizione più probabile potrebbe essere quella evidenziata dal pallino verde. Risulta evidente quindi che in questo caso l'ortofoto andrebbe spostata di circa 37 centimetri in direzione 126 gradi.

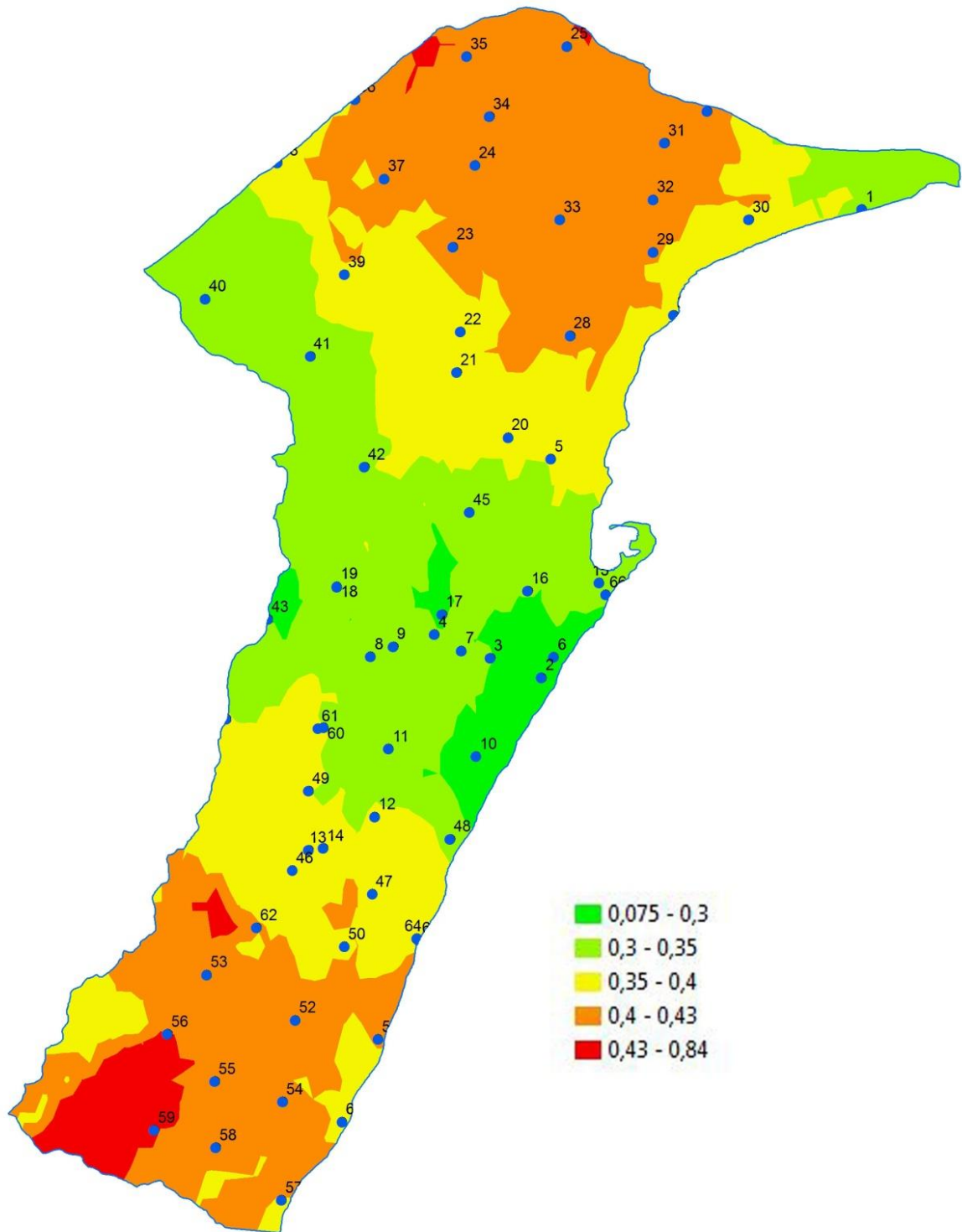


Figura 70 - Differenze tra rilevato e osservato per la distanza.

Nella figura 72 è mostrata la distribuzione del rilievo su un DEM con maglia a 2 metri. E' possibile notare che i punti rilevati coprono tutti i valori delle altimetrie presenti nel comune, andando da zone prossime alla quota del mare, fino alle quote più elevate presenti nel territorio, che superano i 1100 metri.

Al fine di controllare l'altimetria fornita dal DEM del Comune di Messina, si è provveduto a fare un'estrazione dei punti del rilievo DGPS rispetto al DEM stesso e a paragonare la quota dichiarata a quella misurata (*shapefile* Estratto). La tabella 3 riassume queste informazioni, dove

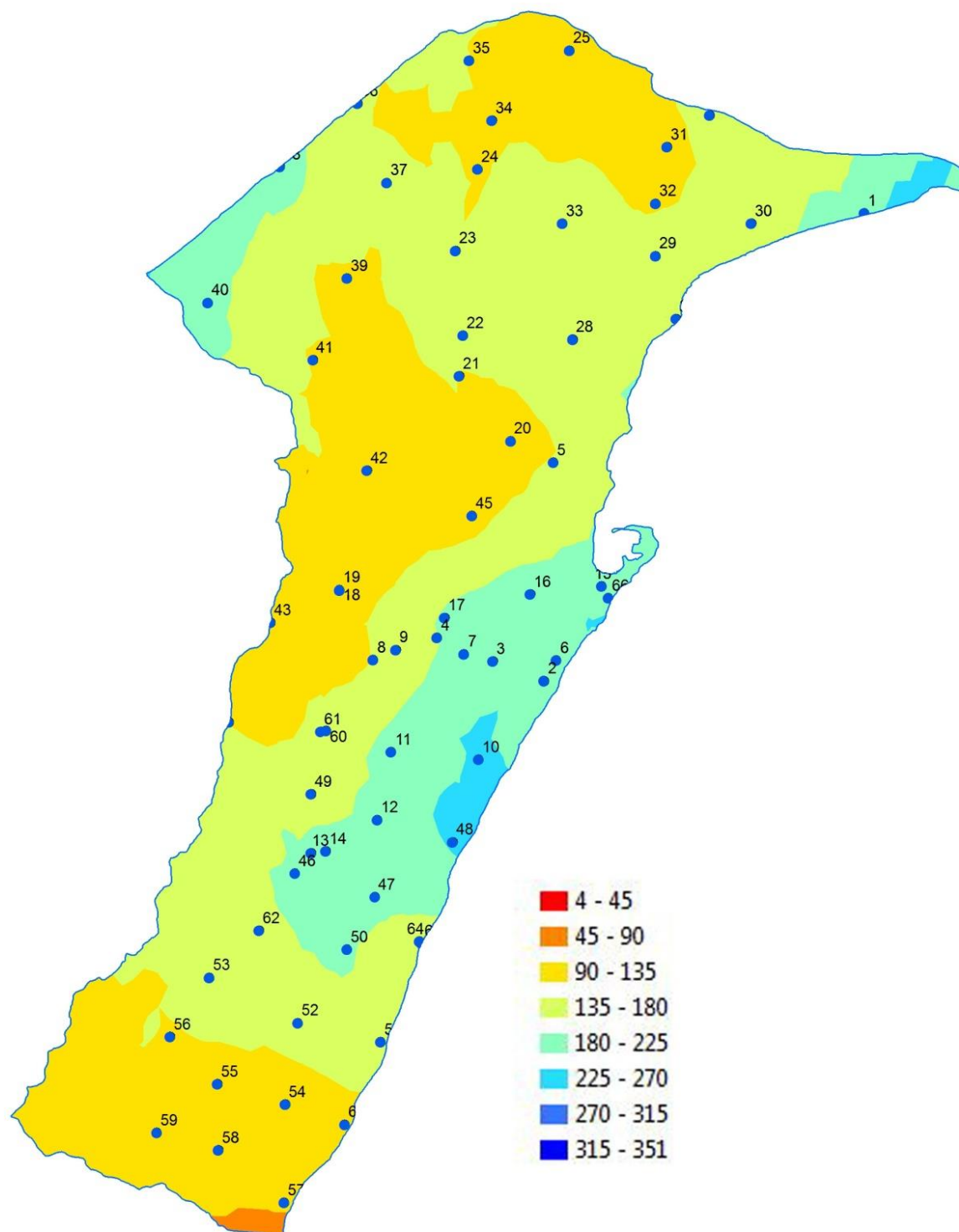


Figura 71 - Differenze tra rilevato e osservato per l'azimut.

per ciascun punto è associata la quota ortometrica ricavata dal rilievo DGPS, la quota estratta dal DEM e la differenza tra questi due valori.

E' possibile notare che alcuni punti rilevati differiscono sensibilmente dai punti estratti. Questa difformità è imputabile al fatto che alcuni rilievi sono stati effettuati ai margini di una scarpata, ai bordi di terrazzi o comunque in zone dove nell'intorno di 2 metri (cella del DEM), la differenza di quota era elevata. Pertanto ai fini dell'analisi geostatistica sono stati individuati dalle foto questi casi ed eliminati i rilievi 2; 9; 13; 24; 27; 39; 45; 47; 58; 59; 66.

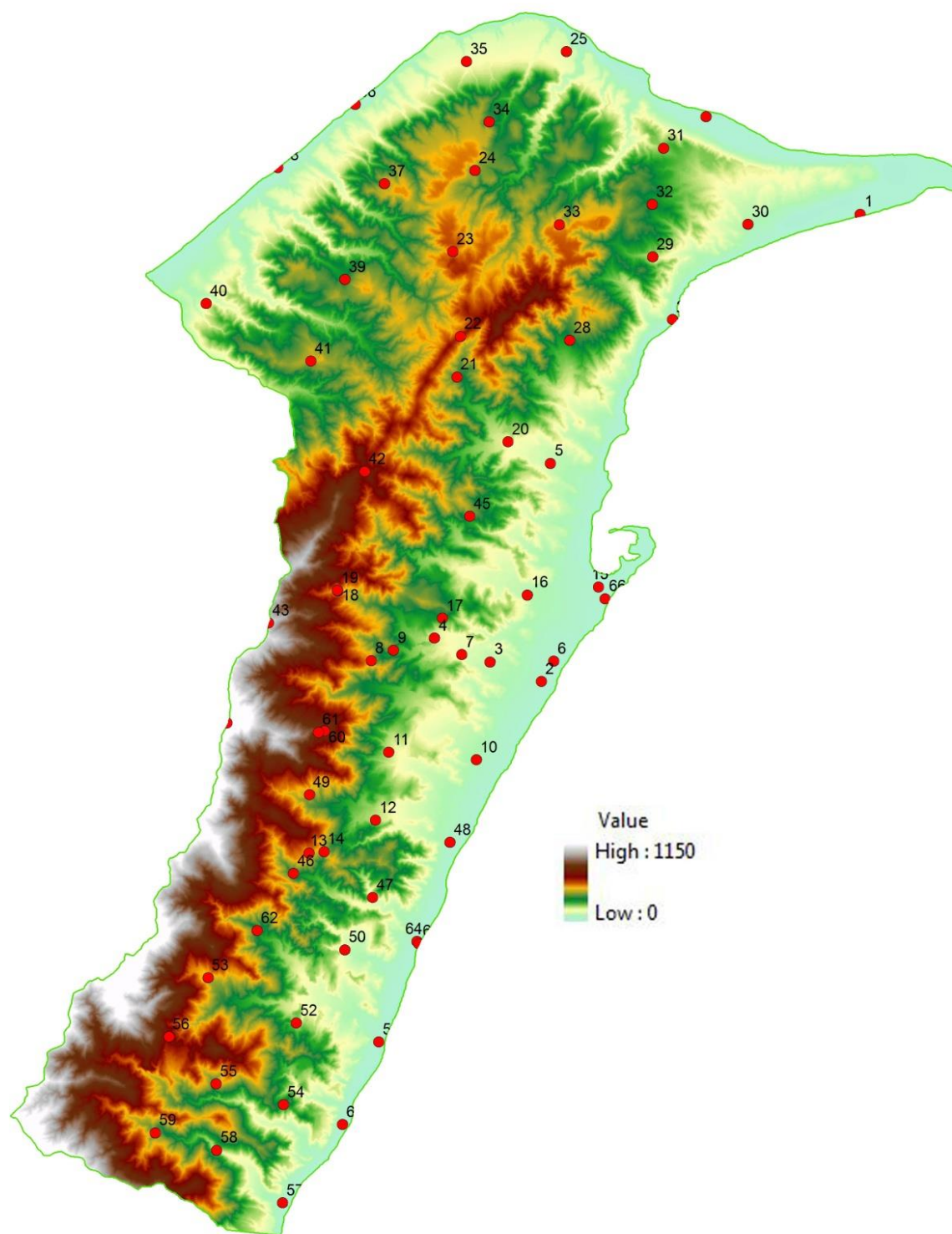


Figura 72 – Distribuzione altimetrica dei punti rilevati.

La figura 73 mostra come si distribuisce l'errore del DEM rispetto al dato rilevato, variando da un valore inferiore di oltre -2 metri, a un valore superiore di +0,78 metri. Quindi il DEM generalmente sottostima la quota effettiva di campagna con una media di -0,39 metri. Il punto 65 è stato preso sulla battigia per verificare grossolanamente la quota zero e il rilievo ha restituito una quota di +0,18 metri. Successivamente è stata calcolata l'altezza della marea relativa al giorno e all'ora in cui è stato effettuato il rilievo misurata al la stazione mareografica di Messina

che era di +0,13 metri. Pertanto il valore trovato è perfettamente allineato con il rilievo altimetrico effettuato.

Point	H_GEOI D	RASTERVAL UE	SCART O	Point	H_GEOI D	RASTERVAL UE	SCART O
1	5,89	4	-1,89	34	248,55	249	0,45
2	18,64	11	-7,64	35	98,02	97	-1,02
3	61,51	61	-0,51	36	5,21	3	-2,21
4	131,39	131	-0,39	37	299,82	299	-0,82
5	59,49	60	0,51	38	3,58	4	0,42
6	7,66	7	-0,66	39	262,45	260	-2,45
7	86,77	87	0,23	40	94,26	94	-0,26
8	343,23	341	-2,23	41	347,99	347	-0,99
9	231,53	229	-2,53	42	549,83	550	0,17
10	30,41	31	0,59	43	850,25	850	-0,25
11	133,71	134	0,29	44	1109,39	1109	-0,39
12	138,6	139	0,4	45	246,63	242	-4,63
13	386,29	381	-5,29	46	239,94	240	0,06
14	325,89	325	-0,89	48	21,71	21	-0,71
15	4,9	5	0,1	49	349,51	350	0,49
16	50,5	51	0,5	50	62,08	61	-1,08
17	233,19	233	-0,19	51	3,49	4	0,51
18	375,61	376	0,39	52	184,38	184	-0,38
19	376,99	377	0,01	53	350,57	350	-0,57
20	116,64	117	0,36	54	220,26	220	-0,26
21	260,35	259	-1,35	55	304,66	303	-1,66
22	448,46	448	-0,46	56	534,1	534	-0,1
23	432,38	432	-0,38	57	15,1	13	-2,1
24	304,05	305	0,95	58	145,9	140	-5,9
25	73,67	73	-0,67	60	659,82	659	-0,82
26	2,14	1	-1,14	61	674,16	674	-0,16
28	241,21	240	-1,21	62	221,54	221	-0,54
29	139,83	140	0,17	63	5,87	6	0,13
30	44,47	45	0,53	64	3,69	3	-0,69
31	164,08	164	-0,08	65	0,18	0	-0,18
32	239,22	240	0,78	66	12,69	2	-10,69
33	362,54	361	-1,54				

Tabella 3 - Per ciascun punto è associata la quota ortometrica ricavata dal rilievo DGPS, la quota estratta dal DEM e la differenza tra questi due valori

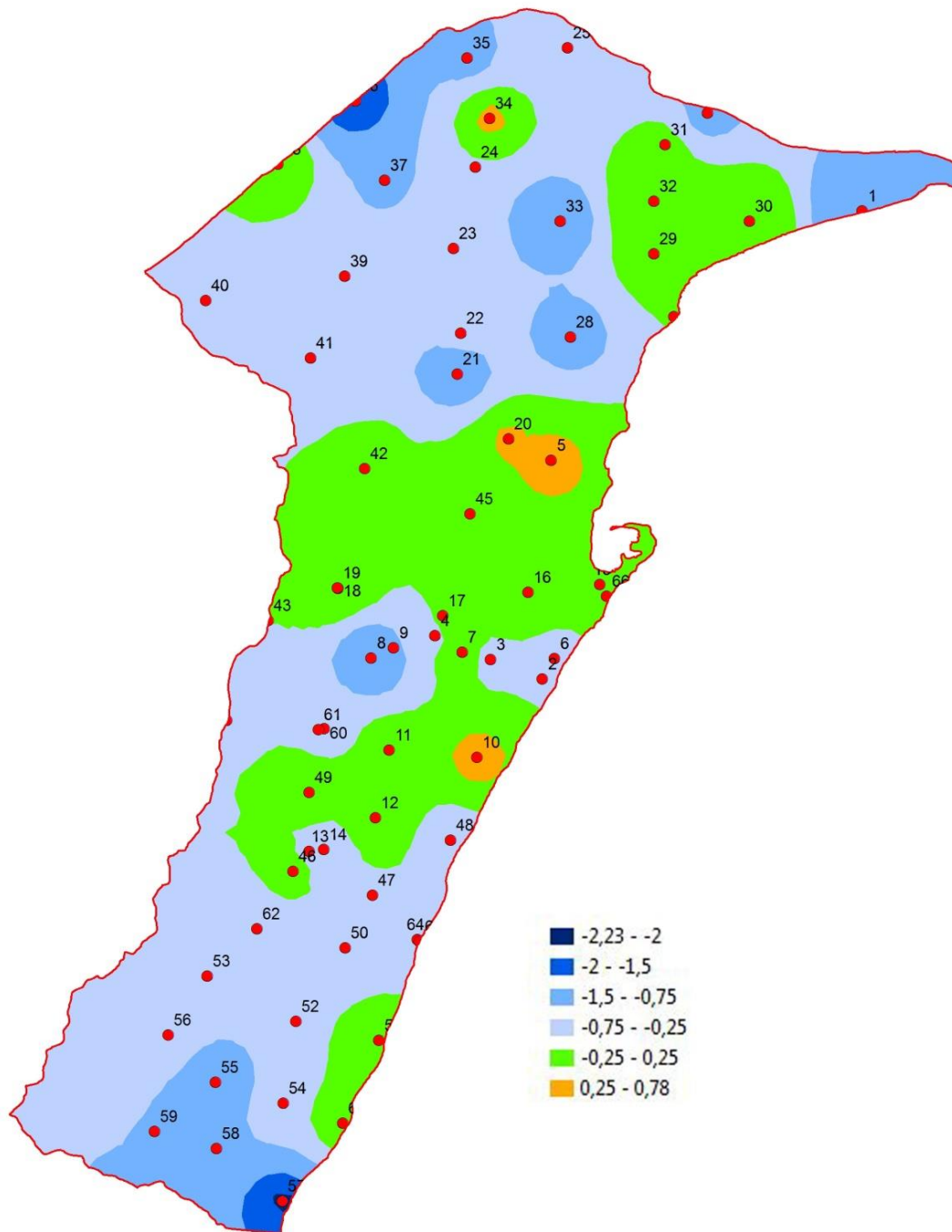


Figura 73 - Distribuzione dell'errore del DEM rispetto al dato rilevato

### 4.3 Bibliografia

- Surace L. (1993). Il progetto IGM95. Bollettino di geodesia e scienze affini, 1993.
- Cina A. (2000). GPS, Principi, modalità e tecniche di posizionamento.
- Cina A., Manzano A. (2000). Misure GPS in tempo reale: applicabilità e precisioni. Bollettino della SIFET, 2000.
- Screpanti A. (2009). Monitoraggio a scala regionale: l'impiego dei GIS e dei DGPS. Workshop Erosione Costiera - Febbraio 2009 ENEA Roma.

## 5. ARCHIVIO STORICO

Le caratteristiche di ripetitività temporale e spaziale tipiche degli eventi di frana, fanno ritenere che una percentuale consistente degli eventi che potranno verificarsi in futuro si riproporranno con caratteristiche simili a quelle di eventi verificatisi nel passato. Disporre di una memoria storica organizzata relativa ad eventi storici può pertanto:

- contribuire alla definizione della pericolosità,
- consentire una migliore pianificazione territoriale,
- far aumentare la consapevolezza della popolazione rispetto agli eventi geomorfologici ed ai loro effetti potenzialmente distruttivi.

Un'accurata ricerca di archivio, che copra un intervallo di tempo significativo, permette sia di ricavare informazioni su fenomeni passati di cui allo stato attuale non rimane traccia visibile, sia di delineare il quadro evolutivo delle frane attualmente osservabili, di approfondire la conoscenza delle loro caratteristiche e di disporre di notizie spesso dettagliate degli effetti sul territorio. Tali dati, difficilmente estrapolabili mediante il rilevamento diretto, risultano necessari per completare lo stato dell'arte relativo al fenomeno stesso. Essi consentono di stabilire relazioni tra cause ed effetti, finalizzate alla costruzione di modelli che, sulla base delle informazioni passate, possono aiutare nella previsione dei fenomeni futuri. La ricostruzione accurata dell'evoluzione dei dissesti può trovare applicazioni, non solo nel territorio in esame, ma anche in ambienti dalle caratteristiche analoghe. Inoltre, la documentazione storica relativa alle frane rappresenta indiscutibilmente un dato di importanza fondamentale nella pianificazione urbanistica e territoriale, consentendo di preservare la memoria storica di eventi verificatisi in periodi distanti dall'attuale ma che devono essere tenuti in conto per i loro possibili effetti sugli insediamenti presenti e futuri. In quest'ottica è stato realizzato l'Archivio degli eventi franosi del territorio comunale di Messina (Archivio generale).

Un contributo particolare all'archivio storico è giunto dal *database* sugli effetti al suolo del terremoto di Messina del 28 dicembre 1908, che rappresenta, per l'Italia, l'evento naturale più distruttivo del XX secolo.

L'archivio storico dei fenomeni franosi che hanno interessato il Comune di Messina, costituisce una fonte di informazioni specifiche, indispensabili per la conoscenza e l'analisi del territorio. I 207 fenomeni censiti hanno una differente significatività in funzione della affidabilità della fonte dell'ubicazione e del livello di dettaglio della descrizione fornita. Complessivamente, costituiscono uno strumento di particolare interesse per tecnici e non che si confrontano con le problematiche legate alla determinazione del rischio geomorfologico e che, nell'ottica del principio dell'attualismo, hanno interesse ad approfondire le conoscenze degli eventi passati per meglio comprendere le condizioni attuali del territorio.

L'interesse per la raccolta inventaristica è dato dalla possibilità di un suo utilizzo nell'ambito della definizione degli strumenti di gestione territoriale. I dati ubicati con affidabilità alta e molto alta, infatti, possono contribuire ad arricchire gli inventari già esistenti a livello regionale (Autorità di Bacino) o nazionale (IFFI). In questo senso, la pubblicazione di un web-GIS specifico su portali istituzionali (Comune, Regione, IFFI) può concorrere ad incrementare gli strumenti di conoscenza del territorio ad uso del pubblico e degli operatori nel campo della difesa del suolo. Nell'ambito dell'analisi della pericolosità, ed in particolare relativamente al rapporto fra tipo di litologia e frequenza di innesco delle colate rapide, è interessante evidenziare la congruità tra quanto emerso dall'elaborazione dei dati riguardanti i fenomeni franosi censiti nell'archivio storico (figg. 6 e 7) e le informazioni raccolte durante i rilievi di campo sulla base delle quali è stata sviluppata la carta della suscettibilità specifica (Capitolo 6).

Infine, i dati contenuti nell'archivio, costituiscono la base propedeutica indispensabile per la determinazione delle soglie pluviometriche di innesco dei fenomeni franosi, ossia per la

definizione della correlazione tra la quantità di pioggia registrata durante un determinato evento ed il numero e la tipologia di fenomeni che ha originato. (Capitolo 9).

## **5.1 L'archiviazione dei fenomeni franosi**

Numerosi sono gli esempi di censimento degli eventi franosi di carattere locale (Calcaterra, 2003; Salvati, 2009; Rossi, 2010), nazionale (Schuster, 2002; Devoli, 2007) e globale (Bach Kirschbaum, 2009). In Italia, gli studi di Almagià (1910) di inizio '900 posero le premesse per una analisi sistematica delle problematiche connesse con il dissesto idrogeologico sul territorio nazionale, approfondite nel dopoguerra dai lavori della Commissione De Marchi (1966), in seguito all'alluvione di Firenze. Più recentemente, Catenacci (1992) pubblicò uno "Studio sul dissesto geologico e geoambientale in Italia dal dopoguerra al 1990", contenente un archivio di eventi calamitosi di tipo idraulico e geomorfologico distinti per regione.

Negli anni '90, il Progetto Speciale AVI (<http://avi.gndci.cnr.it/>), commissionato dal Ministro per il Coordinamento della Protezione Civile al Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IRPI), permise la realizzazione di un catalogo contenente informazioni relative a 4521 eventi con danni compresi tra il 1279 ed il 2002, di cui 2366 relativi a frane (52,3%), 2070 ad inondazioni (45,8%), ed 85 a valanghe (1,9%). Nonostante le numerose limitazioni, il censimento del Progetto AVI rappresentava il più completo ed aggiornato archivio di notizie su frane ed inondazioni realizzato in Italia fino ad allora.

Il Progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia, <http://www.mais.sinanet.apat.it/cartanetiffi/>), avviato negli stessi anni dall'ISPRA e dalle Regioni e Province Autonome, fornisce un quadro dettagliato sulla distribuzione dei fenomeni franosi sul territorio italiano anche quando non insistenti su infrastrutture urbane e territoriali in genere. L'inventario IFFI, che è tuttora costantemente aggiornato, ha censito ad oggi 485.000 fenomeni franosi che interessano un'area di 20.721 km<sup>2</sup>, pari al 6,9% del territorio nazionale. Attualmente, sono le Autorità di bacino (o Distretti idrografici) a raccogliere informazioni sugli eventi franosi essendo le istituzioni più direttamente coinvolte nei rapporti tra dissesto idrogeologico e pianificazione territoriale.

## **5.2 L'archivio storico delle frane del Comune di Messina**

Il catalogo storico delle frane realizzato per l'intero territorio del Comune di Messina raccoglie informazioni sulla localizzazione e sulla data di attivazione dei movimenti franosi che hanno interessato il territorio comunale dal XVI secolo al 2011. Per il reperimento di materiale utile per la ricostruzione della franosità storica sono state consultate le seguenti fonti:

- Prefettura di Messina
- Ufficio Comunale di Protezione Civile
- Mezzi di informazione locali, regionali e nazionali
- Ufficio stampa del Comune di Messina
- Archivio Comunale di Messina
- Biblioteca Comunale di Messina
- Biblioteca Regionale Universitaria di Messina
- Archivio regionale sezione periodici
- Pubblicazioni scientifiche
- Siti internet
- Interviste ad addetti ai lavori e non
- Archivi precedenti

### 5.2.1 Le fonti

Il materiale bibliografico esaminato è rappresentato da testi di letteratura storica e naturalistica, monografie, documentazione scientifica e tecnica prodotta a partire dalla seconda metà del 1800. Fondamentali per il censimento degli eventi avvenuti tra il XVI ed il XIX secolo sono stati gli Annali della Città di Messina del Gallo che contengono informazioni fino al 1846 e dove sono riportate con dovizia di particolari numerose notizie relative ad eventi di frana e di inondazioni di cui l'autore era stato testimone diretto o dei quali era venuto a conoscenza da altri leggendo memorie, diari, testimonianze ed altre opere. Altrettanto utile allo stesso fine si è rivelata la monografia dell'ingegnere Domenico Raineri, "Dei torrenti attraversanti Messina e dei mezzi diretti alla loro difesa" del 1871 dove sono indicati gli anni in cui sono avvenuti gli eventi più significativi. Altri eventi sono citati in testi che parlano della città di Messina relativamente ai più disparati argomenti, ma che in qualche modo si ricollegano ai fenomeni naturali che l'hanno interessata.

Nella consultazione dei periodici, particolare attenzione è stata posta all'analisi delle testate di interesse locale, rispetto alle testate regionali o nazionali. La scelta è stata motivata dal fatto che le notizie riguardanti frane di minore intensità, sono reperibili con maggior frequenza e abbondanza di informazioni nella cronaca locale, più interessata di quella nazionale a riportare notizie relative ad eventi locali.

Indispensabile per il censimento dei fenomeni si è rivelato il materiale reperito presso la televisione locale (RTP) che possiede un archivio digitale di tutti i servizi, le interviste, i sopralluoghi ed i ritorni giornalistici effettuati in aree colpite da frane o alluvioni ricadenti nel territorio provinciale dal 1985 ad oggi. Ovviamente si tratta di una descrizione giornalistica degli eventi, ma grazie alle immagini è stato possibile, in diversi casi, determinare le caratteristiche dei fenomeni rilevanti ai fini del presente studio. Questa fonte si è rivelata una delle più accurate e ricche d'informazioni, rappresentando una risorsa importante sia per il numero di eventi dei quali ha fornito notizia, sia per l'abbondanza ed il dettaglio delle informazioni relative ad ogni singolo dissesto.

Se da un lato la diversa natura delle fonti consultate ha posto problemi di omogeneizzazione nell'estrazione dei dati, dall'altro ha consentito una maggiore completezza nel numero dei fenomeni censiti e nelle informazioni relative ai singoli eventi. Infatti, in genere:

- la letteratura storica rappresenta l'unica fonte per il recupero delle notizie relative a fenomeni precedenti al XIX secolo;
- le pubblicazioni scientifiche descrivono in dettaglio gli aspetti geologico-tecnici di un numero limitato di frane con scarse informazioni sulla loro cronologia;
- le relazioni tecniche ed amministrative riportano in modo dettagliato le aree interessate e le conseguenze dei movimenti franosi sul territorio e le opere antropiche;
- i mezzi di informazione, seguendo direttamente lo svolgersi degli avvenimenti, consentono la datazione precisa dei fenomeni.

Va comunque tenuto presente che la stessa fonte, ed anche la stessa notizia, può fare riferimento a più eventi avvenuti nello stesso luogo in tempi diversi o nello stesso periodo in località differenti. Allo stesso modo, più fonti ed anche più notizie possono fare riferimento ad una stessa località colpita, o ad uno stesso evento di frana.

Relativamente agli effetti al suolo del terremoto del 1908, la ricerca e l'individuazione degli effetti ambientali e quindi delle frane sismoindotte è stata eseguita essenzialmente tramite la consultazione delle fonti contemporanee, o di poco successive, al terremoto. Dopo l'evento catastrofico, che ebbe notevole eco anche all'estero, numerosi studiosi furono incaricati di eseguire rilievi sul terreno, sia per motivi di studio, ma anche e soprattutto finalizzati alle successive ricostruzioni dei numerosi centri abitati gravemente danneggiati. La città di Messina subì gravissimi danni: si stima che il 90% delle abitazioni fu distrutto e oltre il 40% della

popolazione perse la vita. I rapporti tecnici sugli effetti del terremoto furono numerosi e spesso realizzati da eminenti ricercatori ed esperti quali Giuseppe Mercalli, Mario Baratta, ecc.. La qualità di tali fonti di dati, pertanto, risulta spesso ottima così come la loro affidabilità.

### 5.2.2 Completezza dell'archivio

La completezza dell'archivio è legata alle fonti utilizzate ed al fatto che quelle più recenti riportano un maggior numero di informazioni rispetto a quelle più antiche. Le fonti selezionate per la ricerca storica, ed in particolare i fondi archivistici, coprono in prevalenza il periodo 1500 – 1900, periodo durante il quale si è evidenziato un crescente interesse, in particolare degli amministratori locali, a segnalare i danni verificatisi a seguito di piogge intense o prolungate, di frane e di inondazioni. A partire dalla seconda metà del secolo scorso, sono i mezzi di informazione ed in particolare quelli regionali o locali, che riportano numerose notizie di eventi di dissesto, tanto da diventare la più importante e spesso anche la più dettagliata fonte cui attingere.

La mancanza di informazioni relative ad eventi di frana in un determinato periodo storico può essere dovuta a varie cause: l'assenza di testimonianze dirette ed indirette, un'errata selezione delle fonti, o una reale scarsità o mancanza di eventi naturali nel periodo considerato.

Infine, come tipico delle serie storiche degli eventi naturali, anche per le frane il campione è inevitabilmente sbilanciato verso gli eventi franosi più grandi e di maggior impatto che hanno, quindi, una maggiore probabilità di essere registrati dalle cronache, mentre tende a troncarsi tutti quegli eventi minori che, per quanto numerosi, hanno una scarsa ricaduta socio-economica.

### 5.2.3 Struttura dell'archivio

Le informazioni ottenute per ciascuna fonte sono state inserite in due archivi distinti: uno generale con 207 dati di eventi che hanno interessato il Comune di Messina dal 1523 al 2011, ed uno specifico contenente i 61 dati relativi agli effetti al suolo indotto dal terremoto del 1908. Complessivamente le due parti dell'archivio riportano dati relativi a 268 eventi. Per facilitarne l'interpretazione, è stata acquisita copia di tutto il materiale documentale rilevante ai fini della ricerca reperito presso le diverse fonti. Dove possibile, l'intero documento è stato fotocopiato o fotografato e successivamente stampato. In alcuni casi le parti più interessanti di ciascun documento sono state trascritte fedelmente. Le informazioni reperite presso la televisione locale sono state archiviate in forma digitale (immagine o video).

Le notizie raccolte presso ogni singola fonte sono state selezionate in base a criteri di attendibilità, di certezza nella localizzazione della località colpita e definizione della tipologia di evento ed in seguito riportate in un archivio digitale ed ordinate in ordine cronologico. Per ogni evento individuato sono state ricavate, ove presenti, informazioni relative alla tipologia del movimento, ai danni prodotti ed alla possibile causa di innesco. I dati raccolti sono stati catalogati in un *database* e la loro distribuzione spaziale inserita come *shape* nel progetto GIS del presente studio. Viene di seguito riportata la descrizione degli elementi che costituiscono la struttura dell'archivio.

- ID frana: numero identificativo del fenomeno censito.
- Data: contiene la data di accadimento del fenomeno, il cui livello di precisione dipende dalla qualità delle informazioni o dalla fonte cui si è attinto. Ad esempio, relativamente agli eventi reperiti presso il *database* della televisione locale, soprattutto quelli verificatisi nelle ore postmeridiane, il servizio giornalistico è solitamente mandato in onda il giorno seguente il verificarsi dell'evento.
- Località: viene indicato il quartiere, il villaggio e, dove le informazioni lo consentono, il punto esatto in cui si è verificato il fenomeno censito. Per alcuni degli eventi antecedenti

il XX secolo non è stato possibile delimitare la zona interessata, per cui è stato indicato solo il nome del comune.

- Tipologia: per gli eventi di cui si dispone di una descrizione adeguata, di immagini o supporti video, è stata riportata la tipologia del movimento.
- Danni: sono riportati gli effetti sul territorio, sulle opere antropiche, viabilità principale o secondaria, centri abitati, case sparse ecc. coinvolte dall'evento. Dove possibile è segnalato il livello di danno subito e, se presenti, il numero delle vittime e dei feriti.
- Fonte: è segnalata la fonte presso la quale è stata reperita l'informazione.
- Data Fonte: riporta la data di pubblicazione della notizia.
- Supporto: è indicato il formato della copia del materiale documentario recuperato presso le singole fonti.
- Note: sono descritte tutte le informazioni aggiuntive disponibili per ogni evento. Per i fenomeni verificatisi precedentemente al XIX secolo si è ritenuto opportuno trascrivere fedelmente parte del documento in cui il fenomeno era stato registrato, al fine di poter meglio interpretare i luoghi interessati e gli effetti che gli eventi hanno provocato. Relativamente ai dissesti che hanno interessato il Comune dal 2009 al 2011, censiti presso la televisione locale, vengono riportati in questa voce i riferimenti utili per individuare la loro posizione sui supporti forniti.
- Probabile causa di innesco: dove il dettaglio dell'informazione lo consente è stata indicata la possibile causa di innesco del fenomeno.
- Affidabilità (precisione nell'ubicazione della frana: *location reliability*): poiché l'esatta ubicazione spaziale della frana non è sempre desumibile con certezza dalle descrizioni a nostra disposizione, ad ogni frana è stato attribuito un grado di indeterminatezza (a, b, c, d, e, dal migliore al peggiore): a: 0 – 10 m; b: 10 – 100 m; c: 100 – 1 km; d: 1 – 10 km; e: >10 km.

Tali distanze, che esprimono il margine di errore nella ubicazione della frana, sono da considerare a partire dal punto in cui è stata effettivamente posizionata la frana sul GIS. Per quanto riguarda i movimenti legati al terremoto del 1908, l'archivio riporta anche le seguenti informazioni:

- Il tipo di frana (*Type*), ovvero se la frana ha coinvolto formazioni rocciose (sm-r) o sedimenti sciolti (sm-s). Tale distinzione è stata fatta, quando possibile, sulla base delle informazioni contenute nella descrizione del fenomeno osservato, oppure sulla base dell'ubicazione della frana sulla Carta Geologica della Provincia di Messina alla scala 1:50.000 (Lentini F., Catalano S., Carbone S., 2000);
- L'intensità macrosismica locale ESI (*Environmental Seismic Intensity scale*; Michetti et al., 2007) che è stata valutata solo nei casi ritenuti diagnostici;
- Il tipo di effetto osservato e descritto nella fonte (*Effect Category*), che è stato interpretato come indicativo di un fenomeno franoso. I vari tipi di effetti osservati sono: abbassamento differenziale in strutture antropiche, fratture, abbassamento del suolo, accumulo di sedimenti sul fondale marino, frana;
- La descrizione dell'effetto osservato, trascritta direttamente dalla fonte consultata (*Description*);
- L'attendibilità del dato (*Information reliability*). Ad ogni descrizione (e quindi ad ogni frana) è stata attribuita una classe di attendibilità, funzione essenzialmente dell'affidabilità del documento (e dell'autore) da cui la descrizione stessa è stata tratta: "a" corrisponde ad un livello ottimo di attendibilità; "b" corrisponde a buono; "c" a mediocre; i casi con affidabilità scarsa "d" non sono stati inseriti nel *database*.

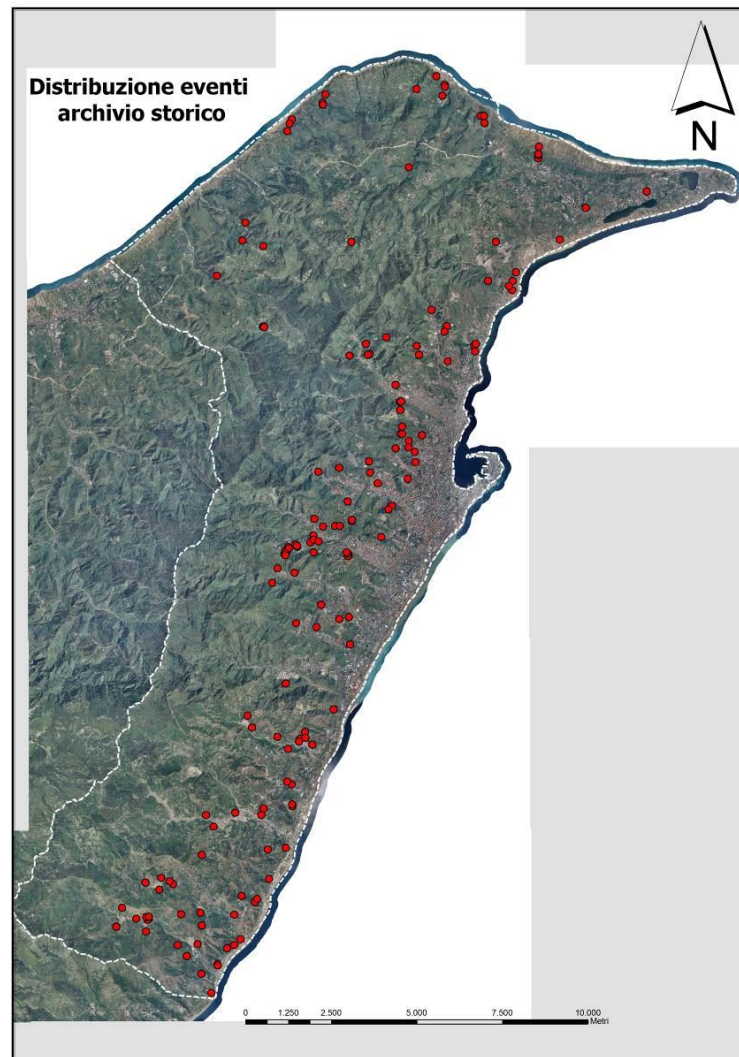


Figura 1 – Distribuzione nel territorio comunale di Messina degli eventi contenuti nell’archivio storico generale

### 5.3 Elaborazione ed analisi dei dati raccolti

I due archivi sono stati strutturati in maniera il più possibile omogenea, sebbene siano stati realizzati da due diversi gruppi di lavoro, in tempi differenti e con finalità parzialmente distinte. Mentre l’archivio generale è stato realizzato specificatamente per l’analisi della pericolosità da frana del Comune di Messina, l’archivio relativo alle frane indotte dal terremoto del 1908 deriva da una parte di una ricerca condotta dall’ISPRA, precedentemente all’avvio del presente studio, su tutti gli effetti cosismici indotti sull’ambiente dall’evento. Entrambe le banche dati forniscono informazioni estremamente utili alla definizione di un quadro completo della pericolosità geomorfologica nel territorio messinese. Per preservare le peculiarità di entrambe le banche dati, i relativi dati sono stati elaborati separatamente.

#### 5.3.1 Archivio generale

Gli eventi contenuti all’interno dell’archivio generale sono distribuiti sull’intero territorio comunale (fig. 1), si riferiscono ad un arco temporale di quasi 500 anni e la stragrande maggioranza (80%) si riferisce al XX ed al XXI secolo (fig. 2). La distribuzione disomogenea

nel tempo degli eventi registrati è giustificabile quanto meno da due fattori: l'espansione urbanistica e l'evoluzione dei mezzi di comunicazione registrati negli ultimi decenni.

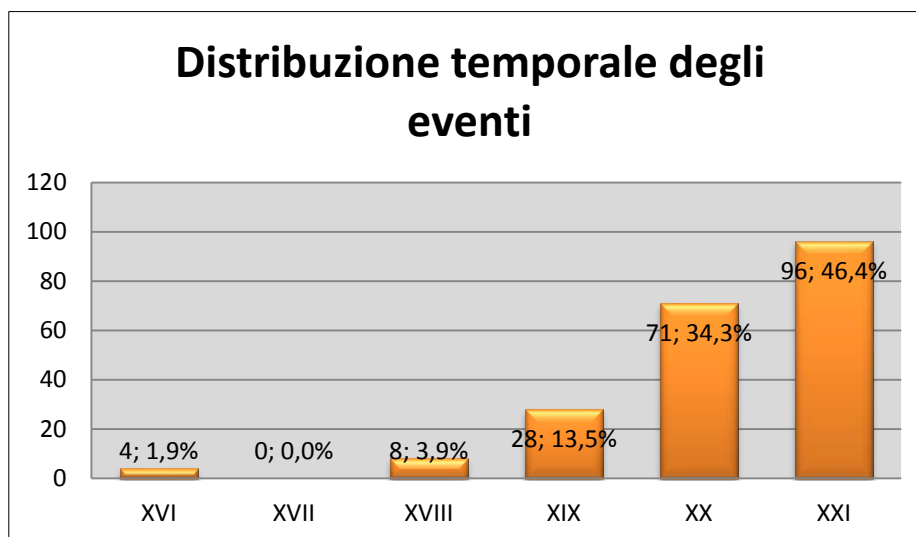


Figura 2 – Distribuzione per secolo degli eventi contenuti nell'archivio storico generale

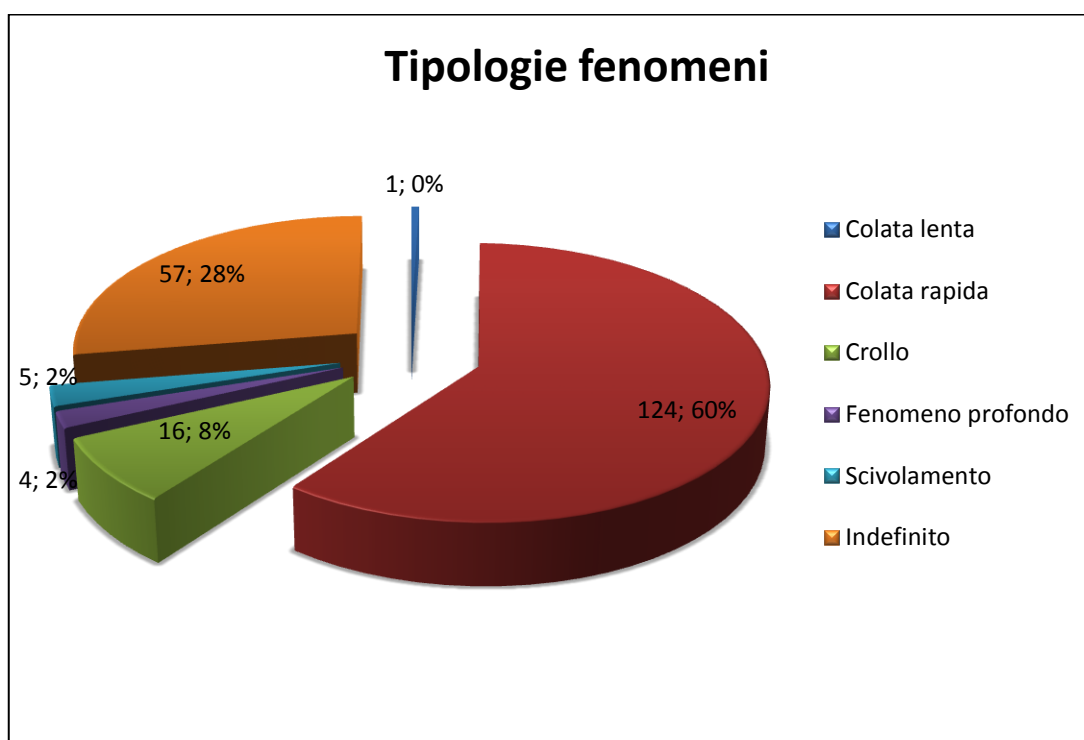


Figura 3 – Tipologie di frana degli eventi contenuti nell'archivio storico generale

I 207 dati sono stati distinti tipologicamente secondo 5 classi (fig. 3): colate lente, colate rapide, crolli, scivolamenti e fenomeni profondi. La maggioranza degli eventi sono colate rapide (60%) mentre poco più del 10% ricade nelle altre classi. Per un evento su quattro (i 49 eventi più antichi, fino al 1951, più altri 8 nel mezzo secolo successivo) non è stato possibile attribuire la tipologia. Dell'insieme dei 207 dati, solo i 163 successivi al 1933 sono stati georiferiti (da notare che per 13 degli eventi georiferiti non è stato possibile attribuire una tipologia). L'affidabilità dell'ubicazione non è sempre ottima (Tabella 1) ma anzi solo un terzo degli eventi registrati sono stati ubicati con dettaglio significativo (classe molto alta e alta). Prendendo in considerazione la

litologia dei punti di ubicazione della totalità degli eventi georiferiti (tab. 2; figg. 4 e 5), si evidenzia che circa la metà degli eventi presenti in archivio si concentra nelle Unità dell'Aspromonte (UA e UAg).

<b>Affidabilità ubicazione</b>			
molto alta	<10m	29	17,8%
alta	10-100m	24	14,7%
media	100m-1km	48	29,4%
bassa	1km-10km	51	31,3%
molto bassa	>10km	11	6,7%
Totale		163	100,0%

Tabella 1 – Affidabilità dell'ubicazione di tutti gli eventi contenuti nell'archivio storico generale

<b>Litologia /totalità eventi georiferiti</b>			
ar	Limi, sabbie e ghiaie	2	1,2%
det	Conglomerato poligenico	1	0,6%
fra	Frane	4	2,5%
P	Marne e sabbie	4	2,5%
Pi	Marne e calcari marnosi	2	1,2%
PQ	Calcareniti e sabbie	11	6,7%
Qg	Sabbie, ghiaie e conglomerati	17	10,4%
Maa	Arenarie e marne argillose	21	12,9%
Mac	Conglomerati matrice sostenuti	10	6,1%
Mc	Calcere evaporitico	2	1,2%
UA	Paragneiss e micascisti	48	29,4%
UAg	Gneiss con pegmatiti	35	21,5%
UM	Filladi e passanti	6	3,7%
Totale		163	100%

Tabella 2 - Distribuzione per litologia degli eventi contenuti nell'archivio storico generale

<b>Affidabilità ubicazione colate rapide</b>			
molto alta	<10m	19	15,3%
alta	10-100m	20	16,1%
media	100m-1km	41	33,1%
bassa	1km-10km	37	29,8%
molto bassa	>10km	7	5,6%
Totale		124	100%

Tabella 3 - Affidabilità dell'ubicazione delle colate rapide contenute nell'archivio storico generale

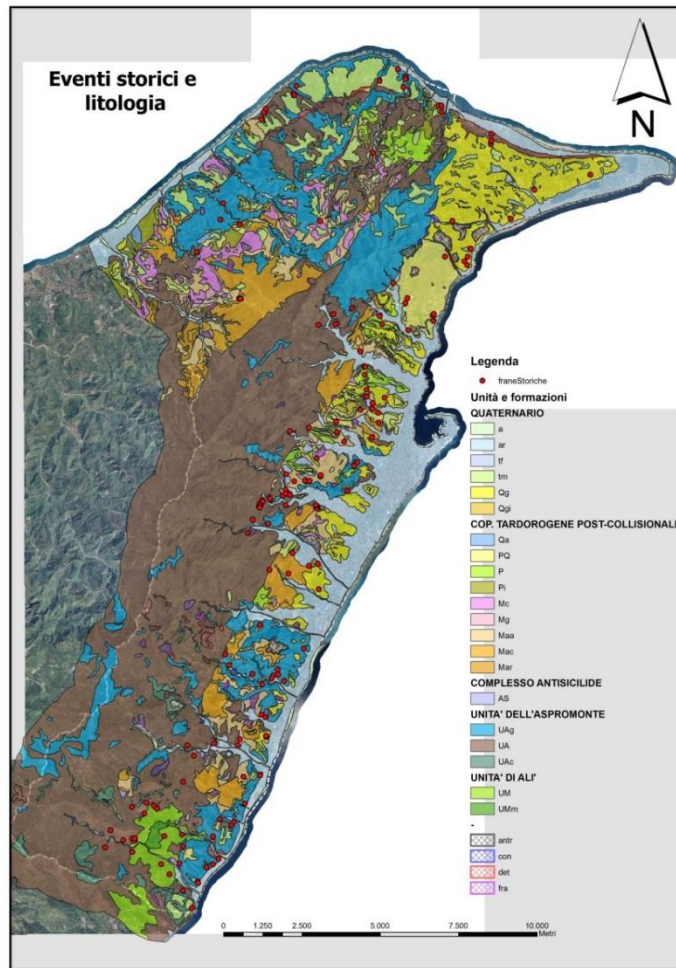


Figura 4 - Ubicazione delle frane contenute nell'archivio storico generale sulla Carta Geologica della Provincia di Messina, adattata per il presente studio

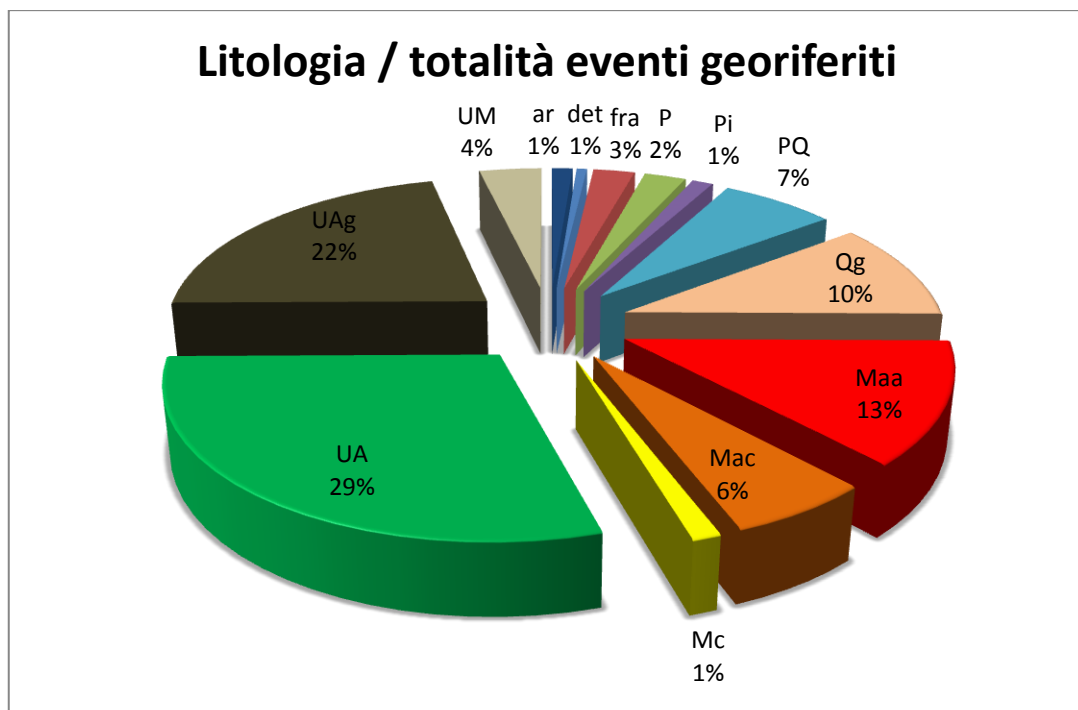


Figura 5 - Distribuzione per litologia degli eventi contenuti nell'archivio storico generale

Estraendo dall'insieme complessivo le sole colate rapide (124 eventi), la cui affidabilità di ubicazione complessiva è analoga a quella della totalità degli eventi (tab. 3), la distribuzione per classi litologiche varia leggermente (tab. 4; fig. 6).

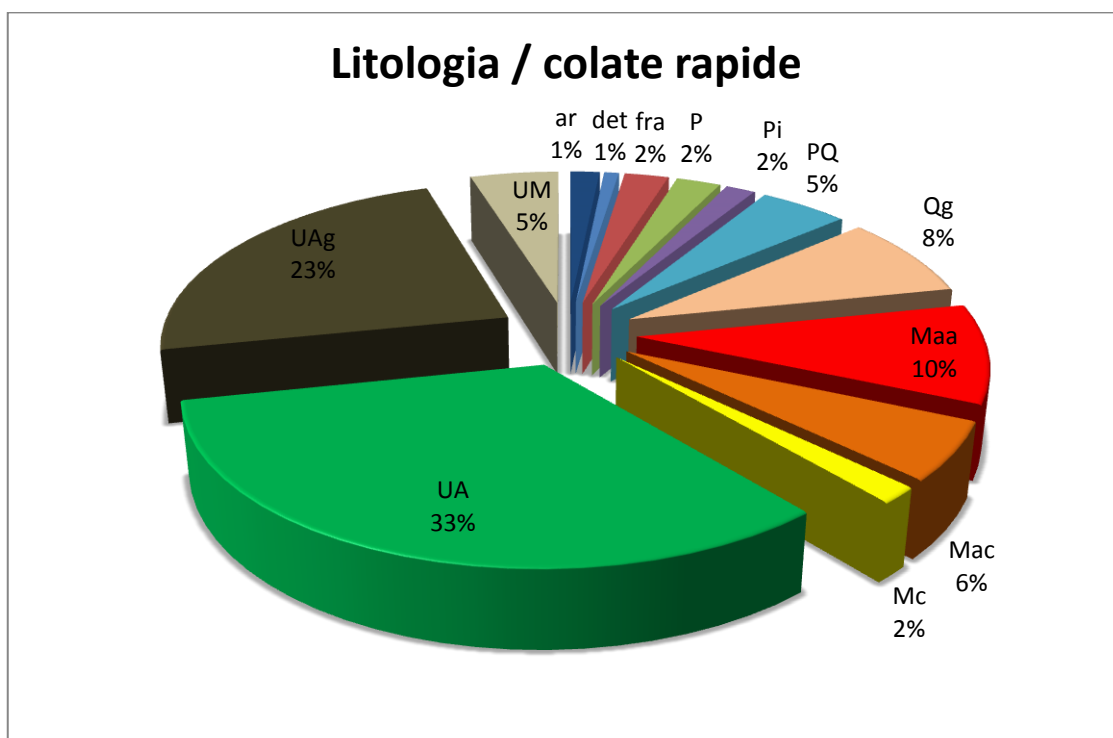


Figura 6 - Distribuzione per litologia delle colate rapide contenute nell'archivio storico generale

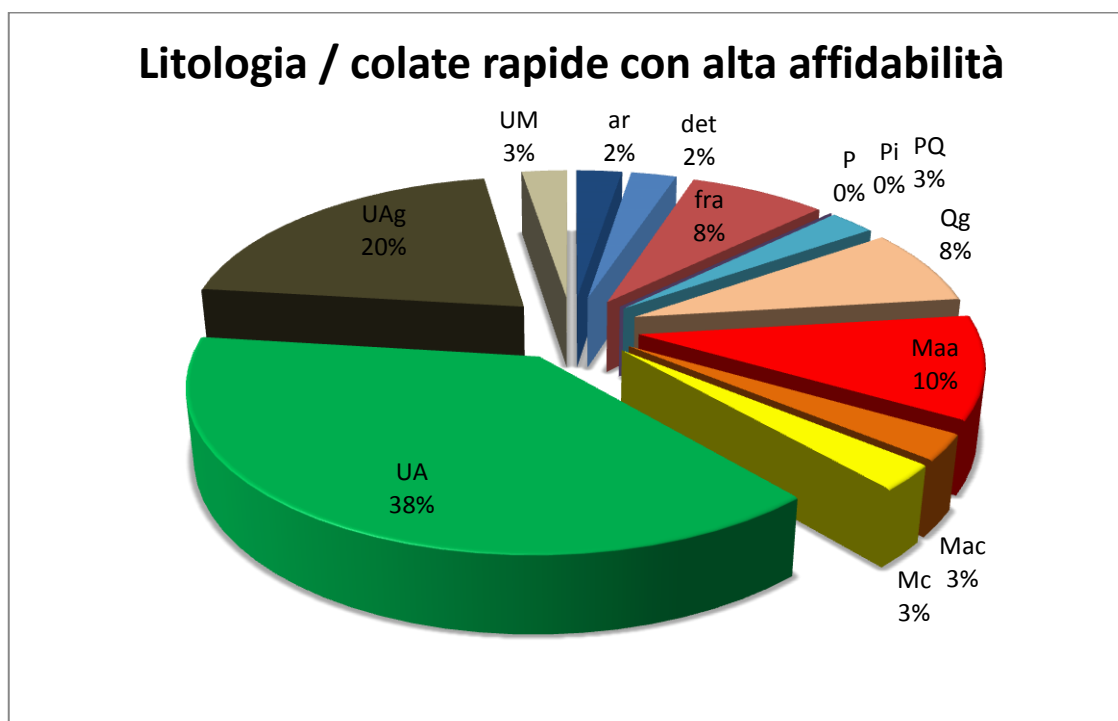


Figura 7 – Distribuzione per litologia delle colate rapide ubicate con affidabilità alta e molto alta contenute nell'archivio storico generale

<b>Litologia /colate rapide</b>			
ar	Limi, sabbie e ghiaie	2	1,6%
det	Conglomerato poligenico	1	0,8%
fra	Frane	3	2,4%
P	Marne e sabbie	3	2,4%
Pi	Marne e calcari marnosi	2	1,6%
PQ	Calcareniti e sabbie	6	4,8%
Qg	Sabbie, ghiaie e conglomerati	10	8,1%
Maa	Arenarie e marne argillose	12	9,7%
Mac	Conglomerati matrice sostenuti	7	5,6%
Mc	Calcare evaporitico	2	1,6%
UA	Paragneiss e micascisti	41	33,1%
UAg	Gneiss con pegmatiti	29	23,4%
UM	Filladi e passanti	6	4,8%
Totale		124	100%

Tabella 4 - Distribuzione per litologia delle colate rapide contenute nell'archivio storico generale

Prendendo in considerazione solo le colate rapide ubicate con affidabilità alta e molto alta (39 eventi), la corrispondenza con le Unità dell'Aspromonte risulta ulteriormente accentuata (tab. 5; fig. 7).

<b>Litologia /colate rapide alta affidabilità</b>			
ar	Limi, sabbie e ghiaie	1	2,6%
det	Conglomerato poligenico	1	2,6%
fra	Frane	3	7,7%
P	Marne e sabbie	0	0,0%
Pi	Marne e calcari marnosi	0	0,0%
PQ	Calcareniti e sabbie	1	2,6%
Qg	Sabbie, ghiaie e conglomerati	3	7,7%
Maa	Arenarie e marne argillose	4	10,3%
Mac	Conglomerati matrice sostenuti	1	2,6%
Mc	Calcare evaporitico	1	2,6%
UA	Paragneiss e micascisti	15	38,5%
UAg	Gneiss con pegmatiti	8	20,5%
UM	Filladi e passanti	1	2,6%
Totale		39	100%

Tabella 5 - Distribuzione per litologia delle colate rapide ubicate con affidabilità alta e molto alta contenute nell'archivio storico generale

### 5.3.2 Archivio 1908

Gli effetti al suolo indotti dal terremoto del 28 dicembre 1908 sul territorio del comune di Messina raccolti nel presente archivio, sono complessivamente 61 (fig. 8). Gli effetti sono stati distinti in 5 diverse classi (fig. 9), di cui due relative a fenomeni franosi in senso stretto e cioè movimenti di versante e accumuli massivi di sedimenti sul fondo del mare antistante Messina, una relativa a fratture nel suolo e due relative ad effetti avvenuti in aree edificate (cedimenti del

terreno e cedimenti differenziali in edifici ed altre strutture antropiche). La totalità di tali effetti è comunque stata interpretata come conseguenza di fenomeni franosi (es. fig. 10); solo gli effetti ubicati tra la foce del torrente Portalegni e la vecchia stazione dei Ferry boat e quelli lungo le rive del lago di Ganzirri sono sospettati di avere una possibile origine tettonica.

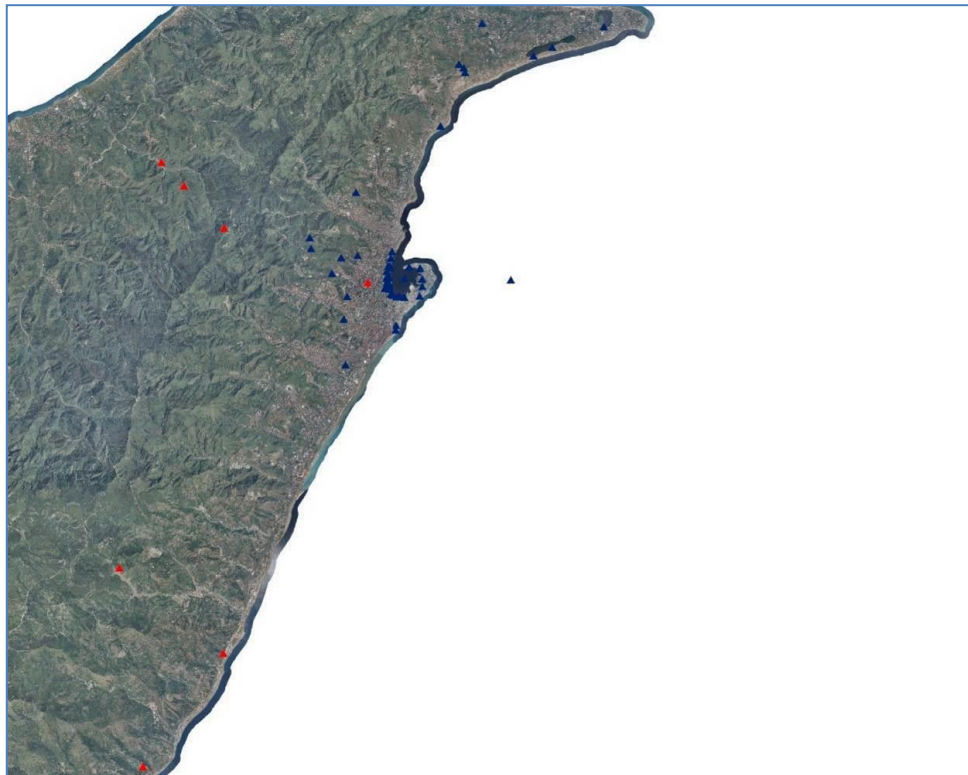


Figura 8 – Ubicazione delle 61 frane indotte dal terremoto del 1908 nel territorio comunale di Messina. In rosso sono indicate le frane avvenute in roccia, mentre in blu quelle che hanno coinvolto sedimenti sciolti.

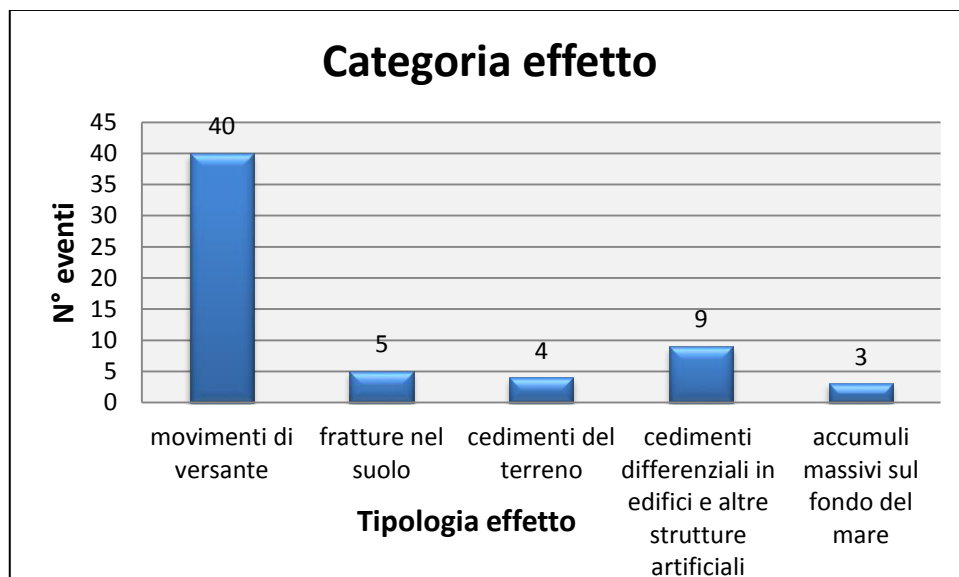


Figura 9 – Tipologia degli effetti sul terreno avvenuti a Messina a seguito del terremoto del 1908.

La maggior parte delle frane cartografate ricade nell'area urbana di Messina (fig. 8). Tale apparente più alta concentrazione è dovuta essenzialmente al fatto che i rapporti tecnici

dell'epoca risentono della maggiore attenzione rivolta da parte dei rilevatori alle aree abitate (dove gli effetti, non solo le frane, furono descritti con dovizia di particolari; fig. 11), piuttosto che alle aree montane non antropizzate.



Figura 10 – Effetti al suolo del sisma del 1908. In evidenza la scarpata principale di una frana sottomarina nell'area portuale di Messina (da Bertolaso *et al.*, 2008”).

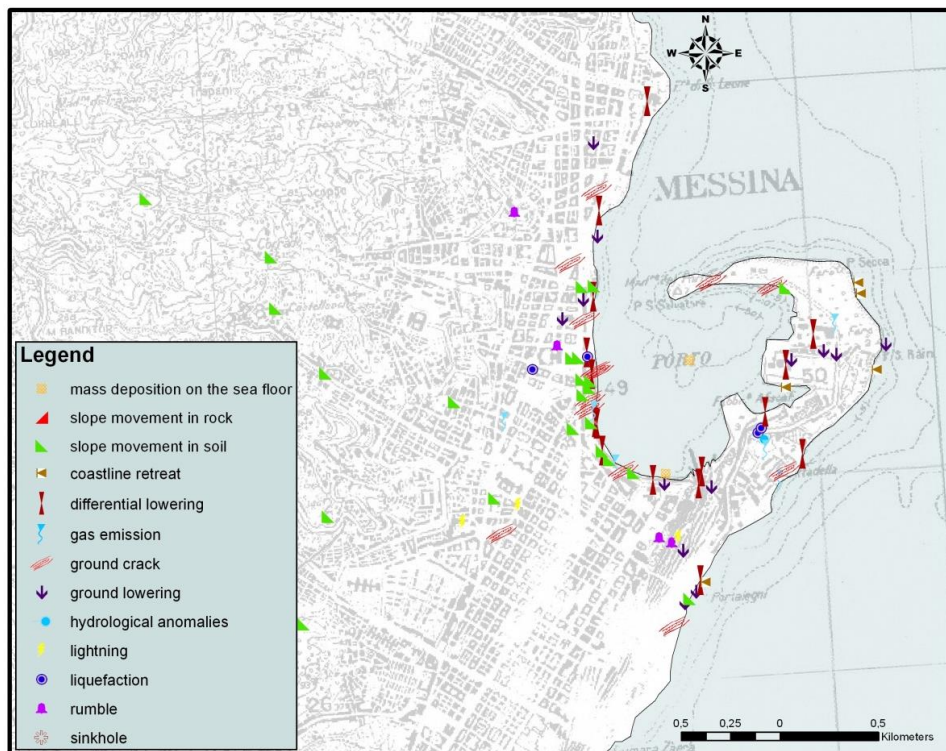


Figura 11 – Effetti ambientali indotti dal sisma del 1908 nella città di Messina (da Comerci *et al.*, 2013). Oltre alle frane si verificarono altri effetti, ma gran parte di essi sembra comunque dovuta a movimenti gravitativi sismoindotti.

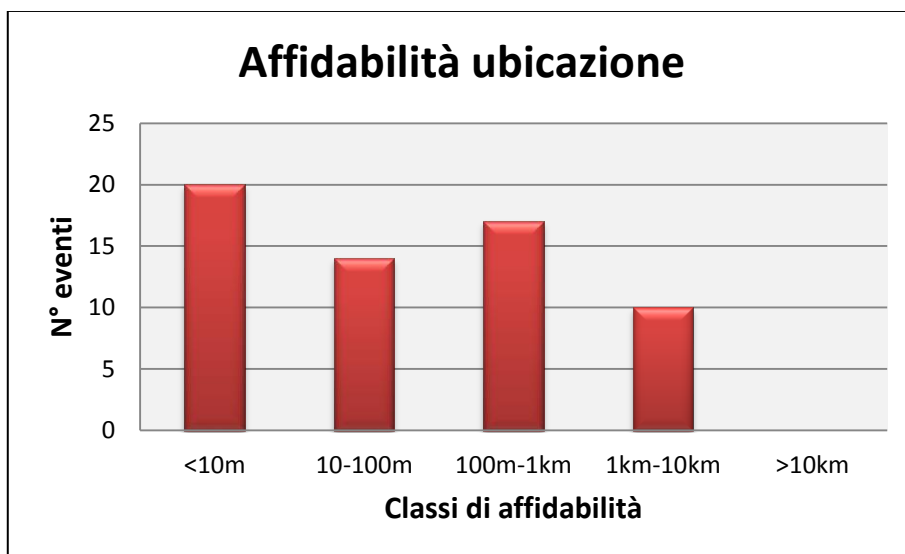


Figura 12 – Affidabilità dell'ubicazione degli effetti al suolo del terremoto del 1908

Le informazioni relative alle 61 frane derivano da fonti essenzialmente ritenute attendibili: 50 descrizioni relative ai fenomeni franosi derivano da rapporti considerati di affidabilità ottima, 6 da fonti considerate buone e solo 5 descrizioni sono considerate di affidabilità mediocre. Gli autori dei rapporti da cui sono state reperite le informazioni per il territorio messinese sono Attanasio (1988), Baratta (1909 e 1910), Franchi (1909), Gor'kji-Meyer (1909), Mercalli (1909), Rezzadore (1914), Riccò (1909), Taramelli (1909), Sabatini (1909) e Società Fotografica Italiana (1909). Inoltre, altri dati sono stati raccolti da articoli di giornali (Corriere della Sera, Il Mattino, L'Orsa, Il Giornale di Sicilia) e dalla Gazzetta Ufficiale del Regno d'Italia.

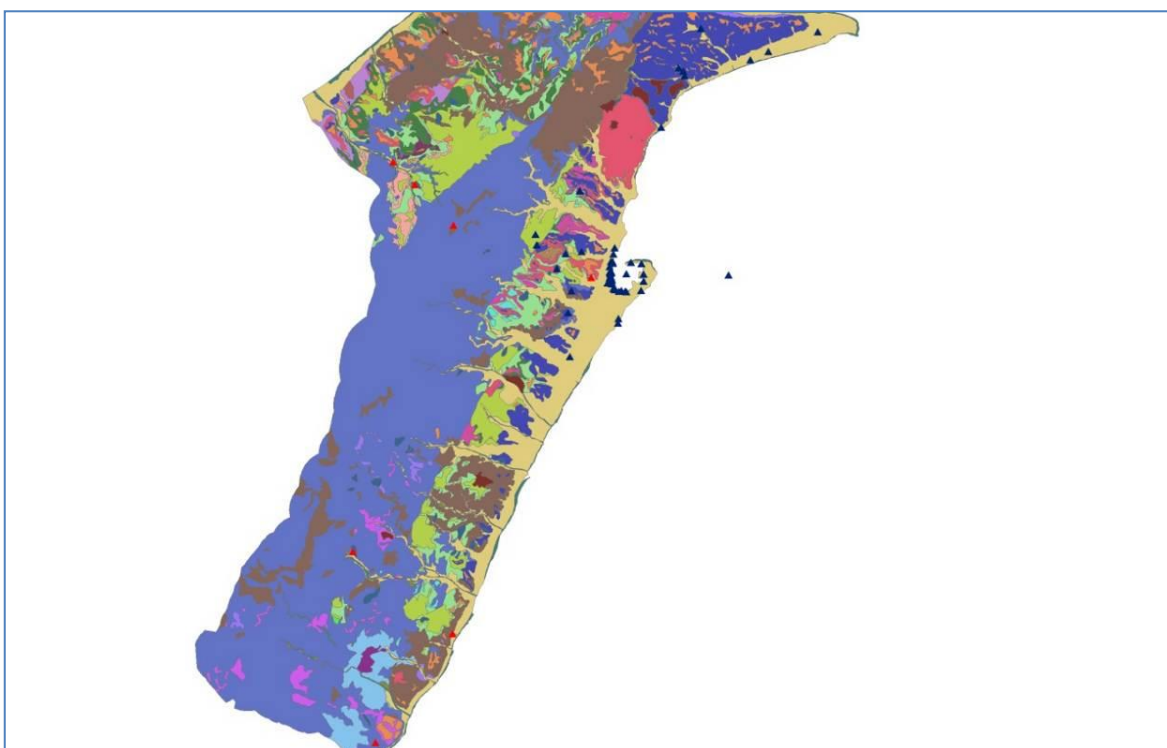


Figura 13 – Ubicazione delle frane sismoindotte del 1908 sulla carta geologica del Comune di Messina. In rosso sono indicate le frane avvenute in roccia, mentre in blu quelle che hanno coinvolto sedimenti sciolti.

Per quanto riguarda l'affidabilità dell'ubicazione geografica (fig. 12), 20 frane sono ubicate con buona precisione (ossia con un piccolo margine di errore stimato entro i 10 metri), per 14 frane la posizione può avere un errore stimato entro i 100 metri, per 17 frane l'errore è stimato essere tra 100 metri ed 1 chilometro e, infine, per 10 frane la posizione risente di una indeterminatezza compresa tra 1 chilometro e 10 chilometri. Dei 61 *record*, 54 (88,5%) ricadono in aree caratterizzate dalla presenza di sedimenti sciolti e solo 7 (11,5%) in zone costituite da depositi rocciosi (fig. 13).

## 5.4 Bibliografia

### 5.4.1 Generale

- Almagià R. (1910). Studi geografici sulle frane in Italia, in Memorie della Società Geografica Italiana, 2 voll., Società Geografica Italiana, Roma 1907 e 1910.
- Bach Kirschbaum D., Adler R., Hong Y., Hill S., Lerner-Lam A. (2010). A global landslide catalog for hazard applications: method, results, and limitations. *Nat Hazards* (2010) 52:561–575. DOI 10.1007/s11069-009-9401-4
- Bertolaso G., Boschi E., Guidoboni E. e Valensise G. (a cura di, 2008). Il terremoto e il maremoto del 28 dicembre 1908: analisi sismologica, impatto, prospettive, INGV-DPC, Roma-Bologna, 813 pp.
- Calcaterra D., Parise M., Palma B. (2003). Combining historical and geological data for the assessment of the landslide hazard: a case study from Campania, Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences* (2003) 3: 3–16. European Geosciences Union 2003.
- Catenacci V. (1992). Il dissesto geologico e geoambientale in Italia dal dopoguerra al 1990. Volume 47 di Memorie descrittive della carta geologica d'Italia, Memorie descrittive della carta geologica d'Italia. R. Ufficio Geologico d'Italia, Istituto Poligrafico Zecca dello Stato.
- Comerci V., Blumetti A.M., Brustia E., Di Manna P., Guerrieri L., Lucarini M., Vittori E. (2013). Landslides induced by the 1908 Southern Calabria – Messina earthquake (Southern Italy). In Margottini C., Canuti P., Sassa K. (eds), *Landslide science and practice: complex environment*. ISBN 978-3-642-31426-1 ISBN 978-3-642-31427-8 (eBook) DOI 10.1007/978-3-642-31427-8. Springer Heidelberg New York Dordrecht London
- Devoli G., Morales A., Høeg K. (2007). Historical landslides in Nicaragua—collection and analysis of data. *Landslides* (2007) 4:5–18. DOI 10.1007/s10346-006-0048-x
- Lentini F., Catalano S., Carbone S. (2000). Carta geologica della Provincia di Messina. Scala 1:50000. Provincia Regionale di Messina. SELCA, Firenze.
- Michetti A.M., Esposito E., Guerrieri L., Porfido S., Serva L., Tatevossian R., Vittori E., Audemard F., Azuma T., Clague J., Comerci V., Gürpınar A., Mc Calpin J., Mohammadioun B., Mörner N.A. Ota Y., and Roghazin E. (2007). Intensity Scale ESI 2007, in Mem. Descr. Carta Geologica d'Italia L. Guerrieri and E. Vittori (Editors), Servizio Geologico d'Italia, Dipartimento Difesa del Suolo, APAT, Rome, Italy, 74.
- Rossi M., Witt A., Guzzetti F., Malamud B. D., Peruccacci S. (2010). Analysis of historical landslide time series in the Emilia-Romagna region, northern Italy. *Earth Surf. Process. Landforms* 35, 1123–1137 (2010). John Wiley & Sons, Ltd.
- Salvati P., Balducci V., Bianchi C., Guzzetti F., Tonelli G. (2009). A Web GIS for the dissemination of information on historical landslides and floods in Umbria, Italy. *Geoinformatica* (2009) 13:305–322. DOI 10.1007/s10707-008-0072-1
- Schuster R.L., Salcedo D. A., Valenzuela L. (2002). Overview of catastrophic landslides of South America in the twentieth century. In Evans S. G. & DeGraff J.V.(Eds): “Catastrophic

landslides: effects, occurrence and mechanism". Geological Society of America, Reviews in Engineering geology, Volume XV, 2002.

#### **5.4.2 Riferimenti bibliografici dei documenti consultati per l'Archivio Generale**

- Cuppari P. (1856). Atti della Reale Accademia dei Georgofili di Firenze. Del quadruplice temporale di Messina. Breve cenno, letto dal Prof. Pietro Cuppari nell'Adunanza ordinaria del 1.° Marzo 1856.
- Gallo C.D., Oliva G. Annali della Città di Messina
- Marantonio E. (1983). Osservazioni topografiche e geologiche sul bacino idrico del Torrente Badiazza (Messina). Il Meridiano dello Stretto 1983 – XII Messina.
- Privitera B. (2000). Il dissesto idrogeologico nella memoria storica della Città di Messina fenomeni alluvionali dal XVI al XIX secolo. Bollettino dell'Ordine Regionale dei Geologi di Sicilia, anno VII num. 4 2000 pp 3-8.
- Raineri D. (1871). Dei torrenti attraversanti Messina e dei mezzi diretti alla loro difesa. Stamperia e Stereotipia Capra, Messina, 1871 pp.16-23.
- Rapisardi P. (1850). Sulla bonificazione dei terreni in pendio e descrizione geognostica ed idrografica della Provincia di Messina. Stamperia Antonino D'amico Arena, Messina, 1850.

#### **5.4.3 Riferimenti bibliografici dei documenti relativi all'Archivio 1908**

- Attanasio S. (1988). 28 dicembre 1908 ore 5,21 - Terremoto. Bonanno Ed., Acireale.
- Baratta, M. (1909). Il terremoto calabro-siculo del 28 dicembre 1908. In Boll. Soc. Geografica Ital., Serie IV, Vol. X, pp. 852-82 and 980-1019. Roma.
- Baratta, M. (1910). La catastrofe sismica calabro-messinese. 28 Dicembre 1908. Societa' Geografica Italiana, Roma. 2 Volumes, pp. 426.
- Franchi S. (1909). Il terremoto del 28 dicembre 1908 a Messina in rapporto alla natura del terreno ed alla riedificazione della città. In Boll. R. Comitato Geologico, Serie IV, Vol. X, pp. 111-157. Roma
- Gor'kij M. & Meyer M. W. (2005). Tra le macerie di Messina, Coll. Cammei, GBM Ed., Messina, 168 pp.
- Mercalli G. (1909). Contributo allo studio del terremoto calabro-messinese del 28 dicembre 1908. Reale Istituto d'Incoraggiamento di Napoli. Cooperativa Tipografica, Napoli.
- Rezzadore P. (1914). Il mondo ne' suoi fulgori e tremori, Tipografia Barbera, Firenze, pp. 496
- Riccò A. (1909). Terremoto del Messinese e della Calabria al 28 Dicembre 1908. In Boll. Accad. Gioenia di Sc. Nat., Serie II, fasc. VI. Catania.
- Sabatini V. Contribuzione allo studio dei terremoti calabresi. Boll. del R. Comitato Geologico d'Italia. Serie IV, Vol. X, fasc. 3.
- Società Fotografica Italiana (1909). Messina e Reggio prima e dopo il terremoto del 28 dicembre 1908. Firenze.
- Taramelli T. (1909). Relazione sull'operato della sottocommissione incaricata di visitare i luoghi del terremoto Calabro-Siculo del 28 dicembre 1908. In Blaserna P., Relazione della Commissione Reale incaricata di designare le zone più adatte per la ricostruzione degli abitati colpiti dal terremoto del 28 dicembre 1908 o da altri precedenti. Tipografia della R. Accademia dei Lincei, Roma, pp. 89-112.

## 6. INVENTARIO DEI FENOMENI FRANOSI

L'inventario dei fenomeni franosi del Comune di Messina costituisce il censimento dei processi attualmente riconoscibili sul territorio e costituisce un insieme di informazioni che integrano quelle contenute nell'archivio storico (Capitolo 5). Il censimento è stato effettuato mediante rilevamento di campo, esame stereoscopico di foto aeree relative agli anni 2007 e 2009 ed analisi di immagini satellitari di Google Earth (Wieczorek, 1984; Brardinoni et alii, 2003). Per la sua realizzazione è stata effettuata una revisione del censimento contenuto nel PAI regionale, l'inventario IFFI dell'ISPRA e i dati interferometrici satellitari del periodo 1992-2008 forniti dalla Regione Sicilia (Regione Sicilia, 2011; Trigila, 2007). Il censimento effettuato ha disegnato un quadro aggiornato dei fenomeni franosi presenti nel territorio. La combinazione delle tecniche in remoto e dei rilievi di campo per l'identificazione delle aree in frana ha permesso di ottenere una banca dati di elevata qualità in termini di completezza ed accuratezza. Tale qualità non è stata riscontrata nelle banche dati disponibili in letteratura né sarebbe stata ottenuta utilizzando processi di identificazione automatici e/o semi-automatici (Trigila et alii, 2010; Tapas et alii, 2013). Tale requisito di qualità è stato ritenuto necessario in quanto l'inventario ha costituito la base indispensabile e propedeutica alla successiva analisi della suscettibilità (Capitolo 7).

Nello studio sono state distinte le seguenti tipologie di fenomeni franosi (Varnes, 1978; Varnes & IAEG, 1984; WP/WLI, 1993; Cruden & Varnes, 1996), insistenti sul territorio comunale (fig. 1): crolli, colate rapide, scorrimenti rotazionali e scorrimenti traslazionali.

Le tipologie di frana più diffuse sono state i crolli e le colate rapide (fig. 2) che singolarmente possono coinvolgere porzioni di versante modeste ma il cui materiale si mobilita con velocità da elevate a molto elevate. Questi fenomeni si manifestano principalmente secondo processi neofornativi. Le ultime due tipologie sono caratterizzate da una attività ciclica che interessa periodicamente sempre le stesse porzioni di versante (riattivazione). Queste tipologie di frana sono risultate meno numerose ma non meno significative rispetto ai crolli ed alle colate rapide; infatti, anche se la velocità del materiale mobilitato dagli scorrimenti è mediamente bassa, i volumi coinvolti sono notevoli. Per ogni fenomeno franoso censito è stata compilata una scheda tecnica in cui sono state inserite tutte le informazioni relative alle caratteristiche generali (ubicazione, tipologia, ecc.), morfometriche (larghezza, lunghezza, profondità, ecc.), geomorfologiche (stato di attività, distribuzione, ecc.) ed ai parametri discriminanti e ai fattori predisponenti.

In relazione ai dati raccolti e sulla base delle elaborazioni effettuate, è stata realizzata la Carta Inventario dei Fenomeni Franosi del Comune di Messina (1:5.000), nella quale sono stati riportati i seguenti elementi morfologici:

- Piff, Punti identificativi fenomeno franoso.
- Aree di innesco.
- Aree di alimentazione (solo per i fenomeni da colata rapida).
- Pip, Punti identificativi piede del fenomeno franoso.

La successiva implementazione in ambiente GIS (strumento basilare per la creazione di un *database* geografico) di ogni singolo strato informativo, ha permesso di sovrapporre le informazioni e di elaborare i dati nelle successive fasi di lavoro.

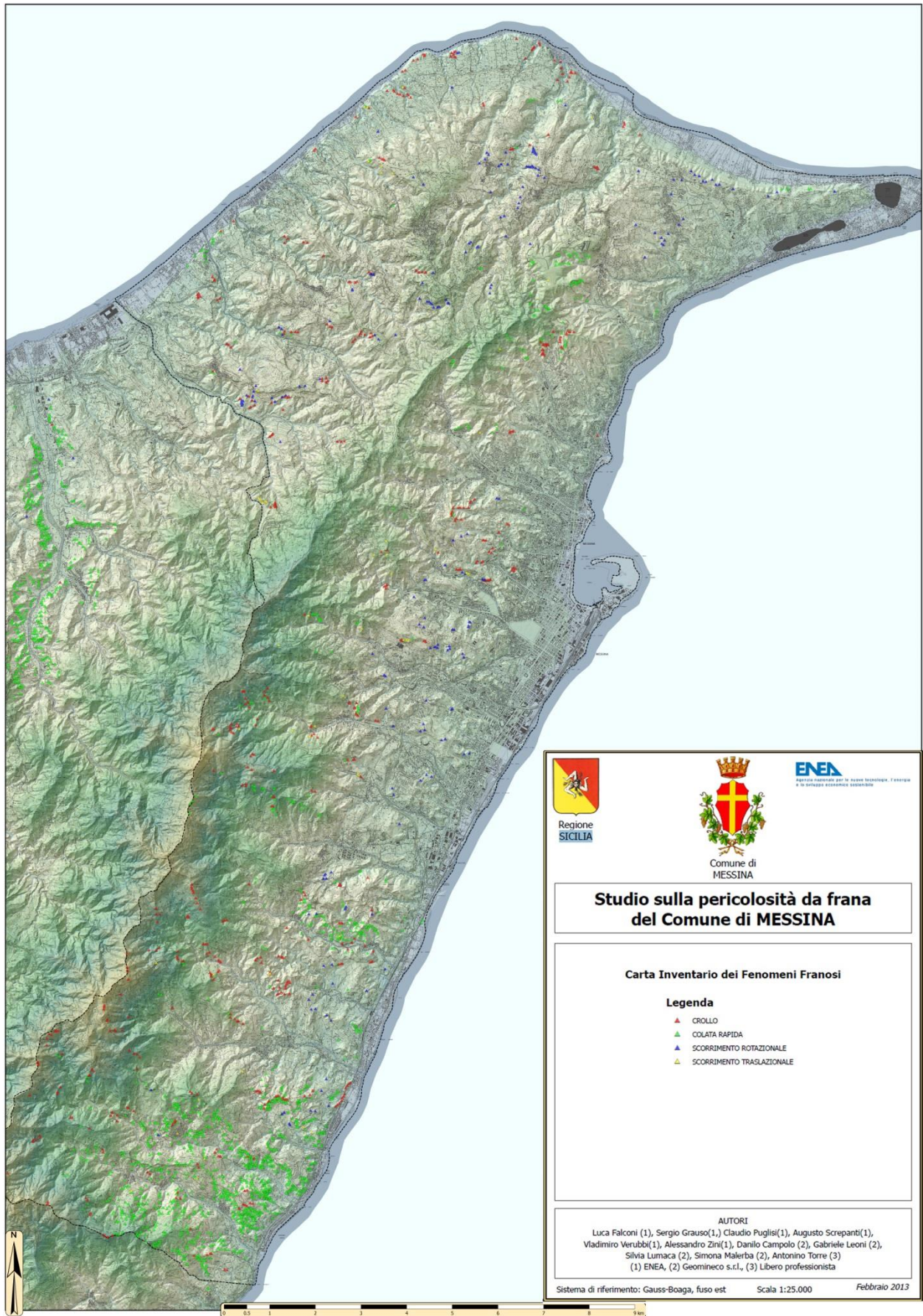


Figura 1 – Distribuzione delle diverse tipologie di frane censite nel territorio comunale di Messina

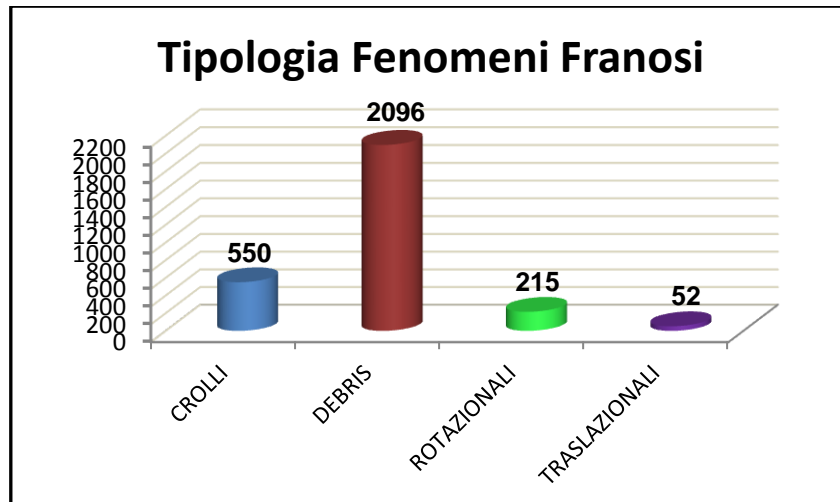


Figura 2 - Tipologie di frane rilevate (n°eventi/ tipologia)

### 6.1 Crolli

I crolli sono caratterizzati dal distacco in blocco di una massa di roccia (*rock fall*), di detriti grossolani (*debris fall*) o di detriti fini (*soil fall*), da pareti da subverticali ad aggettanti, lungo superfici per la gran parte già esistenti (discontinuità stratigrafiche o tettoniche prevalentemente verticali) e in piccola parte di neoformazione.



Figura 3 – Crollo in unità metamorfiche al di sopra di edifici dell’abitato di Mili S. Pietro

In base alla geometria del versante, il materiale, dopo la prima fase di caduta libera e il successivo impatto, può rotolare, rimbalzare o scorrere sul pendio. Questi fenomeni franosi sono estremamente pericolosi sia per l'evoluzione rapida del processo (nella maggior parte dei casi gli eventi durano pochi secondi), che per le velocità che possono raggiungere (20-30 m/sec). La cinematica dell'evento veloce comporta quindi elevata pericolosità del fenomeno e notevole capacità distruttiva. Le traiettorie di caduta dipendono da molti fattori, quali la velocità iniziale, la forma, le dimensioni e la litologia del blocco e la geometria del pendio. Quest'ultima unitamente alle caratteristiche litologiche del pendio incide sulla quantità di energia dissipata per effetto degli urti. I crolli rappresentano la seconda voce nel bilancio totale dei fenomeni franosi presenti nel territorio comunale, essi sono legati ad alti livelli di rischio, in quanto risultano essere concentrati in scarpate sub-verticali sia naturali che antropiche, come quelle presenti a monte di abitati (fig. 3) e della viabilità provinciale e comunale.

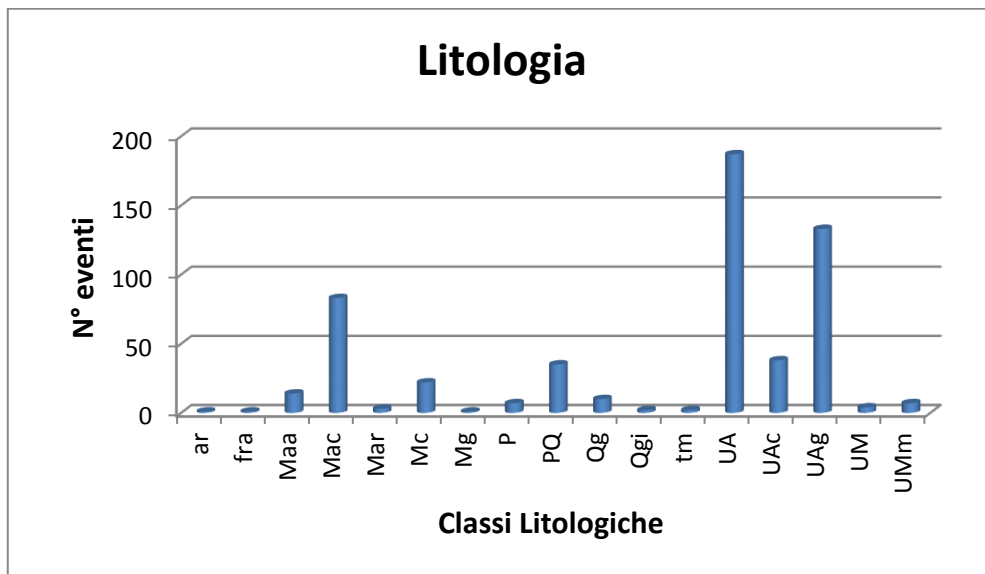


Figura 4 - Litologie interessate dai crolli (n° eventi/ litologie)

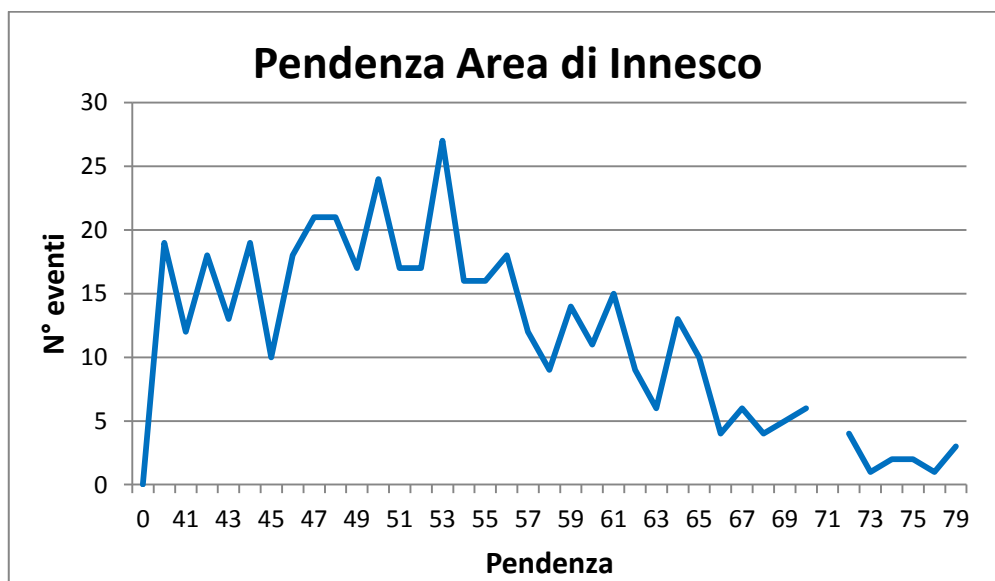


Figura 5 - Pendenze rilevate per i fenomeni da crollo (n°eventi/pendenza)

Molte delle litologie presenti nell'area in esame sono interessate da fenomeni di crollo, ma l'incidenza massima risulta in corrispondenza delle litologie UA (gneiss e micascisti) e UAG

(gneiss con pegmatiti) a causa dell'intenso grado di fratturazione che le caratterizza (fig. 4). Le pendenze dell'area d'innescio di tutti i crolli censiti all'interno del territorio comunale, sono comprese tra 40° e 79° (fig. 5), con un infittimento intorno ai 53°.

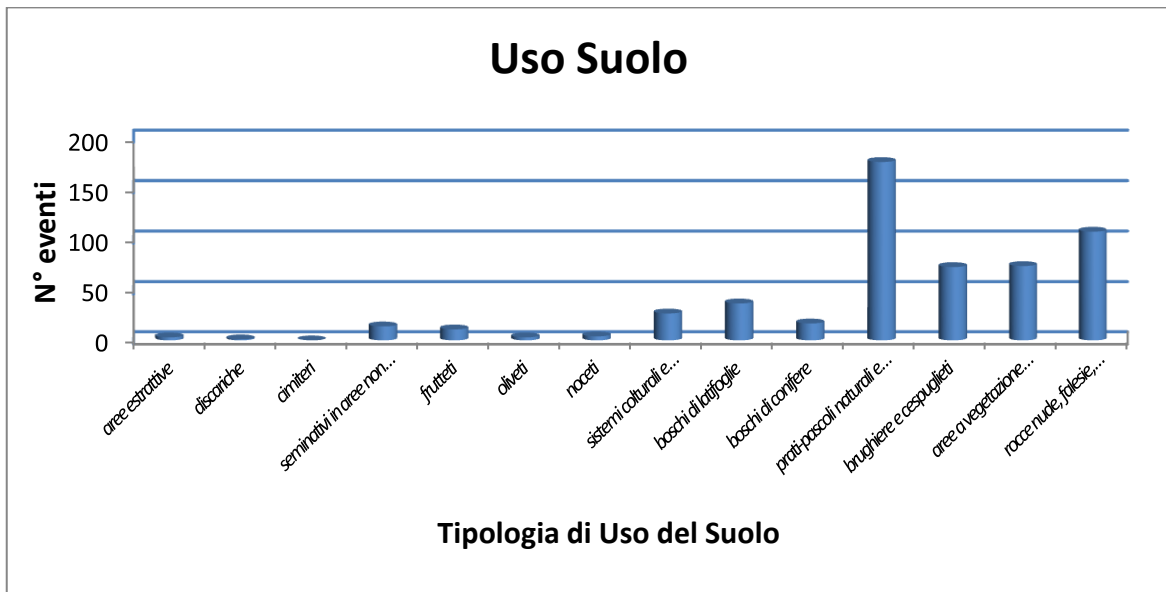


Figura 6 - Diagramma dell' uso del suolo relativo ai crolli (n°eventi/tipologia uso suolo)

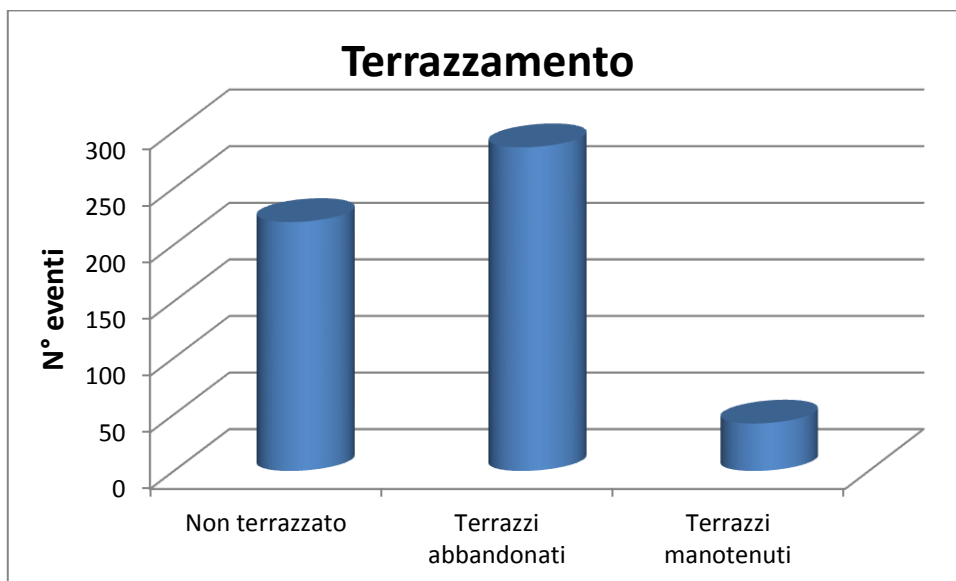


Figura 7 - Diagramma della presenza/assenza di terrazzi e del loro stato relativo ai crolli (n°eventi/tipologia terrazzamento)

L'accumulo dei crolli è caratterizzato dalla presenza di blocchi massivi da centimetrici a metrici combinati con materiale di dimensioni nettamente inferiori (pari alla granulometria della sabbia e e/o della ghiaia). Il materiale distaccatosi fa emergere la fitta fratturazione del substrato che rimane in posto, evidenziando spesso blocchi cinematicamente instabili.

L'analisi dei diversi fattori predisponenti evidenzia la netta predisposizione delle categorie *cespuglieto*, *pascoli* e *rocce nude* (fig. 6) e la scarsa influenza della presenza e dello stato dei terrazzamenti agricoli (fig. 7).

## 6.2 Colate rapide

I fenomeni che interessano in maniera più significativa il territorio comunale sono le colate rapide (fig. 8). Questa tipologia di frane si sviluppa in genere su pendii ripidi innescandosi come piccoli scorrimenti roto-traslazionali (*slide*) per poi assumere le caratteristiche di colate di fango e detrito. La velocità è dell'ordine dei metri al secondo (fino a 10-15 m/s). Il materiale coinvolto è quello giacente sopra il substrato (materiale di copertura costituito da detrito, suolo, copertura vegetale, materiale di origine antropica ecc..) e l'innescò del fenomeno avviene lungo superfici di rottura di neoformazione. Tali fenomeni sono frequenti nell'ambito dello stesso bacino e spesso interessano e invadono le medesime aree di alimentazione e di recapito. Tuttavia si originano sempre in aree di versante mai interessate in epoca storica da fenomeni analoghi, poiché una volta che il materiale di copertura viene asportato da un evento, non sussiste più la condizione per cui quella stessa porzione di versante possa riattivarsi. Di contro, porzioni di versante che presentano condizioni geologico - geomorfologiche simili a quelle in cui il fenomeno è avvenuto, potranno attivarsi in futuro (aree suscettibili all'innescò). E' quindi fondamentale sottolineare che malgrado le aree d'innescò siano differenti, per quanto sopra esposto, spesso questi fenomeni, quando canalizzati, si propagano e impattano le medesime aree (suscettibilità al transito e suscettibilità all'accumulo). All'interno dei confini comunali sono state individuate 2096 colate di fango e detrito a rapida evoluzione.

Le colate rapide interessano le coperture e gli orizzonti più superficiali alterati di parecchi litotipi affioranti nell'area di studio, ma le litologie che mostrano la suscettibilità più elevata sono (fig. 9):

- UA: paragneiss e micascisti
- UA<sub>g</sub>: gneiss con associati filoni pegmatitici
- UA<sub>c</sub>: marmi massivi
- UM: filladi
- Maa: arenarie e marne argillose
- Mac: conglomerati matrice sostenuti
- Mar: argille marnose

Il *range* di pendenza in cui si sono impostate le nicchie di distacco di questo tipo di fenomeno varia da 24° a 79°, ma l'intervallo di pendenza maggiormente significativo in base alla sua frequenza relativa, estratto tramite elaborazioni statistiche sui fenomeni censiti, è risultato essere compreso tra 34° e 56° (fig. 10). Inoltre, esclusivamente per questa tipologia di fenomeno, in funzione della morfologia delle aree di innescò e di flusso, è stato possibile distinguere delle sottoclassi morfologiche particolarmente significative per le successive analisi di pericolosità. Le morfologie delle aree di innescò sono state distinte in arcuate (fig. 11), rettangolari (fig. 12) e lobate (fig. 13). Le arcuate si sviluppano in prevalenza nei versanti trasversalmente concavi, dove lo spessore della copertura e le acque ruscellanti si concentrano; le rettangolari sono per lo più attribuibili alla presenza di terrazzi antropici; le lobate sono costituite dalla coalescenza di nicchie di più fenomeni, cioè sono singoli fenomeni che per allargamento laterale si fondono l'uno con l'altro confluendo poi in uno stesso alveo di scorrimento .



Figura 8 - Colate rapide di fango e detrito sviluppate nelle coperture del substrato metamorfico a monte del paese di Briga

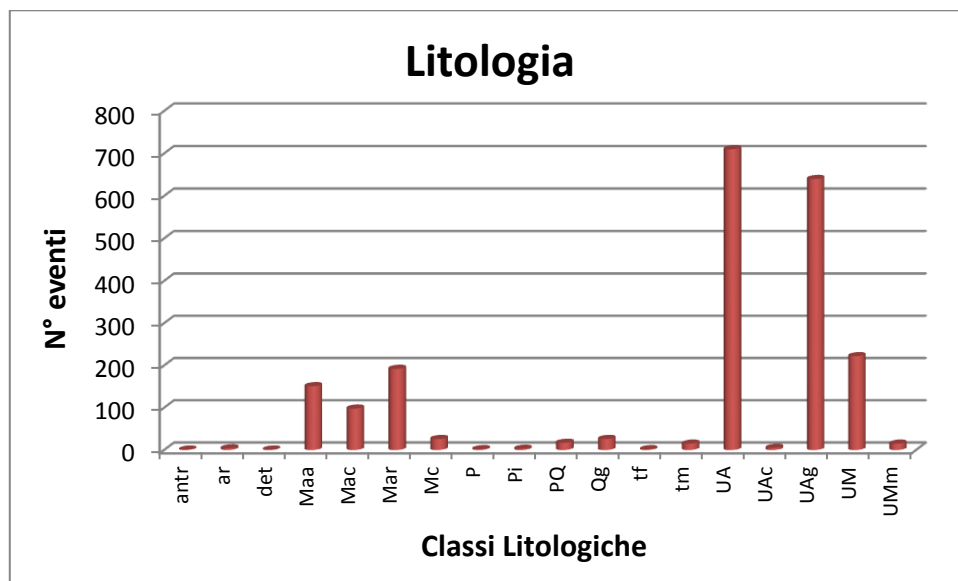


Figura 9 - Litologie coinvolte nelle colate rapide (litologia/n°eventi)

Le morfologie delle aree di alimentazione sono state invece distinte in *incanalate* e *non incanalate* (fig. 14). Le *incanalate* sono rappresentate da quei fenomeni che sono confluiti in una linea di drenaggio preesistente; le *non incanalate* invece si sono propagate su versante aperto, secondo morfologie nastriformi o triangolari, nel primo caso (fig. 15) mantenendo la stessa larghezza delle aree di innesco, nel secondo caso (fig.16) accrescendo la propria larghezza allontanandosi dall'area di innesco secondo un angolo di apertura di circa 20°, conformemente a quanto riportato in bibliografia per altre aree di studio italiane, quali Cervinara e Sarno (Guadagno, 2000; Abbattista *et alii*, 2005).

Sono stati, di seguito, misurati tutti gli elementi necessari per la caratterizzazione morfometrica dei fenomeni. Dall'analisi effettuata, è emersa un'estrema variabilità dei parametri:

- la larghezza della superficie di rottura varia da 2 m a 62 m,

- la lunghezza della superficie di rottura varia da 2 m a 45 m,
- la lunghezza totale corona/piede (per le non incanalate) e corona/collettore principale (per le incanalate) varia da 10 m a 340 m.

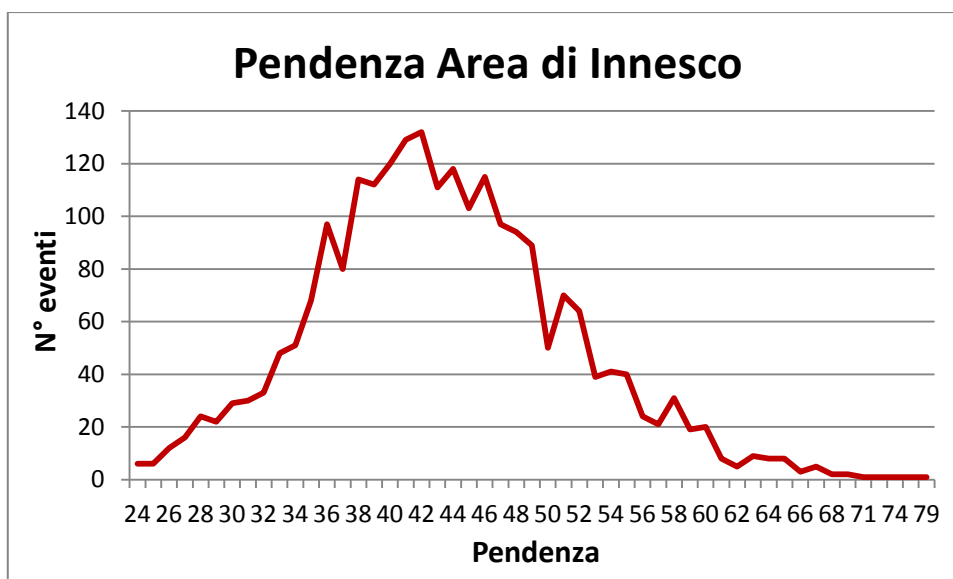


Figura 10 - Pendence originarie del versante nell'area d'innescio dei fenomeni da colata rapida (n° eventi/pendenza)



Figura 11 - Morfologia area di innescio arcuata

L'unico parametro morfometrico relativamente omogeneo, di grande importanza per la successiva fase di analisi dell'intensità dei fenomeni, è la profondità della superficie di rottura, che varia tra 0.5 m e 2 m.



Figura 12 - Morfologia area di innesco rettangolare



Figura 13 - Morfologia area di innesco lobata

Dalla figura 17 emerge come questa tipologia di fenomeni si inneschi con maggiore frequenza in suoli non molto tenuti o con copertura naturale anche se non è da escludere l'attivazione di colate rapide in aree coltivate a frutteti, oliveti o in sistemi colturali complessi.

Tra i fattori predisponenti considerati, la presenza di superfici terrazzate sembra avere un'importanza fondamentale; i dati in figura 18 mostrano che il 93% dei fenomeni ricadono in zone terrazzate, e che il 65% delle colate rapide totali interessano aree caratterizzate dalla presenza di terrazzamenti abbandonati (fig. 19). L'alta percentuale di colate rapide in corrispondenza della categoria "rocce nude, falesie, rupi e affioramenti" è da imputare alla presenza di una coltre di copertura di natura detritico-regolitica discontinua e di spessore

modesto presente su queste aree e particolarmente suscettibile alla mobilitazione in occasione di eventi meteorici estremi.



Figura 14 - Morfologia area di alimentazione: incanalata (sulla sinistra) non incanalata (sulla destra)



Figura 15 - Morfologia area di alimentazione nastriforme



Figura 16 - Morfologia area di alimentazione triangolare

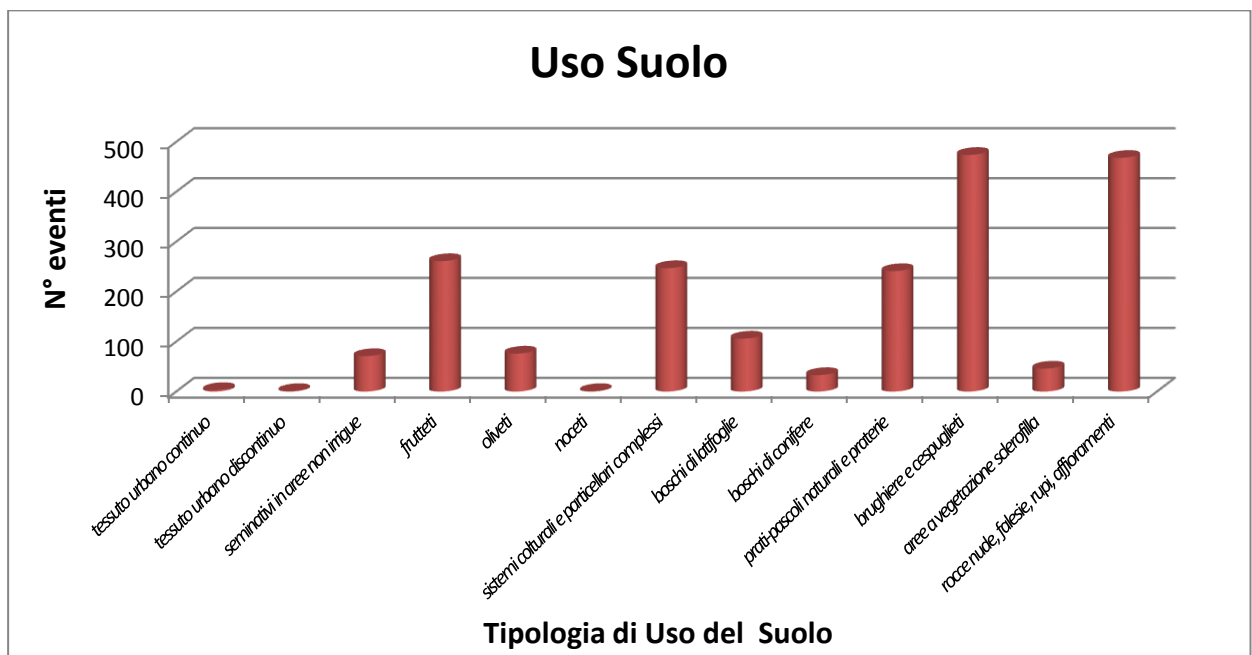


Figura 17 - Diagramma dell' uso del suolo relativo alle colate rapide (n°eventi/tipologia uso suolo)

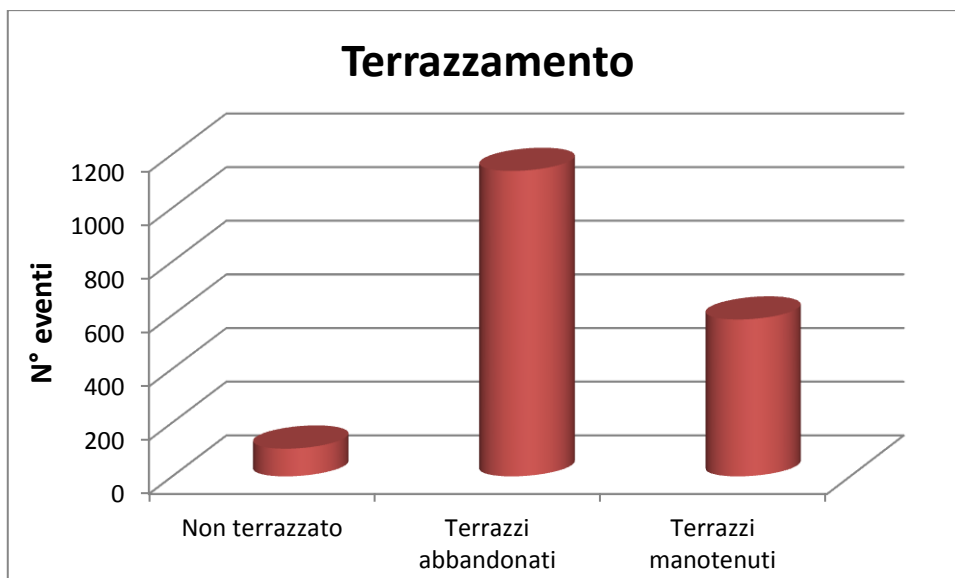


Figura 18 - N°eventi/ aree terrazzate



Figura 19 – Area con terrazzamenti abbandonati interessata dalle colate rapide del 1° ottobre 2009 (Altolia)

La curvatura del versante (fig. 20) evidenzia la ricorrenza dei fenomeni censiti in zone di convessità del versante. La figura 21 mostra l'importanza assunta dalla presenza di aree ad elevata concentrazione di flusso, causata dalla presenza strade o sentieri con inadeguati dispositivi di drenaggio delle acque superficiali che non consentono un corretto smaltimento delle acque di ruscellamento.

Dall'analisi effettuata e dall'elaborazione dei dati ottenuti è emerso quanto segue:

- tutti i fenomeni ascrivibili a colate rapide di fango e detrito hanno interessato modesti spessori (in media 1 m, comunque mai superiore a 2 m) della coltre superficiale nelle zone d'innesco;
- nella stragrande maggioranza dei casi il materiale di copertura, nella zone d'innesco, è stato completamente asportato, lasciando a nudo l'ammasso roccioso che costituisce il substrato;

- nelle zone d'alimentazione il materiale parzialmente mobilizzato con caratteristiche geotecniche residuali può a tratti risultare volumetricamente considerevole (soprattutto nelle aree in cui le colate rapide sono avvenute nel recentissimo passato);
- tutti i fenomeni franosi si sono sviluppati in settori di versante con pendenze comprese tra 24° e 79°;
- l'instabilità dei versanti non cresce all'aumentare della pendenza e si riscontra statisticamente un intervallo clivometrico entro cui si ha la massima incidenza delle frane: i versanti con inclinazione compresa tra 34° e 56° mostrano la più elevata concentrazione di fenomeni;
- i dissesti sono stati osservati in associazione a varie tipologie di substrato ma in particolare in relazione ai litotipi metamorfici; da un punto di vista strettamente geologico, tali rocce si presentano fortemente alterate a causa dell'intensa fratturazione e della struttura metamorfica (foliazione); l'intensa alterazione è causa della formazione di coltri di materiale detritico e regolitico di vario spessore necessarie allo sviluppo delle colate rapide;
- la differente propensione al dissesto dei vari litotipi del substrato è dovuta in larga misura ad una diversa predisposizione alla formazione di una coltre detritica;
- è stata osservata l'elevata frequenza dei fenomeni nella parte alta dei versanti in corrispondenza del settore di cambio di pendenza in particolare nelle aree convesse lungo la direzione di massima pendenza e rettilinee o concave lungo le isoipse.

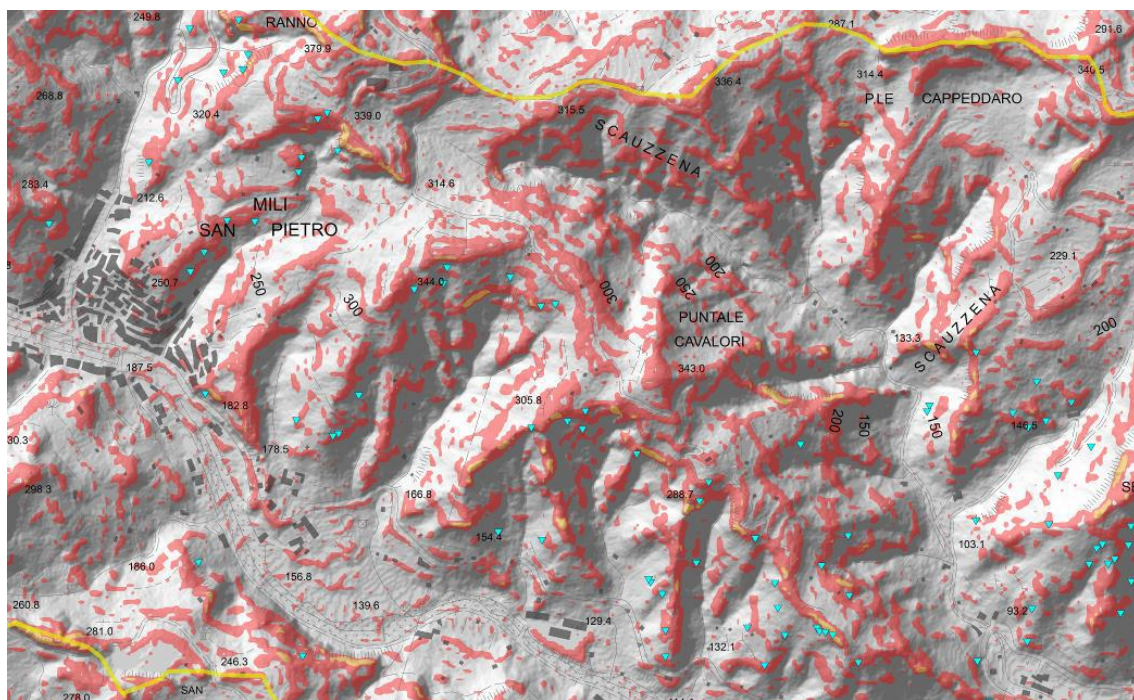


Figura 20 - Carta della curvatura convessa del versante (zone in rosso) e dei fenomeni censiti (triangoli azzurri)

Dai rilevamenti effettuati sul campo e in base alle osservazioni fatte, è emerso che le possibili cause di innesco delle colate rapide possono essere attribuite ad uno o più dei seguenti fattori:

- settori di brusco cambio di pendenza, in cui è particolarmente accentuato l'effetto della filtrazione dell'acqua nel sottosuolo in combinazione con il marcato potere erosivo dovuto all'improvvisa accelerazione dell'acqua di ruscellamento;
- aree di elevata concentrazione di flusso per motivi antropici, causate dalla presenza di strade o sentieri con inadeguati dispositivi di drenaggio delle acque superficiali nonché

dalla presenza di terrazzamenti del versante in stato di abbandono con un non corretto smaltimento delle acque di ruscellamento;

- presenza di sorgenti di contatto per contrasto di permeabilità fra coltre detritica/regolitica e substrato;
- aree di elevata concentrazione di flusso sub-superficiale per motivi geomorfologici, in corrispondenza di linee di impluvio ed avvallamenti topografici o di bacini di ordine zero (*hollows*), ovvero di depressioni morfologiche del substrato riempite da detrito;
- fenomeni di erosione al piede ad opera dei torrenti o di colate di detrito incanalate;
- presenza di aree di debolezza di natura antropica come terrazzi e muretti a secco in cattivo stato di manutenzione;
- presenza di tagli stradali a mezza costa con inadeguate opere di sostegno (muri di ripa e controripa) che, di fatto, creano le condizioni per uno scivolamento di detrito a causa del mancato sostegno della coltre da parte del materiale asportato.



Figura 21 - Ruolo degli elementi antropici: fenomeno franoso strettamente legato alla presenza di un'interruzione antropica del versante che ha contribuito all'incremento della suscettibilità all'innescio di colate rapide

### 6.3 Scorrimenti rotazionali

Gli scorrimenti rotazionali sono dei movimenti di massa del substrato roccioso, caratterizzati da movimenti di rotazione che avvengono intorno ad un punto (immaginario), esterno al versante, al di sopra del baricentro della massa in movimento (fig. 22). La forma della superficie di scorrimento è di solito arcuata (a cucchiaio), con la concavità verso l'alto. Uno scorrimento rotazionale avviene essenzialmente per deformazioni di taglio lungo una o più superfici, o entro uno spessore limitato del materiale. Il fenomeno è controllato dalle caratteristiche di resistenza al taglio dei materiali interessati: la rottura si verifica per massima sollecitazione al taglio e successivo superamento della resistenza di picco. La massa dislocata

scivola oltre la superficie di rottura sulla originale superficie del terreno, che viene così a costituire una superficie di separazione tra la massa in posto e l'accumulo della massa dislocata. Questo tipo di fenomeni si verificano prevalentemente in litotipi argillosi/argilloso-marnosi o in litotipi costituiti da alternanze in cui le rocce litoidi sono subordinate alle rocce non litoidi e comunque il fenomeno franoso è provocato dal comportamento della roccia non litoide. Il movimento nella parte di testata è quasi esclusivamente verticale, di abbassamento, mentre nelle altre parti prevale la componente orizzontale. Durante la rotazione, a causa di movimenti differenziali, si ha lo sviluppo di fessure trasversali che suddividono la massa in frana in più blocchi. Il movimento consiste in una rotazione della massa che tende a raggiungere una configurazione «più stabile» (nel senso che essendo concava la superficie di scorrimento il materiale mobilizzato trova temporaneamente una nuova situazione di equilibrio fin quando non si riattiva il processo per superamento della resistenza residua).

Caratteristiche tipiche degli scorrimenti rotazionali sono:

- presenza di scarpate secondarie che isolano terrazzetti;
- basso grado di deformazione interna;
- stratigrafia discordante tra il materiale ribassato e il materiale indisturbato;
- pattern di drenaggio disturbato;
- presenza di depressioni con acque stagnanti tra le unità di scorrimento o nell'area di testata;
- rigonfiamenti e filtrazioni al piede;
- alberi generalmente inclinati verso valle nelle aree di piede e di margine e verso monte nelle zone di testata.



Figura 22 - Scorrimento rotazionale che ha coinvolto, obliterandola completamente, Via Carmelo Allegra, in località San Giovannello (Bacino idrografico del torrente Gazzì)

Gli scorrimenti rotazionali individuati nel Comune di Messina (215 fenomeni) si sono sviluppati in maniera molto selettiva nei seguenti litotipi (fig. 23):

- Maa: arenarie e marne argillose
- Qg: sabbie e ghiaie
- Mac: conglomerati matrice sostenuti
- Mc: calcare evaporitico

- P: alternanza di marne e sabbie passanti a sabbie
- Tm: terrazzi marini costituiti da sabbie talora ghiaiose
- Mg: gessi ed argille gessose

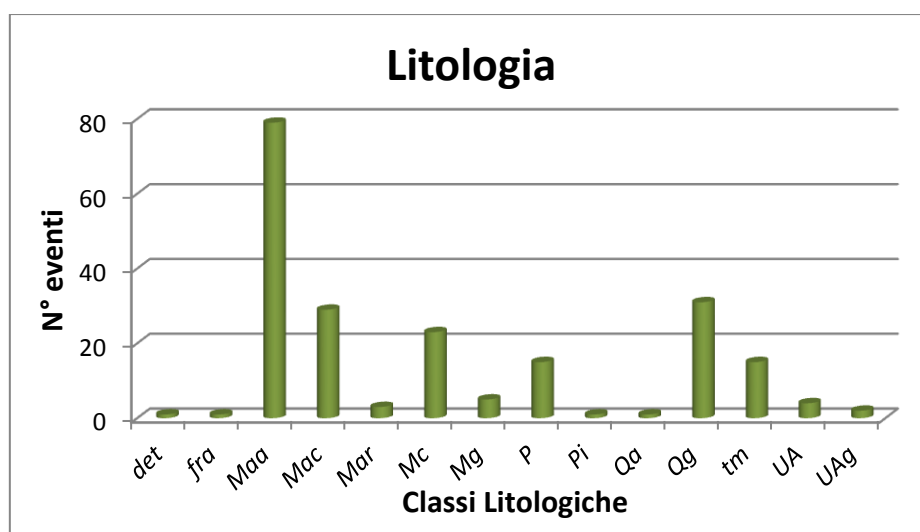


Figura 23 - Litologie coinvolte negli scorrimenti rotazionali (litologia/n°eventi)

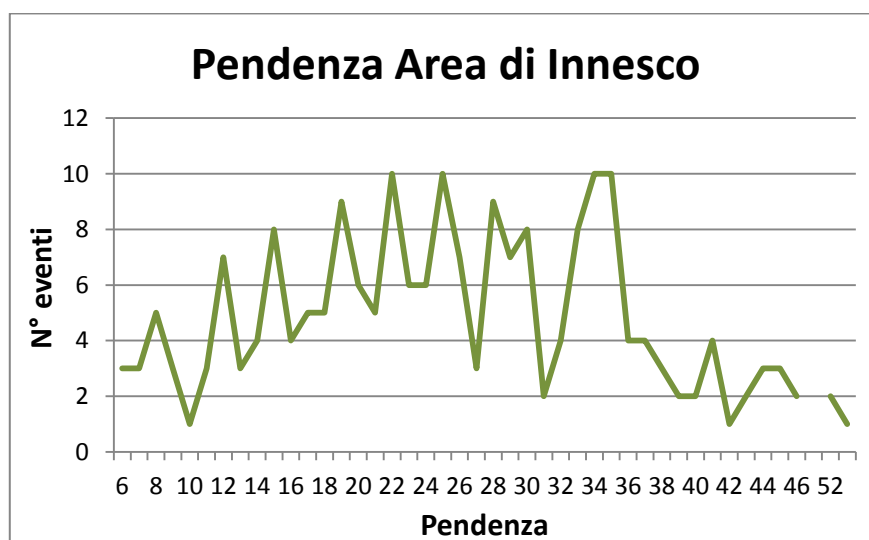


Figura 24 - Pendenze originarie del versante nell'area d'innesco degli scorrimenti rotazionali (n° eventi/pendenza)

Il *range* di pendenza in cui si sono impostate le nicchie di distacco di questo tipo di fenomeno varia da 6° a 54°, ma l'intervallo di pendenza maggiormente significativo in base alla sua frequenza relativa, estratto tramite elaborazioni statistiche sui fenomeni censiti, è risultato essere da 12° a 35° (fig. 24).

Tra i fattori predisponenti considerati, la presenza di superfici terrazzate risulta, anche in questo caso determinante (fig. 25); i dati mostrano infatti che l'83% dei fenomeni sono ricadenti in zone terrazzate, di cui la netta maggioranza (58% degli scorrimenti rotazionali totali) in aree con la presenza di terrazzamenti abbandonati. La figura 26 evidenzia che la quasi totalità dei fenomeni coinvolge aree adibite a prati e pascoli.

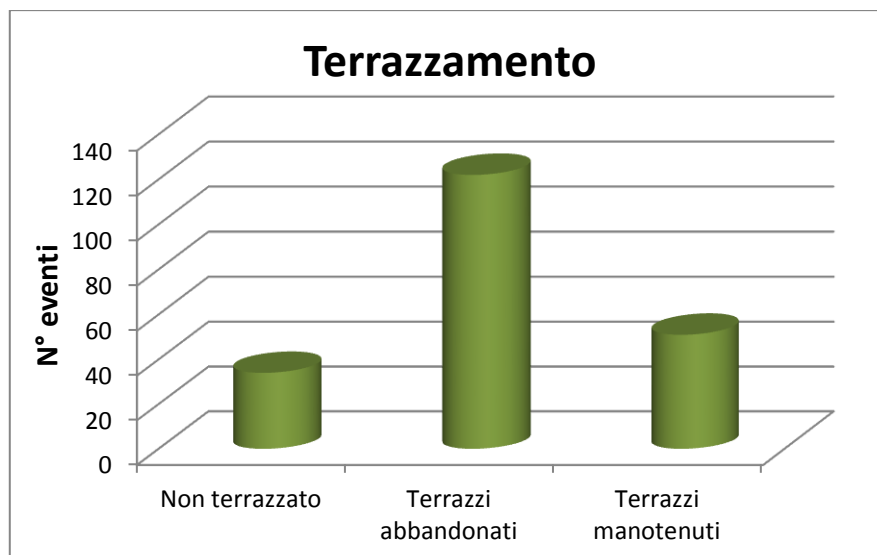


Figura 25 - N°eventi/ aree terrazzate

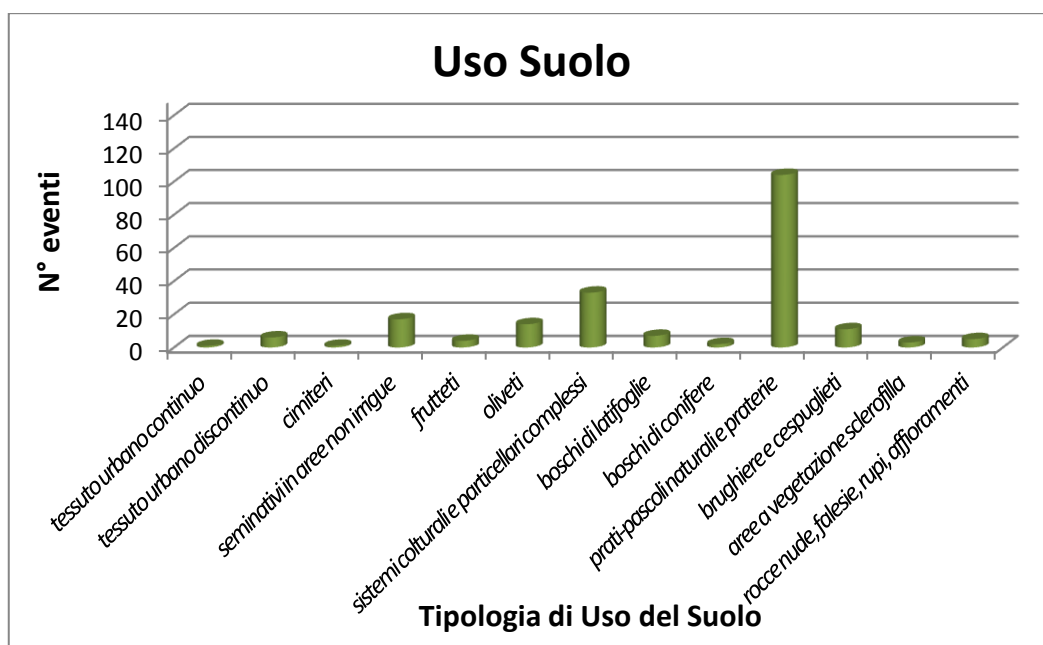


Figura 26 - Diagramma dell' uso del suolo relativo alle rotazionali (n°eventi/tipologia uso suolo)

#### 6.4 Scorrimenti traslazionali

Gli scorrimenti traslazionali (anche detti scorrimenti traslativi o planari) sono caratterizzati da un movimento di traslazione lungo una superficie di scivolamento all'incirca planare, rappresentata da superfici di debolezza preesistenti, disposte nello stesso senso del versante (franapoggio) e con un'inclinazione uguale o minore di quella del pendio (figg. 27 e 28).

Gli scorrimenti traslazionali individuati nell'area sono risultati essere 47 e si sono sviluppati esclusivamente nei seguenti litotipi affioranti (fig. 29):

- UA: paragneiss e micascisti
- UA<sub>g</sub>: gneiss con associati filonipegmatici
- P<sub>q</sub>: calcareniti e sabbie
- Mac: conglomerati matrice sostenuti
- Mar: argille marnose
- UM<sub>m</sub>: marmi associati a filladi

- UAc: marmi massivi
- P: alternanza di marne e sabbie passanti a sabbie
- tm: terrazzi marini



Figura 27 - Scorrimento traslazionale incombente sulla S.P. 38 (Mili San Pietro); in evidenza gli elementi morfologici principali



Figura 28 - Danni causati alla sede stradale dal lento ma continuo movimento traslazionale in località Gesso

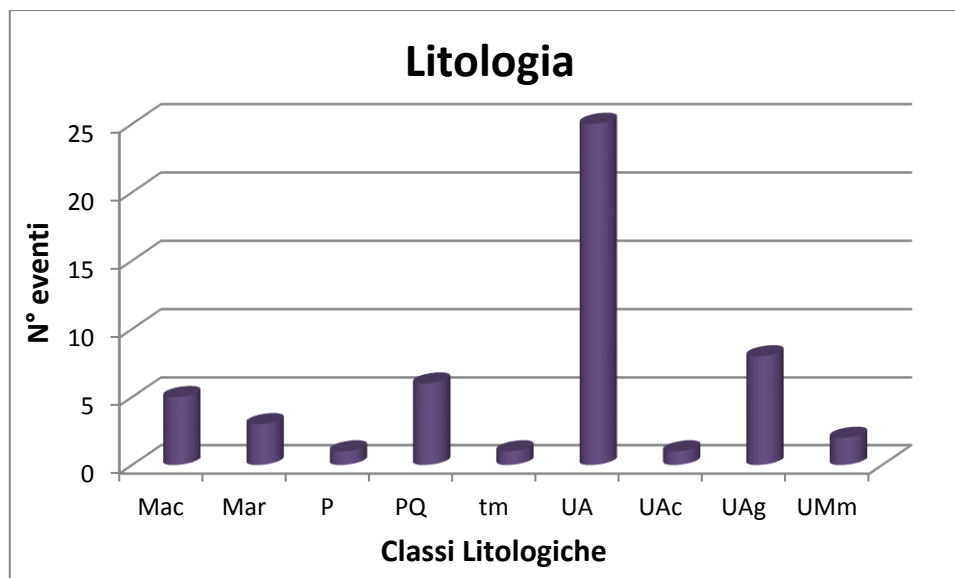


Figura 29 - Litologie coinvolte negli scorrimenti traslazionali (litologia/n°eventi)

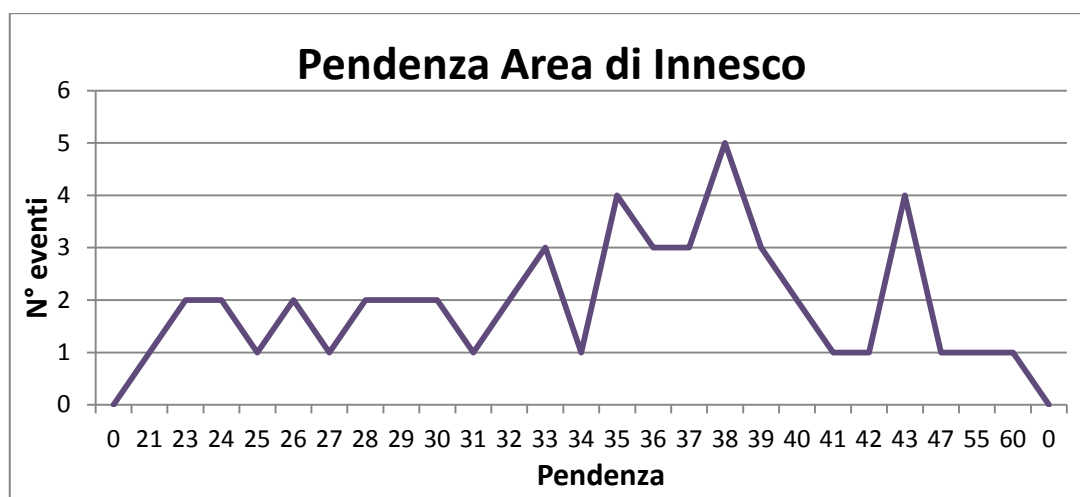


Figura 30 - Pendenze originarie del versante nell'area d'innescio degli scorrimenti traslazionali (n° eventi/pendenza)

Il *range* di pendenza in cui si sono impostate le nicchie di distacco di questo tipo di fenomeno varia da 21° a 60° (fig. 30).

Analogamente a quanto visto per altre tipologie di fenomeni, tra i fattori predisponenti considerati, sostanziale è la presenza di superfici terrazzate (fig. 31). I dati mostrano che il 75% dei fenomeni sono ricadenti in zone terrazzate, di cui la netta maggioranza (59% degli scorrimenti traslazionali totali) in aree con la presenza di terrazzamenti abbandonati. Relativamente all'uso del suolo, la maggior parte degli scorrimenti traslazionali censiti si concentra in zone non coltivate (fig. 32).

## 6.5 Censimento dei fenomeni avvenuti fuori dall'area di studio

Nell'ambito del presente studio è stato possibile effettuare ulteriori analisi sui fenomeni da colata rapida in un'area limitrofa al confine comunale e ricadente all'interno dell'area della Provincia di Messina. Ciò è stato ritenuto necessario per rendere il campione statistico, su cui effettuare le successive indagini, maggiormente omogeneo sul territorio e per indagare la suscettibilità di alcuni litotipi presenti solo nella zona nord del comune e non interessati dagli

eventi meteorici che hanno colpito la parte sud nel 2007 e nel 2009. Infatti, in seguito agli eventi alluvionali che hanno colpito il territorio comunale di Saponara (Me) nel 2011, è stato possibile censire 262 fenomeni da colata rapida (figg. 33 e 34).

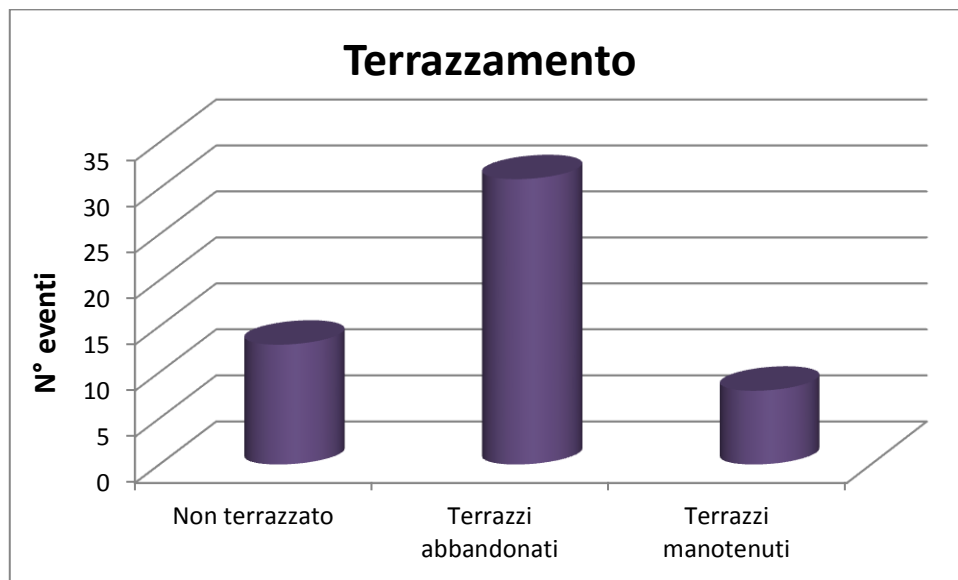


Figura 31 - N°eventi/ aree terrazzate

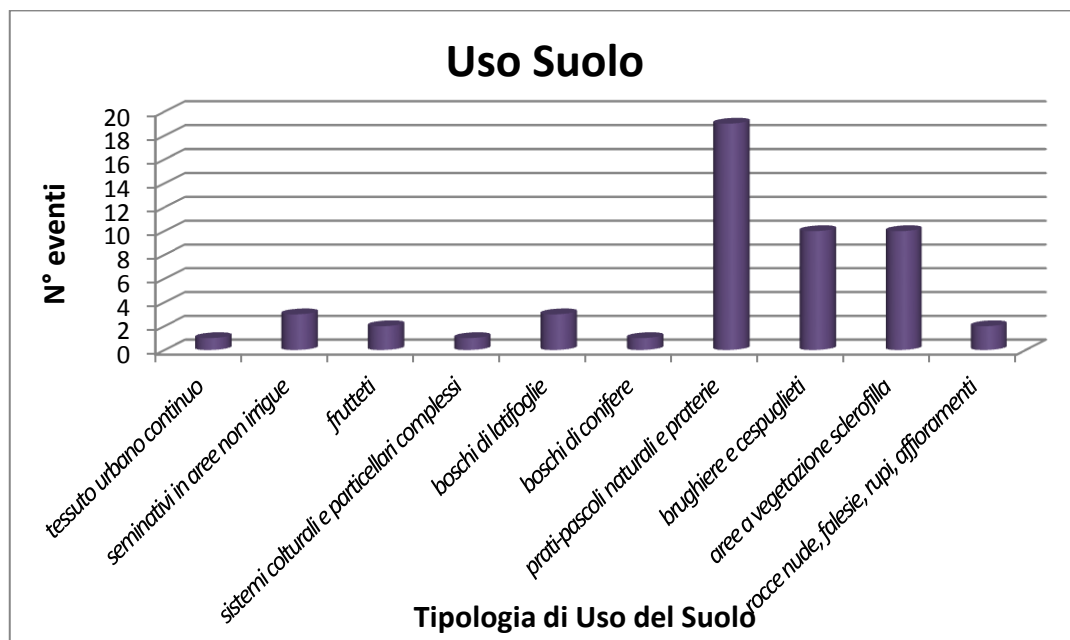


Figura 32 - Diagramma dell' uso del suolo relativo alle traslazionali (n°eventi/tipologia uso suolo)

Le colate rapide hanno interessato le coperture e gli orizzonti più superficiali alterati e si sono sviluppate esclusivamente nei seguenti litotipi affioranti nell'area di studio (fig. 35):

- Mac: conglomerati matrice sostenuti
- UA: paragneiss e micascisti
- UAg: gneiss con associati filoni pegmatitici
- UM: filladi
- Qg: ghiaie e sabbie
- Maa: arenarie e marne argillose



Figure 33 e 34: colate rapide avvenute nel territorio comunale di Saponara in seguito all'evento alluvionale del 23 novembre del 2011

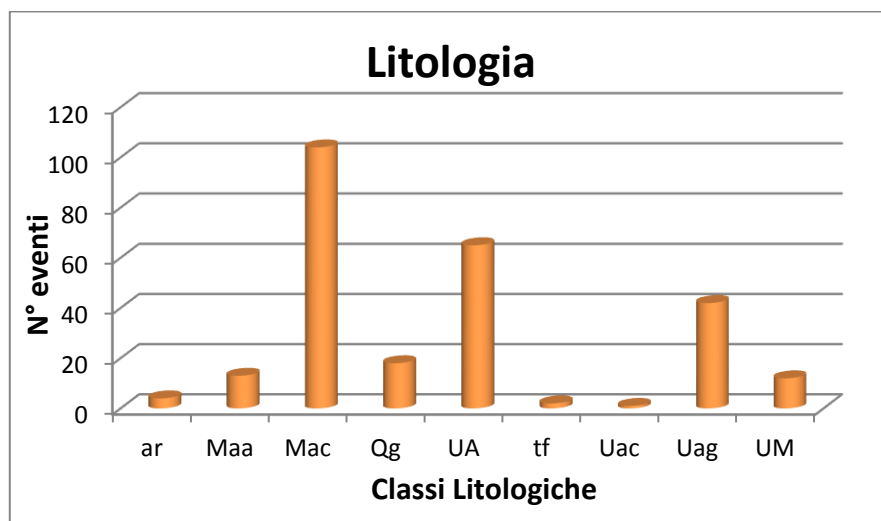


Figura 35 - Litologie coinvolte nelle colate rapide (litologia/n°eventi).

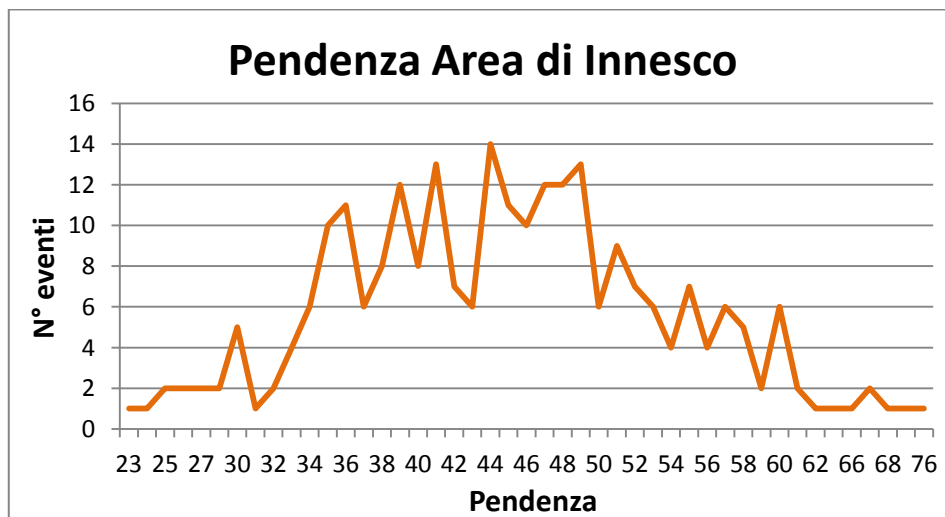


Figura 36 - Pendenze originarie del versante nell'area d'innescio dei fenomeni da colata rapida (n° eventi/pendenza)

Il range di pendenza in cui si sono impostate le nicchie di distacco di questo tipo di fenomeno varia da 23° a 76°, ma l'intervallo di pendenza maggiormente significativo in base alla sua

frequenza relativa, estratto tramite elaborazioni statistiche sui fenomeni censiti, è risultato essere da 34° a 60° (fig. 36). Tra i fattori predisponenti considerati, la presenza di superfici terrazzate ha un'importanza fondamentale (fig. 37). I dati mostrano infatti che l'86% dei fenomeni sono ricadenti in zone terrazzate, di cui la netta maggioranza (61% delle colate rapide totali) in aree con la presenza di terrazzamenti abbandonati.

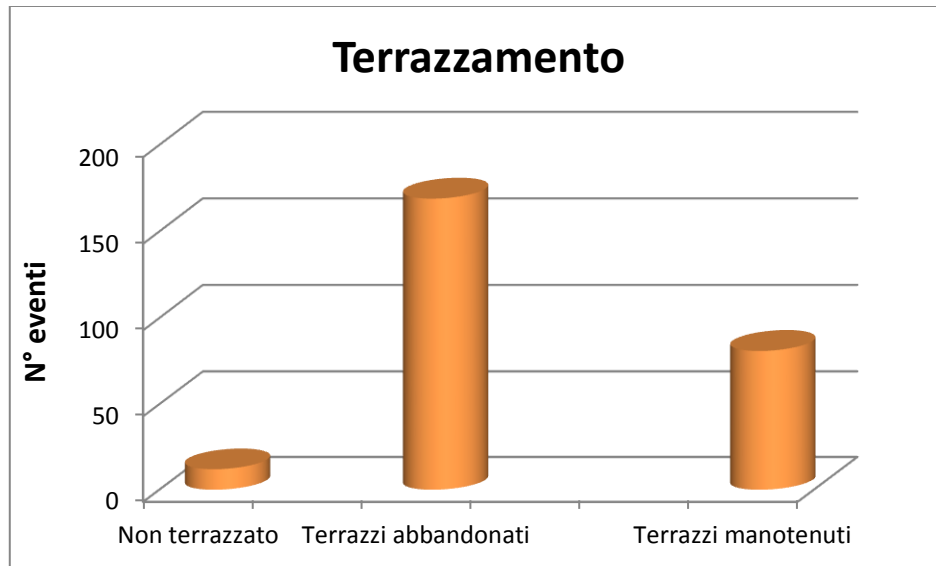


Figura 37 - N° eventi/ aree terrazzate

## 6.6 Bibliografia

- Abbattista F, D'Agostino G, Delmonaco G, Di Filippo L, Falconi L, Leoni G, Margottini C, Puglisi C, Romano P, Spizzichino D. (2005). La valutazione della suscettibilità da frana: applicazione alle colate rapide di Cervinara (AV). *Geologia tecnica & ambientale*, n°1/2005. ISSN 1722-0025
- Brardinoni F., Slaymaker O., Hassan M.A. (2003). Landslide inventory in a rugged forested watershed: a comparison between air-photo and field survey data. *Geomorphology*, Volume 54, Issues 3–4, 5 September 2003, Pages 179–196
- Cruden DM, Varnes DJ (1996). Landslide Types and Processes. In: Turner A.K. & Schuster R.L. (eds.) "Landslides: investigation and mitigation". Sp. - Rep. 247, Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington D.C., 36-75.
- Guadagno F.M., Perriello Zampelli S., Matonti V. (2000). Primo contributo allo studio delle aree di distacco delle frane del 5-6 maggio 1998 in Campania. *Quaderni di Geologia Applicata*, 7-2 (2000), pp. 121-141.
- Regione Siciliana Assessorato del territorio e dell'ambiente - Dipartimento dell'ambiente Servizio III - Assetto del territorio e difesa del suolo. Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico e successivi aggiornamenti (DPR n. 118 del 21/03/2011)
- Tapas R. Martha, Cees J. van Westen, Norman Kerle, Victor Jetten, K. Vinod Kumar (2013). Landslide hazard and risk assessment using semi-automatically created landslide inventories. *Geomorphology*, Volume 184, 15 February 2013, Pages 139–150
- Trigila A. (2007). Rapporto sulle frane in Italia, Il Progetto IFFI. Metodologia, risultati e rapporti regionali (Rapporti 78/2007). APAT, Roma, 681 pp. <http://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/iffi>

- Trigila A., Iadanza C., Spizzichino D. (2010). Quality assessment of the Italian Landslide Inventory using GIS processing. *Landslides* (2010) 7:455–470, DOI 10.1007/s10346-010-0213-0
- WP/WLI Working Party on the World Landslide Inventory & Canadian Geotechnical Society (1993) *Multilingual Landslide Glossary*. BiTech Publishers, Richmond, B.C
- VARNES, D. J. (1978) Slope movements types and processes. In *Landslides: Analysis and Control* (Eds, Schuster, R.L. and Krizek, R.S.) Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Special Report, Washington D.C., 176, 2, pp. 20-47.
- VARNES D.J. & IAEG Commission on Landslides (1984) - *Landslide Hazard Zonation – a review of principles and practice*. UNESCO Paris. 63pp
- Wiczeorek, G.F. (1984). Preparing a detailed landslide-inventory map for hazard evaluation and reduction. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists* 21 (3), 337–342.

## 7. SUSCETTIBILITÀ ALL'INNESCO

Come evidenziato nel Capitolo 1 (Premessa) la valutazione della propensione al dissesto o suscettibilità deve prevedere la risposta al primo quesito inerente la pericolosità: “dove in futuro si può verificare un potenziale fenomeno? (Amadesi & Vianello, 1978; van Westen, 1994; Aleotti & Chowdhury, 1999; Guzzetti et alii, 1999; Guzzetti, 2004; Fell et alii, 2008; van Westen et alii, 2008; Günther *et alii*, 2013a).

È bene sottolineare che ciascuna classe di fenomeno è costituita da almeno due parti morfologiche principali: area di innesco e area di accumulo. A queste nel caso delle colate (sia lente sia rapide) va aggiunta l'area di transito/flusso. Nel caso delle colate lente tale area è caratterizzata esclusivamente da trasporto di materiale. Nel caso delle colate rapide, invece, lungo l'area di flusso avviene asportazione di materiale di copertura che va ad incrementare il volume di materiale mobilitato nell'area d'innesco. Poiché gli elementi a rischio possono essere ubicati in una qualsiasi di tali aree, è necessario effettuare una valutazione della suscettibilità integrale che deve prevedere l'analisi delle seguenti aree:

- l'area dove il fenomeno potenziale prende origine mobilizzando materiale al di sopra di una superficie di rottura (area di innesco);
- l'area di transito/flusso (quando presente) ove generalmente si verifica passaggio di materiale senza significative variazioni volumetriche e energetiche, eccezion fatta per le colate rapide;
- l'area di accumulo ove il fenomeno decelera, diminuendo progressivamente sia il volume sia l'energia.

Gli approcci alla suscettibilità reperibili in bibliografia, sono molto diffusi anche se un aspetto associato è che per la elaborazione dei vari parametri sia necessario implementare tutti i dati in ambiente GIS (Carrara et alii, 1999). I metodi di analisi della suscettibilità proposti possono essere distinti essenzialmente in qualitativi (geomorfologici ed euristici) e quantitativi (statistici, geotecnici e deterministici) (Aleotti & Chowdhury, 1999). A titolo di esempio possono essere citati i seguenti:

- geomorfologici: Crosta & Frattini, 2003; D'Amato et alii, 2009;
- euristici: Budetta et alii, 2008; Castellanos, Abella & Van Westen, 2008; Di Crescenzo et alii, 2008; Donati & Turrini, 2002; Ruff M. & Czurda K., 2008;
- statistici: Ermini et alii, 2005; Conforti et alii, 2011; De Guidi & Scudero 2013; Floris et alii, 2011; Lee & Pradhan, 2007; Günther et alii, 2013b;
- deterministici: Montgomery e Dietrich, 1994; Dietrich, W. E. and Sitar, N., 1997; Dietrich et alii, 2007.

In questo capitolo viene descritta la metodologia ENEA utilizzata per valutare la suscettibilità all'innesco dei fenomeni franosi. Tale metodologia è sostanzialmente di tipo euristico, ma integra un'analisi statistica descrittiva dell'inventario dei fenomeni, preliminare all'applicazione del modello. Inoltre per l'analisi dell'inventario è in corso la valutazione di altri metodi (statistica multivariata e regressione logistica), i quali se da un lato presentano caratteristiche di maggiore oggettività dall'altro non consentono all'operatore di intervenire nelle fasi intermedie del flusso di lavoro, verificando l'attendibilità di ciascun passaggio.

La metodologia qui descritta è stata sviluppata in più di quindici anni di studi, condotti da un gruppo di studio multidisciplinare guidato dai ricercatori ENEA, ed è stata applicata in numerosi altri casi, sia in Italia che all'estero, dalla scala nazionale a quella regionale fino alla scala di sito (Delmonaco et alii, 2003; Casagli et alii, 2004; Abbattista et alii, 2005; Leoni et alii, 2009; Falconi et alii, 2011; Puglisi et alii, 2011a; Puglisi et alii, 2011b)..

## 7.1 La metodologia ENEA

In questo studio la valutazione della suscettibilità all'innesco si basa sull'inventario dei fenomeni avvenuti e sul riconoscimento di Parametri Discriminanti e Fattori Predisponenti al fine di individuare Unità Territoriali Omogenee (UTO) caratterizzate ciascuna da un livello di suscettibilità.

I Parametri Discriminanti sono quei parametri necessari all'innesco di un fenomeno. In base all'esperienza maturata, e in accordo con la maggiorparte degli autori, i Parametri Discriminanti sono rappresentati generalmente dalla pendenza del versante originario e dalla natura del materiale mobilizzato, ovvero la litologia per le frane in substrato e la coltre superficiale per le frane in copertura. Attraverso l'*overlay mapping* in ambiente GIS dei due rispettivi strati informativi il territorio viene suddiviso in Unità Territoriali Lito-Morfometriche (UTLM), porzioni di territorio caratterizzate dalla presenza di entrambi i Parametri Discriminanti.

I Fattori Predisponenti sono rappresentati dalle condizioni geologiche, geomorfologiche, idrogeologiche, litotecniche, morfometriche, antropiche e di uso del suolo, il cui contributo influenza la suscettibilità di un'area. Tramite l'analisi statistica dell'inventario per ciascun Fattore Predisponente vengono determinati quelli maggiormente significativi. Quindi, in funzione del contributo all'instabilità, vengono assegnati un indice (da 0 a 9) a ciascuna classe dei fattori ed un peso complessivo (da 0 a 5) ad ogni fattore, direttamente proporzionali al relativo contributo all'instabilità del versante. Ogni Parametro Discriminante e Fattore Predisponente viene spazializzato e costituisce uno strato informativo geografico del GIS. Dall'*overlay* di tutti gli strati informativi deriva la sintesi di tutte le caratteristiche del territorio: la carta delle UTO (Unità Territoriali Omogenee). Le UTO rappresentano porzioni di territorio caratterizzate da una singolare combinazione di fattori, ad esempio: terreni metamorfici con copertura eluvio colluviale di 1.5 m, pendenza del versante di 27°, falda idrica profonda, coltivazione arborea su terrazzamento ben mantenuto, a distanza di 45 m da una linea tettonica e di 72 m da una strada. Una funzione di suscettibilità, elaborata sulla base di una somma pesata, implementa gli indici ed i pesi associati alle componenti derivando la mappa della suscettibilità all'innesco.

## 7.2 Applicazione nell'ambito dell'Accordo di Programma ENEA – Comune di Messina

### 7.2.1 Parametri discriminanti e fattori predisponenti

Le componenti naturali ed antropiche analizzate nel presente studio sono state:

- Geologia del substrato
- Intervallo di pendenza
- Uso del suolo
- Terrazzamenti
- Elementi antropici
- Elementi tettonici
- Rotture del versante
- Concomitanza con altri fenomeni
- Erosione al piede
- Apporti di acqua in nicchia
- Curvatura longitudinale del versante
- Esposizione del versante

Successivamente, in base alla diffusione di ciascun fattore nel territorio investigato ed in funzione alla relativa spazializzazione, l'analisi statistica ha evidenziato come maggiormente significativi i seguenti fattori predisponenti:

- Geologia del substrato
- Intervallo di pendenza
- Curvatura longitudinale del versante
- Uso del suolo
- Terrazzamenti
- Elementi tettonici (distanza dalle faglie)
- Elementi antropici (distanza dalle strade)
- Rotture del versante (distanza dalle scarpate)

Fatta eccezione per geologia del substrato e intervallo di pendenza, la cui importanza in un'analisi del dissesto territoriale è facilmente intuibile per quanto fin qui esposto, appare necessario porre l'attenzione sul significato degli altri fattori predisponenti considerati. Fondamentale per lo sviluppo del presente elaborato è stato il reperimento di informazioni relative alle caratteristiche fisiche ed alle condizioni ambientali dell'area di indagine. I fattori geoambientali considerati significativi per la determinazione della suscettibilità da frana, sono stati: l'uso del suolo e la presenza dei terrazzamenti. Anche gli elementi antropici (viabilità principale e secondaria), ricavati dalla CTR, rappresentano un elemento essenziale poiché determinano un aumento locale dell'angolo di inclinazione del pendio, il ristagno di acqua con il conseguente aumento dell'infiltrazione e delle pressioni neutre e ruscellamento concentrato nelle porzioni di versante immediatamente a valle. Osservazioni di terreno e analisi statistiche hanno evidenziato che le aree di innesco (soprattutto nel caso di colate rapide) sono influenzate dalla curvatura longitudinale del versante, considerata un altro fattore predisponente di grande importanza. Un esempio sono le colate rapide che hanno interessato i villaggi di Giampileri e Briga nell'ottobre del 2009, attivatesi per la maggior parte in corrispondenza o a pochi metri dalla rottura di pendio (convessa) presente nella parte superiore del versante.

<b>CROLLI</b>		
<b>LITOLOGIE DISCRIMINANTI</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
Maa Marne argillose con intercalaz. di arenarie	5	4
Mac Conglomerati matrice sostenuti	5	8
Mar Alternanze arenarie, silt argillosi, argille marnose	5	1
Mc Calcare evaporitico, generalmente brecciato	5	6
Mg Gessi ed argille gessose	5	1
P Alternanze di marne e sabbie e calcareniti; lembi di argilla	5	3
PQ Calcareniti, subordinatamente sabbie	5	7
Qg Sabbie, ghiaie e conglomerati fluvio-deltizi	5	4
Qgi Conglomerati a clasti eterometrici	5	6
UA Meta-anfiboliti, meta-orneblenditi, meta-peridotiti in lenti intercalate a paragneiss	5	9
UAc Marmi, tessitura massiva, intercalati a paragneiss e micascisti	5	9
UAg Gneiss, paragneiss passanti a micascisti, con masse granodioritiche e filoni pegmatitici	5	9
UM Filladi in masse, passanti a metareniti; quarziti; metabasiti; porfiroidi	5	2
UMm Marmi grigio scuri, in grossi banchi, foliati	5	9

Tabella 1 - Parametro discriminante litologico per Crolli con relativo peso e indice di ciascuna classe

La curvatura è stata ricavata attraverso elaborazioni GIS del Modello Digitale del Terreno (DEM), da cui è stata successivamente realizzata la carta della curvatura longitudinale.

I Parametri Discriminanti ed i Fattori Predisponenti per le varie tipologie di fenomeno sono riassunti nelle seguenti tabelle, che riportano anche il peso complessivo assegnato a ciascuna componente e l'indice per ciascuna classe della componente. Ad esempio, per le frane da crollo il peso del Fattore Predisponente "Uso del Suolo" è 5 e quello della classe "323" (aree a vegetazione sclerofilla) è 6.

<b>CROLLI</b>		
<b>PENDENZA DISCRIMINANTE</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
26-29	5	1
30-32	5	2
33-35	5	3
36-37	5	4
38-39	5	5
40-42	5	6
43-46	5	7
47-49	5	8
50-90	5	9

Tabella 2 - Peso e indice di ciascuna classe di pendenza per i Crolli

<b>CROLLI</b>		
<b>CURVATURA VERSANTE</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
-38- -20	5	1
-19- -16	5	2
-15	5	3
-14- -12	5	4
-11	5	5
-10	5	5
-9	5	6
-8	5	6
-7	5	6
-6	5	6
-5	5	7
-4	5	8
-3	5	9
-2	5	9
-1	5	6

Tabella 3 - Peso e indice di ciascuna classe di curvatura longitudinale per i Crolli

<b>CROLLI</b>		
<b>TERRAZZAMENTO</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
non terrazzato	2	3
terrazzo abbandonato	2	7
terrazzo mantenuto	2	0

Tabella 4 - Peso e indice di ciascuna classe di terrazzamento per i Crolli

<b>CROLLI</b>		
<b>USO SUOLO</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
131 aree estrattive	5	7
211 seminativi in aree non irrigue	5	2
222 frutteti	5	3
223 oliveti	5	3
224 noceti	5	3
225 eucalitteti	5	2
242 sistemi colturali e particellari complessi	5	3
311 boschi di latifoglie	5	4
312 boschi di conifere	5	3
321 prati-pascoli naturali e praterie	5	5
322 brughiere e cespuglieti	5	6
323 aree a vegetazione sclerofilla	5	6
332 rocce nude, falesie, rupi, affioramenti	5	9

Tabella 5 - Peso e indice di ciascuna classe di uso suolo per i Crolli

<b>CROLLI</b>		
<b>DISTANZA FAGLIE (m.)</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
0	2	5
1	2	4
2-6	2	3
7-43	2	2
44 – 150	2	1

Tabella 6 - Peso e indice di ciascuna classe di distanza da faglie per i Crolli

<b>CROLLI</b>		
<b>DISTANZA VIABILITÀ (m.)</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
0	2	8
1	2	7
2-3	2	6
4-7	2	5
8-16	2	4
17-35	2	3
36-79	2	2
80-150	2	1

Tabella 7 - Peso e indice di ciascuna classe di distanza da viabilità per i Crolli

<b>CROLLI</b>		
<b>DISTANZA SCARPATE (m.)</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
0-1	5	8
2	5	6
3-4	5	5
5-7	5	4
8-17	5	3
18-59	5	2
60-150	5	1

Tabella 8 - Peso e indice di ciascuna classe di distanza da scarpate per i Crolli

<b>COLATE RAPIDE</b>		
<b>LITOLOGIA DISCRIMINANTE</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
Antr Antropizzato	5	2
Ar Alluvioni: limi, sabbie e ghiaie talora terrazzati	5	1
Det falda detritica, coltre eluvio-colluviale	5	1
Maa marne argillose con intercalaz. di arenarie	5	7
Mac Conglomerati matrice sostenuti	5	8
Mar Alternanze arenarie, silt argillosi, argille marnose	5	9
Mc Calcare evaporitico, generalmente brecciato	5	4
P Alternanze di marne e sabbie e calcareniti; lembi di argilla	5	1
Pi marne e calcari marnosi con intercalazione di lenti sabbiose	5	2
PQ Calcareniti, subordinatamente sabbie	5	3
Qg Sabbie, ghiaie e conglomerati fluvio-deltizi	5	2
Tf Terrazzi fluviali: ghiaie sabbie ciottolose e limi	5	2
Tm Terrazzi marini: sabbie talora ghiaiose, limi o cineriti	5	4
UA Meta-anfiboliti, meta-orneblenditi, meta-peridotiti in lenti intercalate a paragneiss	5	9
UAc Marmi, tessitura massiva, intercalati a paragneiss e micascisti	5	2
UAg Gneiss, paragneiss passanti a micascisti, con masse granodioritiche e filoni pegmatitici	5	9
UM Filladi in masse, passanti a metareniti; quarziti; metabasiti; porfiroidi	5	8
UMm Marmi grigio scuri, in grossi banchi, foliati	5	7

Tabella 9 - Parametro discriminante litologico per le Colate Rapide con relativo peso e indice di ciascuna classe

<b>COLATE RAPIDE</b>		
<b>PENDENZA DISCRIMINANTE</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
17-23	5	1
24-25	5	2
26-27	5	3
28-32	5	4
33-35	5	5
35	5	6
36	5	7
37	5	8
38-52	5	9
53-55	5	8
56-59	5	7
60-62	5	6
63-64	5	5
66-67	5	4
68-69	5	3
70-71	5	2
72-73	5	1

Tabella 10 - Parametro discriminante pendenza per le Colate Rapide con relativo peso e indice di ciascuna classe

<b>COLATE RAPIDE</b>		
<b>CURVATURA VERSANTE</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
-17- -11	5	1
-10- -8	5	3
-7- -6	5	4
-4	5	6
-3	5	7
-2	5	8
-1	5	9

Tabella 11 - Peso e indice di ciascuna classe di curvatura del versante longitudinale per le Colate Rapide

<b>COLATE RAPIDE</b>		
<b>USO SUOLO</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
211 seminativi in aree non irrigue	5	4
222 frutteti	5	5
223 oliveti	5	4
224 noceti	5	1
225 eucalitteti	5	2
242 sistemi colturali e particellari complessi	5	6
311 boschi di latifoglie	5	2
312 boschi di conifere	5	2
321 prati-pascoli naturali e praterie	5	6
322 brughiere e cespuglieti	5	9
323 aree a vegetazione sclerofilla	5	4
332 rocce nude, falesie, rupi, affioramenti	5	9

Tabella 12 - Peso e indice di ciascuna classe di uso suolo per le Colate Rapide

<b>COLATE RAPIDE</b>		
<b>TERRAZZAMENTO</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
non terrazzato	5	0
terrazzo abbandonato	5	9
terrazzo mantenuto	5	7

Tabella 13 - Peso e indice di ciascuna classe di terrazzamento per le Colate Rapide

<b>COLATE RAPIDE</b>		
<b>DISTANZA FAGLIE (m.)</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
0-2	2	9
3	2	7
4-5	2	6
6-7	2	5
8-12	2	4
13-23	2	3
24-63	2	2
64-150	2	1

Tabella 14 - Peso e indice di ciascuna classe di distanza da faglie per le Colate Rapide

<b>COLATE RAPIDE</b>		
<b>DISTANZA VIABILITÀ (m.)</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
0-1	5	9
2-3	5	8
4-5	5	7
6-9	5	6
10-15	5	5
16-27	5	4
28-48	5	3
49-83	5	2
84-145	5	1
146-150	5	0

Tabella 15 - Peso e indice di ciascuna classe di distanza da viabilità per le Colate Rapide

<b>COLATE RAPIDE</b>		
<b>DISTANZA SCARPATE (m.)</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
0-9	4	9
10-11	4	8
12-13	4	7
14-16	4	6
17-21	4	5
22-30	4	4
31-46	4	3
47-89	4	2
90-150	4	1

Tabella 16 - Peso e indice di ciascuna classe di distanza da scarpate per le Colate Rapide

<b>ROTAZIONALI</b>		
<b>LITOLOGIA DISCRIMINANTE</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
Det falda detritica, coltre eluvio-colluviale	5	1
Fra accumulo di frana	5	1
Maa Marne argillose con intercalaz. di arenarie	5	9
Mac Conglomerati matrice sostenuti	5	8
Mar Alternanze arenarie, silt argillosi, argille marnose	5	3
Mc Calcare evaporitico, generalmente brecciato	5	6
Mg Gessi ed argille gessose	5	8
P Alternanze di marne e sabbie e calcareniti; lembi di argilla	5	5
Pi Marne e calcari marnosi con intercalazione di lenti sabbiose	5	1
Qa Argille marnose, talora sabbiose, grigio azzurre	5	1
Qg Sabbie, ghiaie e conglomerati fluvio-deltizi	5	8
Tm Terrazzi marini: sabbie talora ghiaiose, limi o cineriti	5	2

Tabella 17 - Parametro discriminante litologico per gli Scorrimenti Rotazionali con relativo peso e indice di ciascuna classe

<b>ROTAZIONALI</b>		
<b>PENDENZA DISCRIMINANTE</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
6-7	5	1
8-11	5	2
12-14	5	3
15	5	5
16	5	6
17	5	7
18	5	8
19-30	5	9
31	5	6
32	5	8
33-35	5	9
36	5	7
37	5	6
38	5	5
39-40	5	4
41-42	5	3
43-51	5	2
52-54	5	1

Tabella 18 - Parametro discriminante pendenza per gli Scorrimenti Rotazionali con relativo peso e indice di ciascuna classe

<b>ROTAZIONALI</b>		
<b>CURVATURA VERSANTE</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
-11	1	1
-10	1	1
-9	1	1
-8	1	1
-7	1	2
-6	1	1
-5- -3	1	2
-2	1	4
-1-1	1	5
2	1	4
3	1	3
4	1	2
5-6	1	1
7	1	2
8-9	1	1

Tabella 19 - Peso e indice di ciascuna classe di curvatura longitudinale per gli Scorrimenti Rotazionali

<b>ROTAZIONALI</b>		
<b>TERRAZZAMENTO</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
non terrazzato	2	0
terrazzo abbandonato	2	6
terrazzo manotenuto	2	3

Tabella 20 - Peso e indice di ciascuna classe di terrazzamento per gli Scorrimenti Rotazionali

<b>ROTAZIONALI</b>		
<b>USO SUOLO</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
111 tessuto urbano continuo	3	2
112 tessuto urbano discontinuo	3	3
211 seminativi in aree non irrigue	3	5
212 seminativi irrigui	3	0
221 vigneti	3	1
222 frutteti	3	1
223 oliveti	3	5
225 eucalitteti	3	5
242 sistemi colturali e particellari complessi	3	5
311 boschi di latifoglie	3	1
312 boschi di conifere	3	1
321 prati-pascoli naturali e praterie	3	7
322 brughiere e cespuglieti	3	3
323 aree a vegetazione sclerofilla	3	1
332 rocce nude, falesie, rupi, affioramenti	3	4

Tabella 21 - Peso e indice di ciascuna classe di uso suolo per gli Scorrimenti Rotazionali

<b>ROTAZIONALI</b>		
<b>DISTANZA FAGLIE (m.)</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
0-3	1	3
4-101	1	2
102-150	1	1

Tabella 22 - Peso e indice di ciascuna classe di distanza da faglie per gli Scorrimenti Rotazionali

<b>ROTAZIONALI</b>		
<b>DISTANZA VIABILITÀ (m.)</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
0	2	7
1	2	6
2-5	2	5
4-8	2	4
9-18	2	3
19-43	2	2
44-99	2	1
100-150	2	0

Tabella 23 - Peso e indice di ciascuna classe di distanza da viabilità per gli Scorrimenti Rotazionali

<b>ROTAZIONALI</b>		
<b>DISTANZA SCARPATE (m.)</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
0-1	2	6
2	2	5
3-5	2	4
6-14	2	3
15-66	2	2
67-150	2	1

Tabella 24 - Peso e indice di ciascuna classe di distanza da scarpate per gli Scorrimenti Rotazionali

<b>TRASLAZIONALI</b>		
<b>LITOLOGIA DISCRIMINANTE</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
Mac Conglomerati matrice sostenuti	5	6
Mar Alternanze arenarie, silt argillosi, argille marnose	5	8
P Alternanze di marne e sabbie e calcareniti; lembi di argilla	5	3
PQ Calcareniti, subordinatamente sabbie	5	2
Tm Terrazzi marini: sabbie talora ghiaiose, limi o cineriti	5	1
UA Meta-anfiboliti, meta-orneblenditi, meta-peridotiti in lenti intercalate a paragneiss	5	9
UAc Marmi, tessitura massiva, intercalati a paragneiss e micascisti	5	4
UAg Gneiss, paragneiss passanti a micascisti, con masse granodioritiche	5	7
UMm Marmi grigio scuri, in grossi banchi, foliati	5	8

Tabella 25 - Parametro discriminante litologico per gli Scorrimenti Traslazionali con relativo peso e indice di ciascuna classe

<b>TRASLAZIONALI</b>		
<b>PENDENZA DISCRIMINANTE</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
21-22	5	1
23-27	5	2
28-31	5	3
32-33	5	4
34	5	5
35	5	9
36-37	5	7
38	5	9
39	5	7
40	5	5
41	5	3
42	5	5
43	5	7
44-47	5	3
48-49	5	2
50-60	5	1

Tabella 26 - Parametro discriminante pendenza per gli Scorrimenti Traslazionali con relativo peso e indice di ciascuna classe

<b>TRASLAZIONALI</b>		
<b>CURVATURA VERSANTE</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
-7	1	1
-6	1	1
-5	1	2
-4	1	2
-3	1	2
-2	1	4
-1	1	4
1	1	3
2	1	4

Tabella 27 - Peso e indice di ciascuna classe di curvatura longitudinale per gli Scorrimenti Traslazionali

<b>TRASLAZIONALI</b>		
<b>USO SUOLO</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
111 tessuto urbano continuo	3	2
112 tessuto urbano discontinuo	3	3
131 aree estrattive	3	2
211 seminativi in aree non irrigue	3	3
221 vigneti	3	1
222 frutteti	3	1
311 boschi di latifoglie	3	1
321 prati-pascoli naturali e praterie	3	6
322 brughiere e cespuglieti	3	5
323 aree a vegetazione sclerofilla	3	5
332 rocce nude, falesie, rupi, affioramenti	3	5

Tabella 28 - Peso e indice di ciascuna classe di uso suolo per gli Scorrimenti Traslazionali

<b>TRASLAZIONALI</b>		
<b>TERRAZZAMENTO</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
non terrazzato	2	0
terrazzo abbandonato	2	3
terrazzo manotenuto	2	1

Tabella 29 - Peso e indice di ciascuna classe di terrazzamento per gli Scorrimenti Traslazionali

<b>TRASLAZIONALI</b>		
<b>DISTANZA FAGLIE (m.)</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
0-150	1	0

Tabella 30 - Peso e indice di ciascuna classe di distanza da faglie per gli Scorrimenti Traslazionali

<b>TRASLAZIONALI</b>		
<b>DISTANZA VIABILITÀ (m.)</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
0-150	1	0

Tabella 31 - Peso e indice di ciascuna classe di distanza da viabilità per gli Scorrimenti Traslazionali

<b>TRASLAZIONALI</b>		
<b>DISTANZA SCARPATE (m.)</b>	<b>Peso</b>	<b>Indice</b>
0-150	1	0

Tabella 32 - Peso e indice di ciascuna classe di distanza da scarpate per gli Scorrimenti Traslazionali

### 7.3 Suscettibilità

Dopo l'indicizzazione delle distinte classi dei vari fattori predisponenti, è stata eseguita la sovrapposizione in ambiente GIS degli strati informativi relativi a ciascun parametro. Questa integrazione ha prodotto lo strato informativo di sintesi che identifica quelle porzioni di territorio caratterizzate dalla particolare combinazione di fattori, denominate Unità Territoriali Omogenee per fattori Predisponenti (UTO). La semplice elaborazione GIS (*overlay*) dei due strati informativi principali, UTLM (contenente le informazioni sui parametri discriminanti) e UTO (contenente le informazioni sui fattori predisponenti), conduce all'individuazione, all'interno

delle UTLM stesse, di aree soggette a diverse condizioni di suscettibilità all'innescò di ogni singola classe di fenomeno franoso. Per valutare il grado di suscettibilità di ciascuno di questi settori si applica la seguente Funzione di Suscettibilità:

$$S = (I_{lit} \times I_{pend}) \times \frac{\sum_n (i_n \times P_n)}{\sum_n P_n}$$

dove:

- S : Indice di Suscettibilità
- $I_{lit}$  : indice del Parametro Discriminante litologia
- $I_{pend}$ : indice del Parametro Discriminante pendenza
- $i_n$  : indice della classe del Fattore Predisponente n-simo
- $P_n$  : peso del fattore predisponente n-simo

Al termine di questo procedimento le elaborazioni finali rappresentano la suscettibilità all'innescò di ogni singola tipologia di fenomeno franoso, espresse dall'Indice di Suscettibilità (S), come numero intero compreso fra 0 (Suscettibilità nulla) e 9 (Suscettibilità massima). Successivamente, per semplificare la rappresentazione e renderla coerente con la pianificazione di Bacino espressa dal Piano di Assetto Idrogeologico (PAI), questi valori di suscettibilità S sono stati riclassificati in 5 gradi (Tab. 33) rispecchianti Classi di Suscettibilità crescente, da nulla a molto elevata.

S	CLASSE DI SUSCETTIBILITÀ
0	Nulla
1-4	Bassa
5	Media
6-7	Elevata
8-9	Molto Elevata

Tabella 33 - Suddivisione della suscettibilità adottata distinta in 5 livelli

Alla fine di tale processo, sono state redatte carte della suscettibilità per ciascuna tipologia di fenomeno franoso presente nel territorio comunale. Per quanto riguarda i fenomeni da colata rapida, oltre l'approccio euristico, al fine di standardizzare e rendere oggettiva tutta la procedura, è stata elaborata una carta di suscettibilità con un approccio secondo regressione logistica i cui risultati preliminari richiedono ulteriore verifica. Di seguito viene riportato quanto emerge dalle carte di suscettibilità all'innescò eseguite secondo il metodo sopra descritto.

### 7.3.1 Suscettibilità ai crolli

La suscettibilità ai crolli (fig. 1) è generalmente media per tutto il territorio montuoso e collinare del comune ma mostra un incremento sino a molto elevata in corrispondenza delle aree maggiormente acclivi (pendenze > 40° misurate su lo *slope* derivato dal DEM) e affioramenti di rocce fragili (UMm, UAg, UAc e UA) fortemente tettonizzate e in corrispondenza di salti morfologici naturali o antropici (come tagli stradali). Tali condizioni sono maggiormente presenti nelle porzioni Sud e Nord-Ovest del territorio comunale e in tutti quei settori a coste alte. Poiché l'area di alimentazione di tali fenomeni può essere di neoformazione, interessando porzioni di versante mai interessate nel recente passato da fenomeni analoghi, appare necessario, prima di una qualsiasi utilizzazione del territorio, eseguire studi di dettaglio al fine di valutare la sussistenza delle condizioni indicate nelle tabelle da 1 a 8 e quantificare la loro influenza sulla stabilità dei versanti.

### **7.3.2 Suscettibilità alle colate rapide**

Risulta la tipologia di fenomeno più gravosa in termini di suscettibilità, pericolosità e rischio del territorio comunale (fig. 2). Le aree più soggette a tali tipologie di fenomeni sono quelle con litologia del substrato costituita da Mar, Mac, UA UAg, con pendenze (misurato dallo *slope* derivato dal DEM) comprese tra 33° e 64° con vegetazione naturale o rocce nude, con curvature longitudinalmente maggiormente convesse, con terrazzi soprattutto non mantenuti e con vicinanza da linee tettoniche e da rotture di versante naturali e antropiche. Molte sono le aree a suscettibilità elevata e molto elevata che presentano tali caratteristiche e sono concentrate soprattutto nelle parte centrale e meridionale del territorio comunale, già colpite dagli eventi del 2007, 2009 e 2010, e nella parte settentrionale colpita nel 2011 nei comuni del versante tirrenico confinanti con quello di Messina. È necessario sottolineare, analogamente a quanto fatto per i crolli, che questi fenomeni si esplicano secondo meccanismi neofornativi. Ciò significa che le aree di innesco si sviluppano nella maggior parte dei casi in aree non colpite dalla stessa tipologia di fenomeni nel recente passato. È quindi doveroso, prima di una qualsiasi utilizzazione del territorio, eseguire studi di dettaglio al fine di valutare la sussistenza delle condizioni indicate nelle tabelle da 9 a 16 e quantificare la loro influenza sulla stabilità dei versanti.

### **7.3.3 Suscettibilità agli scorrimenti rotazionali**

Il Comune di Messina presenta molte aree con suscettibilità alta e molto alta per tale tipologia di fenomeno (fig. 3). In particolare, tutte le aree collinari interne o delle colline e terrazzi prospicienti il mare sono particolarmente suscettibili. Le aree più soggette a tali tipologie di fenomeni sono quelle con litologia affiorante costituita da Maa Mac Mg Qg, con pendenze (misurato dallo *slope* derivato dal DEM) comprese tra 16° e 37° ma con particolare rilevanza per quelle degli intervalli 19-30 e 33-35, con assenza di curvatura longitudinale versante, con prati-pascoli naturali e praterie e nei pressi della viabilità. Appare quindi necessario, prima di una qualsiasi utilizzazione del territorio, eseguire studi di dettaglio al fine di valutare la sussistenza delle condizioni indicate nelle tabelle da 17 a 24, quantificare la loro influenza sulla stabilità dei versanti e predisporre sistemi di monitoraggio per valutare l'evoluzione temporale e spaziale dei fenomeni che generalmente sono di riattivazione.

### **7.3.4 Suscettibilità agli scorrimenti traslazionali**

Molto meno grave appare la situazione connessa agli scorrimenti traslazionali in termini percentuale di territorio suscettibile e molto suscettibile (fig. 4). È però da sottolineare come tali fenomeni possono risultare distruttivi con l'incremento del movimento parossistico. Ciò dipende dalla profondità, dalla pendenza della superficie di rottura e dal rapporto angolare di questa con la superficie topografica. Le aree più soggette a tali tipologie di fenomeni sono quelle con litologia affiorante costituita da UA, UAg e UMm, con pendenze (misurato dallo *slope* derivato dal DEM) comprese tra 35° e 39° ma con particolare importanza per le pendenze di 35° e 38°, con curvatura longitudinale versante convessi e con vegetazione naturale e rocce nude. Anche per questi fenomeni occorre, prima di una qualsiasi utilizzazione del territorio, eseguire studi di dettaglio al fine di valutare la sussistenza delle condizioni indicate nelle tabelle da 25 a 32, di quantificare la loro influenza sulla stabilità dei versanti e di predisporre sistemi di monitoraggio per valutare l'evoluzione temporale e spaziale dei fenomeni che generalmente sono di riattivazione.

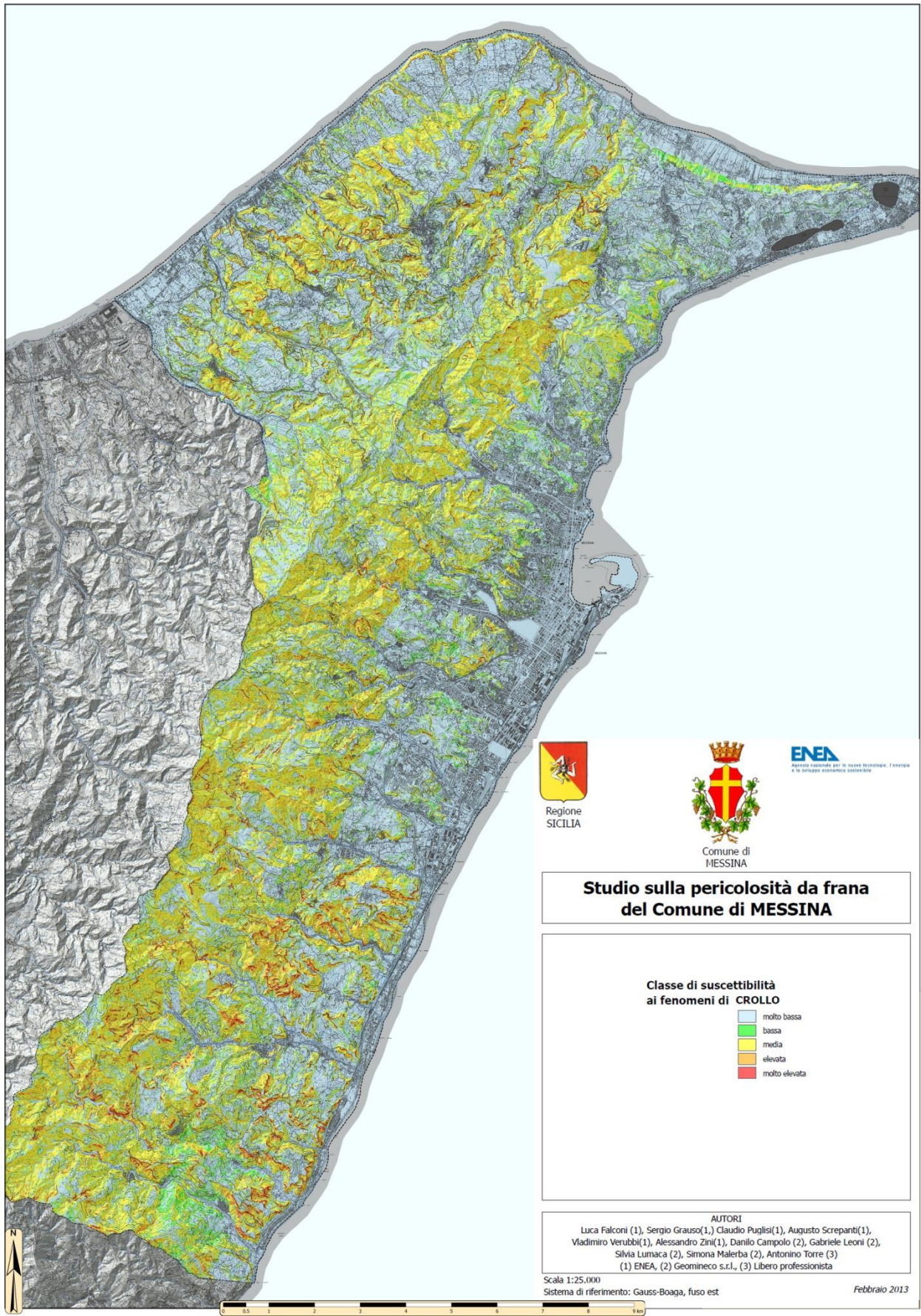


Figura 1 – Carta della suscettibilità ai crolli del territorio comunale di Messina

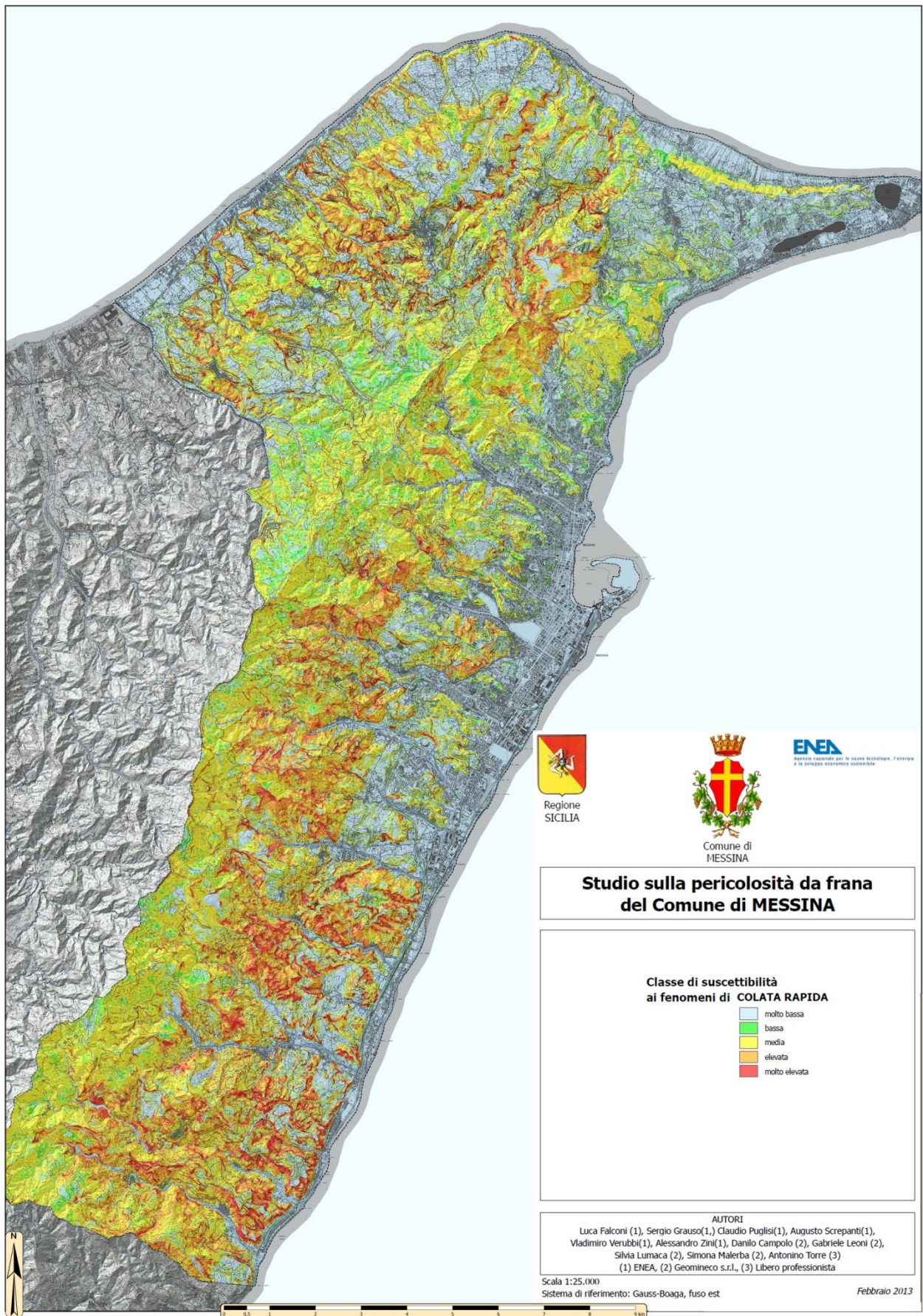


Figura 2 - Carta della suscettibilità alle colate rapide del territorio comunale di Messina

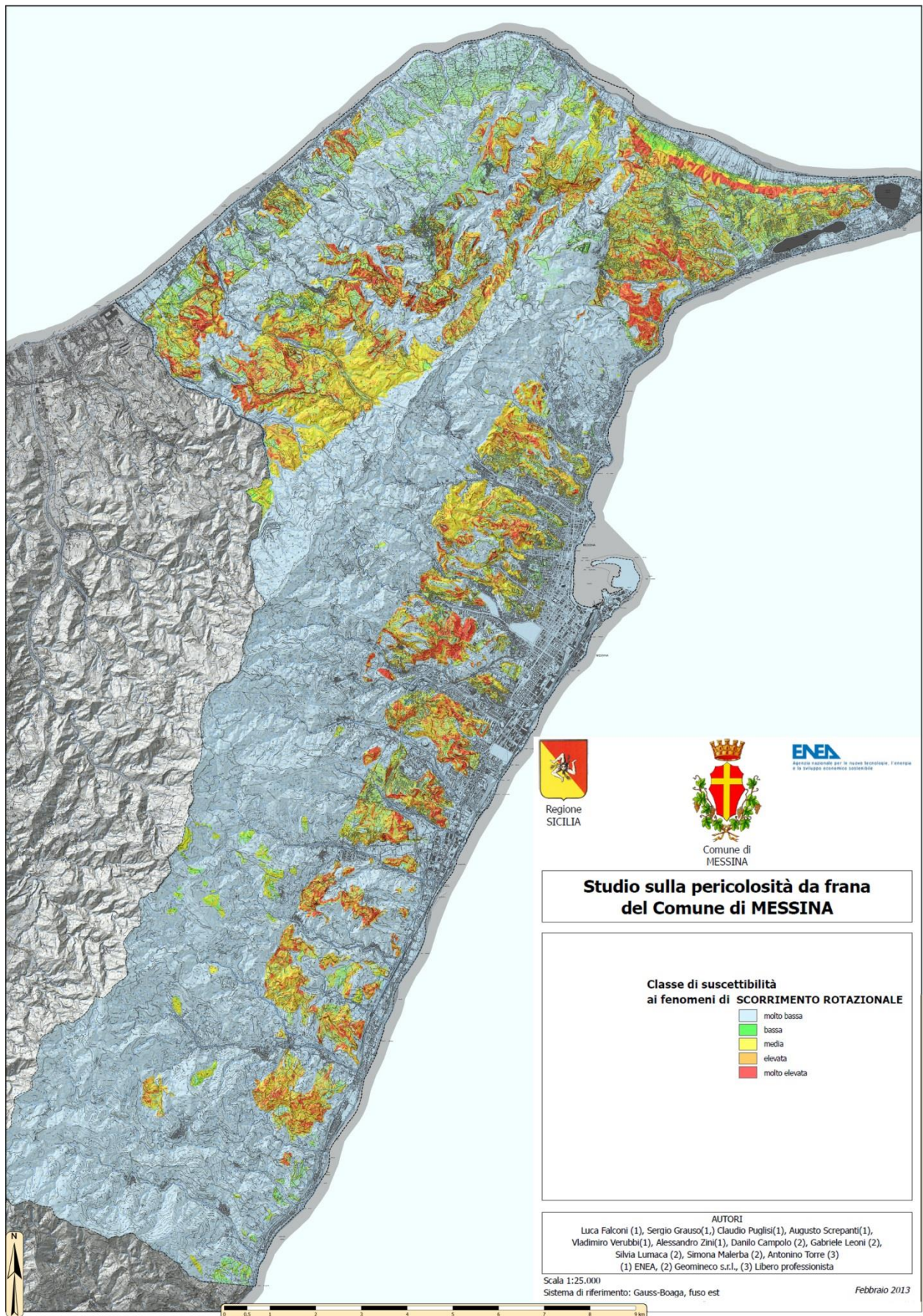


Figura 3 - Carta della suscettibilità agli scorrimenti rotazionali del territorio comunale di Messina

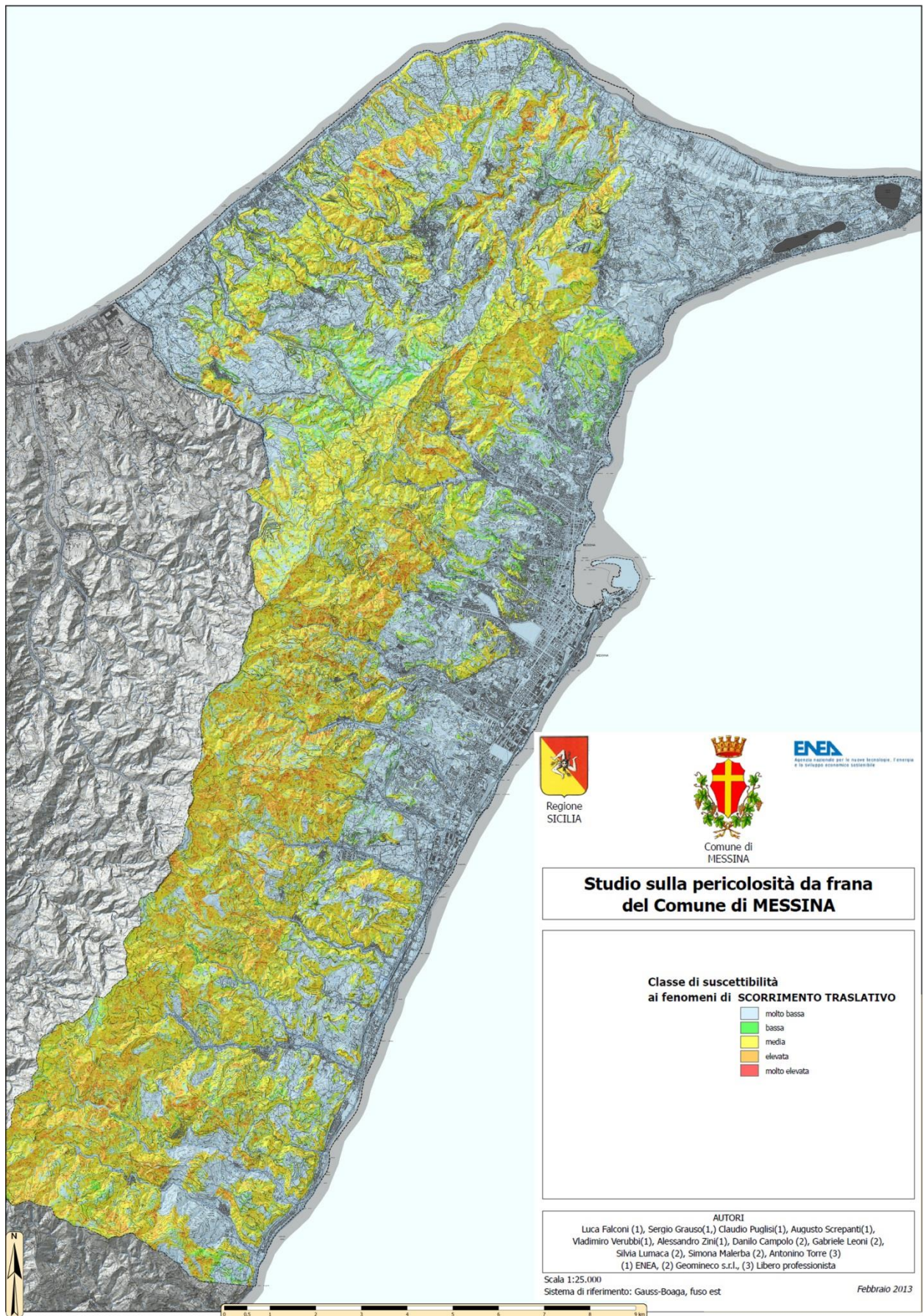


Figura 4 - Carta della suscettibilità agli scorrimenti traslativi del territorio comunale di Messina

## 7.4 Bibliografia

- Abbattista F., D'Agostino G., Delmonaco G., Di Filippo L., Falconi L., Leoni G., Margottini C., Puglisi C., Romano P., Spizzichino D. (2005). La valutazione della suscettibilità da frana: applicazione alle colate rapide di Cervinara (AV). *Geologia tecnica & ambientale*, n°1/2005, 25-40. Roma. ISSN 1722-0025
- Aleotti, P., Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58: 21-44.
- Amadesi, E., Vianello, G. (1978) Nuova guida alla realizzazione di una carta di stabilità dei versanti. *Memorie Società Geologica Italiana*, 19: 53-60
- Budetta P., Santo A., Vivenzio F. (2008). Landslide hazard mapping along the coastline of the Cilento region (Italy) by means of a GIS-based parameter rating approach. *Geomorphology* 94 (2008) 340–352
- Carrara A., Guzzetti F., Cardinali M. and Reichenbach P. (1999). Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard. *Natural Hazards* 20: 117–135, 1999
- Casagli N., Catani F., Puglisi C., Delmonaco G., Ermini L., Margottini C. (2004). An Inventory-Based Approach to Landslide Susceptibility Assessment and its Application to the Virginio River Basin, Italy. *Environmental & Engineering Geoscience*, X (3)
- Castellanos Abella E. A., Van Westen C. J. (2008). Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: a case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba. *Geomorphology* 94 (2008) 453–466
- Conforti M., Robustelli G., Muto F., Critelli S. (2011). Application and validation of bivariate GIS-based landslide susceptibility assessment for the Vittravo river catchment (Calabria, south Italy). *Natural Hazards* DOI 10.1007/s11069-011-9781-0
- Crosta G. B. and Frattini P. (2003). Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall. *Natural Hazards and Earth System Sciences* (2003) 3: 81–93
- D'Amato Avanzi G., Falaschi F., Giannecchini R., Puccinelli A. (2009). Soil slip susceptibility assessment using mechanical–hydrological approach and GIS techniques: an application in the Apuan Alps (Italy). *Nat Hazards* (2009) 50:591–603
- De Guidi G., Scudero S. (2013). Landslide susceptibility assessment in the Peloritani Mts. (Sicily, Italy) and clues for tectonic control of relief processes. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 949–963, 2013
- Delmonaco G., Leoni G., Margottini C., Puglisi C. & Spizzichino D. (2003). Large scale debris-flow assessment: a geotechnical approach and GIS modeling. *Natural Hazards and Earth System Science*, (2003)3, 443-455.
- Di Crescenzo G., De Falco M., Iervolino V.E., Rinaldi S., Santangelo N. & Santo A. (2008) - Proposta di un nuovo metodo semiquantitativo per la valutazione della suscettibilità all'innescio di colate rapide di fango nei contesti carbonatici della Campania. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 1 (2008), 61-79.
- Dietrich, W. E. and Sitar, N. (1997). Geoscience and geotechnical engineering aspects of debris-flow hazard assessment, in *Debris flow hazard mitigation: mechanics, prediction, and assessment*, in C. Chen (edt), American Society of Civil Engineers, p. 656-676.
- Dietrich W. E., McKean J., Bellugi D. and Perron T. (2007). The prediction of shallow landslide location and size using a multidimensional landslide analysis in a digital terrain model, in C. L. Chen and J.J. Major (editors), *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment: Proceedings 4th International DFHM Conference*, Chengdu, China, September 10-13, 2007, Millpress, Amsterdam, The Netherlands, 12p..
- 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 (2002) 277– 289

- Ermini L., Catani F., Casagli N. (2005). Artificial Neural Networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology* 66 (2005) 327–343
- Falconi L., Campolo D., Leoni G., Lumaca S., Puglisi C. (2011). Geomorphology hazard assessment of Giampileri and Briga river basins after the rainfall event on the October 1, 2009. *Proceedings of the Second World Landslide Forum – 3-7 October 2011, Rome*
- 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 (2008) 99–111
- Floris M., Iafelice M., Squarzone C., Zorzi L., De Agostini A., and Genevois R. (2011). Using online databases for landslide susceptibility assessment: an example from the Veneto Region (northeastern Italy). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 1915–1925, 2011
- Günther, A., van den Eeckhaut, M., Malet, J.P., Reichenbach, P., Hervás, J. (2013a). The European landslide susceptibility map ELSUS 1000 Version 1. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 15, EGU2013-10071.
- Günther, A., Reichenbach, P., Malet, J.P., van den Eeckhaut, M., Hervás, J., Dashwood, C., Guzzetti, F. (2013b). Tier-based approaches for landslide susceptibility assessment in Europe. *Landslides*, DOI: 10.1007/s10346-012-0349-1.
- 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 (1–4), 181–216.
- Guzzetti F. (2004) - Landslide Mapping, Hazard Assessment and Risk Evaluation: Limits and Potential. *Proceedings International Symposium on Landslide and Debris Flow Hazard Assessment, National Center for Research on Earthquake Engineering, Taipei, 7-8 October 2004, C1-C17*
- Lee S., Pradhan B. (2007). Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides* (2007) 4:33–41
- Leoni G., Barchiesi F., Catallo F., Dramis F., Fubelli G., Lucifora S., Mattei M., Pezzo G. & Puglisi C. (2009). GIS methodology to assess landslide susceptibility: application to a river catchment of Central Italy. *Journal of Maps*, v2009, 87-93. 10.4113/jom.2009.1041
- Montgomery e Dietrich (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water resources research*, vol. 30, no. 4, pages 1153-1171, April 1994.
- Nigro F., Pisciotta A., Perricone M., Favara R., Renda P., Cusimano G., Torre F. (2011). Stima della pericolosità potenziale al dissesto idrogeologico nella provincia di Messina: valutazione preliminare. *Geologi di Sicilia - Bollettino dell'Ordine Regionale dei Geologi di Sicilia*, Anno XIX, n. 3, Settembre-Dicembre 2011, pagg. 28-46
- Puglisi C., Campolo D., Falconi L., Leoni G., Lumaca S. (2011a). Landslide hazard assessment project in the Messina municipality area (Sicily, Italy). *Proceedings of the Second World Landslide Forum – 3-7 October 2011, Rome*
- Puglisi C., Falconi L., Lentini A., Leoni G., Ramirez Prada C. (2011b). Debris flow risk assessment in the Aguas Calientes village (Cusco, Perú). *Proceedings of the Second World Landslide Forum – 3-7 October 2011, Rome*
- Ruff M., Czurda K. (2008). Landslide susceptibility analysis with a heuristic approach in the Eastern Alps (Vorarlberg, Austria). *Geomorphology* 94 (2008) 314–324
- van Westen C.J., Castellanos E., Sekhar K.L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview. *Engineering Geology* 102 (2008) 112–131
- van Westen C.J., (1994) - GIS in landslide hazard zonation: a review with examples from the Colombian Andes. In: Price, M.F. and Heywood, D.I. (eds.), Taylor and Francis, London, 135-165.

## 8. ERODIBILITA' DEL SUOLO E COLATE RAPIDE DI FANGO E DETRITO

Il suolo costituisce la matrice che regola i flussi idrici superficiali e sotterranei e fa da supporto alla vegetazione naturale ed alle attività agricole. L'erosione del suolo costituisce un problema strettamente connesso alle dinamiche di stabilità dei versanti oltre che a quelle della vegetazione e della produttività agricola, soprattutto in relazione alle ricorrenti crisi meteorologiche dovute all'aumento tendenziale, negli ultimi anni, dei periodi di siccità e dell'incidenza di eventi piovosi di forte intensità con effetti erosivi e conseguente squilibrio dei versanti.

Per quanto riguarda le precipitazioni, così come descritto nell'Atlante Climatologico della Sicilia, la provincia di Messina risulta essere la più piovosa dell'Isola, con una media di circa 808 mm, contro un valore medio regionale di 633 mm. Questa peculiarità viene ricondotta al notevole sviluppo delle catene montuose sul territorio provinciale, in cui le precipitazioni orografiche giocano un ruolo sicuramente predominante. A scala provinciale, vengono distinte cinque sub-aree, caratterizzate da differenti regimi pluviometrici annuali: le isole minori, i Nebrodi occidentali, i Nebrodi centro-orientali, il versante tirrenico ed il versante ionico dei Peloritani. In queste ultime è compreso il territorio del Comune di Messina. Il versante tirrenico dei Peloritani è caratterizzato da precipitazioni medie annue di circa 770 mm. Il versante ionico, presenta invece valori medi annui di 880 mm, risultando in assoluto la zona più piovosa della regione, accanto ad alcune aree del versante orientale dell'Etna, con precipitazioni molto abbondanti anche a quote basse. Dal punto di vista climatico, l'area può essere classificata come temperato-calda, in base all'indice di De Martonne, o asciutta-subumida, in base all'indice di Thornthwaite.

Riguardo alla distribuzione delle intensità delle piogge, per cui si verificano precipitazioni temporalesche intense e abbondanti che danno luogo a notevoli eccedenze, lo stesso Atlante Climatologico evidenzia che tali precipitazioni, se non adeguatamente regimate con opportuni interventi di difesa idrogeologica, possono portare a gravi fenomeni di dissesto e degrado dei suoli (erosione, frane, ecc.) pur essendo la percentuale di aree dissestate relativamente bassa (intorno al 17%), in ambito provinciale.

Adeguate misure di conservazione del suolo dovranno quindi essere messe in atto, mediante la scelta degli interventi agro-ingegneristici più efficaci e/o degli ordinamenti colturali più adatti. La capacità di previsione quantitativa della perdita di suolo nonché l'individuazione delle aree maggiormente vulnerabili, sono elementi fondamentali all'individuazione ed attivazione di tali misure.

Nel caso specifico del territorio oggetto dello studio, interessato da fenomeni di mobilitazione del materiale detritico dai versanti con modalità di colate rapide, si è ritenuto interessante verificare l'eventuale correlazione tra l'ubicazione delle aree di innesco di tali fenomeni e le caratteristiche di erodibilità dei materiali geo-pedologici di copertura dei versanti. Tale verifica potrà suggerire di implementare un modello di previsione di tali fenomeni, che inglobi anche una componente di modellazione dell'erodibilità dei materiali interessati.

L'analisi, ad integrazione dello studio riguardante la stabilità dei versanti ed i fenomeni franosi a rapida evoluzione del territorio del Comune di Messina, consiste nell'applicazione, a scala del territorio comunale, del modello empirico-parametrico RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*), già applicato dall'ENEA in Sicilia, a scala di bacino idrografico e dell'intero territorio regionale, ai fini della valutazione del rischio di erosione del suolo, in termini di perdita reale e potenziale media annua (Mg/ha/anno) sul medio-lungo periodo.

## 8.1 Calcolo dell'indice di erosione

### 8.1.1 Descrizione della metodologia

Il modello di seguito descritto nasce come *Universal Soil Loss Equation* - USLE (Wischmeier & Smith, 1978), a partire dagli anni '30-'40 del secolo scorso, nell'ambito di un progetto del Dipartimento per l'Agricoltura degli Stati Uniti (U.S.D.A.) finalizzato alla previsione dell'erosione del suolo a scala di singolo appezzamento e con l'intento di fornire ai coltivatori indicazioni dirette sulle pratiche gestionali più idonee. Data la sua natura di modello empirico, esso è in continua evoluzione, man mano che vengono acquisiti nuovi e più completi dati provenienti dalle osservazioni. Esso è stato largamente utilizzato negli ultimi decenni in tutto il mondo, grazie soprattutto alla sua semplicità concettuale e facile applicabilità.

Il modello esprime la perdita di suolo (A), in tonnellate (Mg) per ettaro per anno, come prodotto di due gruppi di fattori che costituiscono, rispettivamente, i fattori naturali che predispongono il suolo ai processi erosivi e quelli legati all'azione antropica. Tale prodotto è espresso mediante la nota formula:

$$A = (R \times K \times LS) \times (C \times P)$$

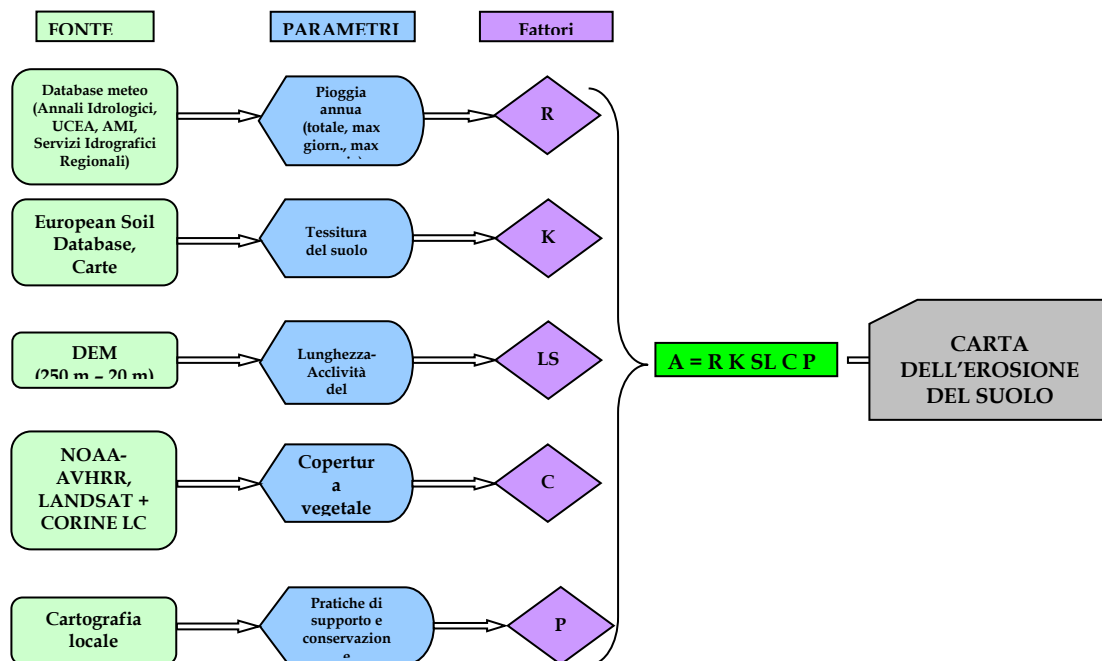
in cui il primo gruppo tra parentesi rappresenta il prodotto tra l'erosività della pioggia R (espressa in MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup>), l'erodibilità del suolo K (espressa in Mg h MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>) e la morfologia del terreno LS data dal prodotto combinato di lunghezza ed acclività del versante (adimensionale); mentre il secondo gruppo rappresenta l'influenza antropica sui fattori naturali, espressa dalla tipologia delle colture C e delle tecniche di conservazione e protezione del suolo P, entrambi fattori adimensionali. In particolare, il fattore R rappresenta la forza erosiva del singolo evento di pioggia, misurata dal prodotto dell'energia cinetica dell'evento di pioggia E per la sua massima intensità (altezza di pioggia nell'unità di tempo) nell'intervallo di 30 minuti (I30). Piogge di altezza inferiori ai 13 mm non sono considerate erosive. R rappresenta la media dei valori EI30 su un periodo sufficientemente lungo (almeno 20 anni). Il fattore K rappresenta la suscettibilità del suolo all'erosione ossia il grado di mobilizzazione delle particelle di suolo dovuta all'impatto delle gocce di pioggia ed al ruscellamento. La resistenza offerta dal suolo all'erosione è strettamente legata a due principali proprietà: il grado di coesione tra le singole particelle di suolo (quindi la presenza di argilla) e le dimensioni delle particelle (ossia la resistenza alla trazione, legata al peso, e la porosità). Suoli con elevato contenuto di argilla presentano bassi valori di K (tra 0.006 e 0.020 Mg h MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>) dovuti alla maggior resistenza al distacco delle particelle di argilla, altamente coesive. Suoli con tessitura più grossolana (es. suoli sabbiosi) presentano ugualmente bassi valori di K (tra 0.006 e 0.026 Mg h MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>), nonostante la minor coesione delle particelle, a causa del basso ruscellamento determinato dalla più alta permeabilità. Suoli a tessitura media (es. suoli franco-limosi) presentano valori moderati di K (tra 0.032 e 0.052 Mg h MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>), essendo contenuti sia la suscettibilità al distacco sia il ruscellamento. Suoli con elevato contenuto di limo presentano il più alto valore di erodibilità, data la maggior facilità al distacco e la tendenza a formare croste superficiali che riducono fortemente l'infiltrazione e favoriscono il ruscellamento. I valori del fattore K di questi tipi di suoli sono generalmente superiori a 0.052 Mg h MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>.

Nella forma originaria del modello, i fattori prima descritti venivano quantificati necessariamente mediante la raccolta dei dati direttamente sul terreno. Nel corso dei decenni, il modello è stato ulteriormente affinato, per giungere alla attuale forma *revised*, da cui l'acronimo RUSLE (Renard et al., 1991; 1994; 1997), nella quale è possibile pervenire ai dati quantitativi in modo indiretto, mediante formule di correlazione ed algoritmi di calcolo che utilizzano dati di facile acquisizione, generalmente disponibili sotto forma di cartografia digitale o di *database* alfanumerici.

Lo sviluppo e la diffusione delle tecnologie di geo-informazione (GIS, *remote sensing* e *image processing*) hanno infatti introdotto la possibilità di determinare i parametri della RUSLE in maniera semi-automatica, avvalendosi degli strumenti e delle tecniche avanzate di acquisizione, elaborazione ed integrazione dei dati geo-spaziali. In particolare, grazie alla messa a punto di tecniche di spazializzazione delle variabili puntuali, come il *kriging*, è possibile estrapolare e distribuire nello spazio i valori di erosività della pioggia a partire dai dati relativi alle singole stazioni pluviometriche ubicate nell'area di interesse, determinando così i valori del fattore R anche in aree prive di informazione.

Altrettanto è possibile fare con i dati pedologici relativi a singoli punti di campionamento, per quanto riguarda l'erosibilità dei suoli, riuscendo, anche in questo caso, ad attribuire il fattore K ad aree in cui il dato diretto non è disponibile. In alternativa, il valore del fattore K può essere attribuito sulla base delle classi ed associazioni pedologiche ove sia disponibile la relativa cartografia. Inoltre, sono stati sviluppati specifici metodi ed algoritmi per il calcolo del fattore LS sulla base di modelli digitali di elevazione, risolvendo il problema della misura della lunghezza e pendenza dei versanti su aree vaste (Hickey et al, 1994; Hickey, 2000; Van Remortel et al, 2001, 2004).

Per quanto riguarda il fattore C, sono state messe a punto formule di correlazione che utilizzano, ad esempio, l'indice NDVI *Normalised Difference Vegetation Index* (Rouse et al., 1973) derivabile dall'elaborazione delle immagini satellitari (van der Knijff et al., 2002). In alternativa, ove possibile, il fattore C può essere attribuito alle diverse classi di uso del suolo sulla base dei valori medi annui valutati per i diversi tipi di colture secondo la procedura originale della USLE. In tal modo, è possibile applicare il modello a scala di bacino o regione, ed operare delle classificazioni per la visualizzazione dei risultati su base geografica, stagionale e multi-temporale. Nello schema è visualizzata l'articolazione del modello, i parametri utilizzabili per il calcolo dei singoli fattori in forma semplificata e le possibili fonti dei dati:



Come successivo sviluppo applicativo, lo stesso modello si presta a possibili previsioni, riguardo alle variazioni nell'intensità del processo erosivo nel prossimo futuro, previa analisi dell'andamento tendenziale dei dati termo-pluviometrici storici, dei tempi di ritorno degli eventi estremi ed in base alle proiezioni fornite dagli scenari climatici costruiti mediante modelli di circolazione globale, opportunamente adattati alla scala locale, per i prossimi 10-50-100 anni.

### 8.1.2 Carta dell'erosione del Comune di Messina

In prima applicazione, la carta dell'erosione relativa al territorio del Comune di Messina è stata realizzata utilizzando dati di letteratura. I singoli fattori contenuti nel modello sono stati determinati utilizzando cartografia e *database* pluviometrici, pedologici, di uso del suolo e del modello digitale di elevazione riguardanti il territorio regionale siciliano. In tale fase, Il fattore P relativo alle tecniche di conservazione è stato trascurato. Sono state quindi elaborate preliminarmente le singole mappe *raster* relative ai fattori R, K, LS e C, a copertura del territorio comunale. In particolare, lo strato relativo all'erosività della pioggia R è stato prodotto a partire dalla mappa dell'erosività della Sicilia, elaborata in uno studio precedente (Grauso et al., 2009), a sua volta basata sull'elaborazione di dati pluviometrici relativi a 116 stazioni sparse nella regione (fig. 1).

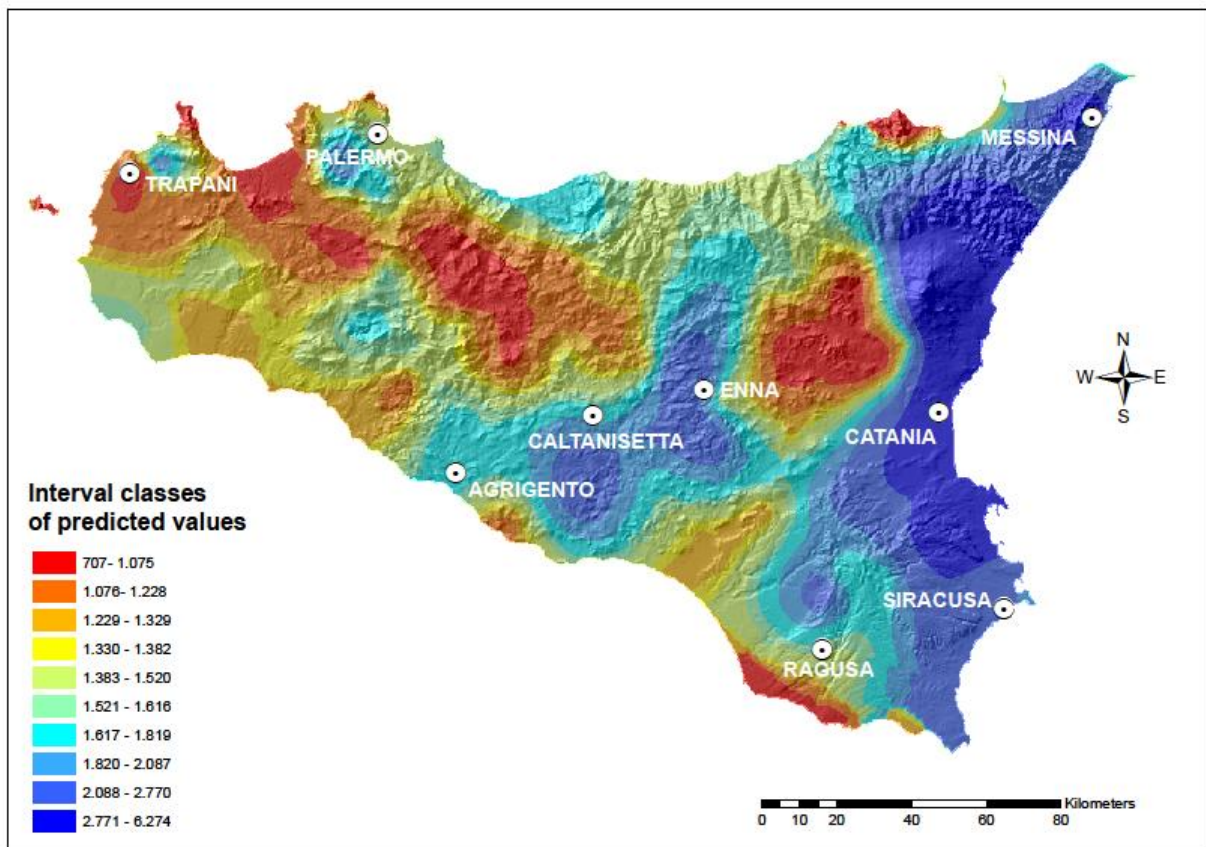


Figura 1 – Carta dell'erosività della pioggia della Sicilia (da Grauso et al., 2009)

Il valore di R attribuito ad ogni stazione è quello medio annuo calcolato sul periodo di osservazione:

$$R = \frac{1}{N} \sum_{1}^N EI_{30\text{-annual}}$$

dove N è il numero di anni in cui sono state effettuate le misure.

I valori annui di R sono stati calcolati per ciascuna delle stazioni mediante la formula di correlazione:

$$EI_{30R\text{-annual}} = 0.124 \times [a^{0.9} + (d^{0.85} \times h)]^{1.294}$$

dove EI30-annual (MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) corrisponde all'indice di erosività della pioggia, così come definito nel modello originario, e a, d e h sono, rispettivamente, il totale di pioggia, la massima

altezza di pioggia giornaliera e la massima altezza di pioggia oraria, tutte considerate su base annua ed espresse in mm. Tale formula, che raggruppa variabili relative a tre diverse scale temporali ed è specificamente calibrata per il territorio siciliano, si è dimostrata più efficace di altri modelli di correlazione nel riprodurre ed esprimere il potere erosivo della pioggia. Concettualmente, la variabile a è rappresentativa delle precipitazioni meno erosive, ma con effetto cumulativo sul lungo periodo, mentre le variabili d e h descrivono gli effetti più severi dovuti alle precipitazioni di forte intensità. Inoltre, il vantaggio non trascurabile nell'uso di tale formula è rappresentato dal fatto che le variabili richieste sono di facile accessibilità e generalmente disponibili in serie pluriennali, mentre il procedimento di calcolo originariamente previsto dal modello di Wischmeier and Smith (1978) è certamente più oneroso in termini di raccolta e disponibilità dei dati.

I valori di R relativi alle 116 stazioni sono stati spazializzati per giungere alla carta dell'erosività della Sicilia mediante interpolazione geostatistica (*Universal Kriging*). Come si può vedere, a scala regionale, i valori più elevati di erosività della pioggia si riscontrano in tutta la fascia orientale dell'isola, da Capo Peloro a Capo Passero, e nella zona centrale, tra Enna e Caltanissetta, con massimi concentrati intorno a Messina e in un'area estesa dall'Etna a Priolo Gargallo. La vista generale, quindi, evidenzia una particolare vulnerabilità del territorio oggetto di studio in relazione all'aggressività climatica.

Da tale carta è stata estratta la porzione relativa al Comune di Messina ed i valori di R sono stati riclassificati in maniera da evidenziarne la distribuzione all'interno dell'area. La mappa del fattore R così ottenuta è rappresentata in figura 2 mentre in tabella 1 sono riportate le stazioni pluviometriche, ricadenti nell'area o prossime ad essa, con i relativi dati caratteristici. Il dettaglio dell'area ci mostra che i valori più elevati di erosività sono distribuiti all'interno della fascia collinare sul versante jonico del territorio comunale, con massimi concentrati in corrispondenza delle colline a ridosso del centro cittadino. I valori medi dell'area si attestano intorno ai 2800 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> confermando l'elevato potenziale di aggressività climatica di questa porzione della Sicilia.

Nome_stazione	Altezza s.l.m. (m)	Anni di osservazione	Max_1h (mm)	Max_giorn (mm)	Tot_annuo (mm)	Fattore R MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>
Camaro	568	43	36.4	88.3	1049.9	3117.7
Ganzirri	3	49	31.3	64.4	768.2	1809.7
Messina (Ist. Geofisico)	50	45	30.1	66.3	741.7	1661.2
Messina (Osservatorio)	54	20	34.6	73.1	863.5	2224.7
Monforte S. Giorgio	293	32	33.0	89.3	970.7	2735.6
S. Saba	24	27	33.2	71.5	772.1	1955.3

Tabella 1 – Stazioni pluviometriche comprese nell'area e valori medi di precipitazione

Non essendo stato possibile effettuare un campionamento dei suoli a copertura dell'intera area comunale, i valori di erodibilità del suolo (fattore K) sono stati attribuiti alle diverse classi ed associazioni pedologiche (fig. 3), riportate sulla Carta dei Suoli della Sicilia (Fierotti et al., 1988) e comprese nel territorio del Comune di Messina, sulla base delle osservazioni effettuate da Bagarello et al. (1992) e Fierotti et al. (1996) in altre zone della Sicilia, assumendo i valori medi di K tra quelli da loro determinati sperimentalmente per gli stessi tipi di suolo.

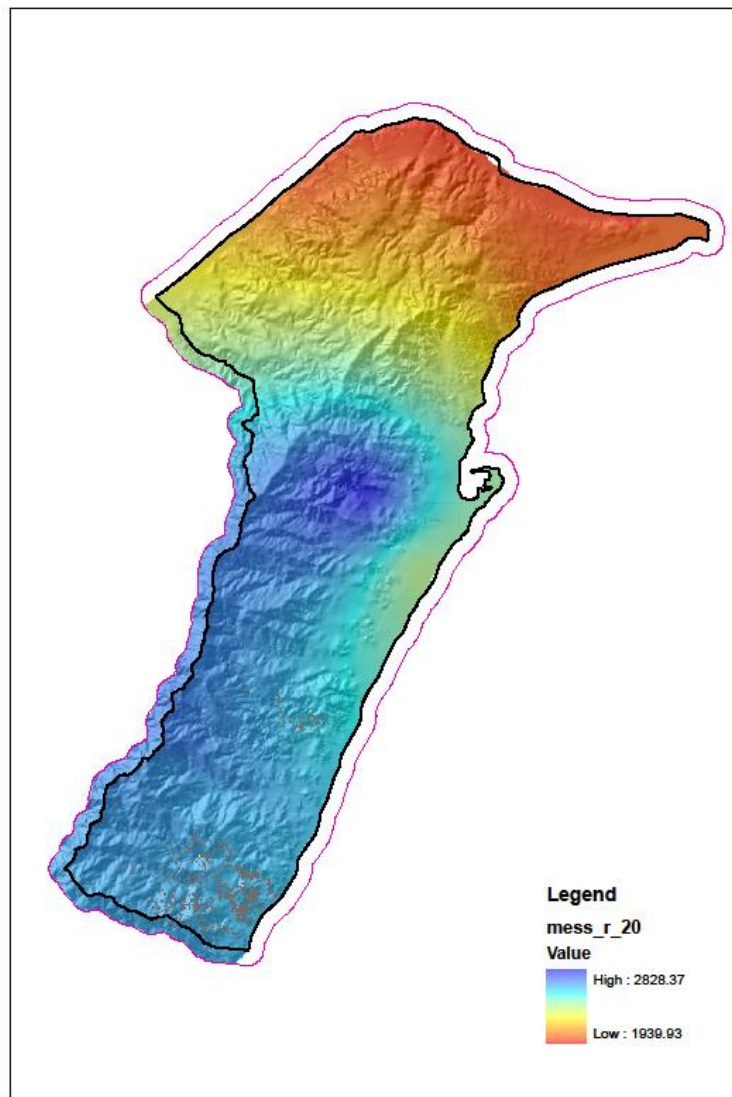


Figura 2 – Carta dell’erosività della pioggia nel Comune di Messina

Allo stesso modo sono stati attribuiti i valori del fattore C, considerando, per le diverse classi di uso del suolo riportate dalla stessa Carta dei Suoli della Sicilia in corrispondenza delle associazioni pedologiche presenti nell’area, i valori medi annui valutati da Bazzoffi (2007) e riportati in Bagarello e Ferro (2008) quali valori di prima approssimazione, ma di sufficiente attendibilità per i diversi tipi di colture in Sicilia. In tabella 2 sono riportati i valori di K e C presi a riferimento per i suoli presenti nell’area. I valori di K attribuiti, con le modalità prima descritte, attestano un’erodibilità di entità medio-bassa che, salvo verifiche, potrebbe produrre una sottostima della perdita di suolo reale.

<b>Suoli USDA (da: <i>Carta dei Suoli della Sicilia</i>)</b>	<b>K</b>	<b>C</b>
Rock outcrop	0.024	0.312
Typic e/o vertic xerofluvents	0.029	0.310
Typic xerumbrepts	0.015	0.123
Typic xerochrepts	0.047	0.237

Tabella 2 – Valori di K e C attribuiti ai suoli presenti nell’area del Comune di Messina

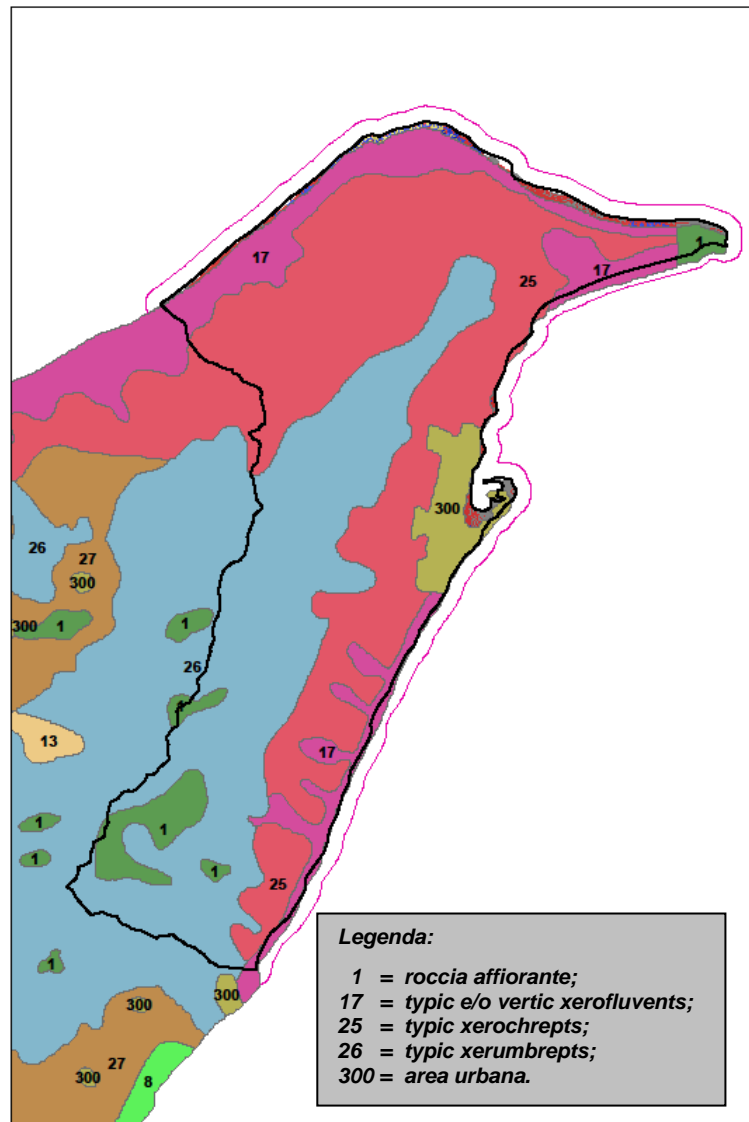


Figura 3 – Carta dei suoli (estratto da: Carta dei Suoli della Sicilia, di Fierotti et al., 1988)

A differenza dei due precedenti fattori, per la cui valutazione è stata utilizzata una procedura *proxy*, il fattore LS è stato invece determinato direttamente, sulla base di un DEM con risoluzione 20x20 m, mediante l'algoritmo messo a punto da Van Remortel et al. (2004). In figura 4 è riportata la mappa relativa al fattore LS insieme con la distribuzione di frequenza in tre diverse classi di valori ( $LS < 3$ ;  $3 < LS < 10$ ;  $LS > 10$ ).

Come è ovvio aspettarsi, i valori più elevati del fattore topografico caratterizzano i versanti collinari alle quote più elevate, maggiormente nei bacini orientati verso il litorale jonico ed in misura minore in quelli diretti verso il litorale tirrenico. Mediamente, i valori assunti dal fattore LS nell'area di studio appaiono piuttosto elevati, attestando una morfologia caratterizzata da forte contrasto ed elevata energia del rilievo.

La combinazione dei *layer* corrispondenti a ciascuno dei suddetti fattori, attraverso l'operatore spaziale della piattaforma GIS utilizzata (ArcGIS™), ha consentito infine il calcolo della RUSLE, restituendo la mappa della perdita di suolo del Comune di Messina, riportata in figura 5. In tabella 3 sono invece mostrati i dati statistici relativi ai fattori R, LS e ai valori della perdita di suolo ottenuti.

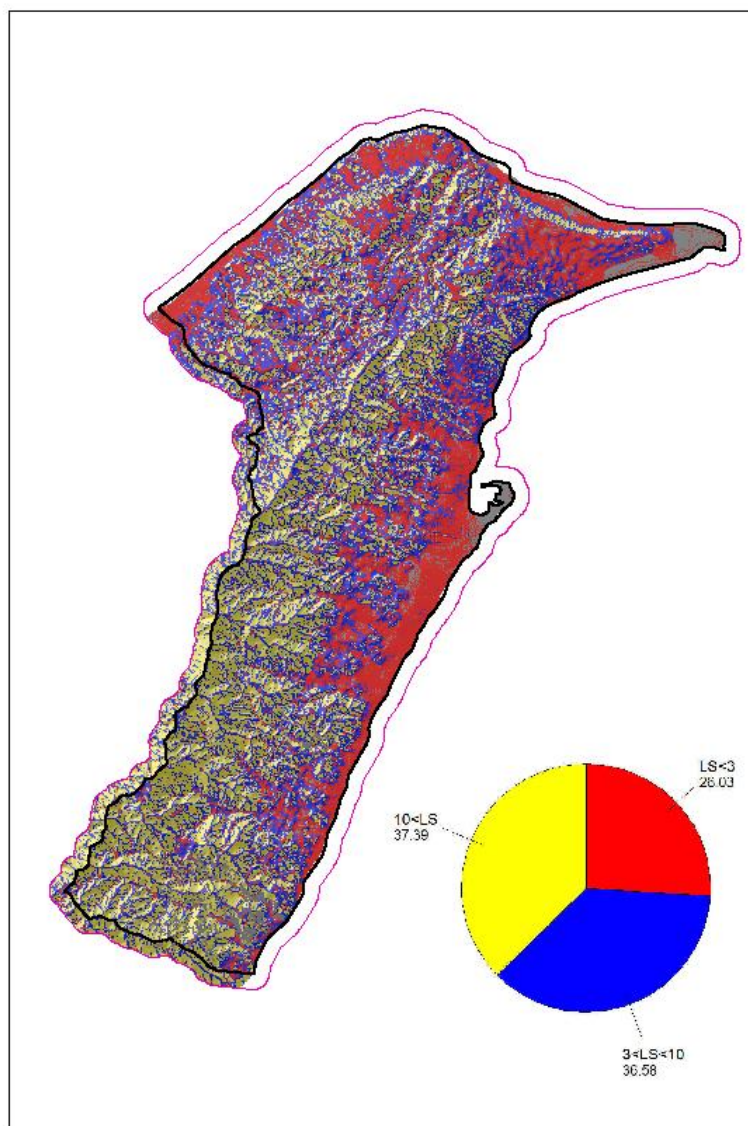


Figura 4 – Carta del fattore topografico LS

	<i>LS</i>	<i>R</i>	<i>Perdita di suolo</i>
<i>Min</i>	0,37	1939	0
<i>Max</i>	87,81	2828	2297
<i>Media</i>	25,71	2438	123
<i>St. dev.</i>	15,53	238	146

Tabella 3 – Dati statistici relativi ai fattori RUSLE calcolati e ai valori di perdita di suolo

La distribuzione dei valori di perdita di suolo è chiaramente influenzata dal *layer* relativo al fattore erodibilità *K* che rimarca la distribuzione ed estensione areale dei diversi tipi di suolo, come conseguenza della metodologia con la quale il fattore stesso è stato qui determinato. La gran parte dell'area mostra valori superiori ai 30 Mg/ha/anno, con un valore medio pari a 123 Mg/ha/anno, quindi di molto superiori al valore dei 10 Mg/ha/anno considerato convenzionalmente come soglia di tolleranza. Le aree soggette ai massimi valori di perdita di suolo (> 140 Mg/ha/anno) sono distribuite nella fascia pedecollinare sia sul versante jonico che su quello tirrenico, in corrispondenza dell'associazione di suoli in cui prevalgono suoli

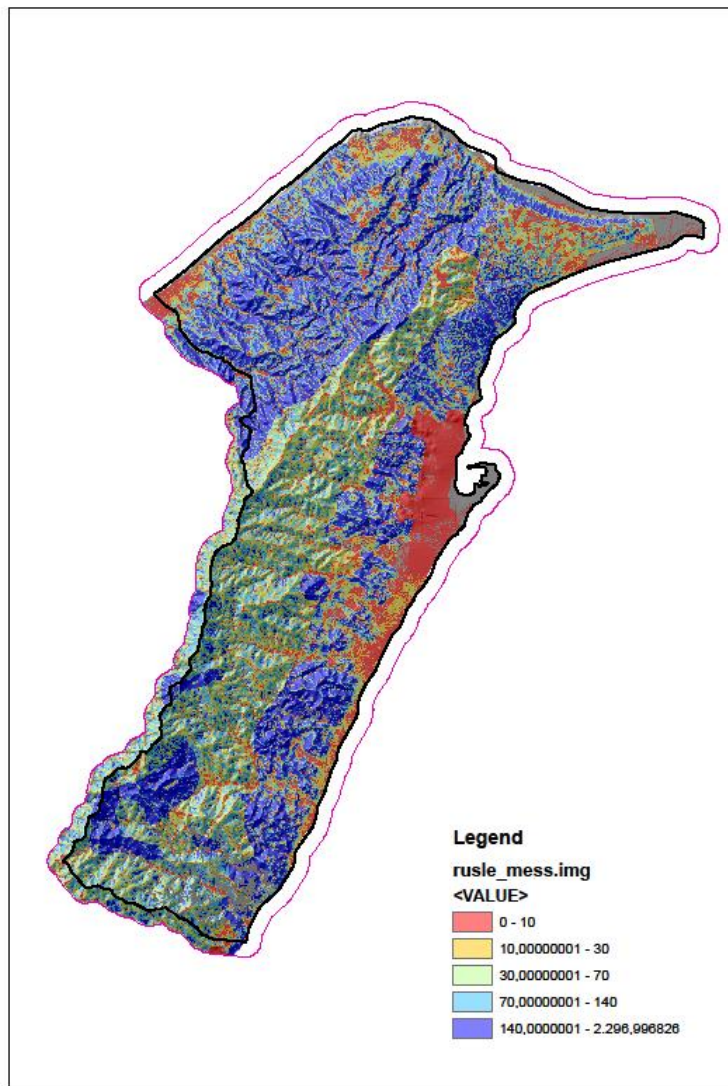


Figura 5 – Carta della perdita di suolo (Mg/ha/anno)

classificati come *Typic xerochrepts* ovvero suoli bruni. Questi suoli, in generale, sono caratterizzati da discreta profondità, buona struttura e contenuto di S.O. che gli conferiscono una media potenzialità agronomica (Fierotti et al., 1988). La mappa così ottenuta evidenzia, in ogni caso, le zone esposte a diversi livelli di erosione, nelle quali interventi mirati di tecniche e tipologie colturali o veri e propri interventi di protezione mediante difese attive possono contribuire alla riduzione del rischio di erosione.

## 8.2 Correlazione con le aree di innesco delle colate rapide

### 8.2.1 Considerazioni statistiche preliminari

La verifica dei legami statistici tra indice di erosione del suolo e distribuzione delle colate rapide può essere effettuata mediante un'analisi di regressione logistica spazializzata, cioè un tipo di analisi finalizzata ad assegnare un valore di probabilità che una colata rapida abbia luogo, tenendo conto anche della variabilità spaziale dei dati osservati. Questo tipo di analisi necessita,

però, di un accurato piano di campionamento ovvero di formazione del campione statistico. L'inventario dei fenomeni franosi nei bacini dei torrenti Mili, Briga e Giampilieri ammonta a 1259 eventi, un numero molto limitato rispetto alla griglia sulla base della quale è stato determinato l'indice di erosione RUSLE. A tale proposito, si può ricorrere a diverse soluzioni (Ramani et al., 2011), onde ottenere un campione sufficientemente rappresentativo. Nel presente caso, si è deciso di adottare un campione bilanciato con uguale proporzione di osservazioni corrispondenti a colate rapide ed osservazioni non registrate come tali. Dalla griglia RUSLE sono stati estratti in modo casuale 1259 casi, corrispondenti a punti dello spazio non interessati da colata rapida, a condizione che essi fossero ubicati ad almeno 100 metri dal più vicino punto interessato da colata rapida, allo scopo di favorire una migliore distribuzione spaziale. A questi casi si sommano i 1259 corrispondenti a punti realmente registrati come colata rapida. Il *dataset* ottenuto si compone quindi di 2518 osservazioni, con una probabilità a priori di evento di colata rapida pari al 50%. La figura 6 evidenzia la distribuzione spaziale dell'indice RUSLE in relazione alla distribuzione dei punti corrispondenti alle colate rapide censite (punti neri).

Ad un livello eminentemente descrittivo di analisi, si osserva una forte tendenza alla concentrazione dei fenomeni di colata in particolari aree dei bacini osservati. L' 87% dei punti interessati dagli eventi di frana è infatti concentrato nell'area orientale, mentre il 75% dei punti privi di tali fenomeni si trova nell'area occidentale (tab. 4). L'analisi della *Nearest Neighbor Distance*, come riportata in tabella 5, conferma la non casualità di questa tendenza ( $p < 0.001$ ). Il valore medio dell'indice RUSLE nell'area orientale è pari a 137 Mg/ha/anno, contro il valore di 103 Mg/ha/anno dell'area occidentale.

Ad un ulteriore livello di analisi, si è deciso di "dicotomizzare" l'indice RUSLE nelle categorie "basso/medio-basso" e "alto/medio-alto", introducendo un valore di *cutoff* convenzionale, corrispondente a 50 Mg/ha/anno. In tal modo si è cominciata ad evidenziare una relazione significativa tra colate censite e valore dell'indice di erosione (tab. 6). A questo punto si è potuto ragionevolmente procedere all'identificazione e validazione di un modello di regressione, passando da un livello descrittivo ad un livello esplicativo.

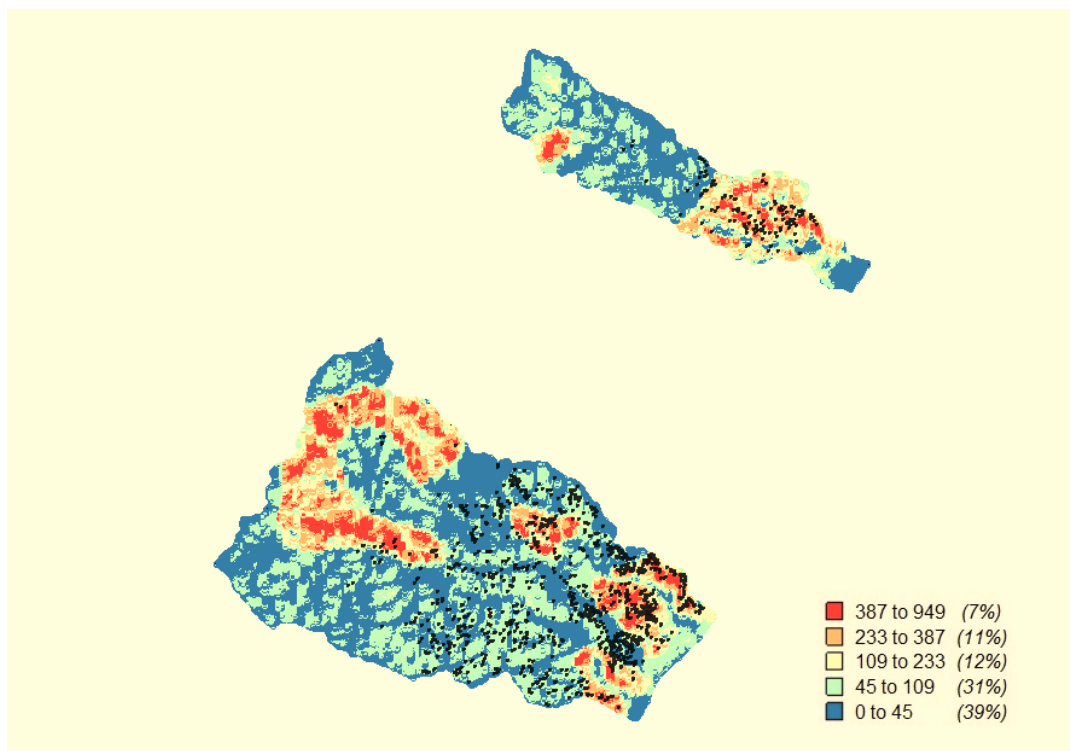


Figura 6 - Carta della distribuzione dell'indice RUSLE nei bacini Mili, Giampilieri e Briga in relazione alle colate rapide osservate (punti neri)

	Presenza di colata	Assenza di colata
Ovest	13	75
Est	87	25
totale	100	100

Tabella 4 - Occorrenza di colate rapide di detrito per settori di bacino (%)

	Mili	Giampileri	Briga
Area (m <sup>2</sup> )	5943637	10396924	10124084
n° di eventi osservati	140	531	588
Distanza media osservata	47.21	39.22	32.63
Distanza media attesa	103.02	69.96	65.61
Errore standard	4.55	1.59	1.41
z value	12.26	19.37	23.32
p value	0.0000	0.0000	0.0000

Tabella 5 - Statistici dall'analisi della *Nearest Neighbor Distance* nei tre bacini.

Indice RUSLE	Presenza di colata	Assenza di colata
Basso e Medio-basso (< 50)	205 (16%)	627 (49%)
Alto e Medio-alto (> 50)	1054 (84%)	632 (51%)
totale	1259 (100%)	1259 (100%)

Tabella 6 - Numero di successi ed errori nella previsione di colate di detrito mediante dicotomizzazione dei valori dell'indice RUSLE

### 8.2.2 Considerazioni sulla tecnica statistica adottata

Per la scelta del modello statistico ci si è orientati verso la regressione logistica spazialmente vincolata, segnatamente la tecnica GWR - *Geographically Weighted Regression* (Fotheringham, et al. 2000, 2002), implementata nell'omonimo *software*, versione 3.0. Un altro *software* utilizzato è costituito dal GeoDa, specialmente per l'analisi spaziale di auto-correlazione. In generale, l'analisi di regressione logistica, di cui la GWR costituisce una particolare versione, è una tecnica che lega la probabilità di occorrenza di un determinato fenomeno, o variabile dipendente, ad una serie di variabili indipendenti. Il valore aggiunto della tecnica GWR è dato dalla stima dei coefficienti, l'intercetta e la pendenza della retta di regressione, in ciascun punto geografico dell'area di studio. In altre parole, l'analisi attraverso la GWR restituisce un'equazione per ciascun punto esaminato nello spazio fisico anziché produrre una singola equazione generale. Il risultato è la restituzione di una vera e propria mappatura geografica dei valori di sensibilità alle colate rapide. Prima di illustrare nel dettaglio la specifica tecnica GWR, è opportuno richiamare alcuni elementi generali dell'analisi di regressione logistica, di qui in avanti definita regressione "globale".

Nel modello logistico globale la variabile dipendente dicotomica (Y) è rappresentata dal verificarsi dell'evento di colata rapida, che assume i valori '0' e '1', rispettivamente, in caso di assenza ("falso") o presenza ("vero") di tale evento. La variabile indipendente (X) è rappresentata dall'indice RUSLE. La ragione per cui un modello globale spesso fallisce quando viene applicato a dati spaziali è perché non rispetta le assunzioni di base del modello. Queste possono essere così sintetizzate: si assume che le osservazioni siano indipendenti e che i residui non siano affetti da errore sistematico. In particolare, dato che vengono trattati dati georiferiti, ci si aspetta che i residui, una volta rapportati alla carta geografica, non siano distribuiti in maniera sistematica, ovvero non mostrino un trend di natura spaziale. Questo è molto spesso proprio il punto debole della regressione logistica globale, e quando si verifica indica che le osservazioni

non sono indipendenti le une dalle altre. Tale fenomeno è ben noto in letteratura col termine di "autocorrelazione spaziale", basato sull'osservazione di Tobler (1970) che "qualunque oggetto è correlato agli altri, ma oggetti vicini sono più correlati degli oggetti lontani". Se, come appare ampiamente ipotizzabile e come viene empiricamente verificato, le colate rapide mostrano una tendenza all'autocorrelazione spaziale, anche i residui del modello tradizionale di regressione logistica possono essere affetti da autocorrelazione spaziale. Il rischio, in questo caso, è di ottenere stime distorte ed inefficienti, ovvero con un errore standard troppo ampio e valori errati o addirittura di segno opposto al valore reale. Tale problema è stato affrontato nel recente passato nella letteratura statistica (Anselin, 1988) attraverso svariate tecniche. Nell'approccio utilizzato nella presente indagine è stata considerata la tecnica *Geographically Weighted Regression* (Brunsdon et al., 1996; Fotheringham et al., 1996; 1997; 2002). Tale tecnica è in grado di gestire con maggiore efficienza il problema dell'autocorrelazione spaziale, producendo stime più accurate. Questa consiste nell'attribuire pesi differenti a ciascuna osservazione, mediante un metodo iterativo, al fine di massimizzare la rispondenza della variabile dipendente. I pesi sono legati alla posizione geografica di ogni osservazione, in maniera tale che ogni osservazione abbia influenza maggiore su quella più vicina e via via minore su quelle più lontane. Lo schema di pesi adottato è una funzione dei quadrati delle distanze:

$$W_{ih} = e^{\left(\frac{1}{d_{ij}^2 h^2}\right)}$$

in cui  $d_{ij}$  esprime la distanza osservata tra la  $i$ -esima e la  $j$ -esima osservazione e  $h$  denota il valore di *bandwidth*, ovvero l'estensione spaziale entro la quale computare la ponderazione. Il valore di *bandwidth* si pone quindi come parametro di smussamento o, in altre parole, un parametro di continuità tra le osservazioni. La funzione di cui sopra indica che più alto è tale valore più la regressione GWR è simile alla regressione tradizionale non-spaziale. Inoltre, minore è la distanza, maggiore è il peso che l'osservazione  $i$ -esima esercita sull'osservazione  $j$ -esima. L'espressione generale:

$$\text{logit}[\pi(x)] = \beta_0 + \sum_i^q (\beta_i x_i) = X\beta$$

può essere riscritta nella forma:

$$\text{logit}[\pi(x)] = \beta_{0(u_i, v_i)} + \sum_i^q (\beta_i(u_i, v_i) x_i) = X\beta$$

Dove  $u_i, v_i$  sono le coordinate dei punti nello spazio. In tal modo, mediante la tecnica GWR, si possono ottenere stime dei parametri, ovvero i coefficienti di regressione, noti come intercetta e pendenza, per ogni punto osservato. È così possibile, nel caso della nostra indagine, misurare punto per punto la sensibilità al fattore erosione. I "pesi" risultati dalla nostra indagine, tuttavia, non sono applicabili ad altre aree al di fuori di quella considerata, e la validità del modello scaturito è circoscritta all'ambito considerato. Lo scopo principale del presente studio, infatti, è di dimostrare la connessione empirica tra indice di erosione ed eventi di colata rapida in riferimento al territorio di Messina piuttosto che definire una legge generale di correlazione.

### 8.3 Risultati

In questa sezione viene riportato il confronto tra i risultati ottenuti con il modello GWR ed il modello globale. In breve, si può asserire quanto segue: 1) la sensibilità (e quindi la correlazione) del fenomeno delle colate rapide di detrito all'indice di erosione sembra accertata, vista la significatività dei coefficienti di regressione risultanti, tanto nel modello globale quanto

in quello GWR; 2) il modello GWR sembra garantire una migliore *performance* ed un'elevata capacità predittiva rispetto al modello globale. Di seguito si descriverà nel dettaglio l'analisi degli indici statistici, la verifica delle assunzioni di base del modello e l'abilità di previsione di nuovi fenomeni, ossia la validazione del modello stesso, attraverso alcuni tipici indicatori analitici quali AUC, efficienza, sensitività e specificità.

### 8.3.1 Indici statistici della regressione e accuratezza del modello

La tabella 7 riporta alcuni indici riguardo alle regressioni ottenute con i due modelli. L'indice AIC (*Akaike Information Criterion*) viene adoperato per esprimere la qualità di un modello attraverso la quantità di informazione che viene perduta a causa della semplificazione introdotta dal modello stesso nel rappresentare un fenomeno reale. Minore è l'indice AIC maggiore è la vicinanza del modello alla realtà. Una misura rilevante della precisione di un modello è data dal *Root Mean Square Error* (RMSE), anche definito come errore standard della stima, e dal *Mean Absolute Error* (MAE). Alla luce di tutti questi indici, il modello GWR sembra essere più affidabile.

Modello	AIC	RMSE	MAE
Globale	3303	0.4794	0.4617
GWR	2234	0.3748	0.3220

Tabella 7 - Confronto tra i modelli Globale e GWR

Le tabelle 8 e 9 mostrano altri parametri di stima relativi ai due modelli, rispettivamente. Ai fini del confronto tra i due modelli, vengono riportati i valori medi di tali parametri ottenuti nei due casi.

	B	S.E.	df	Sig.	Exp(B)
RUSLE	0.003942	0.00031	1	<0.001	1.004
intercetta	-0.543	0.05727	1	<0.001	0.581

Tabella 8 - Equazione di regressione del modello Globale

	B Median Value	B Lower Quartile	B Upper Quartile	Exp(B)
RUSLE	0.004745	0.002214	0.006544	1.005
Intercetta	0.035	-1.838	0.478	1.036

Tabella 9 - Equazione di regressione del modello GWR

I coefficienti espressi con lettera "B" si riferiscono alla variazione del rapporto di probabilità di un evento di colata rapida rispetto ad una variazione nell'indice RUSLE equivalente a 1 Mg per ettaro. Si potrebbe affermare che le stime ottenute con i due modelli sono molto simili in assoluto (circa 0.004) ed entrambe confermano il segno positivo della correlazione, che significa che un aumento del valore dell'indice RUSLE porta ad un aumento della probabilità di un evento di colata. Inoltre tutti i parametri di stima relativi all'indice di erosione sono significativamente diversi da zero sia nel modello globale che nel GWR ( $p < 0.001$ ). Alla fine, però, il modello GWR fornisce un'informazione più dettagliata dato che presenta una distribuzione spaziale non uniforme dei coefficienti di regressione. Proprio utilizzando i valori del parametro "B" relativo all'indice RUSLE, che, ricordiamo, indica il valore della pendenza della retta ed è variabile nello spazio, si è proceduto ad una *clusterizzazione* dell'area di studio. I risultati sono sintetizzati nella

figura 7 in cui l'intera area di studio è suddivisa in quattro zone omogenee (*clusters*). Ogni *cluster* ottenuto costituisce una porzione di territorio sufficientemente omogenea dal punto di vista della sensibilità, ovvero un diverso modo di “rispondere” all'erosione così come misurata dall'indice RUSLE. Per ognuno di questi *cluster* è stata calcolata la mediana dell'intercetta e della pendenza “B” relativa all'indice RUSLE. In tal modo, ogni zona omogenea ha il suo modello semplificato, cioè la sua curva logistica rappresentante il livello di probabilità di un evento di colata rapida di detrito rispetto ad un determinato valore dell'indice di erosione RUSLE (fig. 8). La zona 4, corrispondente alla porzione più orientale dei bacini Giampilieri e Briga, presenta la più alta sensibilità all'indice di erosione, poiché in corrispondenza di un indice RUSLE pari a 50 Mg/ha raggiunge una probabilità media di evento di colata rapida pari al 65%; mentre la zona 1, che coincide con la parte più ad ovest del Mili, presenta caratteristiche opposte di relativa invarianza all'indice medesimo. La zona 2, corrispondente alla porzione più orientale del Mili, mostra un basso livello di probabilità per valori bassi dell'indice RUSLE, ma quando il valore dell'indice si avvicina e supera 600 Mg/ha mostra un comportamento simile a quello della zona 4. Per esemplificare la diversa risposta dei quattro sub-modelli, si può affermare che un valore dell'indice RUSLE pari a 300 definisce una probabilità di colata rapida pari a 38%, 58%, 49% e 83%, rispettivamente, per le zone 1, 2, 3 e 4. Se consideriamo i risultati del modello globale, lo stesso valore dell'indice RUSLE corrisponderebbe in tutti i casi ad una probabilità di colata rapida del 65%. Questa è la conseguenza della maggiore complessità del modello GWR ovvero della citata distribuzione non uniforme dei coefficienti di regressione.

### 8.3.2 Verifica degli assunti di base

Riguardo alla questione della violazione degli assunti di base, in aggiunta alla determinazione degli indici statistici della regressione, è stata effettuata un'analisi dei residui. Un buon modello dovrebbe riportare residui con le seguenti caratteristiche: 1) distribuzione *random*; 2) correlazione non significativa con la variabile indipendente; 3) omogeneità della varianza, o omoschedasticità; 4) auto-correlazione spaziale non significativa. Possiamo dire che il modello GWR non viola nessuna di queste assunzioni, infatti:

- la devianza dei residui del modello tende ad una distribuzione simmetrica, come si può vedere negli istogrammi di frequenza (fig. 9a-b);
- mentre il modello globale mostra una indesiderata forte correlazione tra indice RUSLE e residui ( $r^2 = 0.99$ ), il GWR mostra valori inferiori sia in caso di evento che in caso di non-evento;
- riguardo alla omoschedasticità, si rammenta che nel presente caso ci si trova nel dominio logistico binario per cui tutti i residui sono forzati a giacere nell'intervallo [0,1]. Per tale motivo, è difficile verificare tale assunto mediante un test analitico. Piuttosto, è utile analizzare il grafico dei residui e constatare il grado di dispersione intorno ai valori centrali che, se molto ampio, attesta che l'assunto non viene osservato. Questo è proprio il caso dei residui del modello globale (fig. 10a). Al contrario, i residui del modello GWR (fig. 10b), denotano un grado di dispersione basso, come auspicato.

Come più volte sottolineato, il fenomeno di auto-correlazione è peculiare dei dati spaziali.

Un tipico test è la stima dell'indice di Moran, la cui misura varia tra -1 e 1. Più l'indice è prossimo a zero, minore è l'auto-correlazione e maggiormente viene osservato l'assunto. Anche in questo caso, il modello globale mostra un'indesiderata auto-correlazione rispetto al modello GWR. Se si proiettano in un grafico i valori dell'indice di Moran ottenuti dai due modelli a differenti distanze (fig. 11), è possibile osservare che, nel caso del GWR, tale indice decresce velocemente a partire da una distanza di 100 m. Le figure 12a e 12b mostrano che i residui provenienti dal GWR sono minimi e non concentrati, a differenza del modello globale.

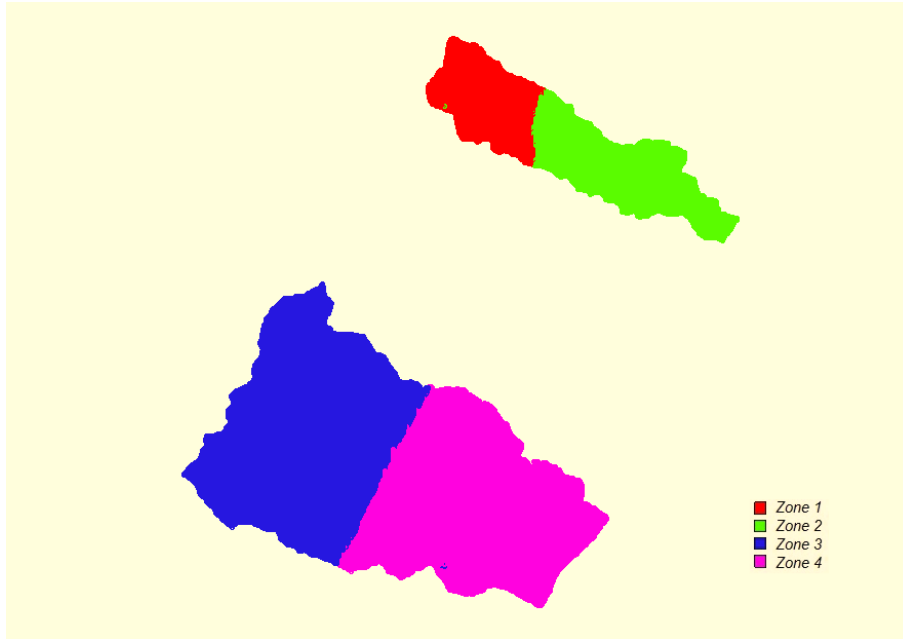


Figura 7 - Sub-regioni (cluster) derivanti dalla distribuzione di parametri del modello GWR

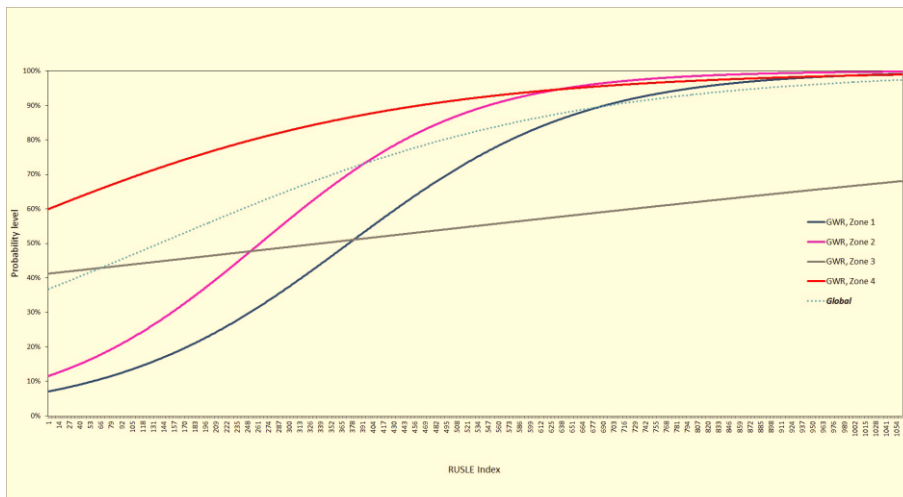


Figura 8 - Curve logistiche relative ai *cluster*. Livello di probabilità a priori: 0.5

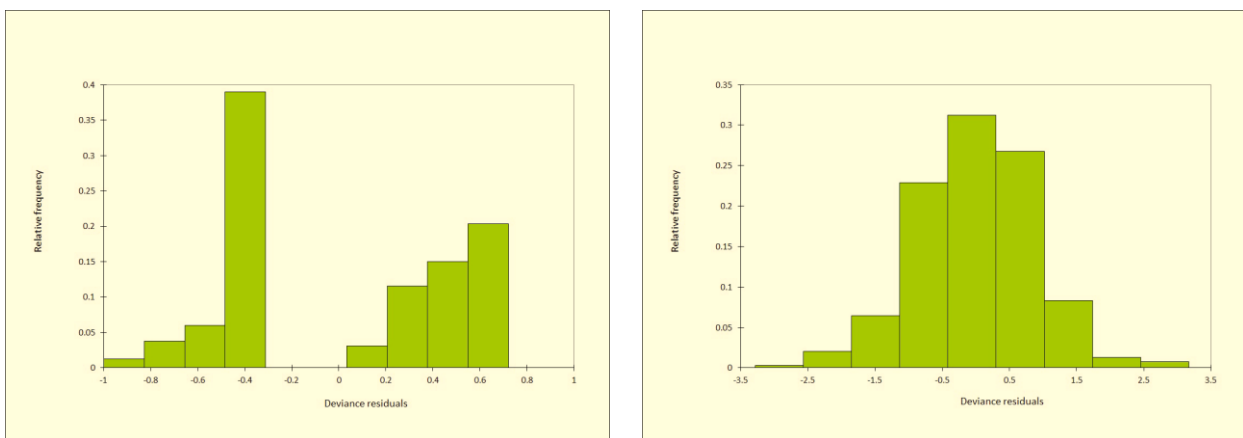


Figura 9 - Istogramma della devianza dei residui nel modello Globale (sinistra) e GWR (destra)

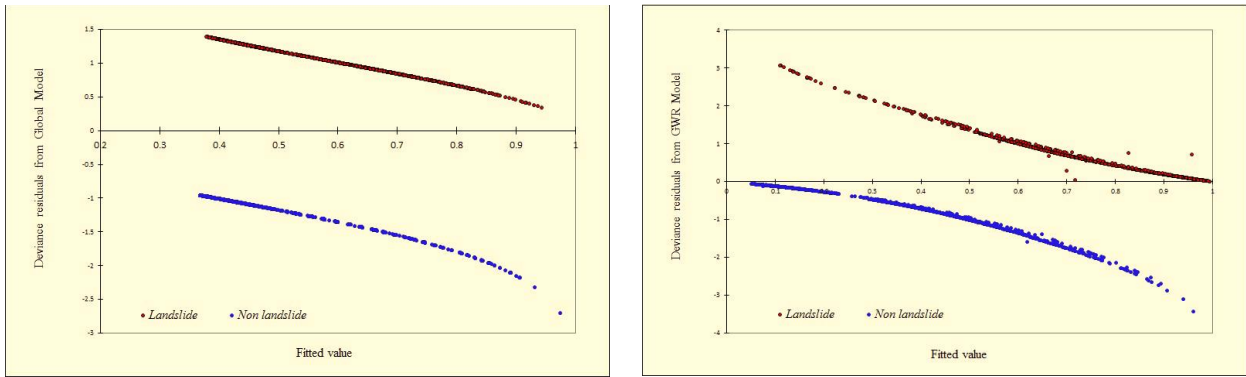


Figura 10 - Grafico dei residui relativi al modello Globale (sinistra) e GWR (destra)

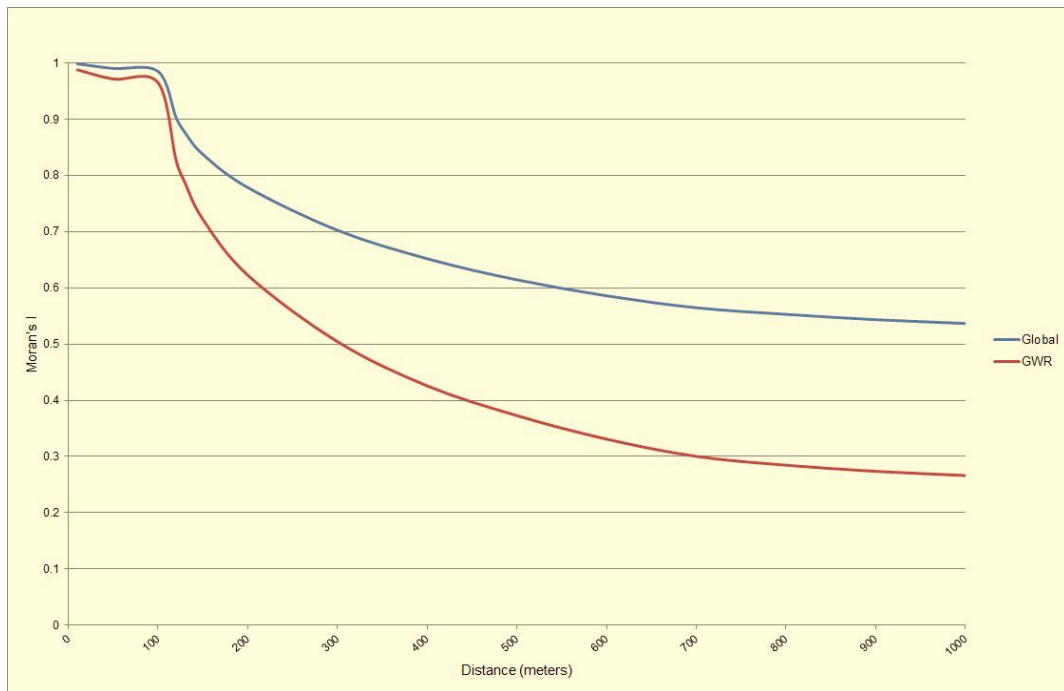


Figura 11 - Indice di Moran come funzione della distanza spaziale nei due modelli

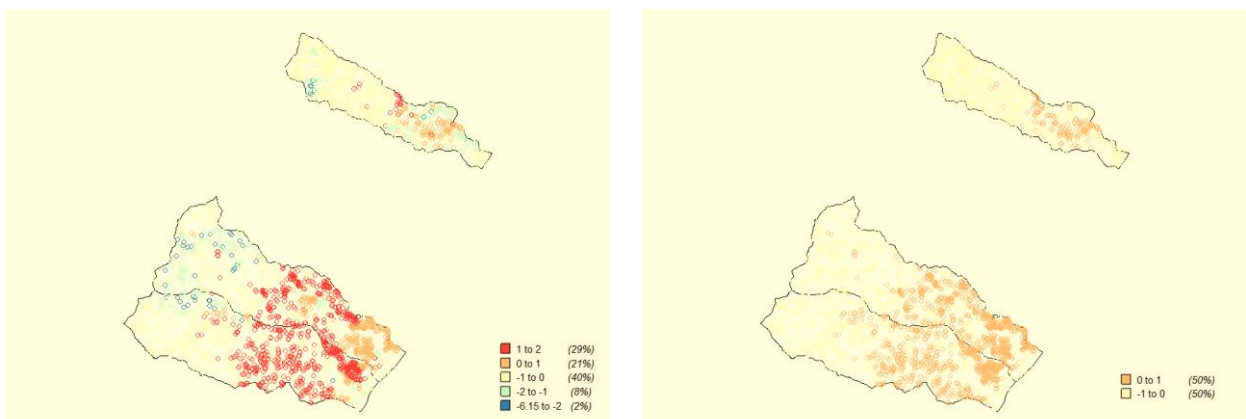


Figura 12 - Mappa dei residui standard relativi al modello Globale (sinistra) e GWR (destra)

### 8.3.3 Validazione

I risultati finora evidenziati ci autorizzano a considerare il modello GWR il più affidabile dal punto di vista metodologico. Il passo successivo è di indagare l'abilità di questo modello

nella previsione di nuovi eventi ovvero, in generale, la sua capacità di *performance*. A tale scopo, è stato effettuato un test di validazione incrociata (*cross validation*). Il metodo qui utilizzato consiste nel suddividere il *dataset* in un subset di prova e in un subset di validazione attraverso un campionamento casuale. Il primo viene adoperato per costruire il modello, mentre il secondo viene utilizzato per verificare quantità e distribuzione degli errori rispetto ai dati osservati, a seguito dell'applicazione del modello. I risultati ottenuti dall'applicazione del modelli globale e del GWR al subset di prova sono molto simili a quelli analizzati nel precedente paragrafo. Per tale motivo, in questa sezione ci si sofferma sulla funzione di classificazione generata dai rispettivi modelli in base alla classica *ROC analysis*. Prima di qualsiasi considerazione è bene ricordare che, dal momento che abbiamo costruito un campione costituito al 50% da assenza di frana e al 50% da presenza di frana, il livello di probabilità a priori è pari a 0.5.

Indicatore	<i>Cutoff: 0.4</i>		<i>Cutoff: 0.5</i>		<i>Cutoff: 0.6</i>	
	Globale	GWR	Globale	GWR	Globale	GWR
Area Under Curve (AUC)	0.72	0.92	0.72	0.92	0.72	0.92
Sensitività	0.95	0.98	0.45	0.96	0.34	0.82
Specificità	0.30	0.50	0.79	0.71	0.84	0.88
Falso Positivo	0.70	0.50	0.21	0.29	0.16	0.12
Falso Negativo	0.05	0.02	0.55	0.04	0.66	0.18
Efficienza	0.62	0.74	0.62	0.83	0.59	0.85

Tabella 10 - *Performance* dei due modelli a differenti valori di *cutoff*

La tabella 10 illustra i principali indicatori di *performance*. Il più utilizzato tra questi è l'Area Under Curve (AUC), equivalente alla probabilità che il risultato dell'applicazione del modello effettuato su un punto nello spazio estratto a caso dal gruppo interessato da colata rapida sia superiore a quello estratto a caso dal gruppo non interessato dal fenomeno. In altre parole, il parametro AUC fornisce una misura dell'accuratezza, in quanto descrive come si comporta il modello nel discriminare tra veri positivi (punti che il modello applicato classifica correttamente come "interessati da colata rapida") e veri negativi (punti che il modello applicato classifica correttamente come "non interessati da colata rapida"). Il suo campo di variazione è tra 0.5 (di fatto equivalente alla probabilità di discriminare correttamente quando si tira ad indovinare) e 1 (discriminazione perfetta). Una regola empirica suggerisce che un valore superiore a 0.9 è un eccellente indicatore di accuratezza del modello. Nel caso del modello GWR, il valore AUC è più che soddisfacente (0.92) ed in accordo con altri studi (Ramani 2011). La tabella riporta altri indicatori che, a differenza dell'AUC, dipendono da un valore convenzionale di *cutoff*. Il *cutoff* indica la soglia minima di probabilità di occorrenza al di sotto della quale il punto viene classificato come "non interessato da colata rapida". Se il modello applicato assegna ad un determinato punto un valore superiore al *cutoff* lo stesso punto può essere classificato come "interessato da colata rapida". La sensitività indica la percentuale di eventi di colata rapida correttamente classificati. La specificità denota la percentuale di punti non interessati da colata rapida correttamente classificati. L'efficienza indica la percentuale di tutti e 2518 punti classificati correttamente, che siano o meno interessati da colata rapida. Sensitività e specificità costituiscono concetti in opposizione. La sensitività è conseguenza di una filosofia più conservativa, con un'attenzione maggiormente rivolta alla minimizzazione di perdite umane e materiali, anche a costo di generare un alto numero di falsi allarmi. Per converso, la specificità denota una maggiore attenzione al rischio di minimizzare i costi legati ai falsi allarmi. In termini pratici la scelta tra le due diverse esigenze si traduce nella individuazione del valore-soglia, il *cutoff*. Un valore relativamente basso di *cutoff* si traduce in un più alto valore di sensitività, e

viceversa. La questione è evidentemente di natura non statistica ma rimanda alla sfera delle decisioni politiche, poiché non esiste in assoluto un “giusto” valore di *cutoff*. La figura 13 è il risultato di un’elaborazione condotta a seguito dell’analisi ROC e mostra il sostanziale *trade-off* nella scelta del valore di *cutoff*. Dall’ispezione della figura un buon *range* di possibili valori di *cutoff* pare collocarsi tra 0.4 e 0.6. La tabella 10 indica in forma numerica tre differenti scenari di classificazione, a 0.4, 0.5 e 0.6, mentre la figura 14 sintetizza in forma grafica gli stessi scenari.

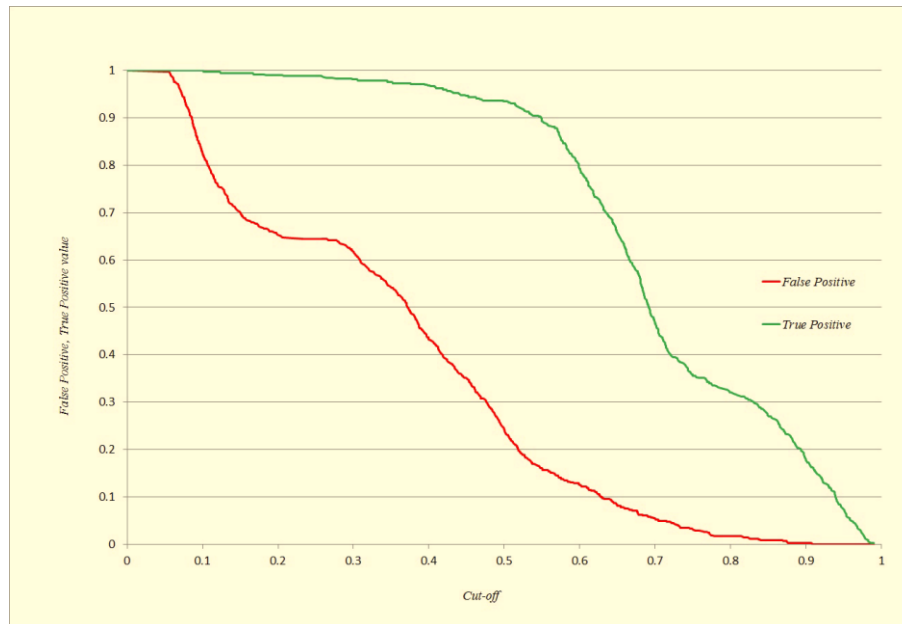


Figura 13 - Rappresentazione delle *performance* corrispondenti a differenti valori di *cutoff*. Coordinate ottenute dalla ROC *analysis*

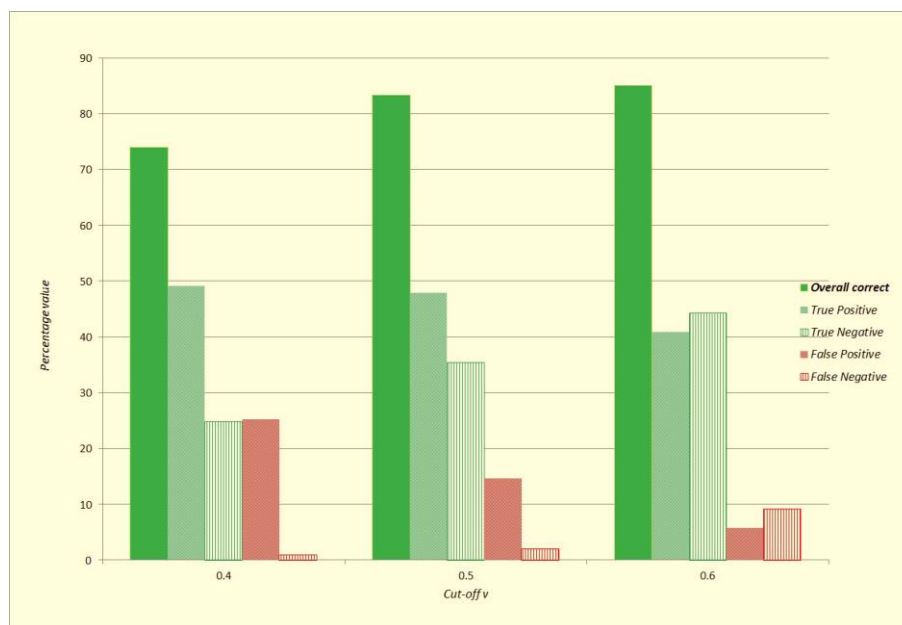


Figura 14 - Classificazione risultante dal modello logistico GWR

Dalla tabella 7 si può notare come il valore di efficienza sia elevato e soddisfacente, essendo compreso tra 74% e 85%. In particolare, se selezioniamo un *cutoff* pari a 0.6 si ottiene un valore di efficienza prossima all'85%, che costituisce un buon risultato, ma anche alti valori di specificità (0.88) e sensibilità (0.82). Data la natura spaziale dei dati in esame, per una visualizzazione d’insieme si deve tuttavia ricorrere anche alla rappresentazione cartografica dei

risultati di classificazione. Ancora una volta è possibile comparare i risultati dei due modelli, globale e GWR. La figura 15a-b mostra la mappa di probabilità estratta dai due modelli applicati attraverso il metodo della *cross-validation*.

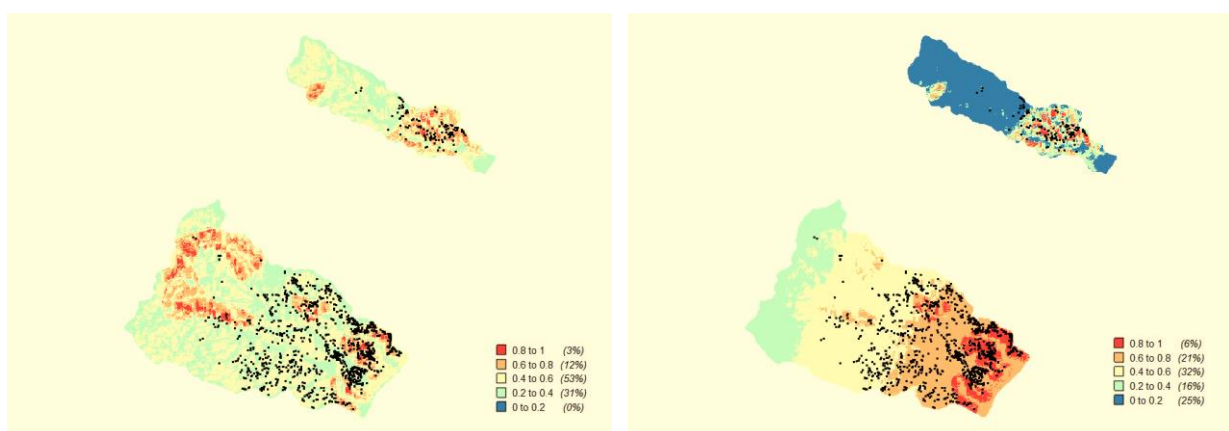


Figura 15 - Mappe di probabilità estratte da (sinistra) Modello Globale e (destra) Modello GWR (i punti neri rappresentano le colate di detrito osservate). Livello di probabilità a priori: 0.5

I colori caldi, rosso e arancio, denotano una probabilità di almeno il 60% che si verifichi un evento di colata di detrito. I punti neri indicano gli eventi effettivamente osservati. La corrispondenza tra i colori rosso e arancio ed i punti neri indica la buona approssimazione del modello. Si può vedere che, nel caso del modello GWR, tale corrispondenza è molto accentuata, il che denota la maggior affidabilità rispetto al modello globale. Questo indica anche chiaramente la sussistenza di un legame statistico tra indice di erosione e processi di colata di detrito sui versanti. È anche opportuno notare come il modello GWR tenda a discriminare meglio, rispetto al globale, tra valori “alti” e valori “bassi” di probabilità di colata rapida. In particolare, il 27% degli eventi previsti dal GWR mostra un livello di probabilità più alto del 60%, rispetto al 15% ottenuto dal modello globale. Ma l'evidenza più importante è quella relativa alla differente influenza esercitata dall'indice RUSLE nell'intera area di studio. Nel modello spazializzato lo stesso valore di erosione del suolo produce effetti relativamente più accentuati, in termini di colate rapide, nel settore orientale rispetto a quello occidentale.

A seguito dell'analisi di validazione del modello, è possibile tracciare, seppur con la necessaria cautela, alcuni scenari corrispondenti a diversi valori dell'indice di erosione. Innanzitutto va ricordato che i "pesi" geografici possono variare dinamicamente nel tempo, mentre l'analisi di scenario qui proposta è piuttosto statica. Ciononostante, si può prevedere un'ipotetica variazione nell'indice RUSLE indotta da una variazione nell'indice di erosività della pioggia R, che costituisce il più soggetto a variazioni anche nel breve periodo (fig. 16a-b). E' così possibile notare che un aumento del 10% nel fattore R provocherebbe solo un debole cambiamento nella fenomenologia generale delle colate di detrito. In questo scenario, infatti, il numero di punti aventi una probabilità di colata “alta” o “medio-alta” (non inferiore al 60%) rimarrebbe sostanzialmente invariato, passando dal 27% al 28%. Nell'ipotesi del raddoppio del valore di R si avrebbero invece delle conseguenze più complesse. In generale, la percentuale di punti a probabilità “alta” o “medio-alta” salirebbe al 38%, nondimeno con una specifica distribuzione spaziale. I bacini Giampilieri e Briga non subirebbero forti variazioni relative, eccetto per un generale aumento nella probabilità. Al contrario, il bacino Mili subirebbe un forte aumento nella parte orientale che sarebbe soggetta ad una diffusa franosità.

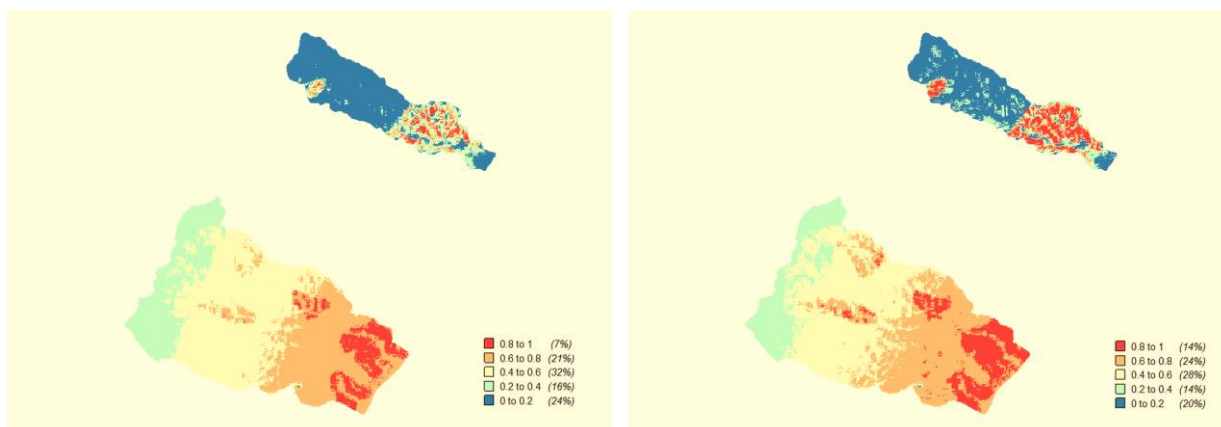


Figura 16 - Scenario probabilistico estratto dal modello GWR sull'ipotesi di un aumento del fattore R (erosività della pioggia) del (a) 10% e (b) 100% (i punti neri rappresentano le colate di detrito osservate). Livello di probabilità a priori: 0.5

## 8.4 Conclusioni

I risultati dell'analisi qui condotta confermano l'esistenza di un significativo legame statistico tra suscettibilità del suolo all'erosione, misurata attraverso l'indice RUSLE, e processi di colate detritiche e fangose. La stabilità del modello è stata testata anche ricorrendo alla analisi ROC sui dati di *cross-validation* onde escludere il rischio di *overfitting*. Sono stati suggeriti alcuni scenari sotto diverse ipotesi basate sui risultati della regressione. È stato discusso l'aspetto relativo alla definizione di un valore-soglia di probabilità in base al quale discriminare tra rischio e non-rischio del verificarsi di un evento di colata. Riguardo a ciò, non esiste un valore convenzionale prestabilito e la scelta di questo dipende dagli obiettivi che ci si prefigge. Nell'ambito della pianificazione territoriale, per esempio, è possibile che si utilizzi una certa cautela ed il valore-soglia possa essere ragionevolmente fissato intorno a livelli piuttosto bassi, onde limitare al massimo il rischio di danni alle persone. Al contrario, nel contesto di un piano di emergenza, il costo di un falso allarme assume importanza rilevante e si può decidere di elevare il valore-limite. Sebbene, mediante l'analisi qui condotta, la relazione tra erosione e rischio di colata sia stata, in generale, ampiamente dimostrata, il carattere spaziale del modello stesso ci suggerisce che lo stesso indice RUSLE, ovvero l'entità dell'erosione, può produrre effetti anche molto diversi da luogo a luogo, in termini di livello di probabilità che si verifichi una colata di detrito. In altri termini, si ritiene, in questa sede, che la struttura del modello statistico dovrebbe variare dinamicamente in base ai caratteri fisici dell'area investigata. Per tale ragione, il considerare parametri variabili nello spazio aiuta a riprodurre il comportamento reale di un sistema complesso, quale è l'insieme suolo-substrato geologico-versante, sul quale agiscono diverse forze (pioggia, acque ruscellanti, pressioni interstiziali, attriti interni, gravità) che determinano, da versante a versante e tra un'area geografica e l'altra, diverse suscettibilità allo sviluppo di colate detritiche.

I soddisfacenti risultati qui ottenuti sono molto incoraggianti riguardo al possibile sviluppo di una metodologia innovativa per la valutazione della pericolosità da colata rapida di detrito che tenga conto di una componente riguardante l'erodibilità del suolo.

## 8.5 Bibliografia

- Bagarello V., Ferro V. (2008). Valutazione del fattore culturale per le coperture agrarie. In: Linee guida per l'applicazione della USLE in ambiente mediterraneo (a cura di V. Ferro), Quaderni di Idronomia Montana, 28/1, 85-92.

- Bagarello V., Dazzi C., Ferro V., Fierotti G., Giordano G., Santoro M. (1992). Indagine sull'erosione idrica potenziale del bacino del fiume Belice. *Boll. A.I.C.*, n. 86, 105-110.
- Bazzoffi P. (2007). Erosione del suolo e sviluppo rurale. Fondamenti e manualistica per la valutazione agroambientale. Edagricole, Bologna.
- Fierotti G., Dazzi C., Lombardo V. (1996). Sensibilità dei suoli all'erosione. *Agricoltura Ricerca* n. 164-165-166: 25-32.
- Fierotti G., Dazzi C., Raimondi S. (1988). Carta dei suoli della Sicilia. Regione Sicilia, Assessorato Territorio e Ambiente. Palermo.
- Grauso S., Diodato N., Verrubbi V. (2009). Calibrating a rainfall erosivity assessment model at regional scale in Mediterranean area. *Environmental Earth Sciences*, DOI: 10.1007/s12665-009-0294-z.
- Hickey R (2000). Slope angle and slope length solution for GIS. *Cartography* 29:1-8
- Hickey R, Smith A, Jankowski P (1994). Slope length calculations from a DEM within ARC/INFO GRID. *Comput Environ Urban Syst* 18:365-380.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., Porter P.J. (1991). RUSLE - revised universal soil loss equation. *J. Soil Water Conserv.* 46: 30-33.
- Renard K.G., Freimund J.R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *J. Hydrol.* 157: 287-306.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A, McCool D.K., Yoder D.C. (1997). Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service (USDA-ARS) Handbook no. 703. United States Government Printing Office, Washington, DC.
- Fierotti G., Dazzi C., Raimondi S. (1988). Carta dei suoli della Sicilia. Regione Sicilia, Assessorato Territorio e Ambiente, Palermo.
- Fotheringham A.S., Brunsdon C., Charlton M.E. (2000). *Quantitative Geography*. London: Sage.
- Fotheringham A.S., Brunsdon C., Charlton M.E. (2002). *Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships*. Wiley, Chichester.
- Ramani S.E., Pitchaimani K., Gnanamanickam V. R. (2011). GIS based landslide susceptibility mapping of Tevankarai Ar sub-watershed, Kodaikkanal, India using binary logistic regression analysis. *Journal of Mountain Science* 8/4: 505-517.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I*: 309-317.
- Tobler W. R. (1970). A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography* 46: 234-40.
- Van der Knijff J.M., Jones R.J.A., Montanarella L. (2002). Soil erosion risk assessment in Italy. *Proceedings of the third International Congress of the ESSC (Rubio et al. eds.): 1903-1917*.
- Van Remortel R.D., Maichle R.W., Hickey R.J. (2004). Computing the LS factor for the Revised Universal Soil Loss Equation through array-based slope processing of digital elevation data using a C++ executable. *Computers & Geosciences* 30: 1043-1053.
- Van Remortel, R., Hamilton M. and Hickey R. (2001). Estimating the LS factor for RUSLE through iterative slope length processing of digital elevation data. *Cartography*, v. 30, no. 1: 27-35.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. United States Department of Agriculture - Handbook no. 537. United States Government Printing Office, Washington, DC.

## 9. VALUTAZIONE DELLA DISTANZA DI PROPAGAZIONE (*RUNOUT*) E DELL'INTENSITÀ DELLE COLATE RAPIDE

In letteratura sono reperibili numerosi approcci, anche molto differenti, volti a rispondere al secondo quesito relativo ad una esaustiva valutazione della pericolosità, "con quale intensità si manifesterà un fenomeno del futuro?". L'intensità è stata espressa in una scala relativa, associandola a livelli di danneggiamento o perdite, oppure in termini di grandezze caratteristiche del fenomeno, come velocità, volume o anche secondo approcci ibridi che mettono in relazione i due precedenti (Hsü, 1975; Hungr, 1981; Morgenstern, 1985; Sassa, 1992; Fell, 1994; Scheidegger, 1994; Cruden&Varnes, 1996; Jakob, 2005). Un approccio che tenga in considerazione esclusivamente il grado di danneggiamento e le perdite appare del tutto scorretto poiché ciò è valutabile solo per i fenomeni avvenuti (contrariamente a quanto enunciato dalla definizione di pericolosità). Inoltre, dato che il danneggiamento dipende dalle caratteristiche fisiche e strutturali dei beni colpiti e non solo dall'intensità del fenomeno, un approccio di questo tipo apporta confusione tra i concetti di pericolosità e vulnerabilità. Analogamente le valutazioni dell'intensità effettuate esclusivamente secondo la velocità del fenomeno o le sue dimensioni risultano parziali e quindi non esaustive di una valutazione di intensità che possa essere utilizzata ai fini pianificatori. È, infatti, intuitivo come a parità di volume un fenomeno lento abbia un contenuto energetico minore rispetto ad un fenomeno rapido e, viceversa, a parità di velocità una massa in movimento più grande ha una energia maggiore di una più piccola.

Al fine di superare tali limitazioni, la metodologia proposta da ENEA è stata indirizzata a stimare l'intensità come uguale, o proporzionale, all'energia cinetica sviluppata da una frana potenziale. Un approccio di tale tipo però comporta una serie di passi intermedi che in questa sede sono stati sviluppati esclusivamente per le colate rapide dato che questo fenomeno appare il più gravoso per il territorio comunale di Messina.

### 9.1 Distanza di propagazione delle colate rapide

La valutazione delle distanze di propagazione degli eventi potenziali è stata effettuata per una serie di aree campione applicando le formule derivate dalla valutazione dall'analisi del *runout* effettuata su una serie di *debris-mud flow* accaduti nell'area dei Monti Peloritani. Gli eventi sono stati suddivisi in incanalati e non incanalati poiché è apparso evidente come i fenomeni che una volta attivatisi entrano in una linea di drenaggio preesistente hanno una lunghezza di propagazione, a parità di volumi mobilizzati e di energia potenziale superiore ai fenomeni che si sviluppano su versanti aperti, senza, cioè, un condizionamento morfologico che ne concentri il flusso in una determinata area di scorrimento.

In particolare sono stati presi in considerazione:

- 245 fenomeni non incanalati
  - 60 fenomeni canalizzati
- distribuiti omogeneamente su tutto il territorio comunale.

In prima analisi la valutazione del *runout* è stata effettuata secondo una metodologia ampiamente utilizzata in letteratura (Rickenmann, 1999; Crosta *et alii*, 2003; García-Ruiz *et alii*, 2002) graficando il prodotto del volume mobilizzato dai fenomeni per la differenza di quota tra il punto di innesco (PIFF) e il punto di arresto (PIP), in ascissa, e in ordinata la distanza effettiva percorsa dal fenomeno dal PIFF al PIP.

Per stimare il volume mobilizzato di ogni singolo fenomeno si è calcolato il prodotto della profondità massima dell'area di nicchia (che varia da 0,2 a 1,5 metri) per l'area di innesco, ricavata da fotointerpretazione; tale prodotto è stato poi ridotto al volume reale tramite un fattore di correzione della forma, ricavato sperimentalmente, pari a 0.62. Per non tralasciare i volumi

mobilizzati delle aree di transito sono stati considerati, in seguito ad osservazioni di terreno, dei valori medi di spessore di tali zone variabili da 0,2 a 1m.

In figura 1 e 2 in azzurro sono riportati i punti e le relative rette di interpolazione inerenti a tale prima analisi, le cui equazioni sono le seguenti:

- Fenomeni canalizzati:  $y = 4.861x^{0.329}$  con un errore quadratico medio  $R^2 = 0.894$ ;
- Fenomeni non canalizzati:  $y = 3.127x^{0.341}$  con un errore quadratico medio  $R^2 = 0.817$ .

Confrontando queste equazioni con quelle proposte da Rickenmann, risulta che per uguali volumi ed uguale  $\Delta h$  tra Piff e Pip il *runout* relativo ai Monti Peloritani è minore rispetto a quello di altre regioni analizzate da Rickenmann stesso.

Tali formule sono state successivamente riviste per rendere l'applicabilità a fenomeni potenziali più efficace e di più semplice utilizzo. In ascissa anziché il  $\Delta h$  tra Piff e Pip è stato scelto di mettere il  $\Delta h$  tra Piff e la rottura di pendio alla base del versante oltre la quale i fenomeni di colata perdono il potere erosivo, iniziano a depositare materiale e la velocità del fenomeno stesso inizia a decrescere. Tale rottura di pendio è stata individuata orientativamente nella isolina di pendenza del rilievo pari a  $28^\circ$ . La scelta di tale procedura è legata al fatto che la rottura di pendio è sempre automaticamente identificabile per i fenomeni potenziali mentre al contrario l'identificazione del Pip risulta intrinsecamente molto incerta. Infatti è molto complicato identificare il punto di arresto Pip senza uno specifico lavoro fotointerpretativo per ciascuna area di distacco potenziale e senza conoscere a priori la distanza di propagazione.

In figura 1 e 2 in rosso sono riportati i punti e le relative rette di interpolazione inerenti a tale seconda analisi, le cui equazioni sono le seguenti:

- Fenomeni canalizzati:  $y = 5.049x^{0.329}$  con un errore quadratico medio di  $R^2 = 0.887$
- Fenomeni non canalizzati:  $y = 3.099x^{0.346}$  con un errore quadratico medio  $R^2 = 0.807$ .

A conferma della attendibilità di questa nuova elaborazione è stato effettuato il confronto tra le curve originali e la loro evoluzione (figura 1 e 2) dal quale si evince la ottima corrispondenza e quindi la affidabilità delle seconde per la stima della distanza di propagazione. In base a tali curve, quindi, a partire dalla conoscenza del volume di materiale mobilizzabile è possibile stimare il *runout* di aree di innesco potenziali.

Nei fenomeni avvenuti il volume mobilizzato dall'evento è stato accuratamente calcolato secondo quanto precedentemente illustrato; viceversa per stimare il *runout* di fenomeni potenziali è necessario calcolare il volume mobilizzabile in aree suscettibili all'innesco, individuate come illustrato nel capitolo 7. A tal fine è stato necessario attribuire all'area di innesco e alimentazione uno spessore medio stimato empiricamente in 0.8 m.; per verificare l'attendibilità di tale semplificazione, su una serie di fenomeni avvenuti è stato confrontato il *runout* reale con quello stimato con il valore 0.8 dello spessore: l'affidabilità di tale semplificazione è risultata molto soddisfacente.

Inoltre, per discriminare quali fenomeni potenziali potessero essere incanalati e quali non incanalati si è proceduto a estrarre in maniera automatica la rete di drenaggio a partire dal DEM in possesso (2x2m). In questo modo sono state estratte tutte le linee di drenaggio insistenti sui versanti e nel fondovalle (fig. 3).

Si è poi proceduto a selezionare in maniera automatica i Piff potenziali che avessero una distanza lungo il profilo maggiore o minore di 55m dalla più vicina linea di drenaggio, assegnando l'attributo di incanalate ai punti più vicini di 55m e viceversa per i non incanalati. La soglia di 55m è stata ricavata empiricamente in base alla media delle distanze da linee di drenaggio dei fenomeni non incanalati realmente accaduti.

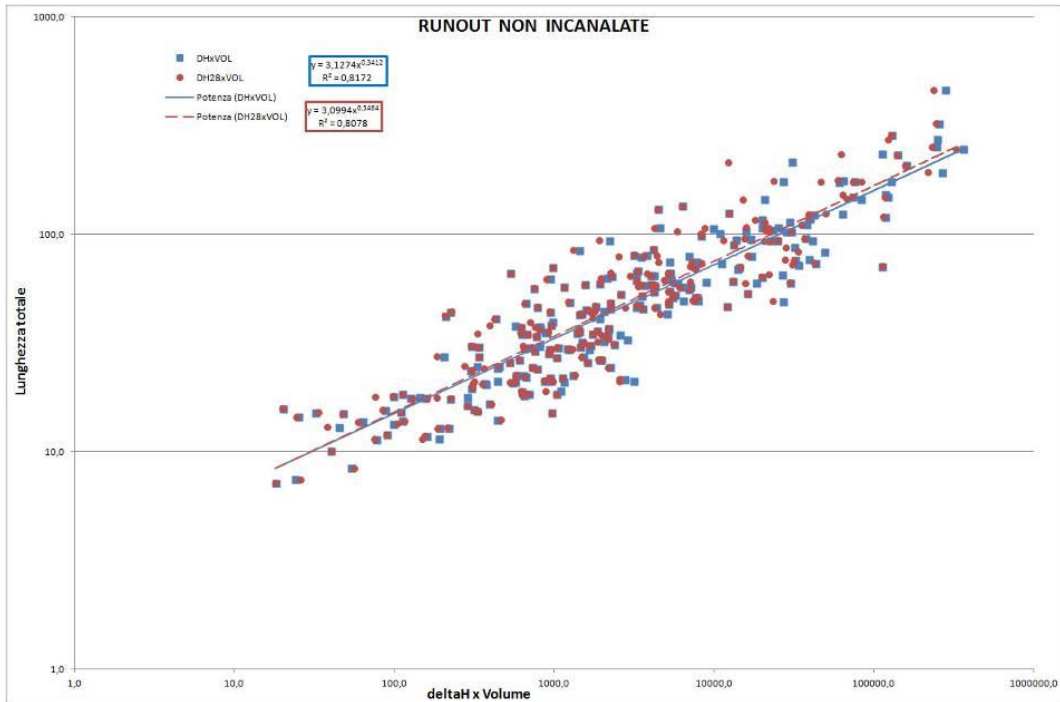


Figura 1 - Distanza di propagazione per fenomeni potenziali non incanalati: confronto delle curve costruite in base al  $\Delta h$  Piff- Pip (azzurro) e  $\Delta h$  Piff- quota della pendenza  $28^\circ$  sottostante l'area di innesco potenziale (rosso). Si noti la perfetta coincidenza delle due curve

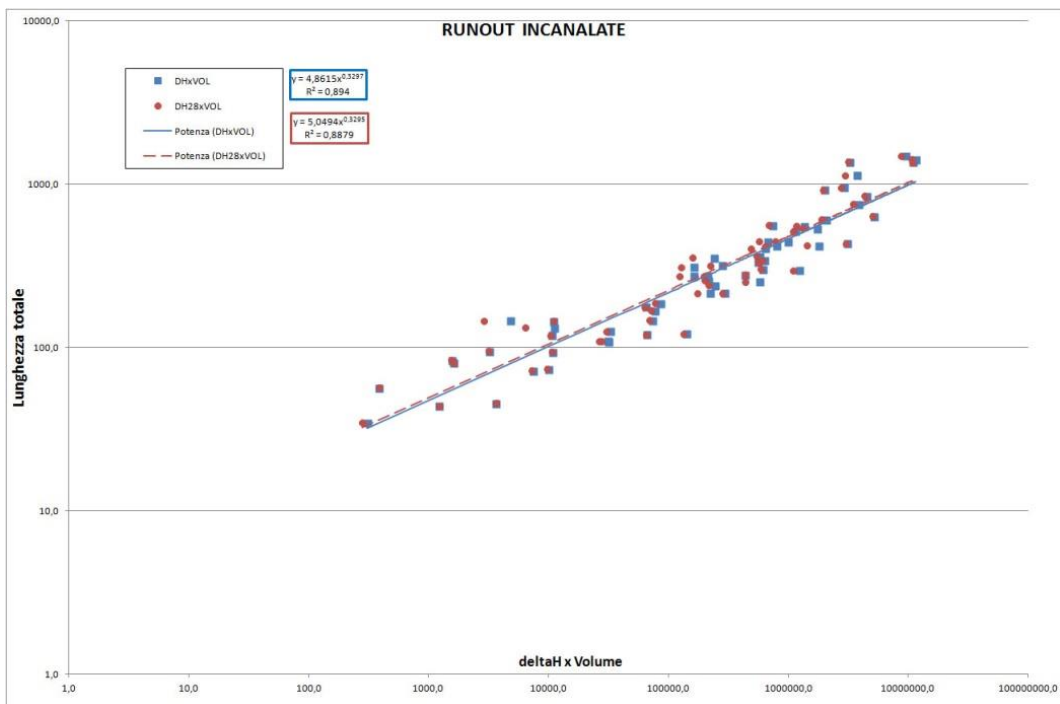


Figura 2 - Distanza di propagazione per fenomeni potenziali incanalati: confronto delle curve costruite in base al  $\Delta h$  Piff- Pip (azzurro) e  $\Delta h$  Piff- quota della pendenza  $28^\circ$  sottostante l'area di innesco potenziale (rosso). Si noti la perfetta coincidenza delle due curve

Conoscendo l'area di alimentazione e lo spessore della copertura (utilizzando la suddetta semplificazione) è stato quantificato il volume mobilizzabile. Misurando il  $\Delta h$  Piff - quota della pendenza  $28^\circ$  sottostante l'area di innesco potenziale ed applicando le formule illustrate, è stato possibile valutare la distanza di propagazione dei fenomeni potenziali.

Si è proceduto quindi a calcolare la distanza di propagazione per tutte le aree a suscettibilità molto elevata per colate rapide di fango e detrito (fig. 4).

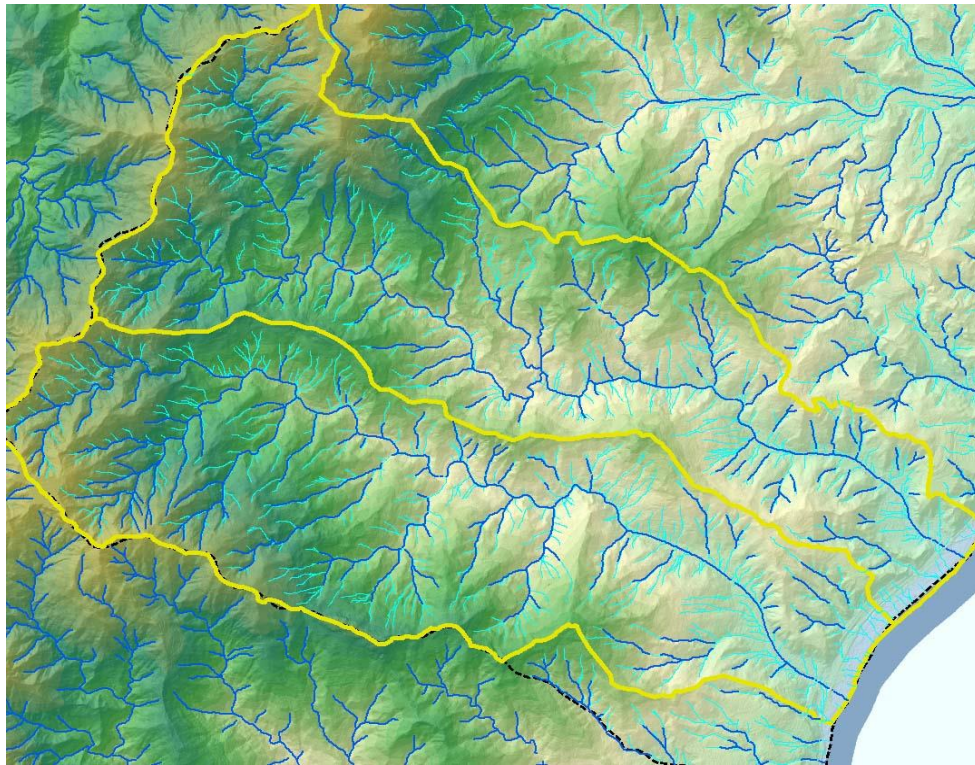


Figura 3 - Esempio di rete di drenaggio estratta automaticamente tramite GIS, In blu reticolo estratto dalla base topografica, in azzurro reticolo estratto tramite DEM 2x2

## 9.2 Intensità

In base allo stesso modello sono state individuate le potenziali aree di accumulo evidenziando le aree al piede del versante sottostante, a pendenze minori di  $28^\circ$ , dove i fenomeni perdendo energia iniziano a depositare materiale. L'intensità può essere espressa in una scala relativa, associandola a livelli di danneggiamento o perdite, oppure in termini di grandezze caratteristiche del fenomeno, come velocità, volume o energia (Hsü, 1975; Hungr, 1981; Morgenstern, 1985; Sassa, 1992; Fell, 1994; Scheidegger, 1994; Cruden & Varnes, 1996; Jakob, 2005). Secondo la metodologia adottata, l'intensità viene considerata come uguale, o proporzionale, all'energia cinetica sviluppata dalla frana, poiché le valutazioni per velocità e/o dimensioni possono risultare parziali.

Adottando l'approccio di Johnson & Rodine (1984), secondo i quali è possibile risalire alla velocità media partendo dalla misura del sopralzo fra due sponde opposte che si verifica in presenza di una curva per effetto della forza centrifuga, sono stati individuati, durante la fase di rilevamento, alcuni settori idonei alla misura delle velocità raggiunte dalle colate di fango e detrito occorse il 1 Ottobre 2009. I siti idonei sono costituiti da impluvi caratterizzati dalla presenza della traccia lasciata dal passaggio della colata rapida.

La formula per il calcolo della velocità media è:

$$V = \sqrt{R \times g \times \cos i \times \tan b}$$

dove:

- $V$  = velocità nel punto di misura,
- $R$  = raggio di curvatura dell'asse dell'impluvio considerato,
- $g$  = accelerazione di gravità,

- $i$  = pendenza del tratto di impluvio considerato,
- $b$  = inclinazione rispetto all'orizzontale della superficie della miscela fluida in moto, in corrispondenza della curva.

Applicando tale formula in diversi punti del percorso attraversato da ciascun *debris-mud flow*, sono state calcolate le velocità relative, in modo da ricostruire le curve di decelerazione nei siti considerati. Le velocità massime hanno valori compresi tra 8 e 16 m/s. A titolo esemplificativo in figura 5, viene riportata la curva di decelerazione relativa al bacino del Torrente Fallega.

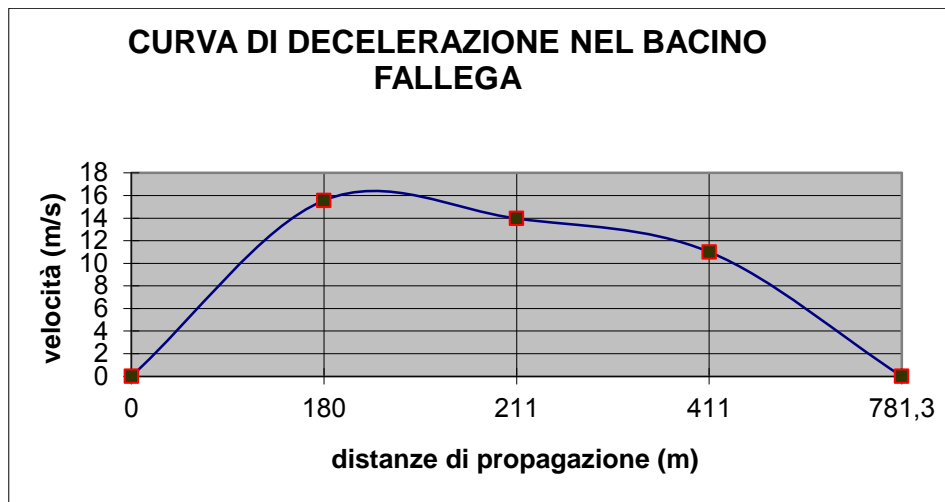


Figura 4 - Curva di decelerazione relativa al bacino del Torrente Fallega.



Figura 5 - Esempio di aree a suscettibilità molto elevata (retinato verde) con visualizzate le distanze di propagazione (giallo) espresse in metri e le energie cinetiche massime (rosa) espresse in migliaia di joule

Dopo aver ricavato la distanza di propagazione del fenomeno a cui è stato possibile applicare il calcolo della velocità, sono state valutate le energie sviluppate dalle colate rapide investigate. Sapendo che l'energia cinetica è pari a  $E = 1/2 MV^2$  sono stati stimati i valori di energia cinetica sviluppata lungo tutta la distanza percorsa dal fenomeno, in ogni punto in cui è stato effettuato il calcolo della velocità.

La stima delle energie è stata effettuata calcolando il prodotto della massa (M), pari al prodotto del volume per la densità media (stimata in  $2000 \text{ kg/m}^3$ ), per la velocità (V) per tutte le aree potenziali a suscettibilità molto elevata. Anche tale valore, espresso in migliaia di kjoule, è facilmente visualizzabile per ciascuna area di innesco potenziale, interrogando il *database* in ambiente GIS (fig. 4). Le energie sviluppate dall'innesco di fenomeni potenziali varia tra la decina e il migliaio di kjoule.

### 9.3 Bibliografia

- Crosta G. B., Dal Negro P., Frattini P. (2003) Soil slips and debris flows on terraced slopes Natural Hazard
- Cruden DM, Varnes DJ (1996). Landslide Types and Processes. In: Turner A.K. & Schuster R.L. (eds.) "Landslides: investigation and mitigation". Sp. - Rep. 247, Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington D.C., 36-75
- Fell R. (1994). Landslide risk assessment and acceptable risk. Can. Geotechn. J., 31 (2), 261-272
- García-Ruiz J.M., Beguería S., Lorente A., Martí C. (2002). Comparing debris flow relationships in the Alps and in the Pyrenees. Instituto Pirenaico de Ecología, Zaragoza, Spain
- Hsü K. (1975). Catastrophic debris stream (sturzstrom) generated by rockfalls. Bull. Geol. Soc. of America, 86, 129-140
- Hungr O. (1981). Dynamics of rock avalanches and other types of mass movements. PhD Thesis. University of Alberta
- Jakob M. (2005). A size classification for debris flows. Engineering Geology, 79 (3-4), pp. 151-161
- Johnson A.M. & Rodine J.R. (1984). Debris flow slope stability. Editors Brusden D. & Prior D.B., p. 257-361. John Wiley and Sons, New York
- Morgenstern N.R. (1985). Geotechnical aspects of environmental control. Proc. 11th ICSMFE, San Francisco, 1, 155-186
- Rickenmann D. (1999). Empirical Relationships for Debris Flows. Natural Hazards, 19: 47-77
- Sassa K. (1992). Access to the dynamic of landslides during earthquakes by a new cyclic loading high-speed ring apparatus. Proc. 6th Int. Symp. on Landslides, Christchurch (New Zealand), Balkema, 3, 1919-1937
- Scheidegger A.E. (1994). Hazards: singularities in geomorphic systems. Geomorphology, 10, 19-25

## 10. SOGLIE D'INNESCO DELLE COLATE RAPIDE

Nell'ambito delle misure di tipo "non strutturale" di mitigazione del rischio da colata rapida, i sistemi di monitoraggio delle frane, associati alle procedure di protezione civile, costituiscono una misura di mitigazione del rischio e di salvaguardia della popolazione particolarmente efficaci, in termini di rapporto costi/benefici. Essendo, inoltre, misure di tipo "non strutturale", sono anche caratterizzati da un elevato livello di sostenibilità ambientale. Attualmente, i sistemi di tipo areale sono basati principalmente sui dati pluviometrici che fanno riferimento a soglie di innesco definite sulla base della correlazione tra precipitazioni ed innesco dei fenomeni franosi. Tuttavia, il fattore più direttamente connesso all'innesco delle colate rapide è lo stato di umidità del terreno che dipende, non solo dall'intensità delle precipitazioni in un dato momento, ma anche dal regime termo-pluviometrico del periodo precedente.

La comunità scientifica e le amministrazioni pubbliche preposte alla difesa del suolo e impegnate nella definizione di misure di mitigazione ed adattamento ai fenomeni franosi, rivolgono grande attenzione verso la predisposizione di sistemi di monitoraggio e allarme connessi ai piani di protezione civile (Terlien, 1988; Aleotti, 2004; Guzzetti *et alii*, 2007; Pizziolo *et alii*, 2008; Brunetti *et alii*, 2010; Cevasco *et alii*, 2010; Basile & Panebianco, 2011). La combinazione di dati pluviometrici e dello stato di saturazione del suolo può fornire un contributo significativo nella definizione delle soglie di innesco delle colate rapide e la predisposizione di sistemi di allerta rapida (*early warning*) connessi con i piani di protezione civile in grado di aiutare la mitigazione del rischio geomorfologico specifico. In questo studio, si è cercato di fornire degli elementi aggiuntivi alle conoscenze sulle precipitazioni critiche e sullo stato di saturazione dei suoli tipici dell'area, concentrandosi esclusivamente sulle soglie d'innesco delle colate rapide per due ordini di motivi:

- tra le diverse tipologie di frana, le colate rapide sono quelle più direttamente dipendenti dalle precipitazioni e dallo stato di saturazione della coltre superficiale del suolo. Esse, infatti, avvengono principalmente in corrispondenza di precipitazioni intense, lungo versanti a media ed elevata pendenza, per liquefazione statica e successiva fluidificazione della coltre di terreno superficiale in seguito a parziale o completa saturazione;
- l'archivio storico sviluppato nel progetto (Capitolo 1) ha un insieme di dati limitato (207 *record*, escludendo quelli relativi al terremoto del 1908). Al suo interno, solo le colate rapide (124 *record*, 60% del totale) raggiungono una numero che possa permettere delle elaborazioni statistiche significative.

Lo studio è stato condotto distinguendo due livelli differenti:

- definizione di soglie basate sui dati pluviometrici giornalieri corrispondenti agli eventi franosi presenti nell'archivio storico;
- definizione di soglie basate sui dati pluviometrici orari corrispondenti agli eventi più recenti ed, in particolar modo, all'evento del 1° ottobre 2009.

I dati pluviometrici utilizzati nei due livelli dello studio derivano da due fonti distinte, entrambe della Regione Sicilia:

- Osservatorio delle Acque del Dipartimento dell'Acqua e dei Rifiuti;
- Dipartimento Regionale della Protezione Civile.

### 10.1 Soglie pluviometriche giornaliere

Lo studio sulle soglie d'innesco giornaliere è stato basato sui dati raccolti nell'archivio storico (Capitolo 2) che conta 163 *record* georiferiti di frane avvenute tra il 1933 ed il 2011 (fig. 1) di cui 124 colate rapide. Per la correlazione con i *record* dell'archivio storico sono stati utilizzati i

dati delle stazioni idrotermopluviometriche della rete dell'Osservatorio delle Acque della Regione Sicilia (<http://www.osservatorioacque.it>) che pubblica gli annali di 255 stazioni distribuite in tutta la Sicilia. Le serie pluviometriche delle 6 stazioni presenti nel territorio comunale di Messina, sebbene parzialmente incomplete, coprono un intervallo temporale abbastanza lungo che va dai primi anni del '900 fino al decennio in corso (tab. 1).

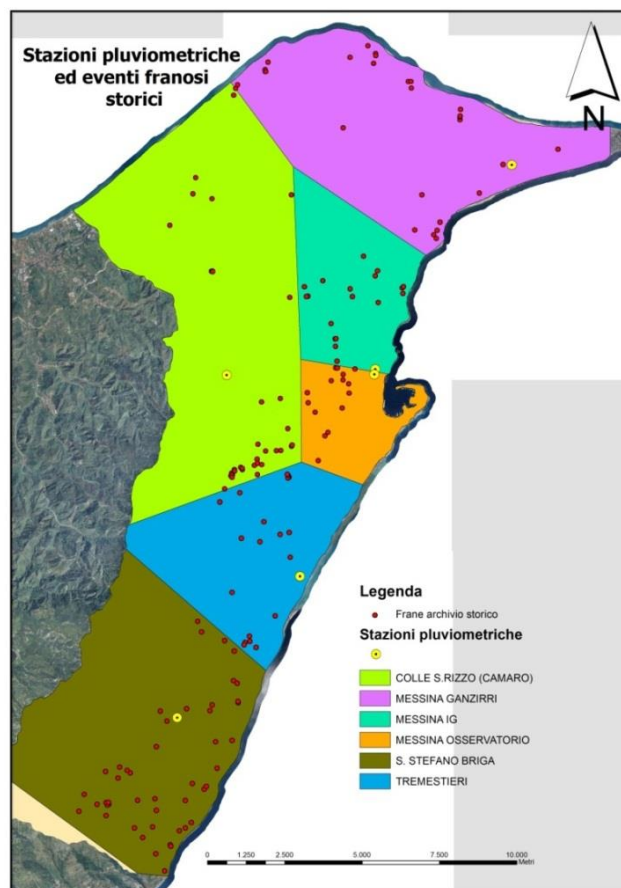


Figura 1 – Distribuzione delle frane contenute nell'archivio storico

Nome stazione	Dati giornalieri disponibili	Dati mensili disponibili
COLLE S.RIZZO (CAMARO)	1989-2008	1925-2003
MESSINA GANZIRRI	1953-2010	1921-2003
MESSINA IG	1952-2007	1938-2003
MESSINA OSSERVATORIO	1951-1995	1916-1995
S. STEFANO BRIGA	1951-2007	1924-2001
TREMESTIERI	1951-1996	1920-1996

Tabella 1 – Disponibilità dati delle sei stazioni dell'Osservatorio delle Acque presenti sul territorio messinese

I dati disponibili sono di diverso genere:

- dati giornalieri (Osservazioni pluviometriche giornaliere );
- dati mensili (Totali annui e riassunto dei totali mensili delle quantità di precipitazione);
- massima intensità (Precipitazioni di massima intensità);

- dato cumulato per numero di giorni (Massime precipitazioni dell'anno per periodi di più giorni consecutivi);
- eventi eccezionali (Precipitazioni di notevole intensità e breve durata).

Successivamente all'analisi dei dati disponibili, l'insieme di dati delle colate rapide si è ridotto a 72 *record* in seguito ad una operazione di "scrematura" attraverso la quale sono stati esclusi:

- 2 *record* la cui data non è stata univocamente definita (n° 71 del 1988 nei pressi del Villaggio di Cumia e il n° 83 sviluppatosi tra il 3 e l'8 ottobre del 1996);
- 21 *record* per i quali non è stato riscontrato il dato giornaliero all'interno degli annali dell'Osservatorio delle Acque della Regione Sicilia;
- 29 *record* del biennio 2010-2011, per i quali non sono stati reperiti i dati pluviometrici.

Nella fase di identificazione delle soglie, sono stati esclusi anche i 26 *record* per i quali la piovosità nel giorno dell'evento è risultata inferiore a 15mm. L'insieme dei *record* delle colate rapide contenuto nell'archivio storico ed utilizzato per la definizione delle soglie di innesco giornaliero si è conseguentemente ridotto a 46 dati (tab. 2).

La distribuzione temporale delle 46 colate rapide contenute nell'archivio storico indica una concentrazione nei mesi autunnali, con un massimo ad ottobre (tab. 3; fig. 2). Il confronto con la piovosità media dell'area<sup>1</sup> evidenzia che il picco di franosità anticipa leggermente il picco di piovosità e si riduce quando la piovosità raggiunge il massimo (a dicembre). L'analisi dei giorni piovosi superiori ai 5mm precedenti il giorno di accadimento della colata rapida (fig. 3) mostra l'importanza degli eventi di durata minima (1 giorno). Queste due informazioni insieme suggeriscono che eventi pluviometrici intensi nei mesi autunnali sono sufficienti per innescare colate rapide. A questo risultato contribuisce, probabilmente, lo stato di aridità del suolo conseguente ai periodi di bassa piovosità, se non siccità, estiva, che favoriscono la formazione di fratture di essiccamento nel terreno, l'infiltrazione di acqua nel suolo e il raggiungimento di condizioni di saturazione.

I dati delle precipitazioni del giorno di accadimento sono stati messi a confronto con quelli dei 2, 3, 7, 15 e 30 giorni precedenti. Le cumulate dei giorni precedenti sono state computate al netto della pioggia del giorno di accadimento dell'evento<sup>2</sup>. Sono stati utilizzati sia i dati interi che quelli normalizzati (espressi in %):

- alla piovosità annuale della stazione di riferimento dell'anno dell'evento franoso;
- al valore medio della piovosità annuale della serie storica della stazione di riferimento.

Inoltre, il confronto con le cumulate normalizzate dei giorni precedenti l'evento è stato effettuato anche con i dati normalizzati delle precipitazioni di evento, intese come la sommatoria delle precipitazioni dei giorni piovosi precedenti l'evento franoso con piovosità superiore a 5mm.

Le colate rapide sono state distinte in due sottoinsiemi in base al numero di *record* concomitanti (stessa data): alle colate rapide che non hanno avuto eventi concomitanti nello stesso giorno e quelle con un solo altro evento concomitante, è stata attribuita una classe bassa di "severità di evento franoso"; alle colate rapide che hanno avuto più di due eventi concomitanti è stata attribuita una classe alta.

Tra le diverse combinazioni sperimentate, quella che ha fornito un quadro maggiormente significativo, è stata quella tra i dati normalizzati alla precipitazione annua della stazione (figg. 4, 5, 6, 7 e 8).

<sup>1</sup> Il dato pluviometrico utilizzato in questa tabella si riferisce alla media mensile delle sei stazioni ARRA presenti sul territorio messinese (intervallo temporale delle serie storiche: 1916-2003)

<sup>2</sup>  $P_{cux} = \sum P(x, 1) - P_1$

ID	Data	Località	Stazione di riferimento	N° record	P1 (mm)	C2 (mm)	C3 (mm)	C7 (mm)	C15 (mm)	C30 (mm)	D	Ce (mm)	Pm (mm)	Pa (mm)	Pma (mm)
51	13/10/1955	Messina - Lungo la SP Annunziata-Monte Gallo	Messina IG	2	21,8	31,8	31,8	82,2	139,6	185,2	2	31,8	173,8	820,4	730,8
53	06/11/1974	Cumia	Colle S.Rizzo (Camaro)	7	54,2	175,6	193,6	235,8	275,6	397,4	3	193,6	285,4	1.409,0	1.109,3
54	06/11/1974	San Filippo Superiore	Colle S.Rizzo (Camaro)	7	54,2	175,6	193,6	235,8	275,6	397,4	3	193,6	285,4	1.409,0	1.109,3
55	06/11/1974	Viale Bocchetta	Messina Osservatorio	7	32,2	85,6	123,6	156,0	178,4	256,4	3	123,6	184,4	879,0	888,2
56	06/11/1974	Pezzolo	S.Stefano Briga	7	44,0	124,0	134,0	170,0	183,0	375,0	3	134,0	224,4	1.031,8	992,0
57	06/11/1974	Altolia-Molino	S.Stefano Briga	7	44,0	124,0	134,0	170,0	183,0	375,0	3	134,0	224,4	1.031,8	992,0
58	06/11/1974	Mili San Pietro	S.Stefano Briga	7	44,0	124,0	134,0	170,0	183,0	375,0	3	134,0	224,4	1.031,8	992,0
59	06/11/1974	Mili San Marco	Tremestieri	7	31,3	179,9	189,2	221,8	336,8	583,1	3	189,2	258,4	1.313,3	849,6
63	30/10/1985	San Filippo Superiore	Colle S.Rizzo (Camaro)	6	50,0	225,2	280,2	290,8	305,2	312,2	5	290,8	312,2	1.446,4	1.109,3
64	30/10/1985	Mili	Colle S.Rizzo (Camaro)	6	50,0	225,2	280,2	290,8	305,2	312,2	5	290,8	312,2	1.446,4	1.109,3
65	30/10/1985	Galati	S.Stefano Briga	6	80,0	240,0	297,0	332,0	347,0	385,5	5	332,0	370,5	1.317,7	992,0
66	30/10/1985	Cumia	Colle S.Rizzo (Camaro)	6	50,0	225,2	280,2	290,8	305,2	312,2	5	290,8	312,2	1.446,4	1.109,3
67	30/10/1985	Messina Centro	Messina Osservatorio	6	40,0	148,6	183,0	186,0	194,8	211,6	4	185,6	211,6	993,4	888,2
68	30/10/1985	Messina - Lungo la A18 Messina-Catania al km 8	Colle S.Rizzo (Camaro)	6	50,0	225,2	280,2	290,8	305,2	312,2	5	290,8	312,2	1.446,4	1.109,3

73	06/03/1988	Molino	S.Stefano Briga	1	20,0	130,0	181,0	232,5	284,3	412,9	3	181,0	371,5	1.173,3	992,0
76	05/11/1991	Casabianca - Lungo la SS n. 113 al km 15+700	Messina Ganzirri	1	18,2	18,2	18,2	34,6	60,4	114,8	1	18,2	67,6	656,2	784,1
79	08/02/1996	Svincolo Messina Bocchetta	Messina Osservatorio	1	18,2	20,0	43,8	56,6	107,0	137,2	5	55,4	130,8	1.237,2	888,2
81	15/03/1996	Via Consolare Pompea	Messina IG	1	34,2	46,0	46,0	59,0	102,2	143,8	2	46,0	131,8	1.237,2	730,8
82	02/10/1996	San Michele Poggio dei Pini	Messina IG	1	155,8	155,8	155,8	162,6	206,6	236,0	1	155,8	293,6	1.237,2	730,8
89	27/09/1998	Contrada Marotta (Torrente Pace verso Curcuraci)	Messina Ganzirri	10	31,0	31,0	31,0	37,0	58,4	90,8	1	31,0	103,0	614,4	784,1
90	27/09/1998	Tono	Messina Ganzirri	10	31,0	31,0	31,0	37,0	58,4	90,8	1	31,0	103,0	614,4	784,1
92	27/09/1998	Messina - Lungo la Strada Panoramica dello Stretto	Messina Ganzirri	10	31,0	31,0	31,0	37,0	58,4	90,8	1	31,0	103,0	614,4	784,1
93	27/09/1998	Tremonti - Acqualadroni	Messina Ganzirri	10	31,0	31,0	31,0	37,0	58,4	90,8	1	31,0	103,0	614,4	784,1
95	27/09/1998	San Saba	Messina Ganzirri	10	31,0	31,0	31,0	37,0	58,4	90,8	1	31,0	103,0	614,4	784,1
98	27/09/1998	C.da Marotta (Torrente Pace)	Messina Ganzirri	10	31,0	31,0	31,0	37,0	58,4	90,8	1	31,0	103,0	614,4	784,1
111	11/12/1999	Casabianca - Lungo la SS n. 113	Messina Ganzirri	1	33,2	45,2	45,2	66,0	82,0	155,4	2	45,2	129,8	729,2	784,1
113	07/09/2000	Altolia - Lungo la SP n. 33	S.Stefano Briga	4	124,8	124,8	124,8	124,8	124,8	124,8	1	124,8	159,0	801,0	992,0
114	07/09/2000	Briga Marina - Giampileri Marina (lungo la SS n. 114)	S.Stefano Briga	4	124,8	124,8	124,8	124,8	124,8	124,8	1	124,8	159,0	801,0	992,0

115	07/09/2000	Giampilieri Sup. - Altolia - Molino (lungo la SP n. 33)	S.Stefano Briga	4	124,8	124,8	124,8	124,8	124,8	124,8	124,8	124,8	124,8	1	124,8	159,0	801,0	992,0
116	07/09/2000	Molino	S.Stefano Briga	4	124,8	124,8	124,8	124,8	124,8	124,8	124,8	124,8	124,8	1	124,8	159,0	801,0	992,0
117	08/09/2000	Capo Scaletta - Lungo la SS n. 114	S.Stefano Briga	5	23,6	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	1	124,8	159,0	801,0	992,0
118	08/09/2000	Giampilieri - Pezzolo (lungo la strada)	S.Stefano Briga	5	23,6	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	1	124,8	159,0	801,0	992,0
119	08/09/2000	Giampilieri Marina - Lungo la SS n. 114	S.Stefano Briga	5	23,6	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	1	124,8	159,0	801,0	992,0
120	08/09/2000	Giampilieri - Briga Superiore (lungo la strada)	S.Stefano Briga	5	23,6	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	1	124,8	159,0	801,0	992,0
121	08/09/2000	Giampilieri-Briga	S.Stefano Briga	5	23,6	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	1	124,8	159,0	801,0	992,0
148	25/10/2007	Giampilieri	S.Stefano Briga	2	102,0	102,4	103,8	250,8	260,8	341,2	341,2	341,2	341,2	1	102,0	324,4	1.345,2	992,0
149	25/10/2007	Santa Margherita	S.Stefano Briga	2	102,0	102,4	103,8	250,8	260,8	341,2	341,2	341,2	341,2	1	102,0	324,4	1.345,2	992,0
155	30/01/2009	Mili	S.Stefano Briga	1	21,0	33,4	94,6	115,4	293,0	380,2	380,2	380,2	380,2	3	94,6	380,2	1.367,2	992,0
166	01/10/2009	Santa Margherita	S.Stefano Briga	8	216,8	216,8	216,8	224,8	305,8	357,0	357,0	357,0	357,0	1	216,8	315,6	1.367,2	992,0
167	01/10/2009	Briga Marina	S.Stefano Briga	8	216,8	216,8	216,8	224,8	305,8	357,0	357,0	357,0	357,0	1	216,8	315,6	1.367,2	992,0
168	01/10/2009	Briga Superiore	S.Stefano Briga	8	216,8	216,8	216,8	224,8	305,8	357,0	357,0	357,0	357,0	1	216,8	315,6	1.367,2	992,0
169	01/10/2009	Pezzolo	S.Stefano Briga	8	216,8	216,8	216,8	224,8	305,8	357,0	357,0	357,0	357,0	1	216,8	315,6	1.367,2	992,0
170	01/10/2009	Giampilieri Marina	S.Stefano Briga	8	216,8	216,8	216,8	224,8	305,8	357,0	357,0	357,0	357,0	1	216,8	315,6	1.367,2	992,0

171	01/10/2009	Giampileri Superiore	S.Stefano Briga	8	216,8	216,8	216,8	216,8	216,8	224,8	305,8	357,0	1	216,8	315,6	1.367,2	992,0
172	01/10/2009	Molino	S.Stefano Briga	8	216,8	216,8	216,8	216,8	224,8	305,8	357,0	1	216,8	315,6	1.367,2	992,0	
173	01/10/2009	Altolia	S.Stefano Briga	8	216,8	216,8	216,8	216,8	224,8	305,8	357,0	1	216,8	315,6	1.367,2	992,0	

Tabella 2 – Record utilizzati nell’analisi delle soglie d’innesco di 1° livello

- ID: numerazione progressiva dei *record* degli eventi franosi;
- Data: data di accadimento dell’evento franoso;
- Località: ubicazione dell’evento franoso;
- Stazione di riferimento: stazione idrotermopluviometrica più vicina;
- N° *record*: numero di eventi franosi (*record*) presenti nell’archivio con medesima data di accadimento (anche se riferiti a stazioni differenti);
- P1 (mm): entità delle precipitazioni registrate dalla stazione di riferimento nel giorno di accadimento<sup>3</sup> dell’evento franoso;
- C2, 3, 7, 15 e 30: cumulate delle precipitazioni registrate dalla stazione di riferimento nei 2, 3, 7, 15 e 30 giorni precedenti, comprese le precipitazioni (P1) del giorno di accadimento dell’evento;
- D: numero di giorni, con piovosità superiore ai 5mm, precedenti la data di accadimento dell’evento franoso (durata evento) registrate dalla stazione di riferimento;
- Ce (mm): entità delle precipitazioni nella stazione di riferimento nei giorni precedenti la data di accadimento dell’evento franoso, con piovosità superiore ai 5mm;
- Pm: entità delle precipitazioni nella stazione di riferimento nel mese di accadimento dell’evento franoso;
- Pa: entità delle precipitazioni nella stazione di riferimento nell’anno di accadimento dell’evento franoso;
- Pma: dato medio annuo della serie storica della stazione di riferimento.

<sup>3</sup> I dati giornalieri dell’Osservatorio sono relativi ad un intervallo temporale compreso tra le 09:00 di un giorno (X) e le 09:00 del giorno successivo (X+1) e sono attribuiti al giorno X+1. I dati giornalieri utilizzati, per tanto, sono quelli relativi al giorno successivo a quello di accadimento dell’evento franoso.

Mese	N° frane	% n° frane	P mensile media
Gennaio	1	2,2%	131,7
Febbraio	1	2,2%	85,8
Marzo	2	4,3%	90,5
Aprile	0	0,0%	63,2
Maggio	0	0,0%	32,8
Giugno	0	0,0%	20,6
Luglio	0	0,0%	14,3
Agosto	0	0,0%	24,7
Settembre	15	32,6%	67,0
Ottobre	18	39,1%	139,7
Novembre	8	17,4%	121,2
Dicembre	1	2,2%	118,0
<b>TOTALE</b>	<b>46</b>	<b>100,0%</b>	<b>909,5</b>

Tabella 3 – Distribuzione eventi franosi per mese e precipitazioni mensili

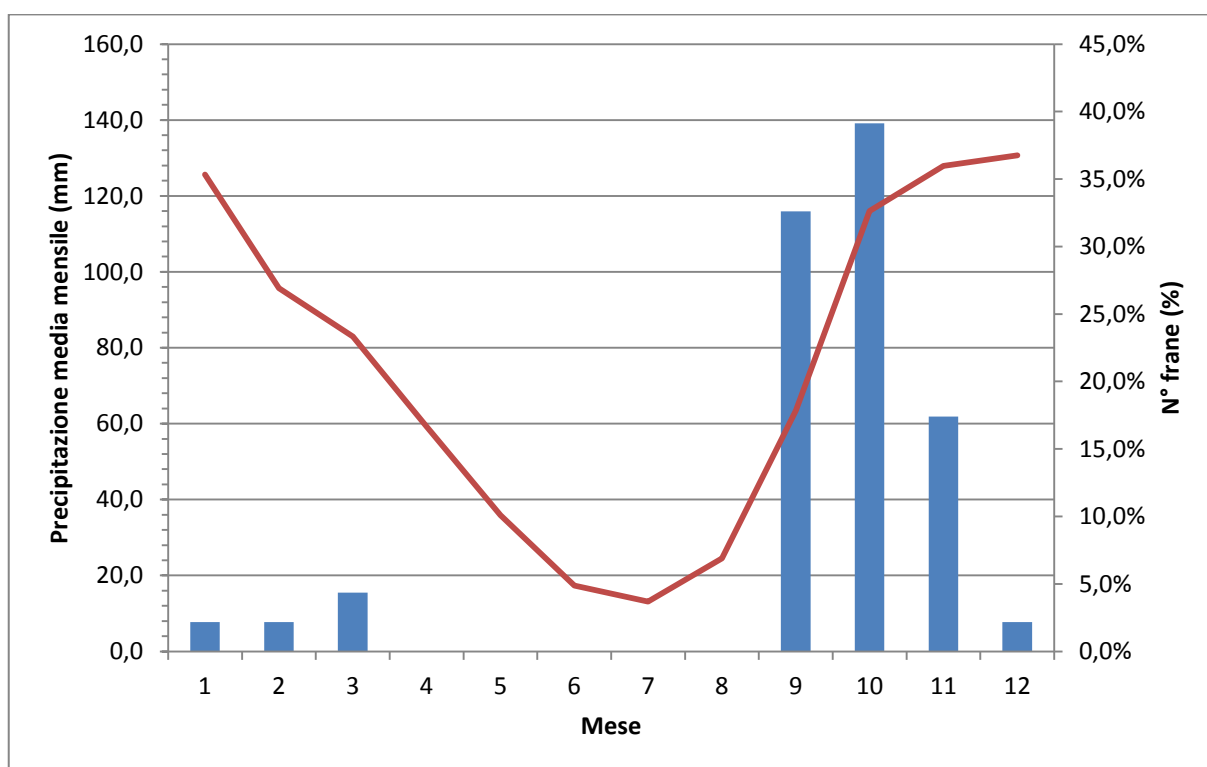


Figura 2 – Distribuzione eventi franosi per mese e precipitazioni mensili

Le linee di tendenza della distribuzione dei valori normalizzati di questi due sottoinsiemi permette di distinguere 3 diversi campi:

- inferiore alla soglia di accadimento di eventi franosi di severità bassa;
- intermedio tra le soglie di accadimento di eventi franosi di severità bassa ed alta;
- superiore alla soglia di accadimento di eventi franosi di severità alta.

Nei grafici sono evidenziati gli eventi del 07/09/2000 (cerchio azzurro), del 25/10/2007 (cerchio arancione) e del 01/10/2009 (cerchio viola) che si collocano sempre al di sopra della linea di soglia alta, tranne per i primi due grafici dell'evento del 2007.

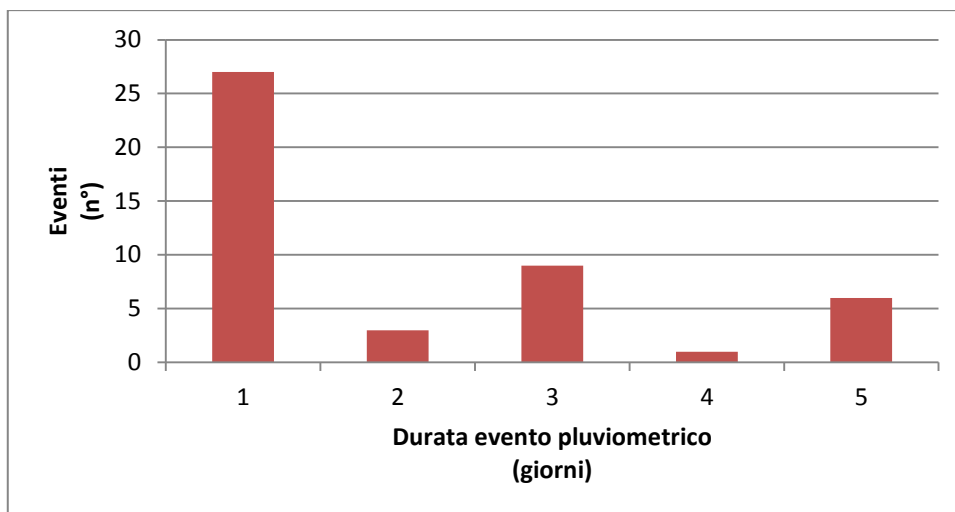


Figura 3 – Distribuzione eventi franosi per durata degli eventi piovosi

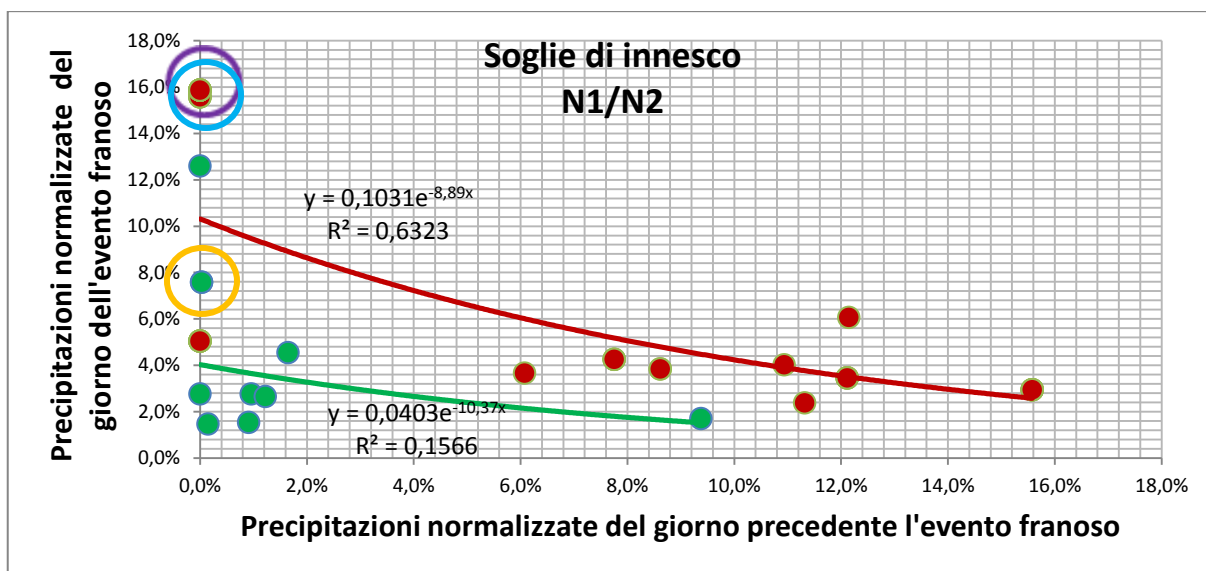


Figura 4 – Precipitazioni normalizzate del giorno di accadimento e del giorno precedente

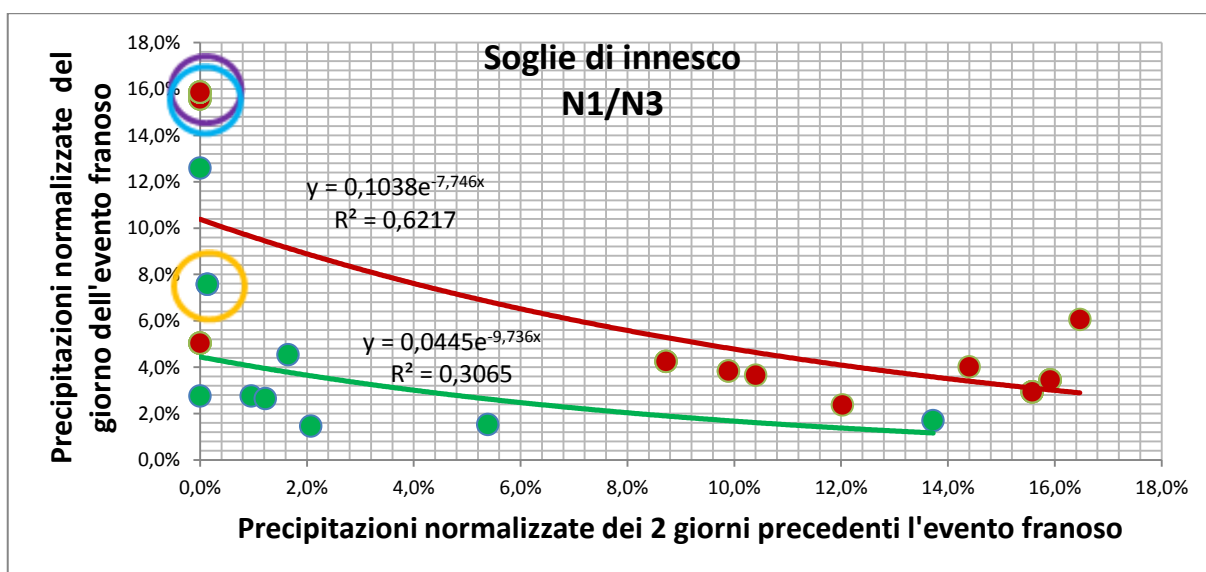


Figura 5 – Precipitazioni normalizzate del giorno di accadimento e dei 2 giorni precedenti

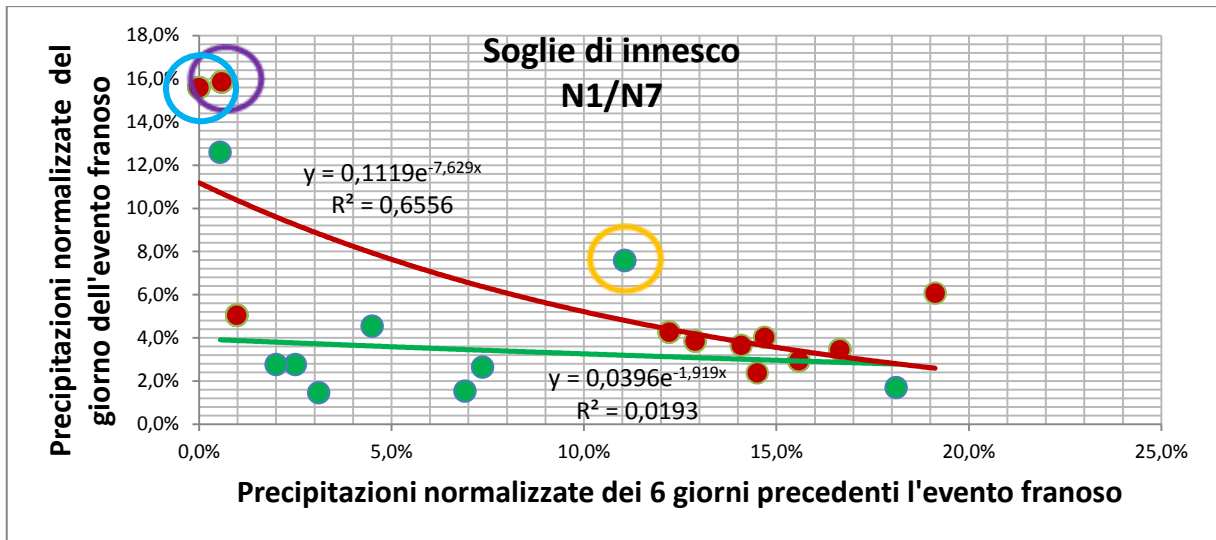


Figura 6 – Precipitazioni normalizzate del giorno di accadimento e dei 6 giorni precedenti

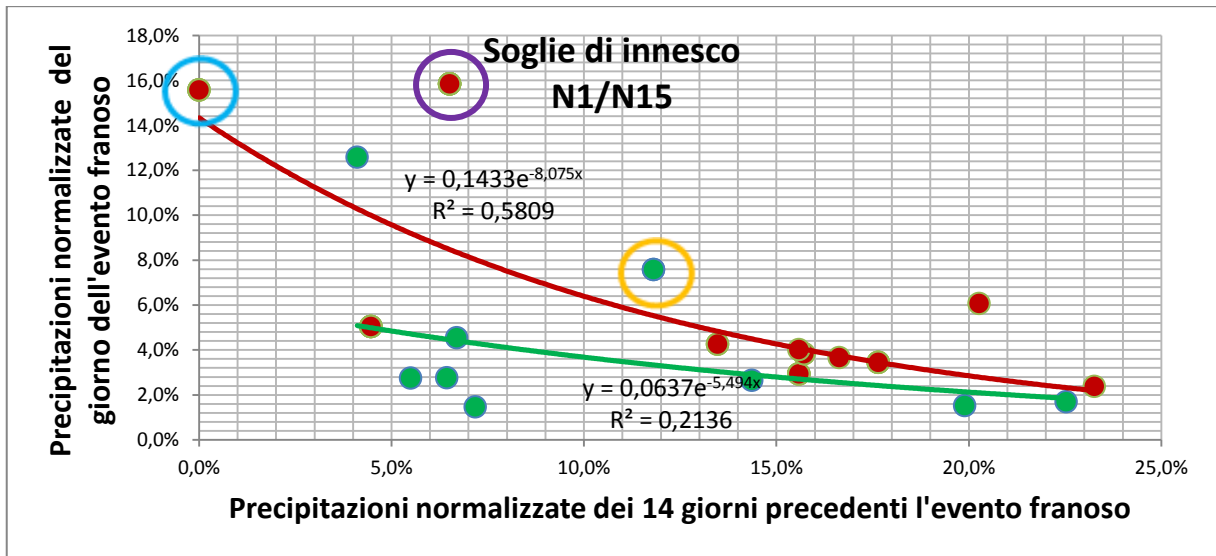


Figura 7 – Precipitazioni normalizzate del giorno di accadimento e dei 14 giorni precedenti

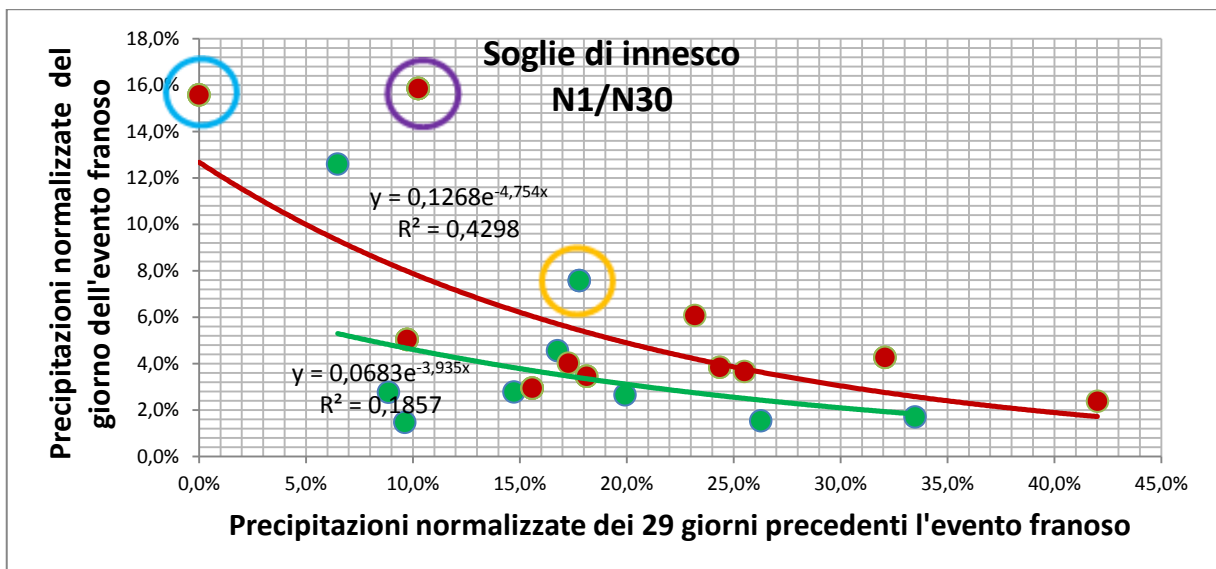


Figura 8 – Precipitazioni normalizzate del giorno di accadimento e dei 29 giorni precedenti

## 10.2 Soglie pluviometriche e di saturazione del suolo su base oraria

L'obiettivo specifico di questa parte dello studio è stato l'approfondimento delle conoscenze sulla variazione dello stato di saturazione del terreno in relazione al regime termo-pluviometrico. L'analisi della correlazione tra dati pluviometrici orari e valori di umidità del terreno è stato condotto tramite l'installazione in campo di sonde FDR (fig. 9), strumenti per la misurazione dell'umidità del suolo (Veldkamp & O'Brien, 2000; Greco & Guida, 2008) in siti caratterizzati dal punto di vista geomorfologico e geotecnico. I due campi prove sono stati ubicati nei pressi delle stazioni meteo climatiche della Protezione Civile di Giampileri e Pezzolo. I dati utilizzati sono stati:

- i dati delle sonde FDR installate nei pressi dei centri abitati di Giampileri e Pezzolo;
- i dati pluviometrici della stazione ARRA di S. Stefano di Briga relativi al settembre-ottobre del 2009;
- i dati pluviometrici da maggio ad ottobre del 2012 delle 2 stazioni di Giampileri e Pezzolo della Regione Sicilia (Protezione Civile) poste nelle immediate vicinanze dei siti di ubicazione delle sonde FDR.

Le sonde FDR (acronimo di *Frequency Domain Reflectometry* – Riflettometria nel Dominio della Frequenza) utilizzate nello studio costituiscono un valido metodo “non invasivo” di misura del contenuto d'acqua di un terreno, poiché, diversamente dai classici prelievi diretti, non comportano un disturbo troppo marcato del terreno. Ciò è reso possibile dalla costante evoluzione dell'hardware elettronico, grazie al quale la tecnologia detta TDR (acronimo di *Time Domain Reflectometry* – Riflettometria nel Dominio del Tempo), è stata implementata in strumenti dalle ridotte dimensioni e con costi “di mercato”. Questa tecnologia, sviluppata nei primi decenni del XX secolo negli Stati Uniti al fine di individuare, in caso di guasto, l'esatto punto di rottura delle linee telefoniche, è stata negli anni approfondita e adattata alle misure in campo geotecnico. Evoluzione delle TDR sono le sonde FDR, categoria cui appartengono le sonde SM100 utilizzate nello studio. Lo strumento genera un segnale che, inviato al terreno, viene riflesso con velocità variabile a seconda del contenuto d'acqua presente. Un'opportuna calibrazione della sonda permette così di relazionare il segnale riflesso con il reale contenuto d'acqua del terreno.

Al fine di testare la strumentazione e le modalità di installazione della stessa, nel mese di dicembre 2011 è stato realizzato un campo prove nel Centro di Ricerca ENEA della Casaccia a Roma. Nel sito della Casaccia è stata individuata un'area con caratteristiche morfologiche quanto più simili a quelle di interesse per il presente studio e che avesse quindi, quantomeno, una modesta acclività (fig. 11). Dal punto di vista litologico, al contrario, l'area della Casaccia è completamente diversa da quella di Messina essendo presente essenzialmente un substrato tufaceo con, al disopra una coltre di suolo costituita prevalentemente da materiale di riporto.

In quest'area, sono state effettuate tre trincee (fig. 12), di cui una lungo una modesta scarpata e le altre due a monte e a valle della scarpata stessa. All'interno di ognuna delle trincee sono state collocate le sonde FDR (fig. 13), in corrispondenza delle quali è stato prelevato un campione di suolo destinato alle analisi di laboratorio.

Nei siti di Messina, invece, sono stati realizzati degli scavi a mano, profondi approssimativamente 1 metro e larghi il necessario a raggiungere la profondità con la strumentazione apposita (tab. 4; fig. 13 e 14). Nel taglio verticale dello scavo sono state inserite le sonde FDR a distanza una dall'altra di circa 30-40 cm. Una volta inserite le sonde, lo scavo è stato richiuso con lo stesso suolo precedentemente estratto. Ogni sonda è stata collegata tramite un cavo ad un *data logger* di registrazione dei dati. Quest'ultimo è stato collocato in una piccola scatola stagna posta in superficie (fig. 10). Il *data logger* di ogni punto di misura è stato configurato per registrare dati di carattere orario, acquisiti periodicamente da un operatore attraverso un *data shuttle* e archiviati in un *database* specifico.



Figure 9 e 10 – Sonde FDR in fase di installazione (a sinistra) e pozzetto e *data logger* (a destra)



Figure 11 - Area di installazione delle sonde nel Centro Ricerche ENEA della Casaccia



Figure 12 e 13 - Trincea realizzata nel sito della Casaccia (a sinistra) e sonda FDR sulla parete di scavo (a destra)

La variazione dello stato di saturazione, oltre che dall'input pluviometrico, è funzione anche delle caratteristiche chimiche e granulometriche del suolo in cui viene posta la sonda. Durante lo scavo, sono stati raccolti dei campioni di terreno in corrispondenza dei livelli di collocamento delle sonde FDR. I suoli rilevati sono stati relazionati con le tipologie di suolo identificate con i progressi rilievi pertinenti al lavoro "Carta dei suoli in scala 1:250.000 della Sicilia", eseguiti

dalla Regione Sicilia con il coordinamento del CRA (Centro di ricerca per l'Agrobiologia e Pedologia di Firenze), e resi disponibili presso il Centro CRA-RPS per scopi di ricerca. Sui campioni sono state eseguite analisi di laboratorio mirate a definire le principali caratteristiche fisico-idrologiche dei suoli, in particolare la granulometria, la massa volumica apparente e il contenuto d'acqua a vari livelli di tensione necessari alla ricostruzione, per ogni orizzonte di suolo, della curva caratteristica di ritenzione idrica.

Nome sito	Caratteristiche dell'area		Campioni indisturbati		Campioni disturbati		Sonde FDR	
	Ubicazione	Tipologia	N° cilindro	Profondità da p.c. (cm)	Sigla	Profondità da p.c. (cm)	Sigla	Profondità da p.c. (cm)
Pezzolo 1	a monte dell'Istituto Cuppari	terreno scosceso terrazzato	12	superficiale	A	0-10	A	10
			2	30	Bw	10-40	B	30
Pezzolo 2	a valle dell'Istituto Cuppari	terreno subpianeggiante arato	13	superficiale	A	0-15	A	10
			22	40	B	30-40	B	30
			11	80-85	-	-	C	80
Giampilieri 1	poco al di sopra del cantiere	terreno scosceso terrazzato	19	10-15	A	0-10	A	10
			21	55	B	10-70/80	B	50
Giampilieri 2	poco al di fuori dell'ingresso del cantiere	terreno subpianeggiante coltivato ad olivi, a 2 m dal ciglio di scarpata	5	10	A	0-10	A	10
			4	60	B	30-35	B	50
			10	80	B2	80-85	C	80

Tabella 4 – Dettagli dei siti di campionamento ed installazione delle sonde FDR



Figure 14 e 15 – Punto di misura Pezzolo 1 (a sinistra; si distinguono le sonde P1A e P1B) e punto di misura Giampilieri 2 (a destra)

Il campionamento dei suoli è stato effettuato tramite infissione in verticale di fustelle di acciaio a volume noto e prelievo di campione indisturbato in tre repliche per ogni orizzonte di suolo. I campioni sono stati poi portati a saturazione in laboratorio ed è stato misurato il contenuto di acqua gravimetrico  $\theta_w(g)$  con il sistema degli estrattori a pressione di tipo Pentola e Piastra di Richards (*Soilmoisture inc.*), secondo il corrispondente metodo ufficiale (MiPAAF, 1997a). I contenuti di acqua sono stati misurati per i livelli di tensione potenziale (pF) corrispondenti a 0 (saturazione), -10,-20, -30 (Capacità di campo), -100, -500, -1000 e -1500 (Punto di appassimento) kpa.

L'analisi granulometrica effettuata ha consentito la suddivisione in classi granulometriche e la distinzione secondo la classificazione USDA. È stato distinto lo scheletro con grani di dimensioni >2mm, mentre la restante terra fine è stata distinta in sabbia, limo e argilla. L'analisi è stata eseguita tramite setacciatura per le frazioni grossolane e metodo gravimetrico (sedigrafo) per le frazioni <50µm. La massa volumica apparente è stata campionata secondo il metodo del carotaggio a volume noto (MIPAAF, 1997b). Sono stati calcolati i parametri della curva di ritenzione caratteristica per ogni orizzonte campionato, applicando l'equazione di Van Genuchten (1980):

$$\theta = (\theta_{sat} - \theta_{res})[1 + (\alpha h)^n]^{-m} + \theta_{res}$$

che mette in relazione il contenuto d'acqua  $\theta$  con un valore di tensione corrispondente ad una altezza di carico (h). L'equazione è stata applicata nella ipotesi modificata da Mualem (1976) per cui il coefficiente  $m=(1-1/n)$  è ricavato attraverso un *fitting* sui dati misurati effettuato con il *software* RECT (Van Genuchten *et alii*, 1991). Il parametro della funzione  $\theta_{res}$  (acqua residua) e i coefficienti  $\alpha$  e  $n$  sono stati ricavati a partire dai dati misurati di contenuto di acqua volumetrico  $\theta_w(vol)$ , calcolato dalla misura gravimetrica  $\theta_w(gr)$  con la formula:

$$\theta_w(vol) = \rho \theta_w(gr)$$

dove  $\rho$  è la massa volumica apparente misurata in campo, espressa in g/cm<sup>3</sup> e depurata del valore % dello scheletro attraverso la formula:

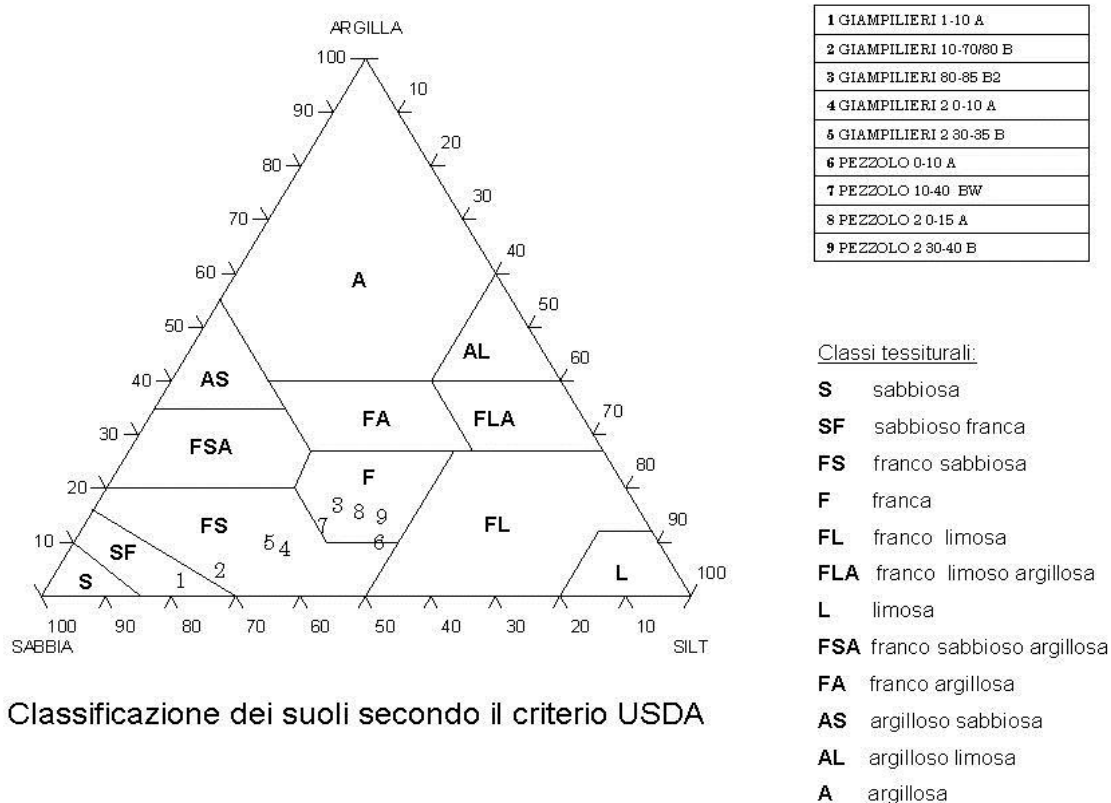
$$D_{tf} = (D_t - 2,65Fsk)/(1 - Fsk)$$

con  $D_{tf}$  la massa volumica apparente (densità) della terra fine,  $D_t$  la massa volumica complessiva e  $Fsk$  la frazione % di scheletro presente in ogni orizzonte. Il parametro  $\theta_{sat}$  (contenuto di acqua a saturazione) è stato invece misurato su campione indisturbato per pesata prima dell'inizio delle prove con estrattori a pressione. È stato necessario correggere il dato di massa volumica apparente in quanto lo scheletro non entra a fare parte del processi di ritenzione/suzione, che vengono solo determinati per la frazione di terra fine (< 2 mm).

Le tipologie di suolo oggetto di studio in cui sono stati posizionati i punti di monitoraggio, nelle aree di Giampileri e Pezzolo, sono riconducibili a due unità tipologiche precedentemente riconosciute nel rilevamento dei suoli della Regione Sicilia. Si tratta di *Leptic Cambisols* (Pezzolo 1 e Giampileri 2) ed *Eutric Cambisols* (Sodic) (Pezzolo 2 e Giampileri 1), presenti sulle parti alte e medie di versanti ripidi delle aree con terrazzi mal conservati e/o abbandonati precedentemente coltivati ad oliveti e attualmente ricoperti da vegetazione mista arbustiva, con piante arboree residuali. I suoli si sviluppano su *parent material* metamorfico costituito da argilloscisti, filladi e scisti sericitico-cloritici, e il loro spessore è variabile in dipendenza dal grado di conservazione delle vecchie superfici terrazzate, che trattenevano un "franco" di coltivazione di spessore poco inferiore al metro, quindi abbastanza cospicuo se comparato con le pendenze piuttosto elevate dei versanti.

Sia nel sito di Pezzolo che di Giampileri (suoli Pezzolo 1 e Giampileri 2), in relazione alle superfici più erose e mal conservate, i suoli sono sottili e con contatto litico entro i 50 cm di profondità.

Questi suoli hanno una tessitura che va da franco sabbiosa a sabbioso franca in superficie (fig. 16), mentre gli orizzonti più profondi (Bw di alterazione) hanno tessitura più fine. I contenuti di argilla sono in genere bassi, con percentuali che variano dal 3 al 15% e hanno un valore medio del 10%. Di seguito sono riportati i dati relativi alle misure fisiche ed idrologiche effettuate in campo contestualmente alla campagna di posizionamento delle sonde FDR, per i siti di Pezzolo e Giampileri (tabb. 5 e 6). L'analisi mostra come i suoli campionati portati a saturazione abbiano un contenuto d'acqua variabile tra il 19% del campione P1Bw (37% di scheletro) ed il 43% del campione G1Bw2 (2,5% di scheletro).



Classificazione dei suoli secondo il criterio USDA

Figura 16 – Classificazione granulometrica dei campioni prelevati in corrispondenza dell’installazione delle sonde FDR

La caratterizzazione fisico-idrologica dei suoli oggetto di indagine ha consentito di calcolare in prima approssimazione il contenuto idrico nell’immediato intorno dell’evento dell’1° ottobre 2009, per vedere la relazione tra riserva idrica dei suoli a saturazione e momento in cui si sono innescate le colate rapide (approssimativamente tra le 19.30 e 22.30). Prima di effettuare il calcolo, si sono tenuti in conto alcuni aspetti al contorno che possono aver influenzato il bilancio, quali il ruscellamento superficiale e sub-superficiale, l’evapotraspirazione, e le condizioni di umidità di partenza.

Suoli/orizzonti	Scheletro %	Spessore suolo (cm)	MVA tot (gr/cm3)	MVA corr (gr/cm3)
Pezzolo 1 A	21.4	10	1.58	1.29
Pezzolo 1 Bw	37.7	20	1.40	0.64
Pezzolo 2 A	10.1	10	1.45	1.32
Pezzolo 2 Bw	4.3	30	1.95	1.92
Pezzolo 2 BC	4.3	45	1.83	1.80
Giampilieri 2 A	35.5	15	1.66	1.11
Giampilieri 2 Bw	28.1	40	1.43	0.96
Giampilieri 1 A	16.7	10	1.53	1.31
Giampilieri 1 Bw	19.4	60	1.90	1.71
Giampilieri 1 Bw2	2.5	15	1.64	1.61

Tabella 5 - Valori della massa volumica apparente totale e corretta dalla presenza di scheletro

Tensione - potenziale di suzione (Kpa)								
Suoli/orizzonti	0 (Saturazione)	10	20	30 (Capacità campo)	100	500	1000	1500 (Punto appassimento)
Pezzolo 1 A	31.1	21.6	18.9	18.5	17.4	17.2	17.1	16.8
Pezzolo 1 Bw	19.0	12.9	10.7	10.3	9.3	9.0	9.0	8.9
Pezzolo 2 A	39.2	23.7	21.0	20.6	18.9	18.8	18.7	18.2
Pezzolo 2 Bw	30.0	26.6	26.3	26.0	25.6	25.5	25.4	24.8
Pezzolo 2 BC	36.6	31.8	29.2	28.8	27.5	27.3	27.2	26.9
Giampilieri 2 A	24.1	12.6	10.8	10.3	9.3	9.1	9.1	9.0
Giampilieri 2 Bw	29.8	17.9	13.4	13.2	10.5	10.5	10.4	10.1
Giampilieri 1 A	41.6	32.1	24.7	24.2	22.0	21.7	21.6	21.3
Giampilieri 1 Bw	32.2	27.7	26.0	25.3	24.5	24.3	24.2	23.8
Giampilieri 1 Bw2	43.1	39.6	37.0	36.5	35.1	35.0	34.8	34.6

Tabella 6 - Valori di contenuto idrico volumetrico misurati per i vari punti di tensione (Kpa)

Esistono vari studi che hanno tentato un approccio sperimentale di misure del *runoff*, e di stima di coefficienti cumulati sulla base della intensità e/o distribuzione delle precipitazioni. Nel caso in oggetto è stato preso come riferimento un recente studio proprio sugli eventi di frana e colata rapida di Giampilieri (Aronica *et alii*, 2012). In tale studio è stato stimato un valore di *runoff* proporzionalmente al *Wetness Index* medio del suolo (fig. 17), per questo tipo di suoli, considerato nella misura del 45% della precipitazione, sottoforma cumulata sia a) come ruscellamento superficiale, b) come ruscellamento sub-superficiale e al contatto con la superficie suolo-roccia.

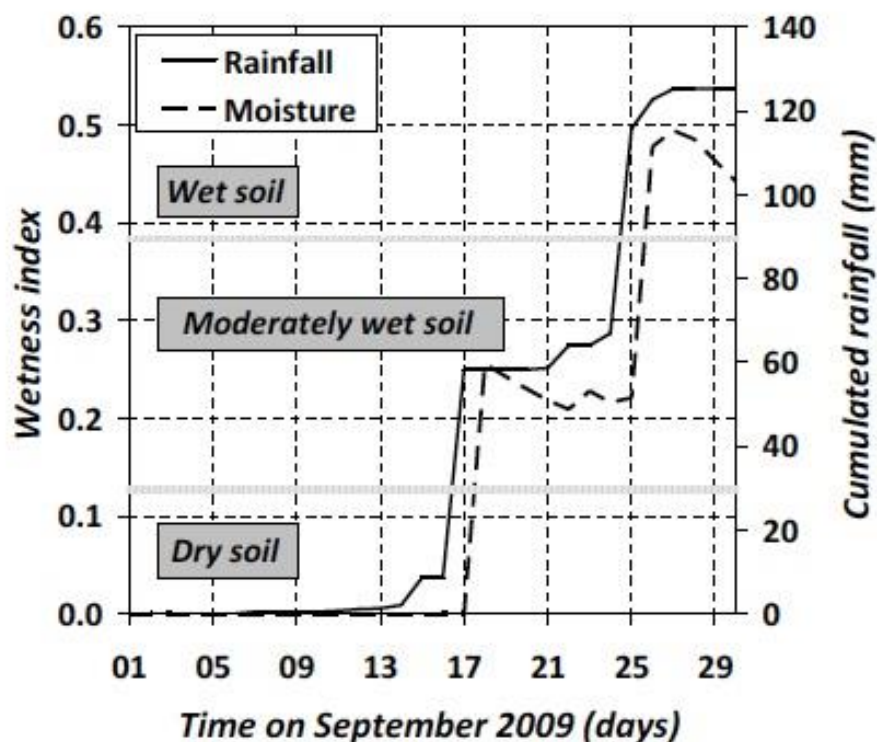


Figura 17 – Stima del *runoff* nel bacino di Giampilieri in relazione alle precipitazioni del 01/10/2009 (Aronica *et alii*, 2012)

Nella figura 18 sono riportati i valori di *runoff* calcolati sulla base dell'andamento delle piogge nella giornata del 1 ottobre 2009 per la Stazione di S.Stefano Briga. Gli intervalli sono sub-orari e variano dai 5 ai 15 minuti.

Dallo stesso studio sono state determinate anche le condizioni di umidità del suolo antecedenti, individuate uno stato di umidità già elevato alla data di fine settembre 2009 (*wet conditions*). Quindi nella modellazione effettuata, sono stati considerati i suoli in quella data come aventi un grado di umidità pari alla capacità di campo; nel caso in oggetto a partire quindi dal  $\theta_w$  (vol) misurato corrispondente a una tensione di -30 kpa.

L'evapotraspirazione potenziale e reale è stata stimata a partire dal *database* giornaliero climatico calcolato dei dati già elaborati all'interno di un progetto CRA-INEA di studio di fabbisogni irrigui nei consorzi delle Regioni Meridionali (Napoli, 2009).

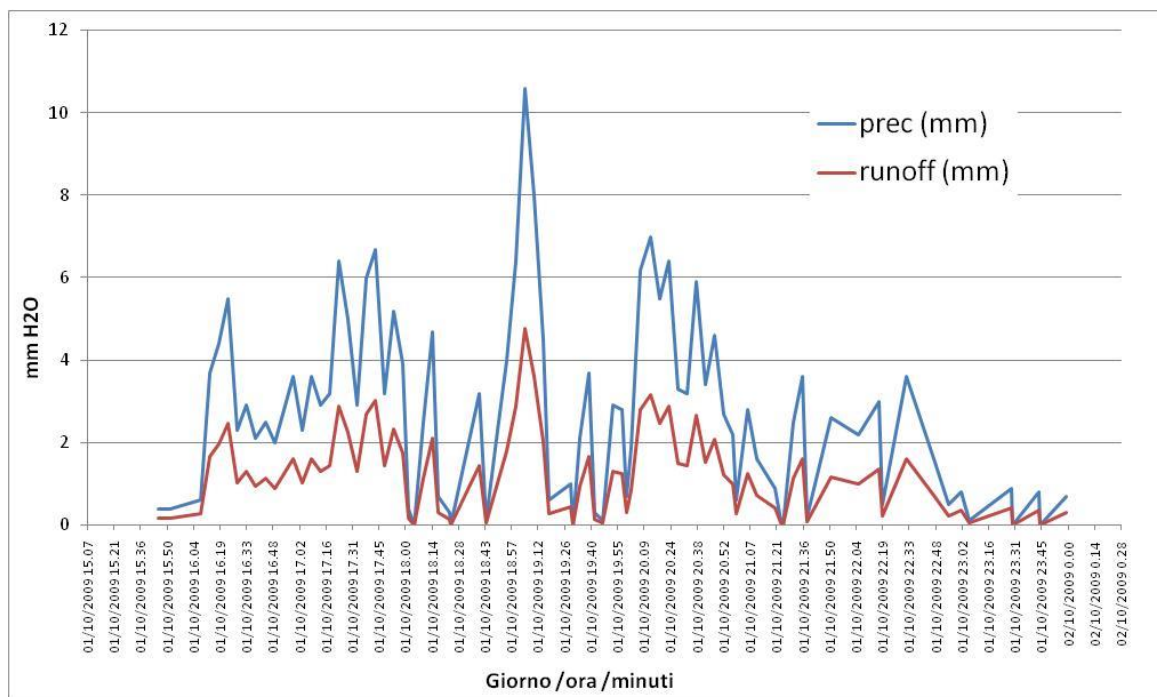


Figura 18 – Valori di *runoff* calcolato sulla base dell'andamento delle piogge nella giornata del 1° ottobre 2009 per la Stazione di S.Stefano Briga

In tale studio è stata stimata l'evapotraspirazione potenziale  $ET_0$  per la stazione di Messina con il metodo Hargreaves-Samani su base giornaliera, e trasformata con coefficiente colturale ( $K_c$ ) per i prati polifiti e/o arbusteti ( $K_c$  massimo estratto dallo stesso *database* delle principali colture delle regioni meridionali). Quindi si è calcolata l'evapotraspirazione massima  $ET_{max} = ET_0 K_c$ . Nel nostro caso  $ET_0$  del 1 ottobre è = 2.56,  $K_c = 1.15$  e quindi  $ET_{max} = 2.94$  mm.

Considerato che questo dato rappresenta il valore massimo di evapotraspirazione durante le ore diurne su base giornaliera e che gli eventi piovosi che hanno coperto l'intera giornata sono iniziati nel primo pomeriggio, di fatto questo parametro di Evapotraspirazione reale si può considerare come ininfluenza ai fini della nostra determinazione, in quanto il valore di  $ET_{max}$  va distribuito per le circa 8-9 ore di luce antecedenti all'inizio dei fenomeni piovosi (ore 15.45); un valore quindi di circa 0.3 mm /ora, ammessa una  $ET$  sempre pari al suo potenziale valore massimo.

Dopo avere introdotto e determinato le condizioni idrologiche al contorno (*runoff* e stato di umidità iniziale) si è calcolata quindi la capacità di ritenzione idrica massima come differenza tra contenuto di acqua alla saturazione ( $WC_{sat}$ ) e alla capacità di campo ( $WC_{cc}$ ) per ogni orizzonte (fig. 18), e quindi per tutto lo spessore del suolo (fig. 19). Per mettere in relazione le condizioni

idrologiche dei suoli con l'innesco di fenomeni franosi, è stato individuato il momento temporale in cui il suolo diventa saturo e quindi non più in grado di accettare acqua, in relazione agli eventi piovosi durante la giornata del 1 ottobre 2009 (cfr. §2.2). Si vede già con gli eventi piovosi cumulati confrontati con il grado di infiltrazione cumulato, come si raggiunga la saturazione media (escluso il caso di Pezzolo 1, che rappresenta il caso-limite di un suolo già molto sottile) proprio nell'intervallo degli eventi franosi (19.30-22.30; fig. 21). La condizione di saturazione viene infatti raggiunta tra le 19:00 e le 20:30 (tab. 7), secondo l'andamento dei dati pluviometrici di S.Stefano di Briga, depurati del *runoff* e per una condizione di umidità di partenza pari alla capacità di campo.

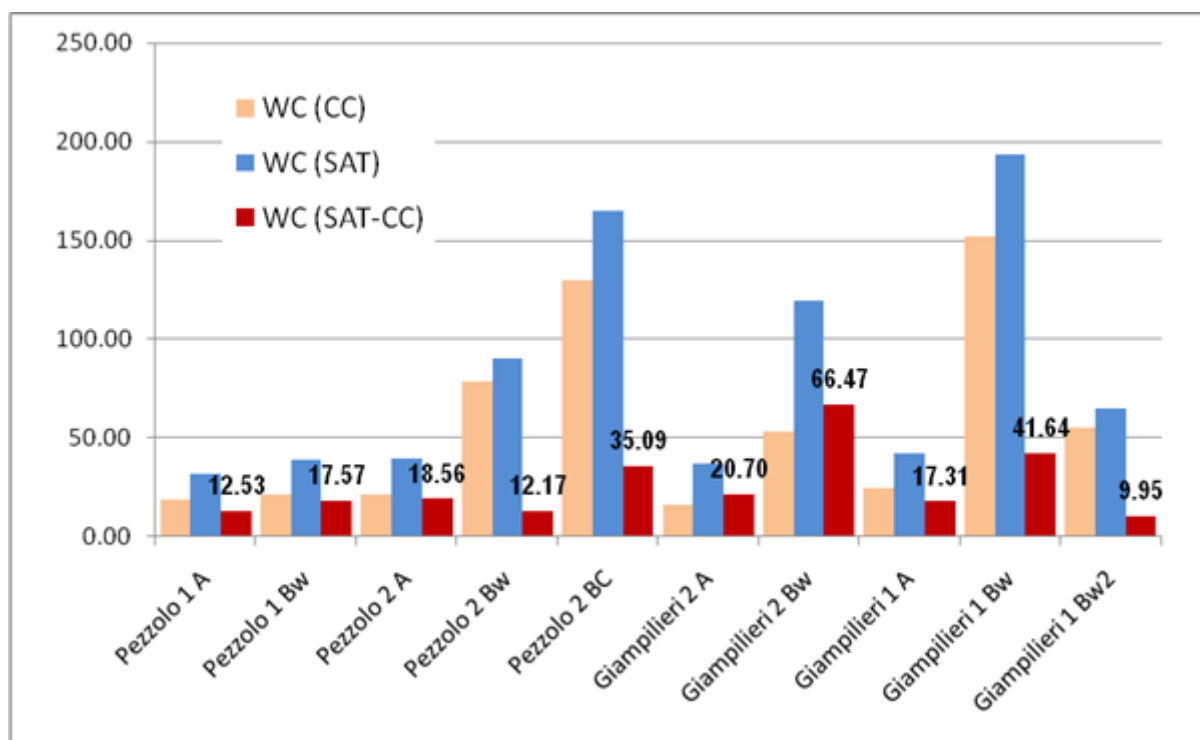


Figura 19 - Contenuti di acqua massimi (WC SAT\_CC) per orizzonte calcolati in base alla differenza tra saturazione (WC SAT) e capacità di campo (WC CC)

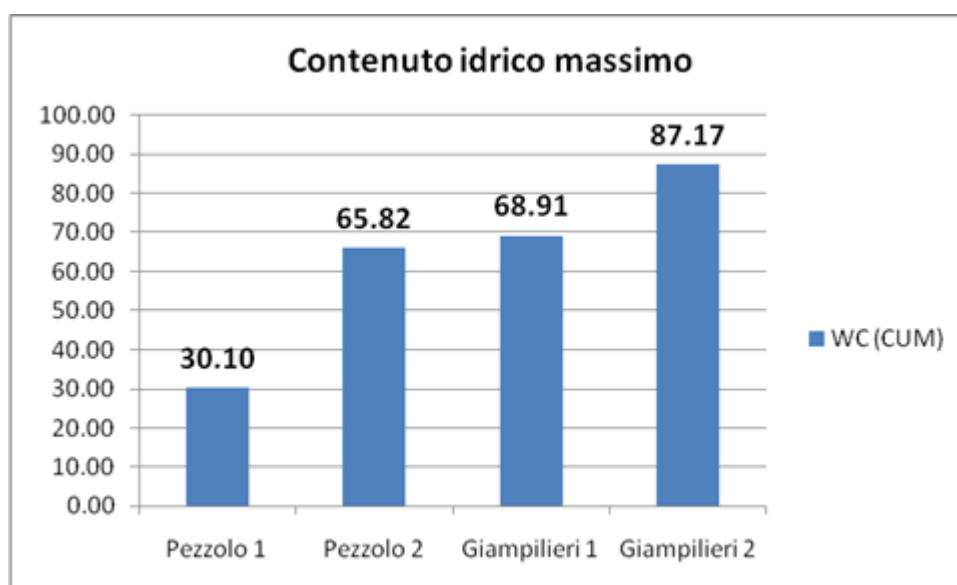


Figura 20 - Contenuto idrico massimo (WC CUM) per i suoli dei siti indagati

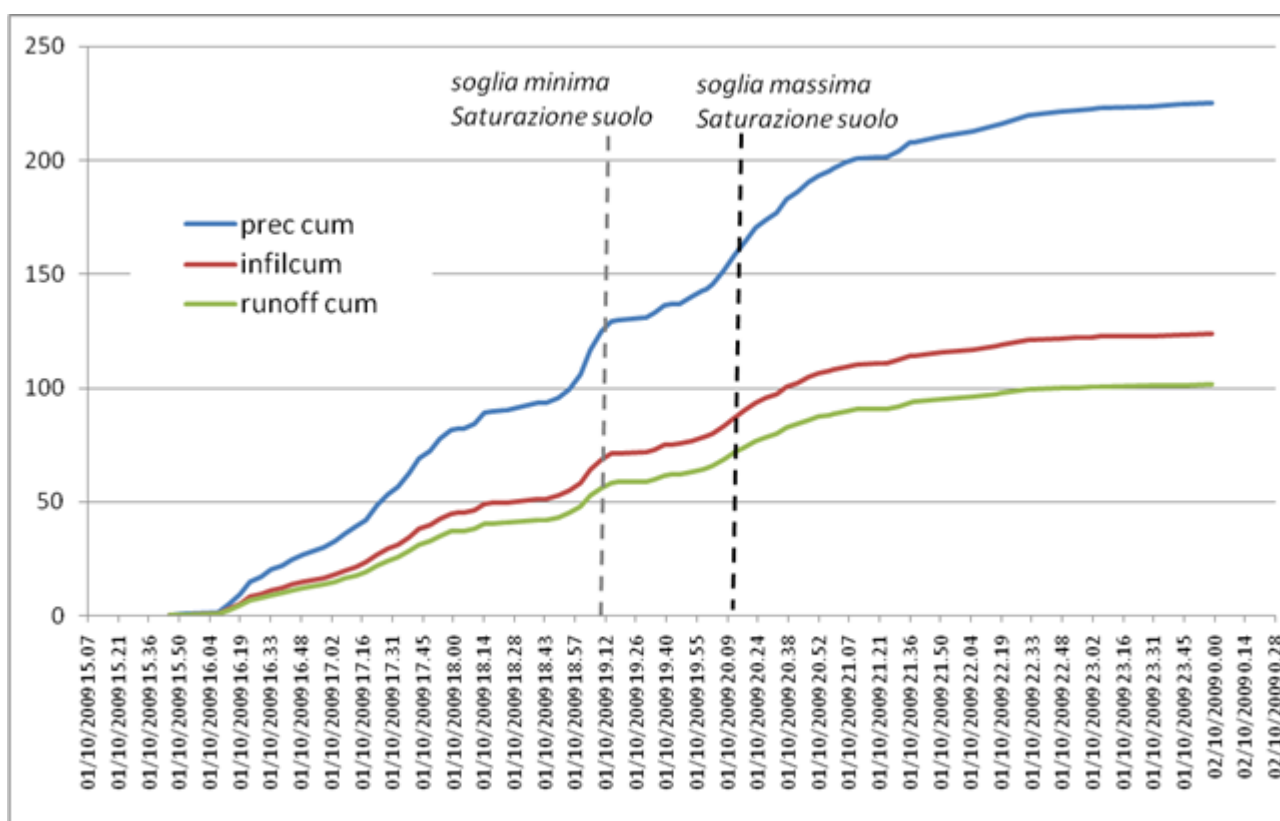


Figura 21 - Raggiungimento delle condizioni di saturazione e stoccaggio di acqua massimo nei suoli, per i valori minimi e massimi calcolati nei siti di indagine, escluso il caso di Pezzolo 1, sulla base dell'andamento orario delle precipitazioni, dell'infiltrazione e del *runoff* cumulati

<i>Sito</i>	<i>WC CUM (mm)</i>	<i>Ora di inizio condizioni saturazione</i>
Pezzolo 1	30.10	n.d.
Pezzolo 2	65.82	19.05
Giampileri 1	68.91	19.10
Giampileri 2	87.17	20.13

Tabella 7 – Quantità di acqua a saturazione e orario di raggiungimento dello stato di saturazione

Osservando anche la figura 15 si vede come la condizione di saturazione per i suoli si raggiunga successivamente al picco di precipitazioni delle 19:00, più o meno nell'intorno dell'intervallo orario di innesco delle colate rapide. Inoltre, la modellazione evidenzia che:

- il ritardo tra l'inizio dell'evento (h 15:45) e la condizione di saturazione varia tra le 3 e le 4 ore;
- una situazione di saturazione in tempi così rapidi e in condizioni di pendenza rilevante, possa costituire sicuramente un fattore predisponente determinante all'innesco di fenomeni di colata di suolo;
- le caratteristiche tixotropiche di questi suoli costituiscono una ulteriore aggravante, visto che la saturazione unita a piccoli movimenti iniziali sul versante può far perdere totalmente la coesione interna e trasformare il comportamento della matrice solida come quello di un liquido viscoso.

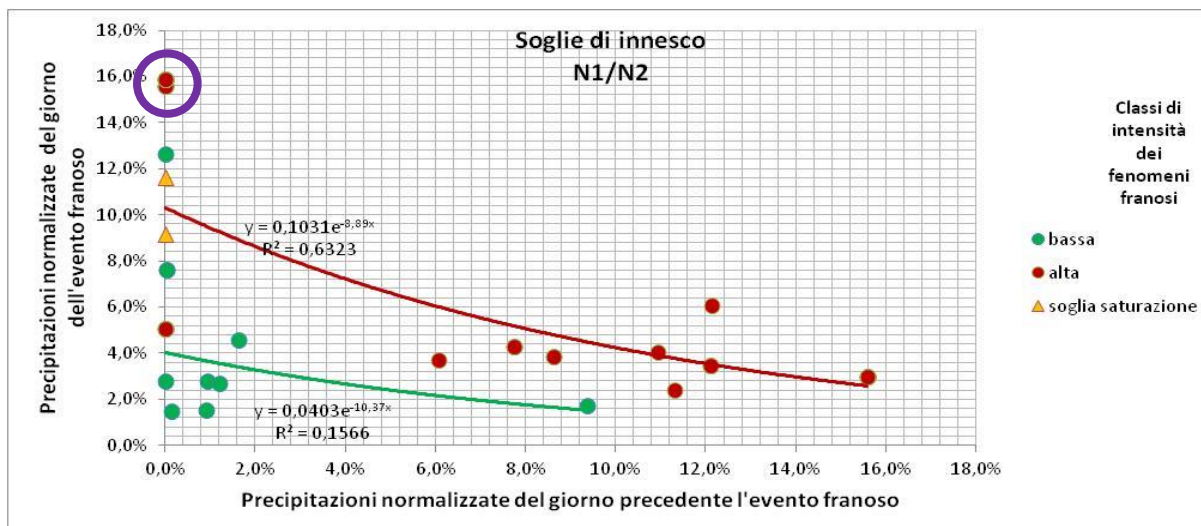


Figura 22 – Precipitazioni normalizzate del 1 ottobre 2009 e del giorno precedente con gli eventi relativi alle soglie di saturazione minima e massima del suolo (triangoli gialli)

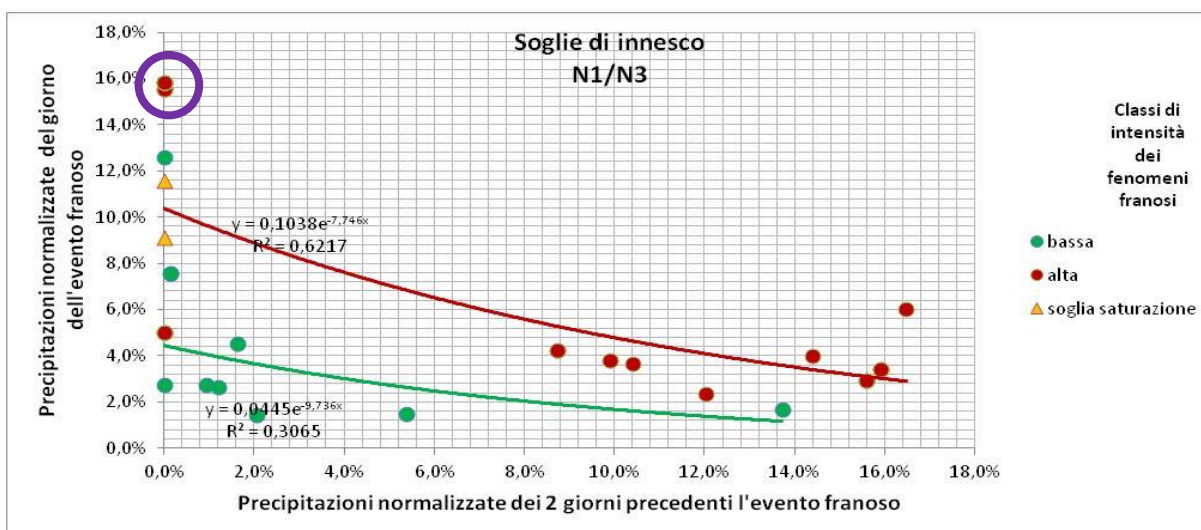


Figura 23 – Precipitazioni normalizzate del 1 ottobre 2009 e dei 2 giorni precedenti con gli eventi relativi alle soglie di saturazione minima e massima del suolo (triangoli gialli)

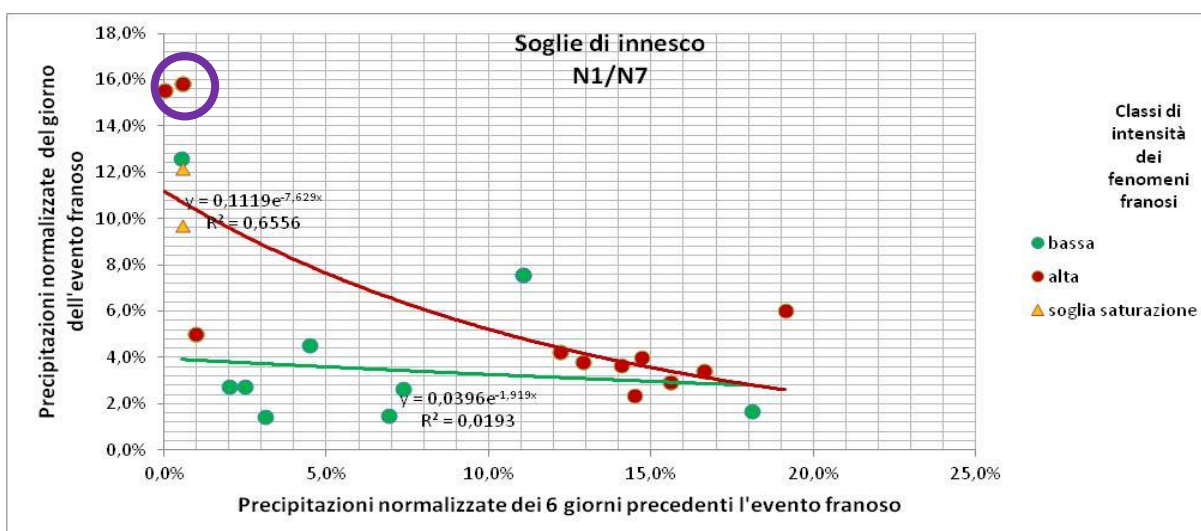


Figura 24 – Precipitazioni normalizzate del 1 ottobre 2009 e dei 6 giorni precedenti con gli eventi relativi alle soglie di saturazione minima e massima del suolo (triangoli gialli)

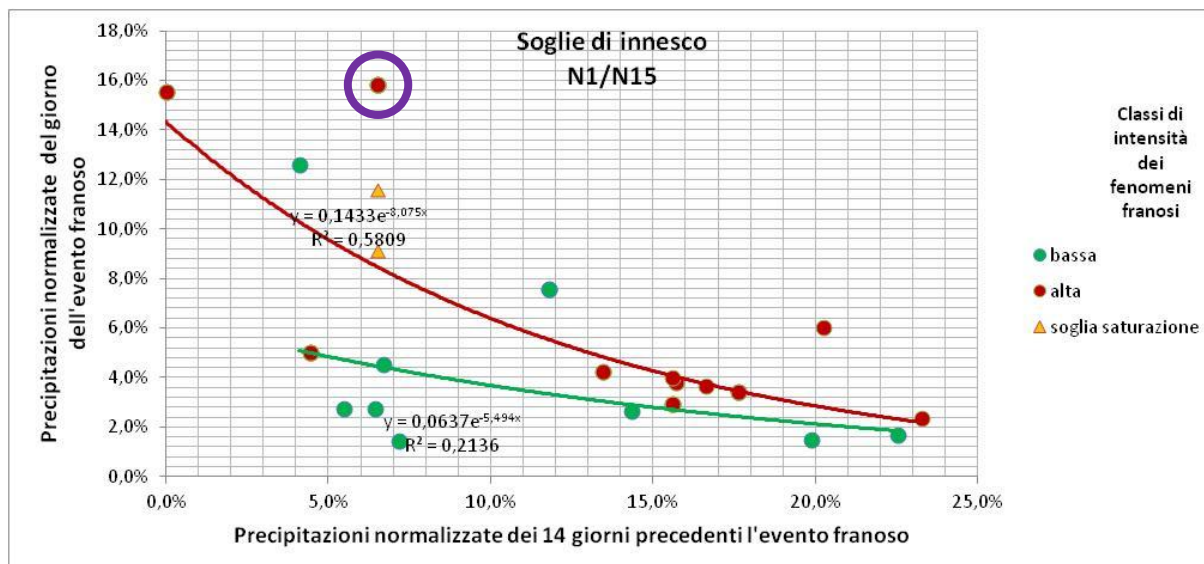


Figura 25 – Precipitazioni normalizzate del 1 ottobre 2009 e dei 14 giorni precedenti con gli eventi relativi alle soglie di saturazione minima e massima del suolo (triangoli gialli)

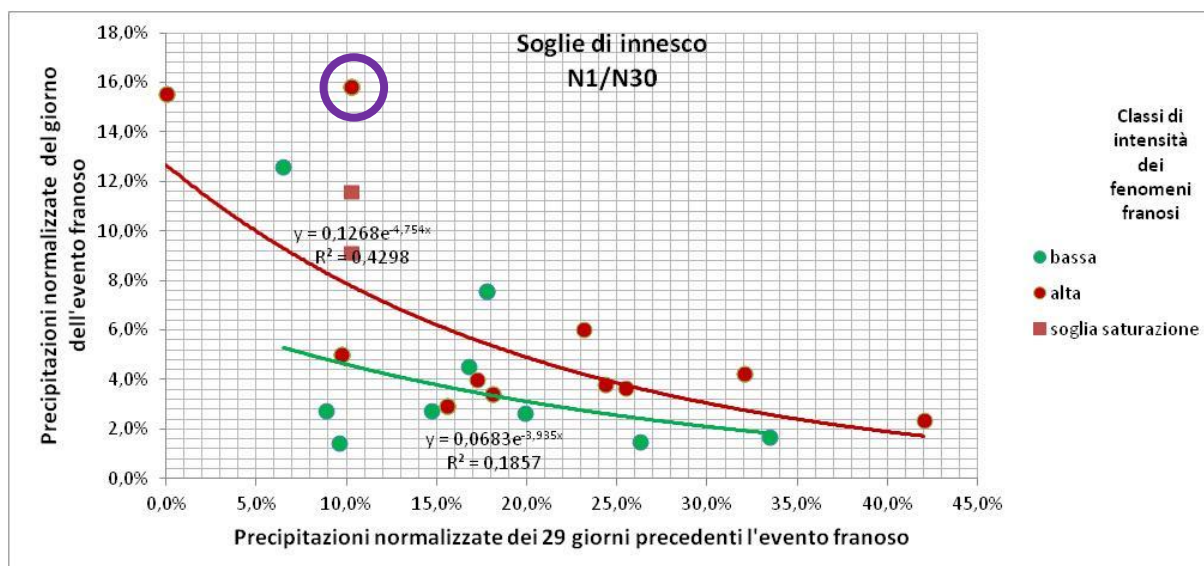


Figura 26 – Precipitazioni normalizzate del 1 ottobre 2009 e dei 29 giorni precedenti con gli eventi relativi alle soglie di saturazione minima e massima del suolo (quadrati rosa)

Volendo effettuare una verifica dell'attendibilità delle soglie pluviometriche giornaliere analizzate precedentemente (§10.1), sono stati attribuiti come valori di precipitazione del giorno dell'evento del 1 ottobre 2009 le precipitazioni relative agli orari della soglia minima e massima di saturazione del suolo, indicati in figura 21. È possibile osservare come questi eventi si pongano a cavallo della linea di tendenza della soglia massima nei primi tre grafici (figg. 22, 23 e 24) e superano la suddetta soglia prendendo in considerazione le precipitazioni precedenti su di un periodo più lungo (figg. 25 e 26).

I dati delle sonde FDR finora registrati (prima acquisizione di dati: ottobre 2012) hanno dato risposte piuttosto discordanti con valori percentuali di contenuto d'acqua molto variabili da sonda a sonda (figg. 27 e 28). Bisogna dire che le precipitazioni nei mesi di registrazione delle sonde sono state estremamente basse, in linea con il normale trend estivo, con massimi di 10mm orari e cumulate di poco superiori ai 250 mm in 5 mesi. In queste condizioni, è presumibile che la componente infiltrata sia stata piuttosto modesta rispetto all'aliquota di evapotraspirazione. Le sonde superficiali dei punti di misura Giampileri 1 e Pezzolo 1 (sonde G1A e P1A; figg. 29 e

30), sebbene registrino valori assoluti piuttosto modesti (<10%), evidenziano una netta sensibilità all'input pluviometrico, con un andamento ad impulsi successivi agli eventi pluviometrici. Osservando i dati in dettaglio, si riconosce un ritardo di 2-3 ore tra picco pluviometrico e innalzamento del contenuto d'acqua.

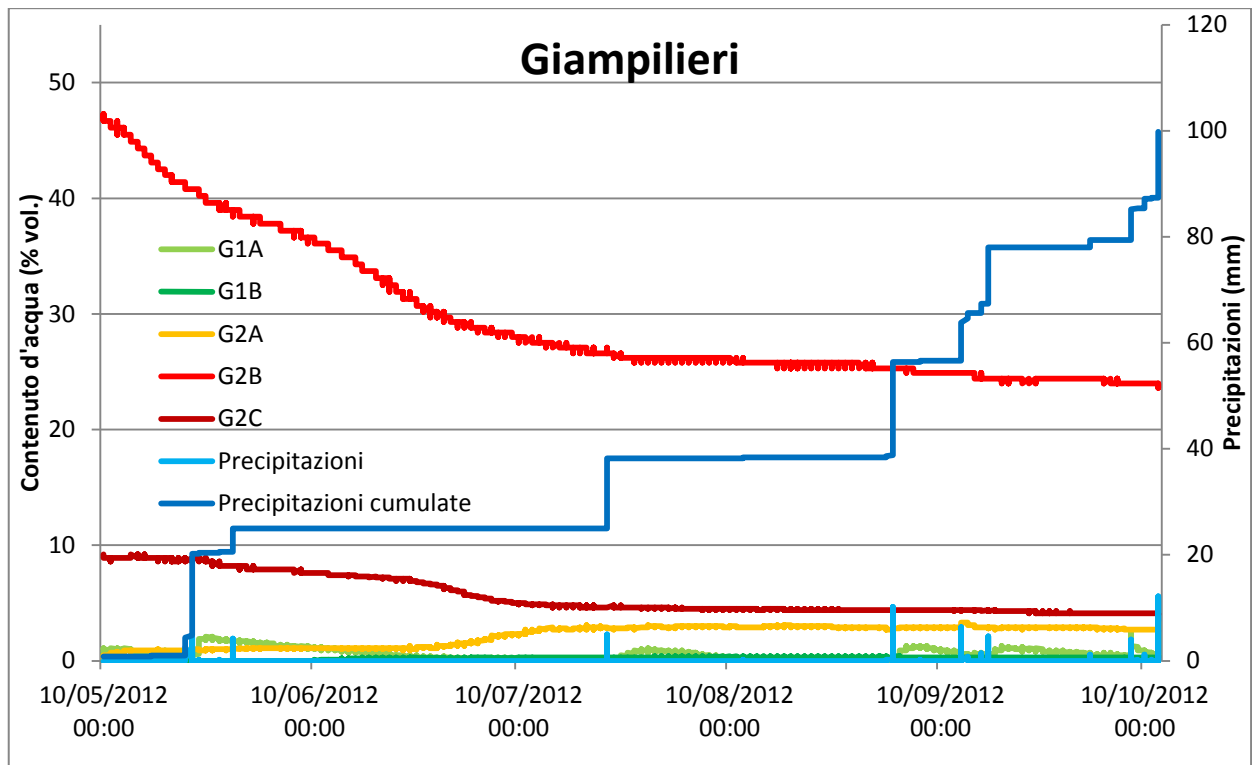


Figura 27 – Valori percentuali di contenuto d'acqua nella stazione di misura di Giampilieri

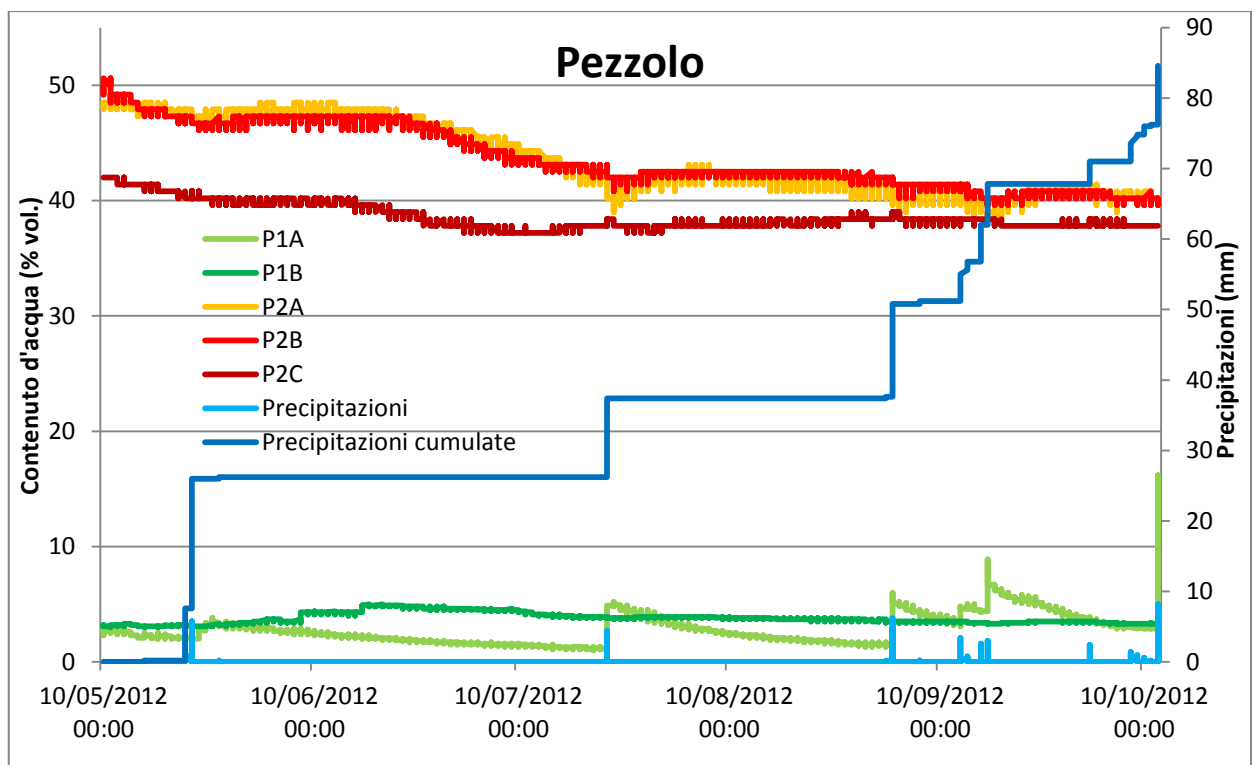


Figura 28 – Valori percentuali di contenuto d'acqua nella stazione di misura di Pezzolo

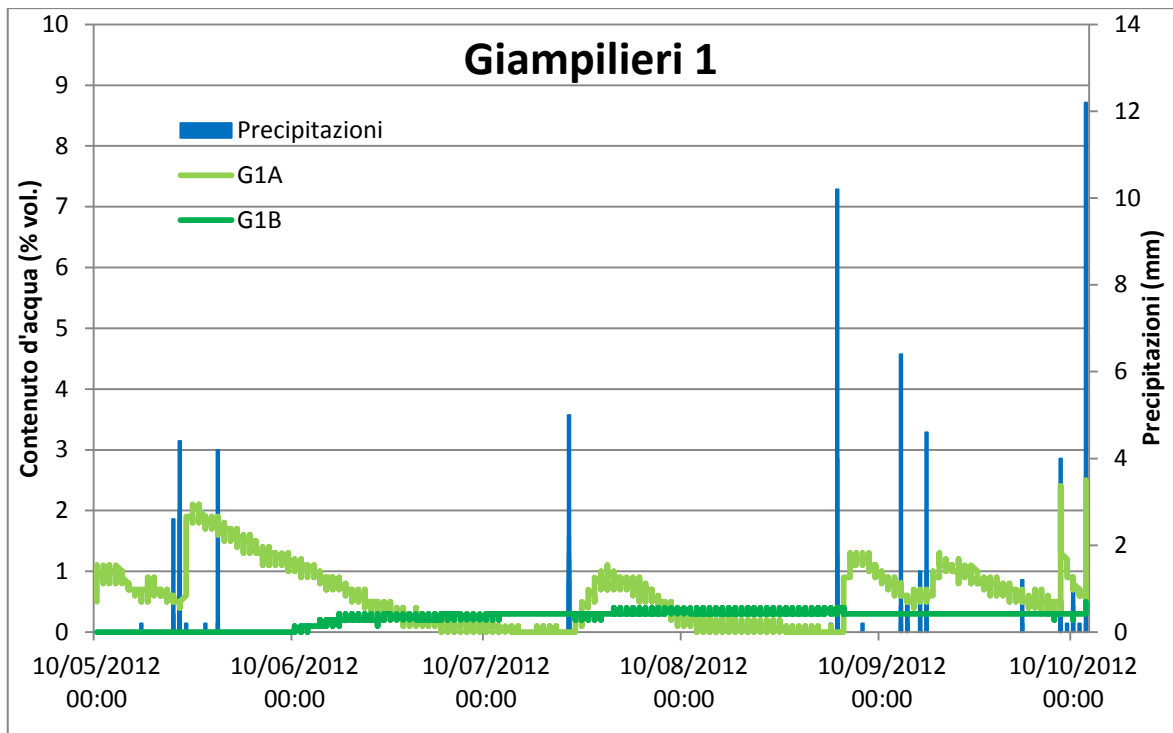


Figura 29 – Valori percentuali di contenuto d’acqua nelle sonde della stazione di misura di Giampilieri 1

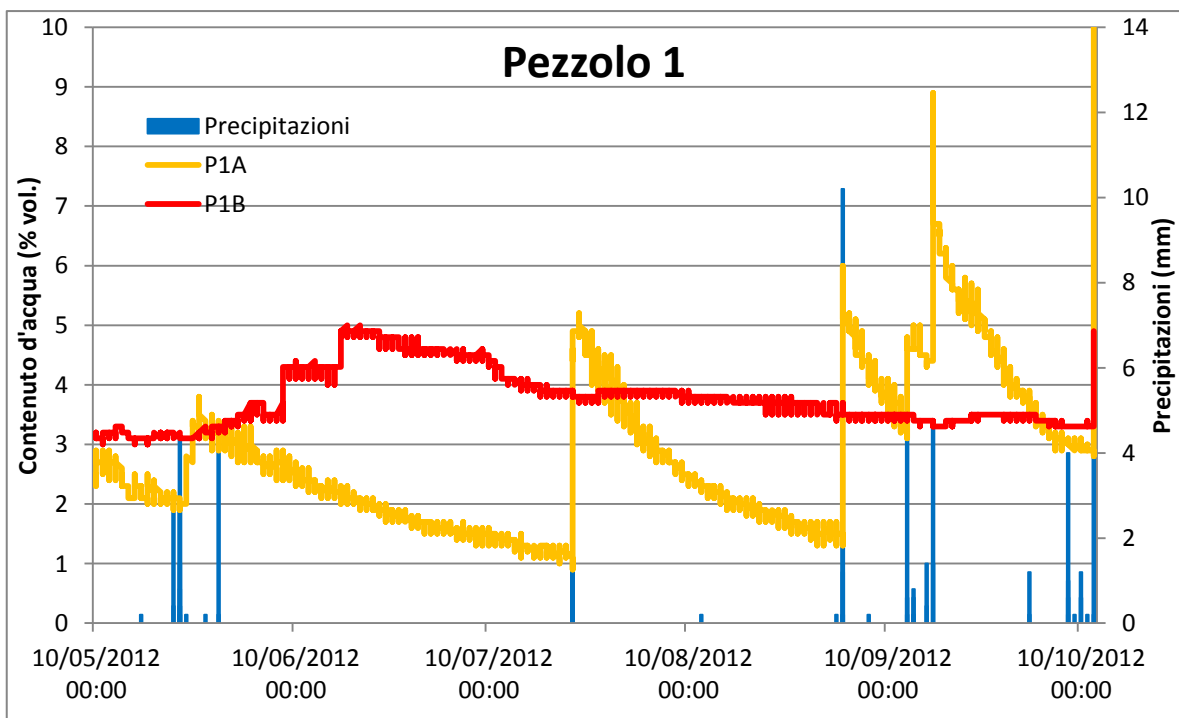


Figura 30 – Valori percentuali di contenuto d’acqua nelle sonde della stazione di misura di Pezzolo 2

### 10.3 Bibliografia

- Aleotti P. (2004). A warning system for rainfall-induced shallow failures. Engineering Geology, Volume 73, Issues 3–4, June 2004, Pages 247–265

- Aronica G. T., Brigandì G., and Morey N. 2012. Flash floods and debris flow in the city area of Messina, north-east part of Sicily, Italy in October 2009: the case of the Giampileri catchment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 1295–1309, 2012. doi:10.5194/nhess-12-1295-2012
- Basile G., Panebianco M. (2011). Experimental alert model for hydrogeological risk: a case study in Sicily. *Proceedings of the Second World Landslide Forum – 3-7 October 2011, Rome*
- Brunetti M. T. , Peruccacci S., Rossi M., Luciani S., Valigi D., Guzzetti F. (2010). Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 447-458 2010
- Cevasco A., Sacchini A., Robbiano A. & Vincenzi E. (2010). Evaluation of rainfall thresholds for triggering shallow landslides on the Genoa municipality area (Italy): the case study of the Bisagno valley. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 1 (2010)
- Greco R., Guida A. (2008). Field measurements of topsoil moisture profiles by vertical TDR probes. *Journal of Hydrology*. Volume 348, Issues 3–4, 15 January 2008, Pages 442–451
- Guzzetti F. , Peruccacci S., Rossi M., Stark C. P. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. December 2007, Volume 98, Issue 3-4, pp 239-267
- MiPAAF, Ministero delle Politiche Agricole Agroalimentari e Forestali 1997a. Metodi Ufficiali di Analisi Fisica del Suolo. Determinazione della massa volumica apparente. Metodo II.1.3.1. del carotaggio. Coordinatore Pagliai M. Franco Angeli Ed., pp. 4-6
- MiPAAF, Ministero delle Politiche Agricole Agroalimentari e Forestali 1997b. Metodi Ufficiali di Analisi Fisica del Suolo. Ritenzione Idrica. Metodo VIII.3.3.1. dell'apparato a pressione e della cassetta tensiometrica. Coordinatore Pagliai M. Franco Angeli Ed., pp. 58-65.
- Mualem Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 12:513-522.
- Napoli R. 2009. Capitolo 4: Stima dei volumi irrigui nelle aree extracomunitarie. In “Uso del suolo e stima dei fabbisogni irrigui nelle aree non servite da reti collettive dei consorzi di bonifica nelle Regioni Meridionali”, a cura di Nino P. e Vanino S., ed. INEA, Collana GESTIONE RISORSE IDRICHE, ISBN 978-88-8145-174-6, pp. 69-135.
- Pizziolo M, Del Mascio L. Gozza G., Pignone S. (2008). Determinazione di soglie pluviometriche per l'insorgere di frane in Emilia-Romagna. *Il Geologo dell'Emilia Romagna*, ANNO VIII/2008 - N.29 - Nuova serie
- Terlien M. T. J. (1998). The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds. *Environmental Geology*, August 1998, Volume 35, Issue 2-3, pp 124-130
- van Genuchten M.Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44:892-898.
- van Genuchten M.Th., Leij F.J., Yates S.R. (1991). The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. *Environmental Protection Agency Report n. EPA/600/2-91/065*, pp. 92.
- Veldkamp E., O'Brien J. J. (2000). Calibration of a Frequency Domain Reflectometry Sensor for Humid Tropical Soils of Volcanic Origin. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 64 No. 5, p. 1549-1553

Edito dall' **ENEA**  
Servizio Comunicazione

Lungotevere Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma

*[www.enea.it](http://www.enea.it)*

Stampa: Tecnografico ENEA - CR Frascati  
Pervenuto il 18.9.2013

Finito di stampare nel mese di settembre 2013