

XVII Conferenza Nazionale ASITA 2013, Riva del Garda 5-7 novembre



## Lo studio delle frane superficiali del Comune di Lerici (La Spezia)

Paolo Petri (\*), Cristiano Lanni(\*\*), Salvatore Buononato(\*), Marco Zanieri(\*\*\*)

(\*) Studio associato Geo-Logica del Territorio, Via A. Pacinotti n° 18 (19124-La Spezia), tel. 0187/525205, mob. 335/6002176, e.mail: paolopetri@geo-logica.net; salvatorebuononato@geo-logica.net;

(\*\*) Studio associato in.ge.na, Via Marconi n° 8 (39100-Bolzano), tel. 0417/324750, mob. 3391600933, e.mail: cristiano.lanni@ingena.info

(\*\*\*) Analista Gis/WebGis, Via Don Pio Vannucchi n° 5 (59100-Prato), tel. 0574/1766163, mob. 348/0069636, e.mail: [marcozanieri@gmail.com](mailto:marcozanieri@gmail.com)

### Riassunto

Le frane superficiali indotte da precipitazioni intense e di breve durata, o di media intensità prolungate nel tempo, sono, a causa della scarsità dei segnali premonitori nelle fasi antecedenti il collasso, difficilmente monitorabili. Vista la rapidità con cui propagano verso valle, dette frane sono anche tra le più pericolose e, talvolta, possono evolvere in colate detritiche con elevato potere distruttivo. Il Comune di Lerici è stato colpito negli ultimi anni da fenomeni di dissesto dovuti a precipitazioni che hanno innescato numerose frane superficiali. Il lavoro che viene presentato in questa memoria si fonda sull'utilizzo del modello "SHALSTAB" (*SHALlow Landslide STABility model*) e mira alla valutazione ed individuazione delle aree maggiormente suscettibili all'innescio di frane superficiali e colate detritiche. A tal fine è stato utilizzato il Sistema Informativo Territoriale (*Geographical Information System, GIS*) UDIG- Jgrass che implementa le equazioni del modello SHALSTAB. UDIG-JGrass è un GIS "free" e "open source" dedicato prevalentemente ad analisi idrologiche e geomorfologiche. Il software è sviluppato dal C.U.D.A.M. (Centro Universitario per la Difesa Idrologica dell'Ambiente Montano) dell'Università di Trento e da Hydrologis s.r.l.

### Abstract

Shallow landslides, produced by high-intensity and short-duration, or medium-intensity and prolonged rainfall are difficult to predict and monitored. Besides, given the rapidity to which

they propagate downstream, shallow landslides are also among the most dangerous, as they may turn into debris flows with high destructive potential.

This work is based on the use of the model "SHALSTAB" (Shallow Landslide Stability model) and aims to evaluate the locations more prone to shallow landslide and debris flow triggering in the municipality of Lerici (La Spezia, Italy).

To this end, we use the SHALSTAB-model implemented in the Geographical Information System (GIS) *UDIG-JGrass*. *UDIG-JGrass* is an "open source" and "free" GIS primarily devoted to hydrological and geomorphological analysis. The software is developed by C.U.D.A.M. (University Center for the Defense Hydrological dell'Ambiente Montano) of the University of Trento and Hydrologis s.r.l.

## Introduzione:

Nello studio della componente geoambientale del Comune di Lerici, finalizzata alla revisione del Piano Urbanistico Comunale si è dato un particolare rilievo alla problematica delle frane superficiali che interessano varie parti del territorio comunale.

Questa tipologia di frana (prevalentemente Soil-Slip con evoluzione verso debris/mud flow), ha cominciato a manifestarsi negli ultimi anni ed in particolare si sono sviluppate nell'evento pluviometrico del 22/23 Dicembre 2010, del Dicembre 2012 fino a quello del Marzo 2013. L'applicazione del modello SHALSTAB ci ha permesso di individuare, in funzione delle piogge critiche, delle condizioni geomeccaniche e idrogeomorfologiche, le aree su cui porre



Fig. 1 - Area di Studio

particolare attenzione per fornire alla pubblica amministrazione uno efficace strumento di supporto alla decisioni in campo idrogeologico sviluppando un apposito sistema GIS.

## Materiali e metodi

Per lo sviluppo del progetto ci siamo avvalsi dei seguenti dati:

- Censimento delle frane occorse nel Dicembre 2010 fino al Marzo del 2013;
- Utilizzo dei dati *LIDAR*(MATTM) e realizzazione di DTM a 1x1 m e 5x5m;
- Analisi idrogeomorfologiche mediante l'utilizzo del Software GIS sviluppato sulla piattaforma *UDIG-Jgrass - Horton Machine* da cui sono state derivate tutte le cartografie ed elaborazioni che a vario titolo entrano nella modellistica applicata a *SHALSTAB*;
- Raccolta dei dati pluviometrici relativamente alle stazioni pluviometriche di La Spezia, M.te Rocchetta (Lerici) e Sarzana e loro elaborazione;
- Rilievi in campo per la stima dello spessore delle coperture detritiche;
- Integrazione in campo per la stima dei parametri di resistenza al taglio mediante l'utilizzo di Van Test;
- Rilettura dei dati relativamente alle indagini geomeccaniche e fisiche in sito raccolti per la redazione del progetto Microzonazione Sismica Comunale per la definizione dei parametri fisico meccanici necessari al modello stesso e di trasmissività;
- Utilizzo del software *Limit equilibrium method, infinite slope model and Monte Carlo Method* (fig.2 Borselli 2010), per sviluppare le fasi di *back analysis* necessarie alla definizione dei valori dei parametri di resistenza al taglio;

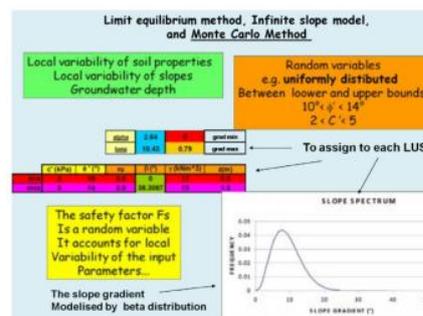


Fig.2 - Metodo di Montecarlo applicato al pendio indefinito

### Caso di studio: Il Comune di Lerici

Il Comune di Lerici si estende per un totale di circa 12 Km<sup>2</sup> ed è posto a cavallo fra il Golfo della Spezia e la parte terminale della vallata del F. Magra. Nel periodo compreso fra il Dicembre del 2010 e il Marzo 2013 è stato interessato da numerosi fenomeni franosi dove spiccano per la loro frequenza e intensità le frane superficiali. Fino al 2010 l'area comunale non è stata investita da fenomeni particolarmente significativi, ad eccezione di un evento accaduto il 24 Ottobre 2005, e fondamentalmente si censivano sul territorio alcuni fenomeni legati essenzialmente alla degradazione delle falesie e alle frane che caratterizzano le stesse e che alimentano alcune spiagge della costa dopo Tellaro verso Bocca di Magra, oltre a un fenomeno di una frana profonda impostata sulle argilliti di Brolio a cinematismo lento su un debole pendio. Quanto è accaduto dal Dicembre del 2010 ha spinto a sviluppare gli studi ed analisi orientati soprattutto alla individuazione delle condizioni spaziali e temporali dell'innescò delle frane superficiali fino al Dicembre 2012 e Marzo 2013 per individuare gli ambienti idrogemorfologici e le condizioni fisico meccaniche che possono favorire l'insorgenza di tali fenomeni in rapporto alla revisione del piano urbanistico generale.

### Analisi pluviometrica

Stazione Sarzana		
Evento (mm)	a	b
50	82.52	0.268
100	91.44	0.265
150	96.66	0.264
200	100.3	0.263

Tab. 1

Stazione La Spezia		
Evento (mm)	a	b
50	68.57	0.286
100	76.05	0.282
150	80.43	0.280
200	83.54	0.279

Tab. 2

Stazione M.te Rocchetta		
Evento (mm)	a	b
50	90.23	0.280
100	100.7	0.282
150	106.9	0.283
200	111.2	0.274

Tab. 3

Distribuzione e classificazione frane	
Frane complesse su Falesie	16
Frane Profonde	2
Frane superficiali	47
<b>TOTALE</b>	<b>65</b>

Tab. 4

L'analisi idrologica si è concentrata sulla definizione delle curve di possibilità pluviometrica, sull'analisi degli eventi critici e sull'analisi dei percorsi pluviometrici riferiti ai 60 gg antecedenti l'innescò delle frane.

### Le Curve di Possibilità Pluviometrica

La costruzione delle curve di possibilità pluviometrica è stata effettuata su tre stazioni: la stazione di Monte Rocchetta (in funzione dal 2001 ubicata baricentrica in Comune di Lerici-Fig. 3), le stazioni della Spezia e la stazione di Sarzana (valori disponibili, anche se non continuativi, dal 1952). Sui valori relativi a 1,3,6,12,24 h sono state calcolate



Fig. 3 - Stazioni Pluviometriche

le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica, LSPP (Gumbel - 1958; Grigorten - 1963). Nelle Tab. 1, 2 vengono proposti i coefficienti **a** e **b** che caratterizzano, rispettivamente, le LSPP per le stazioni, rispettivamente, di Sarzana e La Spezia. Per

quanto riguarda la stazione di Rocchetta (Tab. 3) vengono proposti i parametri **a** e **b** delle LSPP, con l'avvertenza che essendo la serie dei dati limitata a 11 anni potrebbero essere sovrastimati (Tab. 1, 2, 3 e Fig. 4).

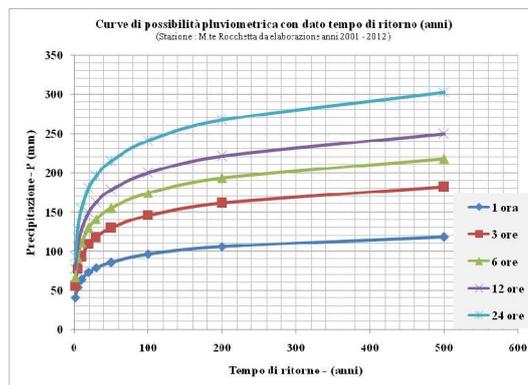
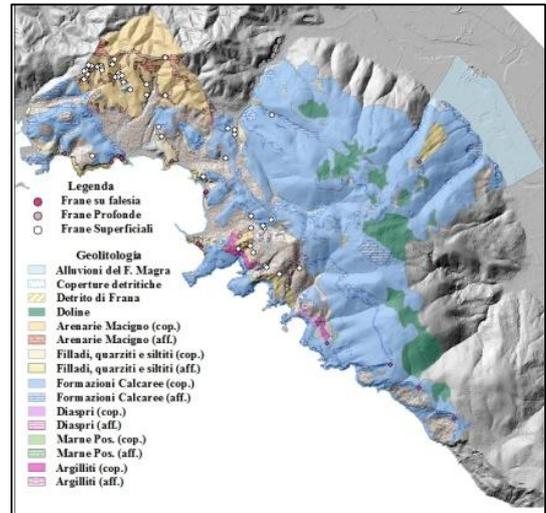


Fig. 4 - Curve di Possibilità Pluviometrica - (M.te Rocchetta)

**Distribuzione spaziale dei fenomeni franosi**

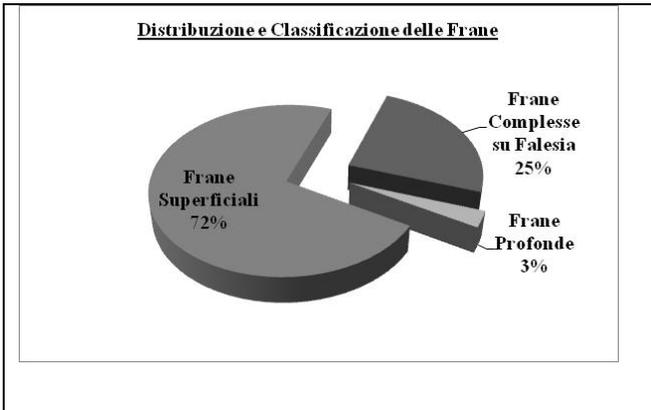
Le frane superficiali censite sull'area di studio presentano una distribuzione spaziale che in qualche misura rispecchia la situazione geolitologica del territorio, dove si evidenzia come la maggioranza delle frane superficiali siano ascrivibili alle coltri di alterazione superficiali delle Arenarie tipo Macigno (Fig. 5). L'analisi sviluppata ha evidenziato 65 frane classificate come mostrate in Tab. 4 e Fig. 6. A loro volta, le frane superficiali risultano suddivise per litologia come mostrato in Tab. 5 e Fig. 7).



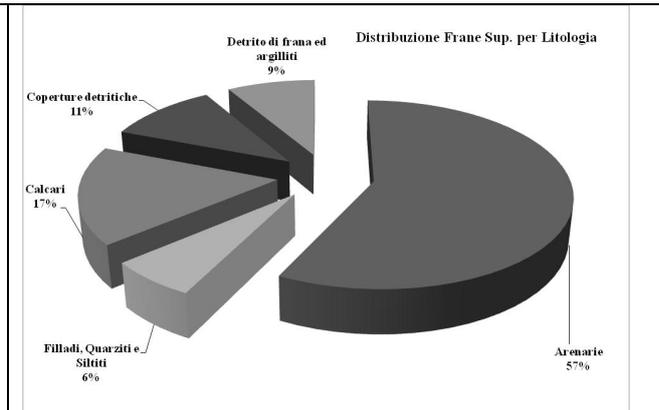
**Fig. 5 - Carta Geolitologica**

<b>Distribuzione frane superficiali per litologie</b>	
Arenarie (Mg) e loro copertura	27
Filladi, Quarziti e Siltiti e loro copertura	3
Formazioni Calcareae e loro copertura	8
Coperture detritiche generiche	5
Detrito di frana e detrito di Argilliti e scisti policromi	4
<b>TOTALE</b>	<b>47</b>

**Tab.5**

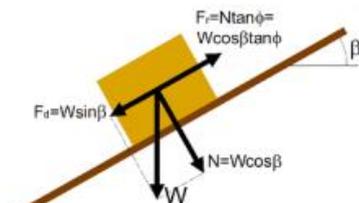


**Fig 6**



**Fig. 7**

**Il modello SHALSTAB e la sua applicazione**



**Fig. 8 - Modello Pendio Indefinito**

$$FS = \frac{F_r}{F_d}$$

Per lo studio dei fenomeni di instabilità di versante connessi con le frane superficiali che interessano prevalentemente i terreni sciolti della copertura eluvio-colluviale, è stato utilizzato il modello *SHALSTAB* (Montgomery and Dietrich, 1994) - (acronimo di *SHAL*low *landslides* *STABILITY*). *SHALSTAB* è un modello fisicamente basato di previsione della suscettività del territorio all'insacco di frane superficiali.

*SHALSTAB* accoppia il modello a pendio indefinito con un modello Idrologico per la determinazione delle pressioni interstiziali (*Topog* - O'Loughlin, 1986). Il Fattore di Sicurezza (FS) è il rapporto fra il Fattore Resistente (Fr) ed il Fattore destabilizzante (Fd); se FS < 1 il punto è

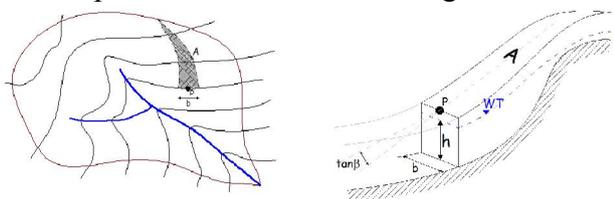
INSTABILE se  $FS > 1$  il punto è STABILE (Fig. 8), la formula generale di stabilità del pendio indefinito è:

$$FS = \frac{2c'}{\gamma Z \sin(2\beta)} + \frac{\tan\phi'}{\tan\beta} + \frac{\gamma_w h}{\gamma Z} (\tan\beta + \cot\beta) \tan\phi'$$

Termine coesivo
Termine attritivo
Termine "idrologico"

la distinzione nei tre termini è opportuna per concettualizzare come interagiscono i vari parametri che regolano la stabilità di un versante. per risolvere l'equazione abbiamo necessità dei seguenti parametri:

1. Caratterizzazione fisica e meccanica dei terreni ( $\gamma'$  = peso di volume del terreno saturo;  $\gamma_w$ = peso di volume dell'acqua;  $\phi'$ = angolo di attrito interno del materiale e  $c'$ = coesione efficace )
2. Modello digitale del terreno per derivare la pendenza dei versanti ( $\beta$ );
3. Spessore della copertura di suolo, modellato o misurato ( $Z$ )
4. Informazioni sul livello di falda ( $h$ ) => questo parametro rientra nella applicazione della componente del modello idrologico TOPOG (O'Loughlin, 1986 - Fig. 9)



**Fig.9 - Modello Idrologico TOPOG**

La componente idrologica è costituita da un modello stazionario che presuppone che il flusso sub-superficiale si sviluppi prevalentemente in direzione parallela al pendio nella sola porzione di suolo saturo. Il suolo è ipotizzato composto da uno spessore di altezza  $H$  e permeabilità satura indipendente dalla profondità; al di sotto di questo strato giace un *bedrock* impermeabile.

L'ipotesi si basa sul concetto che l'evento di pioggia duri a sufficienza affinché l'intero versante raggiunga l'equilibrio afflusso/deflusso, **A** rappresenta l'area drenata a monte e **b** la larghezza del pixel di riferimento. Queste assunzioni sono considerate ragionevoli per lo studio dei dissesti superficiali, in cui gli spessori coinvolti sono modesti e laddove si possa individuare una netta superficie di discontinuità fra coltre superficiale e substrato a bassa conducibilità idraulica.

### Applicazione del modello

L'applicazione del modello, grazie agli applicativi sviluppati in *UDIG-Jgrass*, viene oggettivamente semplificata, anche se rimane all'utente la responsabilità dei parametri da utilizzare relativamente alla componente fisico-meccanica, idrogeologica (conducibilità idraulica satura), e sullo spessore delle coperture. Nelle fasi di studio ed applicazione del modello sono stati ulteriormente affrontati tre aspetti essenziali e cioè:

- Definizione dello spessore dei suoli e loro spazializzazione;
- Individuazione delle principali caratteristiche idrogeomorfologiche delle zone di innesco;
- Individuazione delle soglie di pioggia critica per le applicazioni in *SHALSTAB*

### Spessore di suolo e relazione con la pendenza

Uno dei parametri che riveste particolare importanza risulta essere lo spessore di suolo (inteso come la profondità della coltre superficiale sopra il sub-strato roccioso o la formazione litologica a bassa conducibilità idraulica) in quanto è una variabile cruciale nelle descrizioni dei processi di infiltrazione d'acqua nei versanti (Tromp Van-Merveeld & McDonnell, 2006). La stima dello spessore di suolo viene spesso trascurata nell'applicazione dei modelli per la predizione della suscettibilità al franamento. Generalmente, infatti, si assume che lo spessore della coltre di suolo sia costante su tutto il bacino. Ai fini del presente lavoro, la stima dello spessore di suolo si è basata

sull'utilizzo di un approccio statistico che sfrutta le informazioni derivanti da misure dirette effettuate durante rilievi di campo E' stato possibile derivare alcune relazioni tra lo spessore delle coltri detritiche e le litologie presenti secondo la formula generale:  $L(x, y) = 1.01 - 0.85 \cdot \tan \beta$  . dove L è lo spessore di suolo,  $\tan \beta$  la pendenza dei versanti. L'equazione ha una sua validità se utilizzata con le dovute cautele in rapporto alle litologie riscontrate, considerando inoltre che le zone con pendenze locali superiori a 45/50° risultano generalmente caratterizzate da substrato roccioso affiorante (assenza di copertura di suolo) o spessore della coltre di suolo estremamente sottile e/o discontinua, o addirittura interessate da frane complesse come nelle fasce della falesia.

### Le piogge critiche e i percorsi pluviometrici

La definizione delle piogge critiche ha richiesto una specifica analisi delle condizioni per le quali si sono verificati i fenomeni che hanno dato origine alle frane superficiali in studio e specificatamente ci si riferisce a:

- (a) = Evento del 23 Dicembre 2010 (105 mm/24h) - Cumulata in 60 gg - 750.8 mm;
- (b) = Evento del 18 Marzo 2013 (89 mm/24h) -

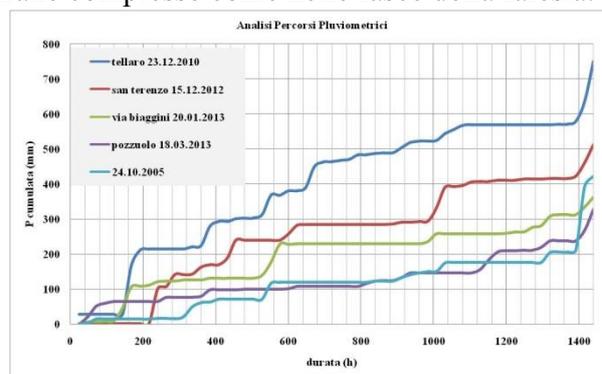


Fig. 10- Percorsi pluviometrici

Cumulata in 60 gg - 327.4 mm;

- (c) = Evento del 15 Dicembre 2012( 70.4 mm/24h) - Cumulata in 60 gg - 513 mm;

- (d) = Evento del 20 Gennaio 2012 (51.4 mm/24h) - Cumulata in 60 gg - 363.6 mm;

- (2005) = Evento 24 Ottobre 2005 (206 mm/24h) - Cumulata in 60 gg - 423.4 mm.

L'evento del **2005** fa emergere un dato e cioè che con una pioggia antecedente di 217.4 mm in 60 gg non si sono innescate frane, ma si è verificata l'esondazione del Canale del Lino. I terreni interessati erano da coperture detritiche calcaree e le acque hanno defluito lungo le linee di drenaggio dando origine a fenomeni di Debris Flow. Probabilmente si è trattato di un classico Flash Flood. Di questi casi sono state costruiti i relativi percorsi pluviometrici.

Si evidenzia che gli eventi che hanno dato origine alle frane superficiali (a,b,c,d) hanno necessità di un periodo di piogge antecedenti all'evento stesso anche di bassa intensità (o di nevicate, seppur modeste, come nel caso dell'evento del 2010) di almeno 10/20 gg. In questo caso anche piogge antecedenti l'evento comprese fra 50 e 100 mm in 24 ore sono in grado di mobilitare le coltri superficiali, vedi in particolare caso b. Sulla base di queste considerazioni le piogge critiche che sono state assunte nelle elaborazioni con il modello *SHALSTAB* per la parte della componente idrologica sono state comprese fra 50 e 200 mm.

### Il Risultato dell'applicazione di Shalstab - La Carta della Suscettività al dissesto per frane superficiali.

La Carta della Suscettività al dissesto in funzione delle Piogge Critiche (Fig.11) è stata redatta identificando le classi di stabilità come riportato in Tab. 7. In Fig. 12 viene presentata la elaborazione della distribuzione delle frane per classi di suscettività e, come si può notare, la

Stazione M.te Rocchetta					
Evento (mm)	1h	3h	6h	12h	24h
50	3.85	1.56	1.10	0.84	0.64
51.4	20 Gennaio 2012				0.67
70.4	15 Dicembre 2012				1.10
89	18 Marzo 2013				1.80
100	134.50	13.79	6.79	4.16	2.40
105	23 Dicembre 2010				2.41
150	4697.2	121.2	41.9	20.61	9.04
200	164054.7	1078.51	258.31	102.16	34

Tab. 6 - Eventi/Tempi di ritorno

maggior parte delle frane superficiali ricadono nella fascia "incondizionatamente Instabile" fino a Instabile fra 100 e 150 mm/d.

Quindi il concetto di stabilità è insito nella definizione del fattore di sicurezza in funzione delle piogge critiche. Il risultato ottenuto evidenzia che sul territorio di Lerici si instaurano condizioni di criticità con una situazione di suoli saturi, conseguenti alle piogge che si sono verificate in un

<b>Incondizionatamente Instabile</b>
<b>Instabile fino a 50 mm/d</b>
<b>Instabile fra 50 e 100 mm/d</b>
<b>Instabile fra 100 e 150 mm/d</b>
<b>Instabile fra 150 e 200 mm/d</b>
<b>Incondizionatamente Stabile</b>

Tab.7 - Condizioni di Stabilità

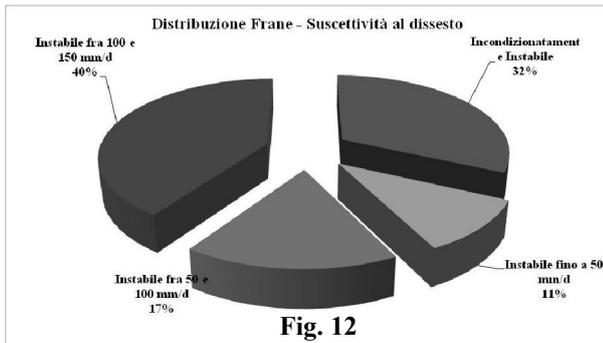
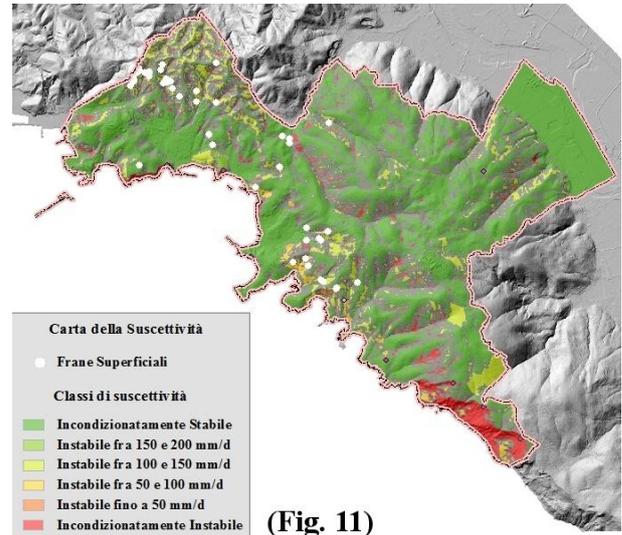


Fig. 12

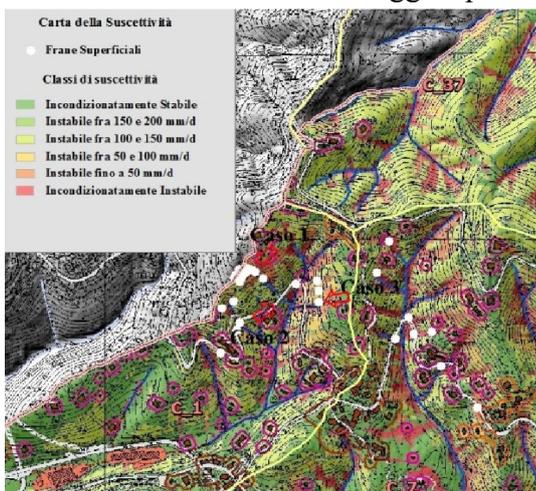


(Fig. 11)

tempo almeno di 15/20 gg antecedenti il franamento seguite da picchi di pioggia che comunque rimangono compresi fra 50 e 100 mm/d. Pare comunque significativo evidenziare come una pioggia di 50 mm/d in condizione di saturazione sia sufficiente a innescare movimenti franosi superficiali.

### Verifica e taratura del modello

La verifica e la taratura del modello che è stata eseguita con varie simulazioni confrontando i punti di innesco delle frane censite fra il 2010 ed il 2013; in particolare si vuole evidenziare che la maggior parte dei movimenti



franos  
innescati  
dagli eventi  
prima  
descritti,  
sono  
riferibili a  
scorrimenti  
superficiali  
di detrito che  
in alcuni casi  
(Caso 2) si  
sono evoluti  
in colate

mud-debris flow conosciuti anche come soil slip - debris flow (Crosta ed al. 1990). Le frane sono avvenute prevalentemente nelle concavità elementari dei versanti, dove la convergenza dei flussi idrici e la conseguente infiltrazione nella copertura favorisce la saturazione del materiale e l'aumento delle pressioni interstiziali, oppure in fasce planari ad elevata pendenza (Caso 3). Nelle figure precedenti tre casi mettono in evidenza come questi fenomeni siano ubicati all'interno dei bacini di ordine più





basso ossia in zone non ancora canalizzate (caso 1) che drenano verso l'impluvio principale, oppure in zone con flussi planari (caso 3). Tale situazione è stata riscontrata anche in altre zone di Italia come in Campania (Guida 2003, Cascini et al. 2008) e Calabria (Calcaterra&Parise 2005). In particolare è stato possibile distinguere due differenti tipologie di aree sorgenti, ossia aree di innesco corrispondenti alla porzione sommitale dei canali principali e su versanti ad elevata acclività adiacenti ai canali stessi.



Vengono qui proposti i risultati riguardanti l'area drenata (espressa in forma logaritmica) dove il deflusso è stato calcolato secondo l'algoritmo D8 modificato da S. Orlandini. L'area drenata rappresenta l'area totale a monte del pixel considerato in Horton Machine la stima è effettuata con un nuovo metodo basato sulle curvature; nonché la carta delle curvature tangenziale, entrambe derivate da *UDIG - JGrass - Horton Machine*. In ambedue viene evidenziato rispettivamente il grado di saturazione dei suoli e i canali, o le aree planari in cui si sono innescate le frane nonché la zonizzazione di suscettività al dissesto risultante. Dei tre casi viene presentata una sintesi fotografica delle frane censite.



### Conclusioni

Il lavoro effettuato ha dato la possibilità, come auspicato di individuare le aree di potenziale dissesto in rapporto alle condizioni idrogeomorfologiche e di piovosità critica, sarebbe opportuno effettuare ulteriori verifiche e approfondimenti su alcune tematiche relativamente alla trasmissività idraulica a saturazione in quanto è il dato che

manifesta oggettivamente le maggiori difficoltà nella sua determinazione. Uno dei limiti del modello, connesso con la componente del modello idrologico è quello di non poter considerare i tempi di ritorno delle piogge critiche. I risultati comunque sono soddisfacenti per gli scopi che ci eravamo posti in quanto il modello ha affinato le aree già colpite e ha evidenziato aree a propensione al dissesto molto alto confortate peraltro dalle verifiche in campo effettuate. Le elaborazioni effettuate congiuntamente ad altre hanno permesso di evidenziare i bacini che presentano maggiori criticità e che necessitano di interventi orientati alla manutenzione del territorio. L'approccio complessivo permette alla modellazione geotecnica di affrancarsi dal ruolo di indagine di dettaglio condotta localmente su aree ristrette, e possa invece assumere una valenza di tipo territoriale orientata a valutazioni e previsioni su larga scala.

### Ringraziamenti

Un doveroso ringraziamento va alla giunta dell'Amministrazione Comunale di Lerici passata e a quella attuale, che ha creduto in questo progetto e ci ha dato la possibilità di effettuare questa applicazione, agli uffici tecnici per i suggerimenti, materiali di archivio e l'esperienza in campo che ci ha permesso di individuare delle situazioni specifiche che solo l'esperienza permette di individuare. Un ringraziamento particolare va al Prof. Riccardo RIGON *direttore del Centro universitario di Eccellenza per la Difesa Idrogeologica dell'Ambiente Montano (CUDAM Università degli studi di Trento)*, ad *Hydrologis (sviluppatori di UDIG-Jgrass)* per i corsi effettuati presso di loro ed preziosi suggerimenti, al Prof. Lorenzo BORSELLI (Ex. CNR-IRPI; *Professor of*

*Geotechnics and Applied Geology Institute of Geology / Faculty of Engineering Universidad Autonoma de San Luis Potosì (UASLP), S.L.P. - MEXICO* con il quale interloquiamo sul piano scientifico da anni.

### **Bibliografia**

Borga, M., Dalla Fontana, G., Da Ros, D., and Marchi, L.: Shallow landslide hazard assessment using a physically based model and digital elevation data, *J. Environ. Geol.*, 35, 81±88, 1998.

Borselli L. (2012). "SSAP 4.2.2 - Slope Stability Analysis Program". manuale di riferimento del codice ssap versione 4.2.2a.

Carrara, F. Guzzetti (Eds.), *Geographical information Systems in Assessing Natural Hazards*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands (1995), pp. 135±175

D.P. Kroese, T. Taimre, Z.I. Botev (2011). *Handbook of Monte Carlo Methods*, Wiley Series in Probability and Statistics, John Wiley and Sons, New York.

Lanni.C, Borga.M, Rigon. R, and Tarolli.P(2012), "Modelling shallow landslide susceptibility by means of a subsurface flow path connectivity index and estimates of soil depth spatial distribution", *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 3959–3971, 2012

Montgomery. L, D. R. and Dietrich, W. E.: A physically based model for the topographic control on shallow landsliding, *Water Resour. Res.*, 30, 1153±1171, doi:10.1029/93WR02979, 1994.

O'loughlin, E. M. "Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis." *Water Resources Research* 22.5 (1986): 794-804.

Petri.P, L. Borselli.L, Sapio.F, Zini.E (2000) . "Alpmon: il land cover nella valutazione del rischio di erosione in ambiente alpino. *Atti 3° congresso naz. ASITA*, Napoli dic. 1999.

Rigon, R., D'Odorico, P., and Bertoldi, G.: The geomorphic structure of the runoff peak, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 8, 1031-1058, doi:10.5194/hessd-8-1031-2011, 2011.

Tromp-van Meerveld, H. J., and J. J. McDonnell. "Threshold relations in subsurface stormflow: 1. A 147-storm analysis of the Panola hillslope." *Water Resources Research* 42.2 (2006).