Criteri morfologici e modellazione dinamica nella valutazione della suscettibilità da frana lungo versanti carbonatici dell'Appennino Campano

Paola Revellino¹, Francesco M. Guadagno², Oldrich Hungr³

¹Dipartimento di Studi Geologici ed Ambientali, Università degli Studi del Sannio - paola.revellino@unisannio.it
²(Autore Corrispondente) Dipartimento di Studi Geologici ed Ambientali, Università degli Studi del Sannio, via Port'Arsa n.11, 82110
Benevento - guadagno@unisannio.it - fax 0824 23013

³Department of Earth and Ocean Sciences, University of British Columbia - ohungr@eos.ubc.ca

Morphological methods and Dynamic modelling in landslide susceptibility assessment of the Campania Appennine carbonate slope

ABSTRACT: Landslide hazard of the Campania carbonate slopes covered by pyroclastic deposits is mainly connected to the occurrence of high-velocity debris avalanches and debris flows. Analyses on case histories show that landslides start as small translational slides then transforming into debris avalanches and debris flows and involving the shallow pyroclastic deposits of the steep, vegetated slopes. The initial landsliding process is controlled by the interaction of numerous factors, both natural and human-induced. In particular, geomorphological settings play a decisive role in locating the source failures of landslides. On this basis it appears crucial in landslide hazard assessment: a) recognize the geomorphological control factors in terms of source areas and flows paths; b) determine parameters defining landslide intensity in terms of velocities. volumes and runout distance. An approach combining geomorphology and numerical analysis is here adopted. The main objective is to verify a procedure which aims to simulate landslide intensity scenarios predicting the runout behaviour of potential debris avalanches-debris flows by using a dynamic model previously calibrated on observed events. The selected area is a sector of the Avella Mts. falling into the same geomorphological environment of the 1998 Sarno landslides. This similarity has allowed methodologies previously adopted in post-landslide conditions to be applied to the chosen area, this time with a preventive viewpoint and therefore pre-landslide. In this paper the geo-morphological factors controlling landslide susceptibility were identified on the basis of past studies. Subsequently, in order to define those landslide intensity characteristics, a dynamic modelling of landslides that could potentially occur were tried in selected drainage sub-basins by using the model previously calibrated in the Sarno/Quindici and Cervinara areas.

Key terms: Landslides, Debris Flows, Dynamic Analysis, Campania Appennine *Termini chiave:* Frane, Debris Flows, Analisi Dinamica, Appennino Campano

Riassunto

La pericolosità da frana dei versanti carbonatici campani ricoperti da depositi piroclastici è principalmente connessa all'innesco di flussi a cinematica veloce, quali debris avalanche e debris flow. Le analisi effettuate mostrano che le instabilità hanno inizio attraverso scorrimenti traslativi di esigue porzioni di mantello piroclastico. L'innesco è controllato dall'interazione di numerosi fattori sia naturali sia antropici. Gli assetti geomorfologici giocano un ruolo decisivo nel localizzare le aree sorgenti dei flussi, per questo in una valutazione della pericolosità da frana risulta grande importanza: a) individuare geomorfologici di controllo, e b) determinare i parametri che definiscono l'intensità da frana (velocità, volume, distanza di propagazione). In questa nota, ad un approccio geomorfologico è unita un'analisi numerica che ha permesso di simulare differenti scenari d'intensità da frana prevedendo il comportamento dinamico di potenziali instabilità. A tale scopo è stato utilizzato un modello dinamico già calibrato in precedenti analisi post-frana su eventi del recente passato. L'area selezionata è un settore campione dei Monti di Avella collocato nello stesso contesto geomorfologico delle frane di Sarno del maggio '98.

1. Introduzione

La coltre piroclastica di copertura dei versanti caebonatici campani è spesso coinvolta in movimenti franosi a cinematica veloce. L'innesco di tali fenomenologie è controllato dall'interazione di numerosi fattori sia naturali sia indotti dall'uomo. Le analisi sugli eventi di dissesto del passato hanno evidenziato che gli assetti geomorfologici hanno avuto un ruolo decisivo nel localizzare le aree sorgenti di flussi che hanno poi determinato effetti catastrofici (Guadagno, 2000; Fiorillo et al., 2001; Guadagno et al., 2003a; Guadagno et al., 2005).

L'individuazione dei fattori geomorfologici di controllo, i quali definiscono le cause predisponenti di tali tipologie franose, rappresenta, pertanto, un prerequisito conoscitivo indispensabile e pone le basi per una corretta ed accurata valutazione della suscettibilità da frana. Tale valutazione dovrebbe anche analizzare quei parametri che definiscono l'intensità di un dato fenomeno e che quindi forniscono uno scenario valutativo in termini di effetti potenziali sul territorio. Ciò costituisce un fattore basilare in studi di valutazione della pericolosità frana allo scopo di definire i

limiti e l'estensione delle aree di danno potenziale.

Scopo di questa nota consiste nell'illustrare il possibile utilizzo dei risultati degli studi condotti dagli autori nell'area interessata dagli eventi franosi di Sarno/Quindici e Cervinara (rispettivamente nel 1998 and 1999) per la valutazione della suscettibilità da frana in ambienti geomorfologici affini, quale il prescelto settore campione dei Monti di Avella. Tale similitudine permette, infatti, di adottare metodologie utilizzate in analisi post-frana nella valutazione della suscettibilità.

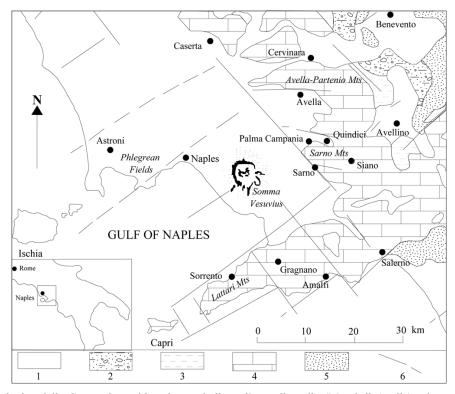


Figura 1. Schema geologico della Campania occidentale con indicate l'area di studio (Monti di Avella) e le aree di Sarno/Quindici e Cervinara. Legenda: 1) Depositi Plio-Pleistocenici; 2) Unità di Altavilla (Tortoniano-Pleistocene Medio); 3) Unità Irpine (Langhiano-Tortoniano); 4) Unità Carbonatica Alburno-Cervati (Trias-Paleocene); 5) Unità Sicilidi (Cretacico-Eocene); e 6) Principali lineamenti tettonici

Comprehensive geological map. Legend: 1) Plio-Pleistocene deposits; 2) Altavilla units (Tortonian Middle Pleistocene); 3) Irpinia units (Langhian-Tortonian); 4) Carbonate unit of the Alburno-Cervate unit (Trias-Paleocene); 5) Sicilide units (Cretaceous-Eocene); and 6) Principal faults. Locations of the study area (Avella) and of the Sarno/Quindici and Cervinara areas are also shown

2. Le instabilità dei depositi piroclastici campani

2.1 Il contesto geologico e geomorfologico

Il contesto ambientale in cui queste frane avvengono è caratterizzato da una straordinaria convergenza di fattori geologici e geomorfologici e di attività vulcanica. I rilievi sono costituiti da strutture prevalentemente monoclinaliche di sequenze carbonatiche mesozoiche (Fig. 1 - Ippolito et al., 1975), con versanti d'origine strutturale e alternativamente di faglia e di strato. I versanti di faglia vedono la presenza di numerose scarpate sub-verticali corrispondenti alle testate degli strati più competenti; i versanti di strato presentano una morfologia più regolare ed

uniforme, anche se fossi incidenti, controllati da lineamenti strutturali, interrompono la loro continuità, incrementando localmente le pendenze. A partire dal tardo Quaternario, materiali da flussi ignimbritici e da ricaduta, quali ceneri, lapilli e pomici, connessi alle attività vulcaniche esplosive dei Campi Flegrei e del Somma-Vesuvio, hanno mantellato i rilievi calcarei. Il risultato è una stratigrafia alquanto complessa con formazione di orizzonti di suoli sepolti (Guadagno F.M., Magaldi S., 2000), con spessori complessivi variabili e generalmente decrescenti da valle (> 10 m) verso monte (1- 2 m).

In tale ambiente geologico, già di per sé naturalmente fragile, le attività di uso del suolo e le modifiche antropiche

effettuate soprattutto negli ultimi decenni a seguito della meccanizzazione delle pratiche forestali hanno prodotto effetti predisponesti all'innesco di eventi di frana, favorendo lo sviluppo di una densa rete di percorsi di risalita sui pendii e sentieri (Guadagno et al., 2003a).

2.2 Caratteristiche delle frane

Le osservazioni sui fenomeni del passato (Civita M. et al. 1975, Guadagno F.M., 1991; Calcaterra D., et al. 1997), ma soprattutto la ricostruzione degli eventi franosi del maggio '98 e del dicembre '99 (Del Prete M. et al., 1998, Fiorillo F. et al. 2001), hanno evidenziato che le instabilità che interessano le coperture piroclastiche campane possono essere organizzate in un comune schema esplicativo alla base del quale è possibile individuare cause predisponesti, fattori d'innesco e comportamenti evolutivi estremamente similari.

I fenomeni prendono atto nei settori più elevati e ripidi dei pendii attraverso scorrimenti traslativi dei depositi di copertura (Guadagno F.M., 2000). Dopo l'iniziale mobilizzazione, la massa del materiale in frana, tipicamente in un percorso non canalizzato e, quindi, su versante aperto,

può incrementarsi attraverso il coinvolgimento delle sottostanti coperture di pendio. Questa fase dello sviluppo è quella che consente al materiale di accrescere considerevolmente il proprio volume trasformandosi in una *debris avalanche* estremamente rapida (cf. Hungr O. et al., 2001).

Se sussistono specifiche condizioni morfologiche, una o più valanghe possono incanalarsi in uno stesso fosso e determinare la formazione di debris flow, fenomeni tipicamente incanalati, dai volumi considerevoli, che si propagano verso valle erodendo i depositi d'alveo. Le analisi dinamiche effettuate, nonché i rilievi sulle caratteristiche geometriche dei flussi, hanno evidenziato che le velocità massime possono raggiungere i 20 m/s (Revellino P. et al. 2002, 2004). Alla base dei pendii e all'uscita dei canali, i flussi si espandono, decrementando significativamente l'energia; il materiale di frana è spesso rielaborato dalle acque di circolazione superficiale con formazione di flussi iperconcentrati (debris floods) che si propagano nelle zone vallive.

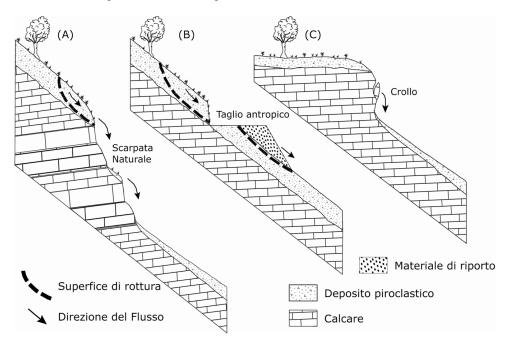


Figure 2. Sezioni schematiche lungo un versante ricoperto da piroclastiti: A) Meccanismo d'innesco in corrispondenza di una scarpata naturale; B) Meccanismi d'innesco in corrispondenza di un taglio antropico; C) Meccanismo d'innesco in seguito a crollo (da Guadagno F.M., Revellino P., 2005)

Schematic cross-sections along a pyroclastics-mantled slope: A) Instability mechanism at the location of natural scarps. B) Instability mechanism at a location of man-made cuts along a trackway. C) Instability mechanism due to a rock fall (after Guadagno F.M., Revellino P., 2005)

2.3 Caratteristiche delle aree sorgenti

Gli studi condotti su recenti *case hystorie* (Guadagno F.M., Perriello Zampelli S., 2000; Guadagno F.M. et al. 2003a,b; Guadagno F.M. et al., 2005) mostrano che gli eventi di scorrimento traslativo, instabilità iniziali del processo di frana, sono essenzialmente legati alla presenza di scarpate

naturali e di tagli antropici. Le fenomenologie verificatesi nell'area di Sarno/Quindici nel 1998 forniscono una significativa conferma.

Studi statistici relativi alle condizioni morfologiche delle zone di distacco effettuati da Guadagno F.M. et al. (2003b, 2005) per l'ampio gruppo di *debris avalanche* (176) verificatosi nell'area hanno infatti evidenziato che oltre il 60% degli scorrimenti iniziali si è innescato a monte o a valle di tagli antropici, secondo i meccanismi illustrati in Figura 2, mentre la restante parte degli eventi è legata alla instabilità di masse al bordo di scarpate naturali. Gli stessi autori, prendendo in considerazione la caratteristica forma triangolare delle *debris avalanche*, hanno individuato specifiche relazioni parametriche che sembrano collegare la geometria delle aree sorgenti con alcune caratteristiche morfologiche e stratigrafiche locali. In particolare, come mostrato in Tabella 1, è stata analizzata l'ampiezza dell'angolo apicale delle aree di distacco (dal quale dipende il volume di materiale coinvolto lungo il pendio aperto), correlandolo con l'angolo di inclinazione del pendio e l'altezza delle scarpate naturali e antropiche.

Tabella 1. Range di ampiezza dell'angolo apicale (ω) sulla base delle analisi effettuate da Guadagno F.M. et al. (2005) per differenti assetto morfologici delle aree sorgenti

Width range of the apex angle (ω) as calculated by Guadagno F.M. et al. (2005) for different morphological settings of the source areas

Condizioni morfologiche delle aree di	ω	
distacco	Min	Max
A monte di scarpate naturali	9°	35°
A monte di tagli antropici	17°	58°
A valle di tagli antropici (coinvolgenti il	5°	72°
materiale di riporto)		

2.3 Analisi dinamica

Al fine di calibrare un modello di simulazione del comportamento dinamico di flussi di prima generazione che avvengono in uno stesso contesto geo-morfologico, Revellino et al. (2002, 2004) hanno condotto una analisi dinamica delle frane attivatesi a Sarno/Quindici ed a Cervinara (1998, 1999). A tale scopo, è stato scelto il codice "DAN" (Dynamic ANalysis), sviluppato da Hungr O. (1995) e basato su una soluzione Lagrangiana esplicita dell'equazione di un flusso non stazionario che si muove in un canale aperto. La relazione utilizzata per simulare il comportamento reologico delle masse in movimento è stata, invece, quella di Voellmy A. (1955), riportata di seguito:

$$\tau = \gamma H(\cos\alpha + \frac{a_c}{g})\mu + \gamma \frac{v^2}{\xi}$$
 (1)

dove τ è la resistenza alla base del flusso, dipendente dal peso dell'unità di volume (γ) del materiale in frana (approx. 16 kN/m3), dallo spessore del flusso (H), dal coefficiente di attrito dinamico del materiale (μ) e da un coefficiente di turbolenza (ξ) con dimensioni di m/s². Questi parametri rappresentano i dati input da inserire nel programma, mentre gli altri (angolo di pendio α e accelerazione centrifuga a_c) sono ricavati direttamente sulla base delle caratteristiche geometriche della frana.

Partendo dall'assunzione che le instabilità presentano

caratteri simili in termini di stile, scala, fattori d'innesco, materiale e assetto geo-morfologico in cui avvengono, ed sulla base dei rilievi effettuati, sono stati modellati, attraverso una *back-analysis*, numerosi eventi nella zona di Sarno-Quindici e di Cervinara, ipotizzando che durante le modellazioni, lo spessore del materiale di copertura interessato dal distacco iniziale e quello eroso lungo il pendio rimanesse costante e pari a 1,5 m.

Attraverso una procedura "trial and error" è stata individuata la coppia di parametri reologici caratteristici (μ e ξ) che fornisse una buona corrispondenza con il comportamento reale del flusso. In particolare, è stato determinato che la maggior parte delle frane poteva essere simulata utilizzando il Voellmy model, con μ pari a 0.07 e ξ di 200 m/sec². Ciò ha permesso di valutare alcuni parametri di intensità delle frane, quali la massima elongazione raggiunta, la velocità del flusso e lo spessore e la distribuzione del deposito, e conseguentemente di poter effettuare una comparazione dei risultati ottenuti con i dati di misura reali in situ sui vari eventi (Tabella 2)

I risultati ottenuti dimostrano che il modello DAN e il fluido di Voellmy sono capaci di fornire simulazioni realistiche del comportamento effettivamente osservato degli eventi utilizzando soltanto un ristretto set di parametri input. Infatti, il modello ha simulato lo spostamento complessivo delle frane con un'accuratezza che differisce all'incirca del \pm 4% per 16 dei 17 casi analizzati utilizzando un'unica generale coppia di parametri di resistenza del flusso (Revellino P. et al., 2004). Buone corrispondenze sono state anche ottenute in termini di velocità del movimento e di spessore del deposito.

E' possibile, dunque, concludere che il modello può considerarsi calibrato per l'assetto geomorfologico di questo settore della regione Campania. Esso può essere utilizzato per prevedere il comportamento dinamico di potenziali instabilità nello stesso contesto geomorfologico a condizione che possa essere fatta una approssimazione realistica della loro ubicazione e geometria.

3. Metodo di analisi

Le analisi eseguite hanno avuto lo scopo di testare e di validare una procedura che mirasse a:

- valutare la suscettibilità da frana di potenziali aree sorgenti attraverso l'identificazione dei fattori morfologici predisponenti alle iniziali instabilità;
- prevedere il comportamento lungo il percorso di potenziali flussi attraverso l'utilizzo di un modello calibrato su eventi storici;
- simulare scenari di intensità da frana attraverso l'identificazione delle massime elongazione raggiunte dei volumi, delle velocità, della distribuzione e dello spessore del deposito di potenziali frane.

Al fine di giungere a tali obiettivi, l'analisi è stata condotta seguendo alcune fasi successive: a) inventario delle frane per l'area test prescelta; b) identificazione e mappatura dei siti e dei terreni potenzialmente suscettibili all'innesco; c) previsione dei punti d'innesco delle aree sorgenti dei flussi potenziali; d) stima del percorso più

probabile; e) valutazione degli scenari di frana per differenti punti di innesco tipici e volumi coinvolti (Revellino P., 2004).

Tabella 2. Sommario delle misure di velocità, massima distanza raggiunta e spessore del deposito e loro comparazioni con le analisi effettuate con il modello DAN per i 17 flussi selezionati a Sarno-Quindici e Cervinara. I risultati conseguiti con il modello sono ottenuti utilizzando i parametri di Voellmy calibrati ($\mu = 0.07$ e $\xi = 200$ m/sec²) (da Revellino P. et al. 2004, modificato)

Summary of the analysis of measured cross-sections, velocity, runout, and deposit thickness and their comparison with DAN model analysis for the 17 flows selected from Sarno-Quindici and Cervinara landslide events. The model calculations are based on the general Voellmy parameters $\mu = 0.07$ and $\xi = 200$ m/sec² (after Revellino et al. 2004, modified)

Evento	Velocità				Distanza		Spessore Deposito		
	Sezione	Run-up	Superelevazione	Modello	Reale	Modello	Sito	Reale	Modello
		(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m)	(m)		(min/max)	(m)
								(m)	
1					993	1003	m	0,2/0,6	0,4
	h		8,3	7,1			n	2,5/4,0	4,1
2	i 1	15,3	7,1	8,4 14,2	1883	1923	o	5,0/8,0	4,8
3					480	518	р	0,4/0,8	0,4
4	b g		5,5 12,8	6,1 10,2	3397	3280	a	1,5/3,0	2,8
5					2560	2591	b	0,7/1,4	1,5
6					1895	1995			
-					1960	1890	С	0,8/1,0	0,6
7					1860	1890	d	0,4/0,5	0,2
8					2051	2074	e	0,4/0,7	0.4
0					2031		f	0,6/0,8	0,5
9	a		10,3	9,4	1535	1589	g	0,4/1,0	2,3
10					1955	2069	h	0,2/0,4	0,2
11					2028	2077			
12					1122	1145			
13					1052	1170			
14					1965	2058			
15	c d		5,9 6,1	6,2 5,9	3210	2990	i 1	0,4/0,8 0,6/1,0	0,4 1,5

Attraverso rilievi geologici e morfologici ed analisi di eventi del passato è stato realizzato un inventario delle frane per l'area di studio, ove sono stati identificati anche tutti i locali assetti morfologici che potrebbero potenzialmente indurre l'innesco di tali fenomenologie (es. scarpate naturali, tagli artificiali, zone di gomito dei percorsi di risalita). La previsione dei punti d'innesco delle aree sorgenti dei flussi potenziali è stata effettuata in maniera deterministica attraverso l'individuazione di alcuni siti critici, individuati sulla base dslla presenza di fessure, punti di ruscellamento e infiltrazione preferenziale di acque superficiali.

La geometria delle aree sorgenti delle potenziali frane è stata definita utilizzando i parametri statistici derivati dalle analisi condotte sull'ampia casistica di dati disponibili nelle aree di Sarno-Quindici elaborati da Guadagno F.M. et al. (2003b, 2005) ed in particolare assumendo la minima e la massima apertura dell'angolo apicale per ogni assetto morfologico tipico (Tabella 2). In base all'apertura dell'angolo apicale, sono state definite differenti geometrie di eventi potenziali allo scopo di valutare l'entità della propagazione di differenti volumi di materiali mobilizzati durante l'evento franoso.

Successivamente, il percorso dell'evento franoso

simulato è stato delineato sulla base di una procedura di "random walking", il cui uso è giustificato dal carattere di flusso dell'evento. Nello specifico, utilizzando il software CAD VectorWorks, è stata condotta un'analisi morfometrica attraverso l'utilizzo di un'analisi vettoriale delle pendenze del versante. Sulla base cartografia disponibile in scala 1:5,000, l'area dei sotto-bacini coinvolti dai potenziali eventi franosi, è stata suddivisa in celle da 20x20 metri. Per ogni cella è stata stimata la pendenza media e conseguentemente la direzione del flusso preferenziale. I percorsi degli eventi di debris avalanche-debris flow e i limiti delle aree di deposito sono stati definiti seguendo le linee di flusso così ottenute.

Lo spessore dei materiali inizialmente coinvolti e quello dei materiali erosi verso valle sono stati dedotti dalle misure di sito sulla copertura piroclastica assumendo il coinvolgimento del materiale sia di pendio sia di alveo. Il limite a valle della parte erosa è stato posto all'uscita dei canali

Come detto in precedenza, la forte similarità degli assetti morfologici tra l'area dei Monti di Avella e quelli di Sarno/Quindici e Cervinara giustifica l'utilizzo dei parametri precedentemente calibrati e utilizzati con successo nelle analisi DAN precedentemente effettuate da Revellino et al. (2002, 2004). Per verificare la validità dei parametri selezionati nell'area test, il modello è stato testato su alcuni eventi di frana verificatisi nel maggio 1998 nell'area prescelta. I dati ottenuti, e paragonabili a quelli scaturiti dalle procedure di calibrazione, riguardano la distanza raggiunta, la velocità e lo spessore del deposito, anche se a scopo comparativo è stato possibile utilizzare soltanto i dati di massima elongazione esposti in Tabella 3.

Tabella 3. Volume iniziale e finale per tre eventi nell'area test e comparazioni sulle massime propagazioni calcolate attraverso le analisi DAN utilizzando $\mu=0.07$ and $\xi=200$ m/s²

Initial and final volumes calculated by DAN on three events of the test area and summary of the analysis of measured runout distance. The model calculations are based on the Voellmy parameters $\mu = 0.07$ and $\xi = 200$ m/s²

Evento	Volume (1	m^3)	Spostamento (m)		
	Iniziale	Finale	Reale	Modello	
1	103	35953	1865	1938	
2	175	9566	928	1001	
3	323	25661	1474	1572	

4. Risultati

Al fine di definire scenari di intensità da frana basati sulla determinazione delle massime elongazioni da specifiche aree sorgenti dei sottobacini selezionati, così come delle velocità e delle energie, è stata condotta una modellazione dinamica dei potenziali flussi. Le osservazioni geomorfologiche hanno evidenziato che, anche nell'area prescelta, le zone d'innesco dei flussi inventariati sono riconducibili ai tre assetti in Tabella 1, ovvero connessi alla

presenza di tagli stradali, a monte ed a valle (b), di scarpate naturali (c).

Nello specifico, le analisi dinamiche illustrate nella Figure 3 sono stata condotte considerando un'area sorgente collocata nell'assetto morfologico di tipo b. Infatti, anche se nell'area prescelta la morfologia dei versanti è sostanzialmente regolare e gli angoli di pendio superano 40° solo in corrispondenza di alcune discontinuità morfologiche (Figure 4), l'assetto naturale appare localmente modificato dalla presenza di percorsi di risalita.

Ad una quota di circa 900 m s.l.m., è stato infatti individuato come punto di innesco più probabile di un potenziale evento franoso un segmento di sentiero "a corda molle" ove sussistono evidenze di sviluppo di condizioni d'instabilità. A scopo comparativo, le geometrie delle potenziali masse sorgenti sono state delineate e definite utilizzando un angolo apicale (ω) di 5°, per l'ampiezza minima, e di 72°, per quella massima (così come scaturito dalle analisi mostrate in Tabella 2), in quanto l'area sorgente della potenziale debris avalanche è collocata a valle del taglio stradale.

Le misure in sito dello spessore dei depositi piroclastici presenti sul versante e potenzialmente coinvolgibili ha permesso di definire un valore medio delle masse erodibili. In particolare, le analisi dinamiche sono state condotte assumendo uno spessore di materiale eroso pari a 1.5 m per il percorso della debris avalanche (fino ad una quota di circa 800 m s.l.m.) e di 1.0 m per la parte di percorso nel fosso di erosione. I risultati dell'analisi dinamica per la minima (Evento A) e la massima (Evento B) ampiezza dell'angolo apicale sono mostrati in Figura 4.

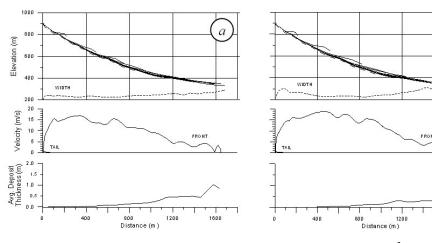


Figure 3. Risultati dell'analisi dinamica utilizzando il modello di Voellmy ($\mu = 0.07$; $\xi = 200 \text{ m/s}^2$): A) Evento A ($\omega = 5^\circ$); B) Evento B ($\omega = 72^\circ$). I profili del flusso sono plottati ad intervalli di 20 secondi. Lo spessore del flusso e quello della parte erosa sono moltiplicati per 10. La relazione velocità-distanza è calcolata sia per il fronte che per la coda del flusso. E' inoltre indicato lo spessore medio del deposito lungo il percorso (Revellino P., 2004)

Result of dynamic analysis using the Voellmy model within DAN (μ , of 0.07 and ξ , of 200 m/s²): Event A (ω = 5°); Event B (ω = 72°). (The flow profiles are plotted at 20-second intervals. Flow depth and erosion depth are multiplied by 10. Velocity-distance relationship is shown both for the front and the tail of the landslide. The average deposit thickness along the path is also plotted (Revellino P., 2004)

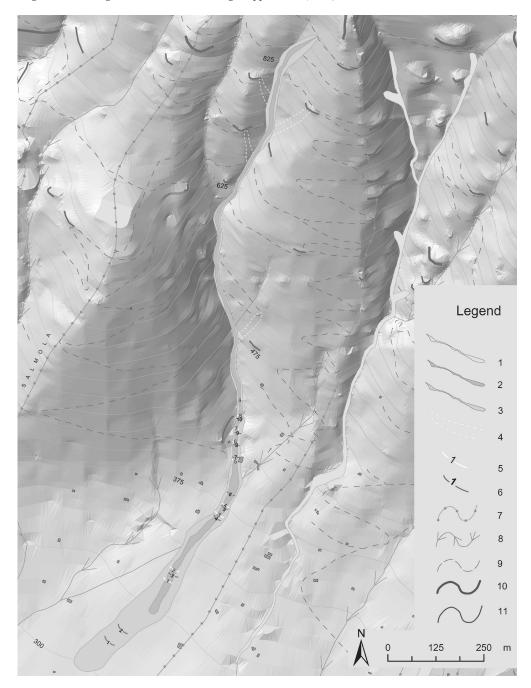


Figure 4. Geometrie degli eventi A e B ottenute con il DAN. Leg.: 1) Area in frana; 2) Evento A; 3) Evento B; 4) Area di frana potenziale; 5) Distribuzione delle velocità per l'Evento A in m/s; 6) Distribuzione delle velocità per l'Evento B in m/s; 7) Spartiacque secondario; 8) Fosso in erosione; 9) Scarpata antropica; 10) Scarpata naturale (h > 5 m); 11) Scarpata naturale (h < 5 m) Simulated path geometry of Event A and Event B events as obtained from the analyses. Velocity flow profiles along the landslide axes are also shown for both cases. Legend: 1) Landslide area; 2) Event A path; 3) Event B path; 4) Potential landslide areas 5) Event A velocity distribution in m/s; 6) Event B velocity distribution in m/s; 7) Secondary watersheds; 8) Gullies cut in bedrock; 9) Trackways scarps; 10) Natural scarps (height > 5 m); 11) Natural scarps (height > 5 m)

Come atteso, la propagazione delle masse degli eventi ipotizzati si incrementa all'aumentare del volume coinvolto. Nello specifico per l'evento A è stato ottenuto uno spostamento massimo di 1645 m per 8208 m³ di volume mobilitati; per l'Evento B, 21023 m³ di volume mobilitati

hanno invece prodotto uno distanza massima di 1879 m. In entrambi i casi, invece, il modello ha simulato uno spessore massimo finale del deposito di circa 1 m. La Figura 6 mostra le geometrie dei flussi simulati e la distribuzione delle velocità ottenute lungo l'asse di frana così come

previste dal modello. In particolare, è interessante notare come le velocità del flusso allo sbocco di canali sono dell'ordine dei 9 m/s, for l'Evento A e maggiori di 10 m/s per l'Evento B.

5. Conclusioni

I risultati descritti, confrontati con quelli ottenuti in studi precedenti, mostrano che il codice DAN, la reologia di Voellmy e le procedure adottate potrebbero fornire un utile strumento per la valutazione del comportamento dinamico di potenziali debris avalanche e debris flow in Campania. Tale analisi, oltre a valutare i più importanti parametri d'intensità (massima distanza, velocità e spessore del deposito) degli eventi simulati nell'ottica di una valutazione delle suscettibilità, ha anche evidenziato che questi sono

fortemente dipendenti, come ci si aspettava, dalla magnitudo dell'evento.

È importante notare che il modello così calibrato ed il suo utilizzo per predire il comportamento di potenziali eventi franosi può essere applicato solo alle specifiche condizioni dei flussi campani. Si ritiene questo un risultato di significativa importanza nell'ottica delle analisi da effettuarsi in un'area che, come visto, propone condizioni similari, in termini di assetti geomorfologici. Se la definizione delle aree suscettibili appare d'importanza fondamentale nell'ambito della pianificazione territoriale, la deduzione dei caratteri cinematici e dinamici degli eventi appare prioritaria per la progettazione delle opere di difesa ove non sia possibile intervenire nelle aree sorgenti.

Bibliografia

Calcaterra D., Santo A., De Riso R., Buretta P., Di Crescenzo G., Franco I., Galletta G., Iovinelli R., Napoletano P., Palma B. (1997). "Fenomeni franosi connessi all'evento pluviometrico del gennaio 1997 in Penisola Sorrentina". IX Congresso Nazionale Geologi, Roma.

Civita M., de Riso R., Lucini P., Nota d'Elogio E. (1975). "Sulle condizioni di stabilità dei terreni della Penisola Sorrentina (Campania)". Geologia Applicata e Idrogeologia, 10.

Del Prete M., Guadagno F.M., Hawkins B. (1998). "Preliminary report on the landslides of 5 May 1998, Campania, southern Italy". Bulletin of Engineering Geology and Environment, 57.

Johnson A.M. (1984). "Debris flows". In Brudsen & Prior (eds). Slope Instability. London.

Fiorillo F., Guadagno F.M., Aquino S., De Blasio A. (2001). "The December 1999 Cervinara landslides: further debris flows in the pyroclastic deposits of Campania (southern Italy)". Bulletin of Engineering Geology and Environment, 60 (3).

Guadagno F.M. (1991). "Debris flows in the Campanian volcaniclastic soil". Slope Stability Engineering. Thomas Telford, London.

Guadagno F.M. (2000). "The landslides of 5th May 1998 in Campania, Southern Italy: natural disasters or also man-induced phenomena?" Journal of Nepal Geological Society, 22...

Guadagno F.M., Magaldi, S. (2000)."Considerazioni sulle proprietà geotecniche dei suoli allofanici di copertura delle

dorsali carbonatiche campane". Quaderni di Geol. Appl., 7(2).

Guadagno F.M., Perriello Zampelli S. (2000). "Triggering mechanisms of the landslides that inundated Sarno, Quindici, Siano and Bracigliano (S. Italy) on May 5-6, 1998". Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides, Cardiff, 2.

Guadagno F.M., Revellino P. (2005). "Debris avalanches and debris flows of the Campania Region (Southern Italy)". In Matthias Jakob & Oldrich Hungr (ed.), Debris-Flow Hazards and Related Phenomena. Springer Verlag editorial.

Guadagno F.M., Martino S., Scarascia Mugnozza G. (2003a). "Influence of man-made cuts on the stability of pyroclastic covers (Campania – Southern Italy): a numerical modelling approach". Environmental Geology, 43.

Guadagno F.M., Fiorillo F., Focareta M., Forte R., Revellino P. (2003b). "Alcune considerazioni sulle instabilità delle coperture piroclastiche campane". I Congresso Nazionale AIGA, Chieti, Rendina Ed.e, 493-508.

Guadagno F.M., Forte R., Revellino P., Fiorillo F., Focareta M. (2005). Geomorphology of the Source areas of the flows involving the pyroclastic soils of Campania (Southern Italy). Geomorphology, 66.

Hungr O. (1995). "A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches". Canadian Geotechnical Journal, 32.

Hungr O., Evans S.G., Bovis M., Hutchinson

J.N. (2001). "Review of the classification of landslides of the flow type". Environmental and Engineering Geoscience, 7(3).

Revellino. P. 2004. "The instability of pyroclastic deposits of the Campania: dynamic analysis and landslide susceptibility in a sample sector of the Avella-Partenio range". PhD Thesis.

Revellino P., Guadagno F.M., Hungr O. (2005). "Debris avalanche and debris flow susceptibility by using morphological factors and dynamic modelling: a case study in Campania (Southern Italy)". International Conference on Landslide risk management, Vancouver, Canada

Revellino P., Hungr O., Guadagno F.M., Evans S.G. (2002). "Dynamic analysis of recent destructive debris flows and debris avalanches in pyroclastic deposits, Campania region, Italy." Int. Conf. on Instability - Planning and Management. Ventnor, Isle of Wight, UK.

Revellino P., Hungr O., Guadagno F.M., Evans S.G. (2004). "Velocity and runout simulation of destructive debris flows and debris avalanches in pyroclastic deposits, Campania Region, Italy". Environmental Geology, 45.

Sassa K. (1984). "The mechanism starting liquefied landslides and debris flows". Proceedings IV International Symposium On Landslides, Toronto.

Voellmy A (1955). "Über die Zerstorungskraft von Laimen". Schwerzerische Bauzertung, 73.