

PROPOSTA DI UN NUOVO METODO SEMIQUANTITATIVO PER LA VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ ALL'INNESCO DI COLATE RAPIDE DI FANGO NEI CONTESTI CARBONATICI DELLA CAMPANIA

PROPOSAL OF A NEW SEMIQUANTITATIVE METHODOLOGY FOR FLOWSLIDES TRIGGERING SUSCEPTIBILITY ASSESSMENT IN THE CARBONATE SLOPE CONTEXTS OF CAMPANIA (SOUTHERN ITALY)

GIUSEPPE DI CRESCENZO(*), MELANIA DE FALCO(**), VITTORIO EMANUELE IERVOLINO(**), SILVANA RINALDI(***) & NICOLETTA SANTANGELO(****) & ANTONIO SANTO(*****)

(*) Dottorato di ricerca in Geologia Applicata e Ambientale - Università di Napoli Federico II. E-mail: g.di.crescenzo@alice.it

(**) Geologo libero professionista. E-mail: melaniadefalco@yahoo.it; veiervolino@yahoo.it

(***) Dipartimento di Matematica e Applicazioni - Università di Napoli Federico II. E-mail: silvana.rinaldi@unina.it

(****) Dipartimento di Scienze della Terra - Università di Napoli Federico II. E-mail: nicsanta@unina.it

(*****) Sezione di Geologia Applicata - Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica ed Ambientale - Università di Napoli Federico II. E-mail: santo@unina.it

RIASSUNTO

Le frane da colata rapida sono fenomeni molto frequenti in Campania e rappresentano un serio rischio per la comunità come evidenziato dal grande numero di vittime e dagli ingenti danni causati nelle ultime decine di anni.

In questo lavoro viene proposto un metodo per la valutazione della suscettibilità all'innesco di tale tipologia franosa. Il metodo si basa su una tecnica di sovrapposizione di carte tematiche ed utilizza un approccio geomorfologico che prende in considerazione una grande quantità di dati morfometrici raccolti negli ultimi anni su un campione di 187 frane da colata rapida. Partendo da tali dati, attraverso un'analisi statistica, sono stati scelti i fattori più significativi all'innesco e rappresentati su carte a grande scala (1:5.000). Ad ogni fattore predisponente è stato attribuito un valore numerico (score) con un approccio sia euristico che statistico. Le carte tematiche sono state pesate e incrociate mediante l'utilizzo di un GIS adottando una relazione matematica che ha permesso di allestire la carta della suscettibilità finale.

Il metodo è stato testato in un'area dei Monti Lattari, già in passato interessata da diversi fenomeni di colata rapida. Su un campione di circa 774 fenomeni franosi segnalati nell'area da differenti enti, circa il 91% si colloca nelle classi a suscettibilità alta e altissima.

TERMINI CHIAVE: suscettibilità da frana; colate rapide, coperture piroclastiche, Italia meridionale

INTRODUZIONE

Nel presente lavoro viene proposto un metodo per la valutazione della suscettibilità all'innesco di colate rapide che coinvolgono terreni piroclastici sciolti su versanti carbonatici.

Le frane studiate sono attribuibili genericamente a tipologie di flusso in cui vengono coinvolte miscele di "acqua-sedimento" (JOHNSON & RODINE 1984; PEARSON & COSTA 1987; HUTCHINSON, 1988).

Secondo REVELLINO *et alii* (2004) e GUADAGNO & REVELLINO (2005) possono essere classificate come "debris avalanche-debris flows". In accordo con CASCINI *et alii* (2003), CAIRO & DENTE (2003) e OLIVARES & PICARELLI (2006) riteniamo invece che possano essere meglio definite come "flow slides".

Lo studio deriva da esperienze maturate in oltre dieci anni di atti-

ABSTRACT

Flowslides are quite frequent phenomena in Campania region and present a serious hazard to the community as evidenced by the large number of victims and the huge economic damage caused over the last few years.

In this work a method for assessing the triggering susceptibility to this type of landslide is proposed. It utilizes the overlay mapping technique, has a geomorphological approach and takes into account a great quantity of morphometric data, collected from over 187 flowslides in recent years. By taking this database into account the main factors which were significant in triggering the slides were selected throughout a statistical approach and compiled at 1:5,000 scale. A numerical value ("score") was then attributed to each predisposing factor both with a heuristic and a statistical approach. Thus the thematic maps can be weighted and overlaid by means of a GIS application, using a mathematical expression, allowing the elaboration of the landslide susceptibility map.

The method was tested in the area of the Lattari Mountain ridge, which was in the past affected by various flowslides. Of a sample of 774 landslides recorded in the area by different authorities, 91% were collocated in the very high and high susceptibility classes.

KEY WORDS: landslides susceptibility; flowslides, pyroclastic soil mantle, Southern Italy

INTRODUCTION

In this paper we propose a method for the assessment of the triggering susceptibility to flowslides involving unconsolidated pyroclastic deposits covering carbonate slopes.

The studied landslides are generally connected to flow mechanisms involving water-sediment mixtures (JOHNSON & RODINE 1984; PEARSON & COSTA 1987; HUTCHINSON, 1988).

REVELLINO *et alii* (2004) and GUADAGNO & REVELLINO (2005) classified them as "debris avalanche-debris flows". According to CASCINI *et alii* (2003), CAIRO & DENTE (2003) e OLIVARES & PICARELLI (2006) we believe they can be better defined as "flow slides".

The study comes from a decade's experience in the western

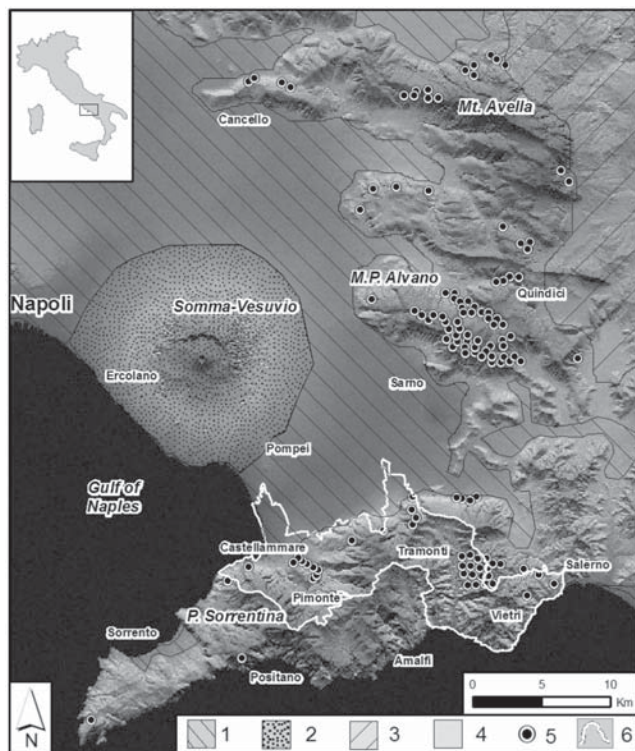


Fig. 1 - Carta con ubicazione dell'area studiata. Legenda: 1) Depositi piroclastici da caduta e detritico-colluviali; 2) Vulcano del Somma-Vesuvio; 3) Depositi terrigeni del Miocene; 4) Rocce carbonatiche del Mesozoico; 5) Colata rapida di fango; 6) Area campione
- Location map of the studied area. Legenda: 1) Pyroclastic fall and detrital-alluvial deposits; 2) Somma-Vesuvius Volcano; 3) Miocene terrigenous deposits; 4) Mesozoic limestones; 5) Flowslide; 6) Test area

vità nel settore occidentale dell'Appennino campano; in quest'area (Fig. 1) i depositi piroclastici da caduta provenienti dal complesso vulcanico del Vesuvio hanno ricoperto estesamente, nel corso del tardo Quaternario, i vicini massicci carbonatici mesozoici (ROLANDI *et alii*, 1993a, b; 2003; ROLANDI, 1997; DI VITO *et alii*, 1999; SIGURDSSON *et alii*, 1982; LIRER *et alii*, 1993).

Sui versanti a maggiore acclività, in concomitanza di intense precipitazioni, nell'ultimo secolo si sono innescate più volte colate rapide di fango (velocità di circa 40 km/h) che hanno coinvolto in alcuni casi più di 200.000 m³ di terreno. In particolare, tra il gennaio 1997 ed il marzo 2005 si sono verificati numerosi eventi nella regione (Castellammare, Sarno, Cervinara, Avellino e Nocera) che hanno causato più di 200 vittime (GUADAGNO, 1991; CALCATERRA *et alii*, 1997; DI CRESCENZO & SANTO, 1999; DEL PRETE *et alii*, 1998; CASCINI *et alii*, 2000; DE RISO *et alii*, 1999, PARESCHI *et alii*, 2002, CROSTA & DAL NEGRO, 2003).

Per tale motivo l'attenzione della comunità scientifica e delle principali autorità pubbliche (Autorità di Bacino) si è concentrata molto sullo studio di queste frane allo scopo di prevenire e ridurre il rischio associato a questi eventi catastrofici. Tali studi sono stati finalizzati alla realizzazione di carte di suscettibilità che prevedono la zonazione del territorio in classi diverse, in funzione della propensione al distacco di frane. Questi elaborati sono particolarmente importanti per la delimitazione delle aree di invasione da frana (runout) e quindi delle aree soggette a rischio più o meno elevato.

sector of the Southern Apennine chain; this area (Fig. 1) is characterized by the cropping out of high-energy carbonate massifs which, due to their proximity to the Vesuvius volcanic complex, during Late Quaternary times were covered by thick sequences of volcanic ashes and pumices (ROLANDI *et alii*, 1993a, b; 2003; ROLANDI, 1997; DI VITO *et alii*, 1999; SIGURDSSON *et alii*, 1982; LIRER *et alii*, 1993).

Unfortunately in the last century, along the steeper slopes, during or after intense precipitations, flowslides (speed of about 40 km/h) were often triggered, involving as much as 200,000 m³ of earth. In particular, from January 1997 until March 2005 numerous failures occurred in the region (Castellammare, Sarno, Cervinara, Avellino and Nocera events) causing more than 200 victims (GUADAGNO, 1991; CALCATERRA *et alii*, 1997; DI CRESCENZO & SANTO, 1999; DEL PRETE *et alii*, 1998; CASCINI *et alii*, 2000; DE RISO *et alii*, 1999, PICARELLI & OLIVARES, 2001; PARESCHI *et alii*, 2002, CROSTA & DAL NEGRO, 2003).

Hence in the last few years researchers and the main public authorities (River Basin Authorities) have focused on flowslides to prevent and reduce the risk connected to such catastrophic events. The main goal of these studies was to construct susceptibility maps, zoning the territory according to the different degree of possibility of slide triggering. These maps are necessary to identify possible inundation areas and calculating risk degrees. GIS applications were often used, facilitating the interaction of different thematic maps, together

L'applicazione di programmi GIS facilita sia le operazioni di intersezione tra le varie carte tematiche ma anche la gestione e l'analisi di un gran numero di dati.

La metodologia proposta si basa sulla sovrapposizione di carte tematiche e sulla identificazione dei fattori più significativi per l'innescamento di queste frane. Essa segue un approccio geomorfologico e si basa sull'analisi statistica di dati morfometrici relativa ad un campione di 187 frane da colata rapida con lunghezza superiore a 150 m verificate in Campania negli ultimi due secoli (Tab. 1). Inoltre è un metodo relativamente semplice e particolarmente adatto per aree alla scala di bacino dove è di norma più difficile avere a disposizione un numero significativo di parametri geotecnici, idraulici e idrogeologici.

IL QUADRO DELLE CONOSCENZE SULLA REDAZIONE DELLE CARTE DELLA SUSCETTIBILITÀ A FRANARE

I diversi metodi per valutare la suscettibilità a franare possono essere classificati in quattro gruppi differenti (SOETERS & VAN WESTEN, 1996; VAN WESTEN *et alii*, 1997; ALEOTTI & CHOWDHURY, 1999):

- inventari di fenomeni franosi;
- metodi euristici;
- metodi deterministici;
- metodi statistici.

Le carte inventario sono realizzate prevalentemente attraverso foto-interpretazione con integrazione di dati storici e riportano informazioni relative alla tipologia di frana e al tipo di attività (GUIDA *et alii*, 1978).

Possono essere utilizzate per determinare la densità dei fenomeni franosi mediante isoplete (CANUTI *et alii*, 1985; DE GRAFF & CANUTI, 1988) oppure la percentuale di area in frana per ogni unità geologica (BRABB *et alii*, 1972; RADBRUCH-HALL, 1982). Le carte della suscettibilità redatte con questo metodo sono documenti di rapida esecuzione ma hanno un limite legato alla soggettività.

I metodi euristici permettono la valutazione della suscettibilità da frana utilizzando una serie di fattori di franosità (ANBALAGAN, 1992; TURRINI *et alii*, 1998; TURRINI & VISINTAINER, 1998). Ad ogni fattore viene dato un punteggio (score) in funzione della sua influenza sulla stabilità dei versanti e la carta finale si ottiene mediante sovrapposizione delle carte tematiche. I vantaggi di tale metodo sono legati alla possibilità di utilizzare un GIS che consente di fare analisi anche a diversa scala; gli svantaggi sono legati alla soggettività con la quale i fattori di franosità sono scelti e pesati.

L'approccio deterministico si basa sul calcolo del fattore di sicurezza dei pendii mediante analisi di stabilità all'equilibrio limite. Questo tipo di approccio è stato largamente utilizzato in ingegneria civile e geologia applicata, soprattutto dopo l'introduzione dei GIS (TERLIEN *et alii*, 1995; WU & SIDLE, 1995). Tra i più utilizzati si ricordano il modello SHALSTAB di MONTGOMERY & DIETRICH (1994) e il modello SINMAP (PACK *et alii*, 1998). Gli svantaggi di tali metodologie risiedono nella difficoltà di poter acquisire su vasta

with the management and analysis of a large amount of data.

The proposed methodology utilizes the overlay mapping technique and is based on identifying the most significant factors influencing the triggering of this slide type. It adopts a geomorphologic approach and results from a statistical analysis of morphometric data from a sample of 187 flowslides with a travel distance exceeding 150 m occurring in the Campania region during the last two centuries (Tab. 1). Moreover it is a relatively simple method to use and is particularly suitable for studies at the river basin scale where collecting experimental data covering geotechnical, hydraulic and hydrogeological parameter is generally difficult.

PREVIOUS KNOWLEDGE OF LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY EVALUATION

The different methods for evaluating landslide susceptibility can be summed up in four principal groups (SOETERS & VAN WESTEN, 1996; VAN WESTEN *et alii*, 1997; ALEOTTI & CHOWDHURY, 1999):

- landslide inventory;
- heuristic method;
- deterministic method;
- statistical method.

Landslide inventory maps, generally drawn based on aerial photo interpretation and historical analysis, give information on landslide type and activity (GUIDA *et alii*, 1978).

They can be used to evaluate landslide density by means of isopleths (CANUTI *et alii*, 1985; DE GRAFF & CANUTI, 1988) or the landslide areas percentage for each lithological unit (BRABB *et alii*, 1972; RADBRUCH-HALL, 1982). This approach is very quick and easy to use but is limited by its subjectivity.

Heuristic methods allow landslide susceptibility to be assessed taking into account the main predisposing factors on slope instability (ANBALAGAN, 1992; TURRINI *et alii*, 1998; TURRINI & VISINTAINER, 1998). Each factor can be weighted considering its influence and final map is obtained by overlying the various thematic maps. The main advantages of this methodology are the possibility of using GIS applications that allows a quick analysis at different scales; the disadvantage is the subjectivity in factor selection and weighting.

The deterministic approach is based on the evaluation of the slope safety factor by means of the analysis of stability to the equilibrium limit. This approach has been widely applied in civil engineering and engineering geology after the introduction of GIS (TERLIEN *et alii*, 1995; WU & SIDLE, 1995). The most widely used are the SHALSTAB model by MONTGOMERY & DIETRICH (1994) and the SINMAP model (PACK *et alii*, 1998). The main disadvantage of these methods lies in the difficulty in collecting at large scale the numerous geotechnical and hydraulics parameters required. Hence these applications are generally suggested for detailed studies regarding a single slope or portion thereof.

Bivariate or multivariate statistical analysis is often applied at the

scala, i numerosi parametri geotecnici ed idraulici necessari. Pertanto, queste applicazioni sono utilizzate, generalmente su singoli versanti o su singole porzioni di essi.

L'analisi statistica (bivariata o multivariata) è spesso utilizzata nella previsione a scala di bacino e garantisce un minore grado di soggettività rispetto ai metodi euristici. I risultati ottenuti possono essere estrapolati a zone prive di eventi franosi in atto, in cui esistono condizioni predisponenti per situazioni future di instabilità. L'analisi statistica *bivariata* confronta ogni fattore di franosità con la carta inventario (BRABB, 1984; YIN & YAN, 1988; VAN WESTEN, 1993; CARRARA, 1995; CHUNG *et alii*, 1995) trascurando la possibilità che i fattori di franosità possano avere una correlazione reciproca significativa. L'analisi statistica multivariata, invece, considerando l'influenza reciproca tra i diversi fattori, costruisce modelli matematici in cui tutte le variabili intervengono contemporaneamente ad influenzare la suscettibilità (CLERICI & DALL'OLIO, 1995). L'analisi può essere applicata tramite modelli di regressione (BERNKNOFF *et alii*, 1988; JADE & SARKAR, 1993; WIECZOREK *et alii*, 1996) o discriminanti (CARRARA, 1983; CARRARA *et alii*, 1991; CHUNG *et alii*, 1995; BAEZA & COROMINAS, 1996). Detti modelli - una volta costruiti e validati - sono utili per effettuare previsioni o stime di suscettibilità di frane; spesso l'equazione può essere utilizzata con risultati soddisfacenti anche su zone diverse da quelle in cui è stata stimata.

La valutazione della suscettibilità a frane da colata rapida in Campania

Tra i primi studi sulla valutazione delle colate rapide in Campania si ricordano quelli di PARESCHI *et alii* (1998, 2002) che hanno effettuato una zonazione in scala 1:25.000 in ambiti carbonatici attraverso la correlazione di due parametri principali: acclività dei versanti e spessori delle coperture piroclastiche.

Lo studio di AMANTI *et alii* (1998), in scala 1:25.000, è basato sull'analisi statistica di una serie di eventi (84 fenomeni franosi) avvenuti nell'area test di Sarno. Il metodo considera un insieme di fattori che possono condizionare l'innescò di colate rapide quali: pendenza dei versanti (S), spessore delle coltri piroclastiche e detritiche (T), distanza dalle linee di impluvio (D), uso del suolo (L) ed ordine gerarchico del bacino idrografico (B). L'indice di suscettibilità viene calcolato mediante la formula: $I = [S^{(1+T+D)} \cdot L \cdot B]$.

ALEOTTI *et alii* (2000) hanno valutato la pericolosità delle colate rapide di fango nell'area di Sarno (Campania), mediante la tecnica ALTM (Airborne Laser Terrain Model). Sono state realizzate carte tematiche mediante l'individuazione di fattori geologico-geomorfologici predisponenti all'innescò (pendenze, spessore critici dei depositi piroclastici, rotture di pendenza su versante sia naturali che artificiali). La carta dei fattori predisponenti è stata combinata con quella delle concavità e delle distanze dagli spartiacque.

CALCATERRA *et alii* (2003), modificando il metodo di AMANTI *et alii* (1998), hanno realizzato carte tematiche ad una scala di maggiore dettaglio (1:5.000), in tre contesti geologici differenti rappresenta-

basin scale and based on the same principles as the heuristic one but guarantees a lower degree of subjectivity. Hence the results of this analysis can be extrapolated in areas where landslides still have not occurred and used for provisional studies.

Bivariate analysis compares each predisposing factor with the landslide inventory map (BRABB, 1984; YIN & YAN, 1988; VAN WESTEN, 1993; CARRARA, 1995; CHUNG *et alii*, 1995) without considering any significant reciprocal correlation between single factors. By contrast, multivariate analysis, giving attention to the reciprocal influence among different factors, builds mathematical models considering at the same time the influence on susceptibility of all the variables (CLERICI & DALL'OLIO, 1995). Analysis can be applied by using regression (BERNKNOFF *et alii*, 1988; JADE & SARKAR, 1993; WIECZOREK *et alii*, 1996) or discrimination (CARRARA, 1983; CARRARA *et alii*, 1991; CHUNG *et alii*, 1995; BAEZA & COROMINAS, 1996) models. These models, after being built and checked, can be useful for susceptibility prediction or evaluation studies; often the equations can be satisfactorily used also in areas other than those for which they were constructed.

The evaluation of flowslides susceptibility in Campania

Among those that evaluated the flowslides in Campania, we can mention the papers of PARESCHI *et alii* (1998, 2002) who carried out susceptibility zoning at the scale 1:25,000 in some carbonate settings, based on the relationship between two main parameters, slope angles and pyroclastic cover thickness.

The study by AMANTI *et alii* (1998), at the scale 1:25,000, was based on a statistical analysis of a series of events (84 landslide phenomena) occurring in the sample area of Sarno. The method takes into consideration different factors that can influence the triggering of flowslides such as: slope angle (S), the thickness of detritic and pyroclastic covers (T), the distance to streams (D), the land use (L) and the hierarchical order of the basin (B). The susceptibility index is rated through the formula: $I = [S^{(1+T+D)} \cdot L \cdot B]$.

ALEOTTI *et alii* (2000) estimated the susceptibility level of flowslides with the ALTM technique (Airborne Laser Terrain Model), applied in the Sarno area (Campania). With this technique they drew up thematic maps of the geological and geomorphological factors leading to the triggering of landslides (slope angles, critical thickness of surface pyroclastic deposits, natural and artificial breaks of slopes). The map of contributory factors was combined with maps of hollows and of distances to ridges.

CALCATERRA *et alii* (2003) modified the method of AMANTI *et alii* (1998) and, using thematic maps at the scale 1:5,000, applied it in three different settings: mesozoic carbonate ridges; the Somma-Vesuvius volcanic complex and the Phlegraean Fields. The following

ti dai rilievi carbonatici mesozoici, dalle aree vulcaniche del Somma-Vesuvio e dei Campi Flegrei. La espressione utilizzata è la seguente:

$$I = [S^{(1+T+D)}] \times L \text{ (Massicci carbonatici);}$$

$$I = [S^{(1+T)}] \text{ (Aree vesuviane e flegree);}$$

$$I = S \text{ (Isola d'Ischia).}$$

dove D è la distanza da tagli e sentieri montani.

SIRANGELO & BRACA (2004) hanno proposto un modello idrologico denominato FLAIR (Forecasting of Landslides Induced by Rainfalls) per valutare l'innesco delle colate rapide di fango avvenute a Sarno (Campania). Integrato ad un modello probabilistico, FLAIR permette di stimare il livello di pericolosità all'innesco.

ABBATISTA *et alii* (2005) propongono un metodo per la valutazione della suscettibilità da frana nell'area di Cervinara (Campania), basato su uno studio multidisciplinare (geologico, geomorfologico, idrogeologico e dell'uso del suolo) in scala 1:10.000. Lo studio identifica i parametri discriminanti e i fattori predisponenti e divide l'area di studio in macroaree. La suscettibilità è stata valutata attribuendo dei pesi ai fattori predisponenti e individuando una funzione di suscettibilità di correlazione tra gli stessi.

Tra i metodi quantitativi si ricordano quello matematico empirico monodimensionale di DEL FURIA & VALENTINI (2004) applicato nell'ambito del bacino del fiume Sarno e quelli previsionali deterministici su base fisica (SHALSTAB e SINMAP) applicati da CALCATERRA *et alii* (2004) in due zone dei Campi Flegrei.

METODOLOGIA

La metodologia proposta si basa sulla tecnica di sovrapposizione di carte tematiche ed utilizza un approccio geomorfologico basato sulla individuazione dei fattori più significativi che influenzano l'innesco di questo tipo di frane. I fattori sono stati selezionati mediante analisi statistica di un campione di 187 frane, tutte con lunghezze superiori a 150 m, censite da DI CRESCENZO & SANTO, 2005. Ogni parametro selezionato è stato riportato su una carta tematica e pesato mediante l'assegnazione di un indice sia attraverso un approccio euristico che statistico. Le carte tematiche così ottenute sono state incrociate mediante l'utilizzo di GIS, usando un Indice di Suscettibilità, derivato dalla letteratura e parzialmente modificato in modo da ottenere la carta della suscettibilità all'innesco.

Selezione dei fattori predisponenti all'innesco

Dall'analisi della letteratura emerge che i fattori ritenuti più significativi per l'innesco del movimento sono i seguenti: pendenza, spessore delle coperture piroclastiche, esposizione dei versanti, uso del suolo, ordine gerarchico del bacino, distanza dalle linee di impluvio, frane pregresse, sorgenti, comici o balze rocciose, sentieri e tagli stradali.

Ai fini della redazione della carta della suscettibilità con il metodo della sovrapposizione di carte tematiche è necessario operare una selezione tra questi fattori per considerare quelli effettivamente più significativi ed arrivare alla elaborazione di un numero limitato di carte tematiche. Prendendo in esame i dati raccolti su 187 frane da DI

espressioni were used:

$$I = [S^{(1+T+D)}] \times L \text{ (carbonate ridges);}$$

$$I = [S^{(1+T)}] \text{ (Vesuvius and Phlegraean areas);}$$

$$I = S \text{ (Ischia island).}$$

where D is the distance to tracks and mountain roads.

SIRANGELO & BRACA (2004) proposed a hydrologic model called FLAIR (Forecasting of Landslides Induced by Rainfall), for the triggering of flowslides at Sarno. Integrated with a probabilistic model, it allows the triggering hazard level to be estimated.

ABBATISTA *et alii* (2005) proposed a method to estimate landslide susceptibility in the Cervinara area (Campania) based on an integrated multi-discipline study (geological, geomorphologic, hydrogeological and land use) at the scale 1:10,000. The study identifies discriminating parameters and contributory factors, and divides the study area into macro areas. Susceptibility is thus estimated by attributing weights to contributory factors and identifying a susceptibility function from the correlation of the factors themselves.

Among the quantitative methods DEL FURIA & VALENTINI (2004) applied the mono-dimensional, empiric mathematic method in the Sarno river basin, while CALCATERRA *et alii* (2004) used the SHALSTAB and SINMAP applications in the volcanic area of the Phlegraean Fields.

METHODOLOGY

The methodology proposed herein utilizes the overlay mapping technique and has a geomorphologic approach based on identifying the most significant factors influencing the triggering of this slide type. Factor selection resulted from a statistical analysis of a sample of 187 flowslide, with a travel distance exceeding 150 m, occurring in the Campania region during the last century and previously mapped by DI CRESCENZO & SANTO, 2005. After selection each factor was mapped thematically and weighted, assigning it a score both in a heuristic and a statistic way. The thematic maps were then overlaid by means of a GIS, using a Susceptibility Index, derived from the literature and partly modified, thus obtaining the triggering susceptibility map.

Selection of predisposing factors

According to the literature many factors were considered to be important in triggering flowslides; the most cited were: slope angle, pyroclastic cover thickness, slope exposure, land use, drainage basin order, distance from gully, historical landslides, springs, rocky cliff, tracks and man-made cuts.

In order to draw up a susceptibility map by means of overlay mapping, a selection of all such factors was needed to restrict the number of thematic maps. Taking in account the database of 187 flowslides carried out by DI CRESCENZO & SANTO (2005) through a statistical approach we sought to choose which factors were actually

**PROPOSTA DI UN NUOVO METODO SEMIQUANTITATIVO PER LA VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ ALL'INNESCO DI COLATE RAPIDE DI FANGO
NEI CONTESTI CARBONATICI DELLA CAMPANIA**

Landslide inventory				Morphometric parameters and some factors used						Landslide inventory				Morphometric parameters and some factors used											
N	Municipality	Victims	Date	L (m)	Ss (°)	Cs (°)	Szs (°)	T (m)	Re	C	V	Sp	N	Municipality	Victims	Date	L (m)	Ss (°)	Cs (°)	Szs (°)	T (m)	Re	C	V	Sp
1	Castellammare	4	10.01.1997	830	33	48	24	4,2	down	up	cc	yes	95	Quindici	-	05.05.1998	1885	24	40	24	2,2		up	s	
2	Gragnano	6	02.01.1971	415	33	37	32	1,5	down	up	s		96	Quindici	-	05.05.1998	1880	21	40	27	1,4		up	cc	
3	Gragnano	n.v.	10.01.1997	220	43	39	38	2,0		up	s		97	Quindici	-	05.05.1998	1870	21	45	26	0,8		up	cc	
4	Pimonte	n.v.	10.01.1997	235	28	30	32	1,5		up	s		98	Quindici	-	05.05.1998	1635	26	42	32	1,2	up	up		
5	Pimonte	4	17.02.1963	275	25	35	31	1,0		up	s		99	Quindici	-	05.05.1998	1330	27	48	49	1,2	down	up	yes	
6	Gragnano	3	01.1841	845	34	45	37	2,0	up	up	s		100	Avella	n.v.	05.05.1998	1335	26	45	23	0,8	up	up	s	
7	Gragnano	100	01.1841	860	35	43	34	2,0	up	up	s		101	Avella	n.v.	05.05.1998	1320	25	51	23	0,6	up	up	s	
8	Pagani	1	10.01.1997	220	44	37	40	0,8	up	up and down	cc	yes	102	Avella	n.v.	05.05.1998	1440	27	34	25	1,5	up	up	s	
9	Pagani	1	06.03.1972	178	39	40	38	1,0	up	up	cc	yes	103	Avella	n.v.	05.05.1998	1415	39	22	2,2	up	up	s		
10	Pagani	n.v.	8.12.1960	193	40	39	36	1,0	down	cc	yes	104	Avella	n.v.	05.05.1998	1345	25	48	23	1,0	up	up	s		
11	Pagani	n.v.	9.12.1960	148	31	34	30	1,0	down	cc	yes	105	Avella	n.v.	05.05.1998	1575	17	35	15	1,5	down	down	s		
12	Corbara	n.v.	10.01.1997	255	49	42	31	2,0	up	cc			106	Avella	n.v.	05.05.1998	1320	20	38	19	1,5	down	down	s	
13	Vico Equense	3	23.11.1966	373	35	34	40	1,0	up	up	?		107	Ospedaletto	n.v.	11.1996	605	37	51	30	0,8	up	up	s	
14	Massalubrense	10	16.2.1873	280	37	42	40	1,0	up	up	s		108	Ospedaletto	n.v.	11.1996	870	34	42	33	1,0	up	up	s	
15	Molina	n.v.	03.1986	335	35	36	45	2,5	up	up	s		109	Cancello	1	05.05.1998	558	33	45	28	1,4	down	down	s	
16	S. Egidio	n.v.	10.01.1997	576	31	37	26	1,5	up	up	s	yes	110	Cancello	-	06.05.1998	755	33	48	35	1,2	down	down	s	
17	Corbara	n.v.	10.01.1997	936	30	47	33	1,8	up and down	up	s	yes	111	Moschiano	-	05.05.1998	500	31	34	31	1,5	up	up	cc	
18	Corbara	n.v.	10.01.1997	826	34	51	48	0,5	up and down	up	s	yes	112	Moschiano	-	05.05.1998	295	30	45	32	1,0	up and down	cc		
19	Vico Equense	n.v.	10.01.1997	190	47	45	43	1,0	up	up			113	Monteforte	n.v.	10.01.1997	415	30	34	28	1,4	up	up	s	
20	Gragnano	103	01.1841	650	38	34	36	1,8	up	up	s		114	Monteforte	n.v.	10.01.1997	405	32	45	29	0,8	up	up	s	
21	Gragnano	41	1764	875	36	40	33	2,5	up and down	up	s		115	Monteforte	n.v.	10.01.1997	265	35	50	38	0,7	up	up	s	
22	Tramonti	>300	25-26.10.1954	310	30	36	30	2,6	up	up			116	Monteforte	n.v.	10.01.1997	518	39	38	33	1,2	up	up	s	
23	Tramonti	-	25-26.10.1954	270	34	27	32	2,4	up	up			117	S. Martino	1	16.12.1999	780	36	45	39	1,0	up	up	s	
24	Tramonti	-	25-26.10.1954	625	45	39	31	2,6	up	up			118	S. Martino	-	16.12.1999	595	37	47	40	1,2	up	up	s	
25	Tramonti	-	25-26.10.1954	625	29	44	20	2,1	up	up	yes		119	S. Martino	-	16.12.1999	470	39	45	40	1,5	up	up	s	
26	Tramonti	-	25-26.10.1954	1050	20	44	3,4	down	down	yes			120	Cervinara	5	15-16.12.1999	1885	34	38	19	1,4	up	up	yes	
27	Tramonti	-	25-26.10.1954	36	30	31	2,7	up	up	yes			121	Cervinara	n.v.	15-16.12.1999	770	24	34	30	1,6	up	up	s	
28	Tramonti	-	25-26.10.1954	48	57	39	2,2	up	up				122	Cervinara	n.v.	15-16.12.1999	650	42	45	41	1,2	up	down	s	
29	Tramonti	-	25-26.10.1954	38	40	34	2,6	up	up				123	Siano	6	05.05.1998	1155	26	42	24	1,5	up	up	s	
30	Tramonti	-	25-26.10.1954	35	37	31	2,9	up	up				124	Siano	-	05.05.1998	1420	23	45	20	1,4	up	down	s	
31	Tramonti	-	25-26.10.1954	40	60	35	2,2	up	up				125	Siano	-	05.05.1998	1165	33	38	32	1,6	up	up	s	
32	Tramonti	-	25-26.10.1954	25	60	27	2,7	up	up				126	Siano	-	05.05.1998	1450	31	48	34	1,2	up and down	cc		
33	Tramonti	-	25-26.10.1954	31	45	29	2,6	up	up				127	Siano	-	05.05.1998	1370	30	45	32	1,5	up	up	s	
34	Tramonti	-	25-26.10.1954	35	40	29	0,5	up	up	yes			128	Siano	-	05.05.1998	1365	27	34	27	2,2	up and down	cc		
35	Tramonti	-	25-26.10.1954	38	41	35	3,3	up	up				129	Siano	-	05.05.1998	1368	28	48	27	1,2	up and down	cc		
36	Tramonti	-	25-26.10.1954	43	45	40	2,3	up	up				130	Siano	-	05.05.1998	1350	27	45	26	1,4	up and down	down		
37	Tramonti	-	25-26.10.1954	49	45	46	2,8	up	up				131	Bracigliano	-	05.05.1998	380	25	34	28	1,5	up	up	s	
38	Tramonti	-	25-26.10.1954	41	45	42	2,9	up	up				132	Bracigliano	-	05.05.1998	2450	25	30	27	1,6	up	up	s	
39	Tramonti	-	25-26.10.1954	39	45	35	2,6	up	up	yes			133	Bracigliano	-	05.05.1998	2450	25	37	28	2,3	up	up	yes	
40	Tramonti	-	25-26.10.1954	41	52	38	2,1	up	up	yes			134	Bracigliano	-	05.05.1998	2615	25	45	29	1,5	up	up	yes	
41	Tramonti	-	25-26.10.1954	46	50	42	2,6	up	up	yes			135	Bracigliano	-	05.05.1998	2470	25	44	27	1,2	up	up	yes	
42	Tramonti	-	25-26.10.1954	46	45	35	2,2	up and down	up and down	yes			136	Bracigliano	-	05.05.1998	1055	32	39	35	2,1	up	up	yes	
43	Tramonti	-	25-26.10.1954	47	45	34	2,2	up and down	up and down	yes			137	Bracigliano	-	05.05.1998	1130	30	37	38	1,4	up	up	cc	
44	Tramonti	-	25-26.10.1954	48	50	33	0,8	up	up				138	Montoro Inf.	n.v.	1997	1770	18	51	26	0,8	up and down	up	cc	
45	Tramonti	-	25-26.10.1954	25	40	27	2,7	up	up				139	Sarno	n.v.	05.05.1998	1958	21	30	21	1,8	up	up	cc	
46	Tramonti	-	25-26.10.1954	26	45	24	2,7	up	up	yes			140	Sarno	137	05.05.1998	1986	26	34	27	3	up	up	cc	
47	Tramonti	-	25-26.10.1954	55	45	1,0	up	up	yes				141	Sarno	-	05.05.1998	1975	27	34	28	3,5	up	up	s	
48	Tramonti	-	25-26.10.1954	54	45	2,8	up	up					142	Sarno	-	05/05/1998	2124	26	45	27	1,5	up and down	s		
49	Tramonti	-	25-26.10.1954	37	40	2,7	up and down	up and down					143	Sarno	-	05.05.1998	1952	27	35	22	2,3	down	cc		
50	Tramonti	-	25-26.10.1954	39	45	2,7	up and down	up and down					144	Sarno	-	05.05.1998	3228	34	11	2,4	up and down	up			
51	Tramonti	-	25-26.10.1954	32	37	30	2,1	up	up				145	Sarno	-	05.05.1998	3289	30	17	2	up and down	up			
52	Tramonti	-	25-26.10.1954	37	40	30	0,4	up and down	up and down				146	Sarno	-	05.05.1998	3191	37	16	2,2	up and down	up			
53	Tramonti	-	25-26.10.1954	37	41	33	2,6	up	up				147	Sarno	-	05.05.1998	3156	45	16	1,5	up and down	up			
54	Tramonti	-	25-26.10.1954	33	45	33	2,3	up and down	up and down				148	Sarno	-	05.05.1998	3109	23	45	17	1,4	up and down	cc		
55	Tramonti	-	25-26.10.1954	37	42	36	2,6	up	up				149	Sarno	-	05.05.1998	2911	22	45	15	1,6	up and down	cc		
56	Tramonti	-	25-26.10.1954	40	42	37	2,9	up and down	up and down				150	Sarno	-	05.05.1998	2821	21	45	15	2,2	up and down	cc		
57	Tramonti	-</																							

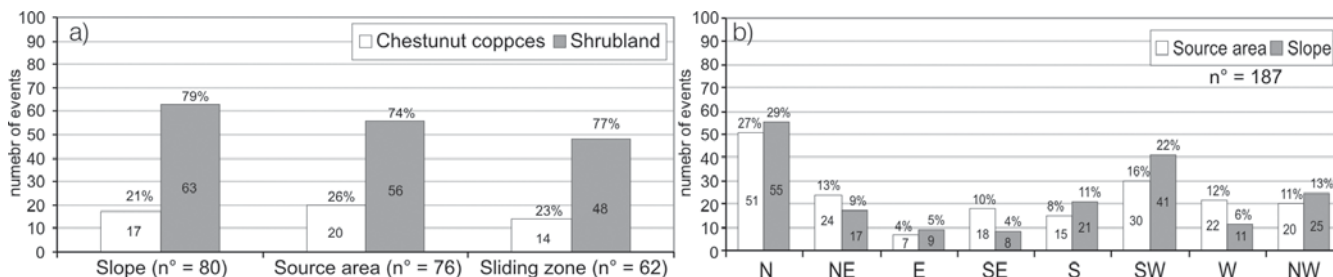


Fig. 2 - (a) Distribuzione della vegetazione sui versanti, nell'area sorgente e nella zona di scorrimento; b) Frequenza di distribuzione della esposizione dell'area sorgente rispetto a quella del versante (N° rappresenta il numero di frane considerato). Da DI CRESCENZO & SANTO (2005) modificato
 - (a) Vegetation distribution along the slopes, in the source area and in the sliding zone; b) Frequency distribution of source areas against slope exposure (N° is the number of flowslides considered in each case). From DI CRESCENZO & SANTO (2005), modified

CRESCENZO & SANTO (2005) tramite un approccio statistico sono stati scelti i fattori più significativi per l'attivazione (Tab. 1).

L'uso del suolo, per esempio, è risultato poco significativo perché gli inneschi sono avvenuti sia in presenza di vegetazione di "alto fusto" che di "basso fusto", in aree disboscate o semplicemente prive di vegetazione (Fig. 2a). Analogamente l'ordine gerarchico del bacino di appartenenza è risultato poco influente in quanto la maggior parte dei canali, in cui le frane si sono sviluppate, presenta valori compresi tra 1 a 2 (CASCINI *et alii*, 2000). Anche il fattore esposizione dei versanti non è risultato molto significativo in quanto le frane si sono verificate sia sui versanti esposti a nord che a sud (Fig. 2b).

I fattori più significativi per questo tipo di frane, invece, come già segnalato dalla gran parte degli Autori, risultano essere la pendenza dei versanti e lo spessore della coltre piroclastica (DE VITA *et alii*, 2006). Per quanto riguarda l'acclività dei versanti è stato osservato che sul campione di frane considerate (187), gli inneschi si sono verificati nell'intervallo compreso tra 30° e 50°. I valori più frequenti si attestano nell'intervallo 35°-45°. Oltre i 50° sono poche le frane censite a causa della scarsa presenza di coperture piroclastiche (Fig. 3a).

Per quanto riguarda lo spessore delle coperture piroclastiche, buona parte delle frane censite (180/187) si imposta in aree con spessori compresi tra 0.5 m e 4 m (Fig. 3b). Una maggiore concentrazione di frane (33.2%) si ha per gli intervalli di spessore 1.0-1.5 m così come per spessori compresi tra 1.5 e 3 m (46.6%); tuttavia, con minore frequenza (14.4%), gli inneschi coinvolgono versanti aventi sia coperture di limitato spessore (0.5-1 m) che con valori più elevati (3-4 m 3.2%).

Relativamente alle variabili numeriche acclività e spessore delle coperture piroclastiche si è ritenuto di verificare - data la taglia non ridotta del campione (non casuale) di dati a disposizione - l'ipotesi statistica che esse potessero essere ritenute a distribuzione normale. Tutti i test condotti (chi quadrato ed Anderson Darling) si sono conclusi rifiutando l'ipotesi come non verosimile a livelli di significatività del 0.05 il primo ed inferiore allo 0.005 il secondo. D'altro canto dal grafico della distribuzione di frequenze si evince una evidente asimmetria, confermata dalla non coincidenza di media e mediana ed un allontanamento dalla distribuzione normale evidentissima nelle code; approssimativamente rispettata invece, nella dispersione dei

more significant in triggering the slides (Tab.1).

Land use, for example, was considered to be of low significance since landslides occurred both in forested and non-forested areas such as where arboreal or non-arboreal vegetation existed (Fig. 2a). Drainage basin order appeared to be of little importance as well, since most of the canals where landslides occurred have a hierarchic order ranging from 1 to 2 (CASCINI *et alii*, 2000). Also slope exposure, landslides being frequent both on north and south exposed slopes, did not seem to be an important control triggering factor (Fig. 2b).

As outlined by the most of the authors, the most significant factors in triggering this kind of landslide were slope angle and pyroclastic cover thickness. With regard to slope angle the major frequency classes for the analysed sample (187 flowslides) occurred in the interval 30°-50°. The more frequent values ranged between 35° and 45° while the scarcity of slides on gradients greater than 50° was explained by an absence of pyroclastic cover (Fig. 3a).

Considering the pyroclastic cover the analysis showed that most of the studied slides (180/187) occurred where its thickness ranged between 0.5 and 4 m (Fig. 3b). The highest landslide concentration (33.2%) took place in the 1.0-1.5 m interval together with that of 1.5-3 m (32.7%); nevertheless, slides also occurred where lower (0.5-1 m; 14.4%) and higher thickness (3-4 m; 3.2%) were present.

As for slope angle and the pyroclastic cover thickness the available data were not a random sample from a population, although the normal distribution was tested. Unfortunately, all the tests performed (chi-square, Anderson Darling) rejected the null hypothesis at a significance level of 0.05, and 0.005 respectively. Besides, the distribution data plots showed a clear asymmetric distribution outlined by the non-coincidence of mean and median and by the presence of non-equal tails. The 3 standard deviation law instead is approximately respected as shown by data dispersion around the mean.

In addition to slope angle and cover thickness the influence of rocky cliffs and man-made cuts has been pointed out by several authors (CALCATERRA *et alii*, 1997; DE FALCO *et alii*, 1997;

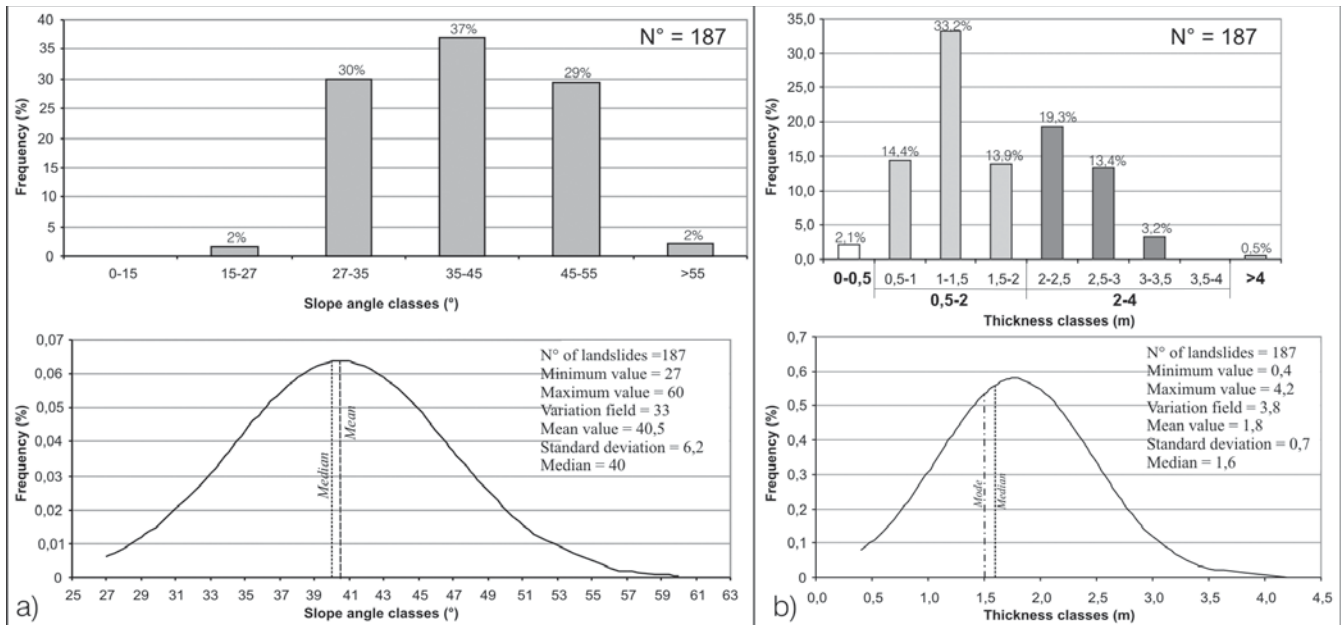


Fig. 3 - Frequenza di distribuzione dei valori di acclività (a) e degli spessori della copertura piroclastica (b) delle frane
 - Frequency distribution of landslides against slope angle (a) and pyroclastic cover thickness (b)

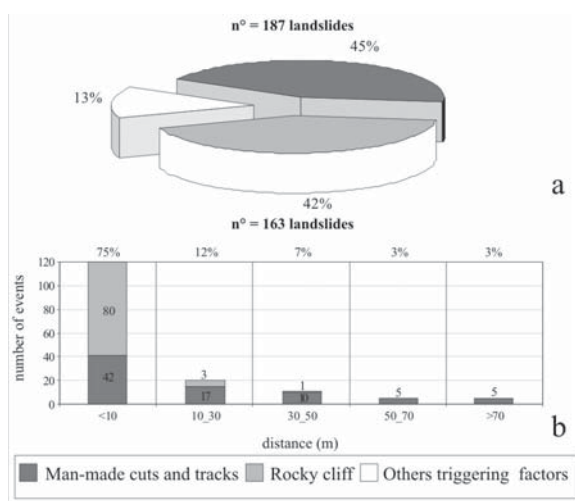


Fig. 4 - Percentuale delle aree sorgenti poste in corrispondenza di tagli stradali/sentieri e cornici rocciose (a) e relativa distanza rispetto alle aree sorgenti. Da DI CRESCENZO & SANTO (2005)
 - Distribution of the distance between the source area and man-made cuts, tracks and rocky cliffs by pie chart (a) and stacked bar (b). From DI CRESCENZO & SANTO (2005)

dati intorno alla media, la legge delle deviazioni standard.

In aggiunta ai fattori acclività e spessore delle coperture piroclastiche, l'influenza delle cornici litologiche e dei sentieri per l'innescò delle colate rapide di fango è evidenziata da numerosi Autori (CALCATERRA *et alii*, 1997; DE FALCO *et alii*, 1997; BRANCACCIO *et alii*, 1999; CELICO & GUADAGNO, 1998; DI CRESCENZO & SANTO,

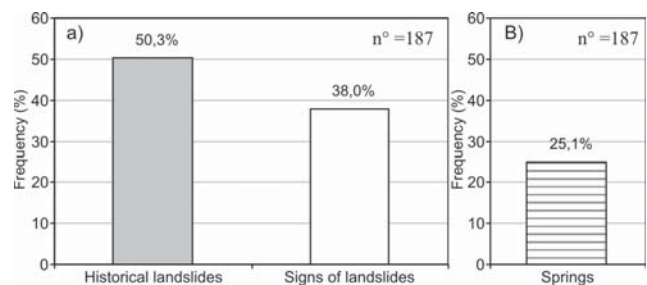


Fig. 5 - Frequenza di distribuzione delle colate rapide in funzione sia della vicinanza a frane storiche e tracce di frane antiche (a) che delle sorgenti (b)
 - Frequency distribution of flowslides located near historical landslides and in the vicinity of signs of landslides (a); frequency distribution of springs in the source area (b)

BRANCACCIO *et alii*, 1999; CELICO & GUADAGNO, 1998; DI CRESCENZO & SANTO, 1999; GUADAGNO & PERRIELLO ZAMPELLI, 2000; GUADAGNO *et alii*, 2003, AYALEW & YAMAGISHI, 2005). In particular, DI CRESCENZO & SANTO (2005) observed that 45% of source areas were located near man-made cuts and tracks and that 42% were in the vicinity of rocky cliffs (Fig. 4a); moreover more than 100 source areas were less than 10 metres from artificial tracks and natural scarps (Fig. 4b).

In respect of the presence of historical landslides and/or signs of landslides (deduced from aerial photo-interpretation), it has been noted that in some areas there is a cyclic occurrence of landslides with variable recurrence, in some cases even within a few decades (MIGALE & MILONE, 1998; MELE & DEL PRETE, 1999; DEL PRETE &

1999; GUADAGNO & PERRIELLO ZAMPELLI, 2000; GUADAGNO *et alii*, 2003, AYALEW & YAMAGISHI, 2005). In particolare DI CRESCENZO & SANTO (2005), hanno osservato che le aree sorgenti sono ubicate nel 45% dei casi in prossimità dei sentieri e nel 42% in vicinanza alle cornici (Fig. 4a); inoltre più di un centinaio si manifestano ad una distanza dai sentieri e dalle balze inferiore a 10 m (Fig. 4b).

In relazione alla presenza di frane storiche e/o tracce morfologiche di frane (individuate da fotointerpretazione) è stato notato che in molte aree esiste una ciclicità degli eventi franosi con periodi di ritorno variabili ed in alcuni casi di pochi decenni (MIGALE & MILONE, 1998; MELE & DEL PRETE, 1999; DEL PRETE & DEL PRETE, 1999; DE RISO *et alii*, 2004). Ciò potrebbe essere spiegato dall'esistenza di condizioni geologiche (spessore delle coperture piroclastiche) e geomorfologiche (acclività dei versanti) analoghe. Sul campione di frane analizzato, circa l'88% ricade in aree interessate dalla presenza di tracce di antiche frane; in particolare il 50.3% in prossimità di frane certe, in quanto documentate storicamente, e il 38.3% in prossimità di tracce di frane desunte da foto-interpretazione. (Fig. 5a).

Per quanto riguarda le sorgenti, nelle zone di nicchia sono state rinvenute numerose sorgenti effimere, generalmente localizzate lungo gli strati calcarei fratturati e carsificati (CELICO & GUADAGNO, 1998; CALCATERRA & SANTO, 2004). Durante periodi di intense precipitazioni, esse creano una circolazione idrica sotterranea relativamente superficiale contribuendo, tramite travasi, alla saturazione dei depositi piroclastici sovrastanti, peggiorandone le proprietà geotecniche (CELICO & GUADAGNO, 1998).

Tuttavia, non è stato possibile documentare la presenza di sorgenti sull'intero campione di frane analizzate per la mancanza di osservazioni dirette, in ragione della difficile accessibilità dei luoghi. Comunque, circa il 25% delle frane analizzate presentano sorgenti localizzate in corrispondenza, o in prossimità della zona di innesco (Fig. 5b).

Sulla base di quanto appena esposto si è deciso di utilizzare come fattori significativi per la valutazione della suscettibilità all'innesco, i seguenti parametri: pendenza dei versanti, spessore delle coperture piroclastiche, presenza di cornici litologiche e/o sentieri, presenza di sorgenti, presenza di frane storiche e/o tracce di antiche frane.

Attribuzione dei valori numerici (scores)

Lo spessore della copertura piroclastica e la pendenza del versante (fattori geologici e geomorfologici) sono grandezze numeriche e pertanto sempre misurabili; gli altri (fattori specifici) in funzione della loro presenza o assenza possono essere considerati variabili binarie.

L'attribuzione dei valori numerici (scores) ai singoli parametri, è stata effettuata mediante un approccio sia euristico che statistico, utilizzando scores variabili in un intervallo compreso tra 0 (bassa influenza sull'innesco) e 4 (alta influenza sull'innesco). Nell'approccio euristico i pesi sono stati assegnati in maniera soggettiva, in funzione della loro presunta maggiore o minore rilevanza, valutata sulla base dell'esperienza maturata dagli scriventi negli ultimi anni. L'approccio statistico è stato invece basato sull'attribuzione

DEL PRETE, 1999; DE RISO *et alii*, 2004). This could be related to the existence of similar geological (thickness of pyroclastic cover) and geomorphological (slope angle) conditions. Overall, 88% of the mapped landslides occurred where there was evidence or signs of ancient movement, 50.3% were near historical events and 38.3% were in the vicinity of landslide traces deduced from aerial photo-interpretation (Fig. 5a).

As regards springs, in many cases ephemeral springs fed by the most fractured and karsified sectors of the limestone bedrock were observed in the source areas (CELICO & GUADAGNO, 1998; CALCATERRA & SANTO, 2004). During heavy rainfall these springs can convey waters towards the pyroclastic covers, contributing to their saturation and lowering of geotechnical properties (CELICO & GUADAGNO, 1998). Although it was not possible to check spring data for all the slides due to the difficulty in reaching them, 25% of the analysed slides showed springs in the vicinity of the source areas (Fig. 5b).

On the basis of all these observations we decided to use as significant factors for the triggering of the flowslides the following parameters: slope angle, pyroclastic cover thickness, rocky cliff, tracks and man-made cuts, historical landslides and springs.

Assigning weights

Pyroclastic cover thickness and slope angle (geological and geomorphological factors) being numerical quantities are always measurable; the others, there being a possibility of their presence or absence, were defined as "specific factors" and considered as binary variables.

Assigning weight to each parameter was carried out both in a heuristic and statistical way, choosing weights ranging between 0 (low triggering influence) and 4 (maximum influence). In the heuristic approach, weights were assigned on the basis of personal experience gained in studying these phenomena in recent years. The statistical approach took into account the relative class frequencies from the collected data, on a scale from 0 to 4.

With regard to the geological and geomorphological factors, their

PROPOSTA DI UN NUOVO METODO SEMIQUANTITATIVO PER LA VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ ALL'INNESCO DI COLATE RAPIDE DI FANGO
NEI CONTESTI CARBONATICI DELLA CAMPANIA

	Euristic approach	Statistic approach		
		N of flowslides	f (%) frequenza	Score
Acclività/Acclivity S (°) (classi/classes)				
0-15	0	0	0	0.00
15-27	1	3	2	0.06
27-35	2	56	30	1.20
35-45	3	69	37	1.48
45-55	3	55	29	1.17
> 55	4	4	2	0.09
Spessore/Thickness T (m) (classi/classes)				
0-0.5	0	4	2.1	0.09
0.5-2	3	115	61.5	2.46
2-4	2	67	35.8	1.43
> 4	2	1	0.5	0.02

Tab. 2 - Scores utilizzati per le classi di acclività (S) e di spessore (T)
- Scores used for the acclivity (S) and thickness (T) classes.

di uno score stimato attraverso le frequenze relative di classe fornite dai dati e successivamente riscalato nel range 0-4.

Il grado di influenza dei fattori geologici e geomorfologici è stato valutato individuando delle classi di acclività e di spessore significative (Tab. 2).

Le formule utilizzate sono:

$$S_S = [(N_{xS-yS})/187]*4 = (f_{xS-yS})*4$$

$$S_T = [(N_{xT-yT})/187]*4 = (f_{xT-yT})*4$$

dove:

x_S-y_S ; x_T-y_T = classe di acclività e di spessore (x ed y sono rispettivamente il limite inferiore e superiore della classe);

N_{xS-yS} ; N_{xT-yT} = numero di frane presenti rispettivamente nella classe di acclività x_S-y_S e di spessore x_T-y_T ;

f_{xS-yS} ; f_{xT-yT} = frequenza relativa di classe rispettivamente della pendenza e dello spessore.

Per quanto riguarda i fattori specifici (Tab. 3) per esempio la presenza di sorgenti, il valore numerico è stato attribuito considerando la seguente relazione:

$$S_{Sp} = [(N_{Sp})/187]*4 = (f_{Sp})*4$$

dove:

N_{Sp} = numero di frane caratterizzate dalla presenza di sorgenti nella zona di nicchia;

f_{Sp} = frequenza relativa.

Nel caso delle cornici rocciose e dei tagli stradali e sentieri l'analisi statistica ha evidenziato che soltanto quelle poste ad una distanza inferiore a 10 m hanno uno score significativo e maggiore di uno (Tab. 4). Nelle successive fasi di elaborazione, pertanto, è stata ritenuta significativa solo la fascia individuata con un buffer di ampiezza pari a 10 m, nelle zone poste a monte e a valle delle cornici e dei tagli stradali.

	Euristic approach	Statistic approach		
		N of landslides	f (%) frequenza	Score
Spring or springs area (Sp)	2	47	25.1	1.00
Rocky cliffs	3	77	41.2	1.65
Man-made cuts and tracks	3	47	25.1	1.01
Historical landslides	4	94	50.3	2.01
Signs of landslides	3	71	37.9	1.52

Tab. 3 - Scores utilizzati per i fattori specifici
- Scores used for the specific factors

Distance (m)	Cornici rocciose Rocky cliffs N	Frequenza Frequency (%)	Scores
< 10	77	41.2	1.65
10-30	2	1.1	0.04
30-50	1	0.5	0.02
50-70	0	0.0	0.00
> 70	0	0.0	0.00
Distance (m)	Tagli stradali e sentieri Man-made cuts and tracks N	Frequenza Frequency (%)	Scores
< 10	47	25.1	1.01
10-30	15	8.0	0.32
30-50	10	5.3	0.21
50-70	4	2.1	0.09
> 70	5	2.7	0.11

Tab. 4 - Scores utilizzati per cornici rocciose e tagli stradali e sentieri sulla base della distanza dalle aree sorgenti.
- Scores obtained for rocky cliffs and man-made cuts and tracks on the basis of their distance from the source area of the landslides

degree of influence was evaluated according to different classes of acclivity and thickness, shown in Tab. 2.

The formulas used are the following:

$$S_S = [(N_{xS-yS})/187]*4 = (f_{xS-yS})*4$$

$$S_T = [(N_{xT-yT})/187]*4 = (f_{xT-yT})*4$$

where:

x_S-y_S ; x_T-y_T = acclivity and thickness class (x and y represent the lower and upper limit of each class);

N_{xS-yS} ; N_{xT-yT} = real number of landslides for the acclivity class x_S-y_S and the thickness class x_T-y_T ;

f_{xS-yS} ; f_{xT-yT} = relative frequency class of acclivity and thickness, respectively.

As regards the specific factors, for example the presence of springs, the weight (Tab. 3) was assigned considering the following relation:

$$S_{Sp} = [(N_{Sp})/187]*4 = (f_{Sp})*4$$

where:

N_{Sp} = number of slides with springs in the source area;

f_{Sp} = relative frequency.

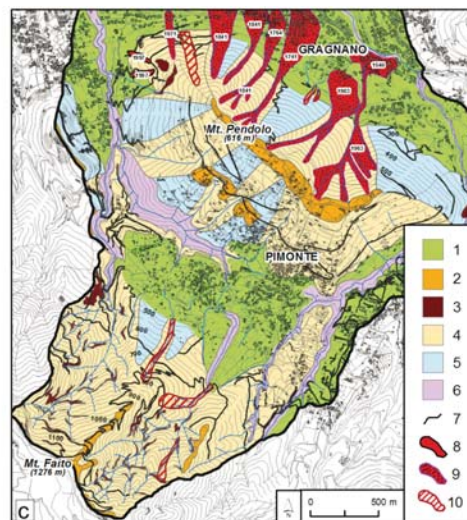
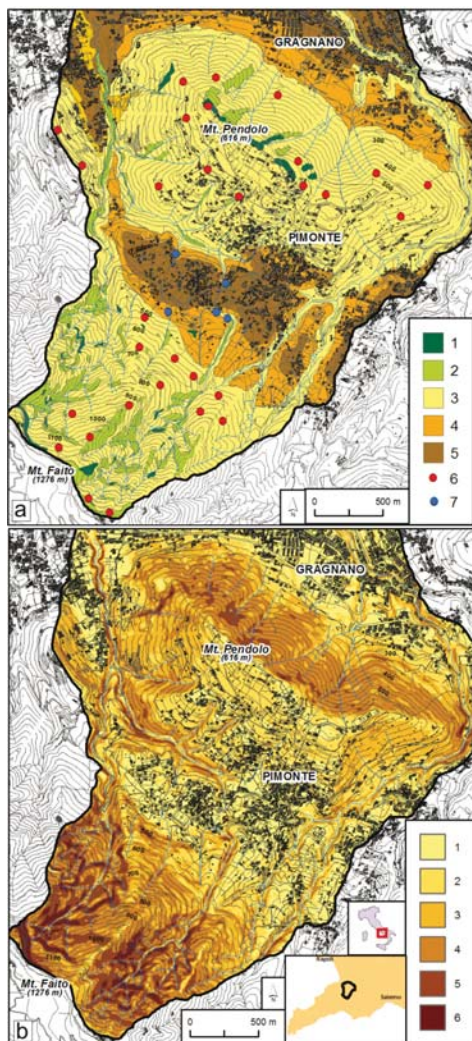


Fig. 6 - Carte tematiche (1:5.000): a) Carta delle coperture piroclastiche: Legenda: 1) substrato carbonatico affiorante; 2) Substrato carbonatico con copertura piroclastica discontinua (0m . 0,5m); 3) Spessore 0,5-2 m; 4) Spessore 2-4 m; 5) Spessore >4 m; 6) Ubicazione delle fiorattature speditive; 7) Sezione stratigrafica. b) Carta delle acclività: Legenda: 1) 0÷15°; 2) 15÷27°; 3) 27÷35°; 4) 35÷45°; 5) 45÷55°; 6) > 45°. c) Carta geomorfologica: Legenda: 1) aree pedemontane; 2) Paleosuperficie; 3) Cornice rocciosa; 4) Versante con bacino idrografico gerarchizzato; 5) Versante regolare; 6) Scarpare di erosione fluviale; 7) tagli stradali e sentieri; 8) Frane del 1997; 9) Frane storiche; 10) Tracce di frane storiche

Carte tematiche

I principali fattori predisponenti sono stati cartografati sulle seguenti mappe tematiche in scala 1:5.000:

- carta degli spessori delle coperture piroclastiche,
- carta delle acclività,
- carta degli elementi geomorfologici significativi.

La carta degli spessori della copertura piroclastica (Fig. 6a) può essere elaborata attraverso un accurato rilevamento geologico, piccoli scavi, fiorattature speditive (AMBROSIO *et alii*, 2002) e, nelle zone più acclivi e meno accessibili, attraverso l'analisi di foto aeree.

La carta delle acclività può essere realizzata dopo la costruzione

In the case of rocky cliffs and man-made cuts, statistical analysis showed they had a significant score (>1) only when they are less than 10 m from the source area (Tab. 4). Hence we assigned the weight only to a 10m wide buffer area in the neighbourhood of each factor.

Thematic maps

Three different thematic maps representing the primary predisposing factors were compiled at 1:5,000 scale:

- pyroclastic cover thickness map;
- acclivity map;
- geomorphologic factors map.

The pyroclastic cover thickness map (Fig. 6a) can be realised through a detailed geological survey, trenches, superficial and quick core bores (AMBROSIO *et alii*, 2002), and, in the steepest areas, through in-depth analysis of aerial photographs.

The acclivity map can be derived from the construction of a

	Maximal errors (m)				
	IDW	Kriging	NN	Spiline	TIN
Rills	12	6	4	27	36
Plain	6	4	2	6	10
Divided zone	8	4	4	10	18
Planar slope	9	4	4	6	9

Tab. 5 - Errori massimi ottenuti nell'elaborazione del DTM con vari metodi nell'area di Pimonte (NA)
- *Maximal errors obtained from the DTM elaborated with the various approaches in the Pimonte area (NA)*

di un modello digitale del terreno (DTM). Nell'esempio descritto nella sezione successiva gli elementi topografici della CTR 1:5.000 (isoipse, punti quotati e idrografia) sono stati elaborati con 5 distinti metodi statistici di interpolazione spaziale (Natural Neighbour, Inverse Distance Wheighted, Triangulation Irregular Network, Kriging, Spline) al fine di individuare il metodo migliore. Per tutti i DTM elaborati, una volta suddiviso il territorio in aree a morfologia omogenea, è stata fissata una dimensione delle celle di 5 m, lasciando di default tutti gli altri parametri statistici. Per ogni DTM è stato calcolato l'errore massimo rispetto alla base CTR presa come riferimento (Tab. 5). L'analisi statistica dei valori così ottenuti mostra che il metodo con il minimo errore è quello di interpolazione spaziale (Natural Neighbour), che è stato utilizzato, quindi per suddividere l'area in 5 classi di acclività (Fig. 6b).

Nella carta dei fattori geomorfologici significativi devono essere cartografati gli elementi specifici quali: cornici di morfoselezione e/o scarpate di origine tettonica, tagli stradali e sentieri, frane pregresse e sorgenti (Fig. 6c). Essa può essere redatta anche sulla base dello studio di foto aeree di anni diversi (1954, 1975, 1998) sia da ricerche bibliografico-storiche di archivio allo scopo di avere il maggior numero di informazioni sulle frane pregresse.

Tutte le carte devono essere digitalizzate, georeferenziate, trasformate in formato raster (cell size pari a 5x5 m) e successivamente pesate, attraverso l'attribuzione ad ognuno dei tematismi del relativo score. Si fa presente che per i fattori specifici sono stati adottati dei buffer significativi (Tab. 6), ottenuti automaticamente mediante il GIS. In particolare per le sorgenti è stato considerato un cerchio con raggio pari a 25 m mentre per le cornici e i tagli stradali una fascia posta a monte e a valle di tali elementi avente una larghezza di 10 m. Per le frane e le tracce di frane infine è stato considerato un intorno significativo tracciato su base geomorfologica i cui limiti sono stati posti a circa 50 m di distanza dal perimetro della frana.

Carta della suscettibilità all'innesco

Le tre carte tematiche "pesate" sono state successivamente relazionate mediante un procedimento di sovrapposizione (overlay mapping), effettuato tramite l'utilizzo di un GIS (ESRI ArcGis 9), ottenendo un indice di instabilità (I) per ogni cella e, di conseguenza la carta di suscettibilità. La formula utilizzata è la seguente:

$$I = S^{(2T+1)} (C+Sp+Lme+Rc+L+I)$$

Specific factor	Buffer
Spring or springs area (Sp)	Circle with a diameter of 25 m
Rocky cliffs	Strips with a width of 10 m situated on the top and at the bottom of the cliff
Man-made cuts and tracks	Strips with a width of 10 m situated on the top and at the bottom of the track
Historical landslides	Manual evaluation with a maximum limit of 50 m
Signs of landslides	Manual evaluation with a maximum limit of 50 m

Tab. 6 - Buffers usati per i fattori specifici
- *Buffers used for the specific factors*

DTM. In the example described in the next section the topographic elements of the Technical regional map 1:5,000 (contour lines, altitude points, rivers) were interpolated with different methods: Natural Neighbour (NN), Inverse Distance Weighted (IDW), Triangulation Irregular Network (TIN), Kriging, Spline, seeking to obtain the best accuracy. For each DTM the cell size was 5 m, the other parameters being those of default. For each DTM the maximum error in respect of the topographic base was calculated (Tab. 5). The best fitting method was the Natural Neighbour (NN) and it was used to elaborate the acclivity map, dividing the slope gradient into 5 classes (Fig. 6b).

The geomorphologic factors map (Fig. 6c) is useful for mapping the specific significant factors i.e. rocky cliffs, tracks and man-made cuts, previous slides and springs. It can be derived from detailed photo-interpretation of aerial photographs from different years (1954, 1975, and 1998 for the examples in question) together with archive, bibliographic and historical research in order to obtain all the possible information related to previous landslides.

All the maps were digitised, geo-referenced raster transformed (cell size 5x5) and then weighted according to the scores evaluated in the previous section. As previously stated, regarding specific factors the weight attribution considered significant buffers (Tab. 6) obtained automatically by means of a GIS application. In the case of springs a circular area of 25 m ray was considered while for rocky cliffs and man-made cuts a strip 10 metres wide located immediately upslope or downslope of each factor was mapped. As to previous landslides the limit applied was a distance of 50 m from their perimeter.

Triggering susceptibility map

The three weighted thematic maps, can be overlaid by means of a GIS application (ESRI ArcGis 9), and a susceptibility index value (I) for each cell can be calculated. The formula used for the GIS application is the following:

$$I = S^{(2T+1)} (C+Sp+Lme+Rc+L+I)$$

PROPOSAL OF A NEW SEMIQUANTITATIVE METHODOLOGY FOR FLOWSLIDES TRIGGERING SUSCEPTIBILITY ASSESSMENT IN THE CARBONATE SLOPE CONTEXTS OF CAMPANIA (SOUTHERN ITALY)

dove:

- (I) Indice di suscettibilità
- (S) Pendenza dei versanti;
- (T) Spessore delle coperture piroclastiche;
- (C) Sentieri e tagli stradali presenti nei settori medio-alti dei versanti;
- (Sp) Sorgenti perenni e carsiche stagionali;
- (Rc) Cornici di morfoselezione;
- (L) Frane;
- (Lme) Tracce morfologiche di frana.

La formula deriva da un'espressione matematica che modifica quelle proposte da AMANTI *et alii* (1998) e CALCATERRA *et alii* (2003), rispettivamente ($I=[S^{(1+T+D)}] \cdot L \cdot B$ e $I=[S^{(1+T+D)}] \cdot L$). Essa, rispetto a quelle proposte in precedenza, presenta alcune differenze sostanziali che possono così essere sintetizzate:

- tiene conto di una quantità maggiore di dati, distribuiti su un territorio molto più vasto;
- i fattori utilizzati sono stati sostituiti e/o aumentati, inserendone altri ritenuti più significativi.

La relazione esponenziale tra i fattori geologici e geomorfologici deriva dalla maggiore influenza che essi hanno sull'innescamento delle frane rispetto agli altri fattori. Il valore 1 presente all'esponente ha lo scopo di non rendere costante la funzione nel caso in cui $T = 0$ (per esempio nel caso che la classe di spessore è tra 0-0.5 m per il metodo euristico $\epsilon > 4$ m per quello statistico, vedi tabella 2). Il numero 1 presente alla fine dell'espressione serve a non invalidarla nel caso in cui non vi siano fattori geomorfologici significativi (è possibile, così, valutare **I** anche in assenza di questi ultimi).

La formula qui proposta è stata testata insieme ad altre su di una area campione ed è stata scelta in quanto era quella in base alla quale il maggior numero di frane ricadeva nelle classi di suscettibilità più alte.

Allo scopo di rendere la carta più leggibile, il valore dell'indice di suscettibilità è stato normalizzato, moltiplicato per 1000 e diviso in 5 differenti classi (Tab. 7).

Queste ultime sono state scelte, sia per il metodo euristico che per quello statistico, con criterio soggettivo, considerato che i metodi automatici (per es. natural break) non davano risultati soddisfacenti.

La prima classe indica una suscettibilità nulla (aree stabili) mentre l'ultima una suscettibilità molto alta (alta probabilità di innescamento di frane).

where:

- (I) Susceptibility index
- (S) Slope angle;
- (T) pyroclastic cover thickness;
- (C) tracks and man-made cuts;
- (Sp) spring area;
- (Rc) rocky cliff within 10 meters;
- (L) historical landslides;
- (Lme) landslides signs including headscarps, lateral ridges etc.

The equation derives from those proposed by AMANTI *et alii* (1998) and CALCATERRA *et alii* (2003) respectively ($I=[S^{(1+T+D)}] \cdot L \cdot B$ and $I=[S^{(1+T+D)}] \cdot L$), previously described. Compared to them, the expression shows some substantial differences that can be summarized as follows:

- a higher number of data concerning a much wider area was considered;
- the factors used were replaced and/or enhanced, taking into account the data previously described.

Choosing an exponential relationship between the two main variables allows for the greater weight they have in triggering the slides in respect of the other factors. Number one at the exponent is needed to avoid the function becoming constant in the case of $T = 0$ (in the case of thickness class 0-0.5 m and > 4 m for the heuristic and statistical approach, respectively; see table 2). Number 1 at the end of the expression is aimed at not nullifying it, should there be significant geomorphologic factors (it is thus possible to estimate/without them).

Different forms of equations were progressively checked on sample areas and the selected one corresponds to that providing the best fit between high susceptibility classes and number of landslides occurring.

In order to make the map more readable, the susceptibility index values were normalised, multiplied by 1000 and then subdivided into 5 different classes (Tab. 7).

Classes have been chosen, for the heuristic method and for the statistical one, with subjective approach, since the automatic methods (e.g. natural break) were not giving satisfactory results.

The first class is that of absent susceptibility (stable areas) and the last is that of very high susceptibility, where there is a high probability of triggering of landslides.

Susceptibility	Euristic approach	Statistic approach
extremely low	$I < 1$	$I < 1$
low	$1 < I < 50$	$1 < I < 15$
medium	$50 < I < 150$	$15 < I < 35$
high	$150 < I < 650$	$35 < I < 60$
very high	$I > 600$	$I > 60$

Tab. 7 - Classi utilizzate per la redazione della carta di suscettibilità
 - *Classes used to produce the susceptibility map*

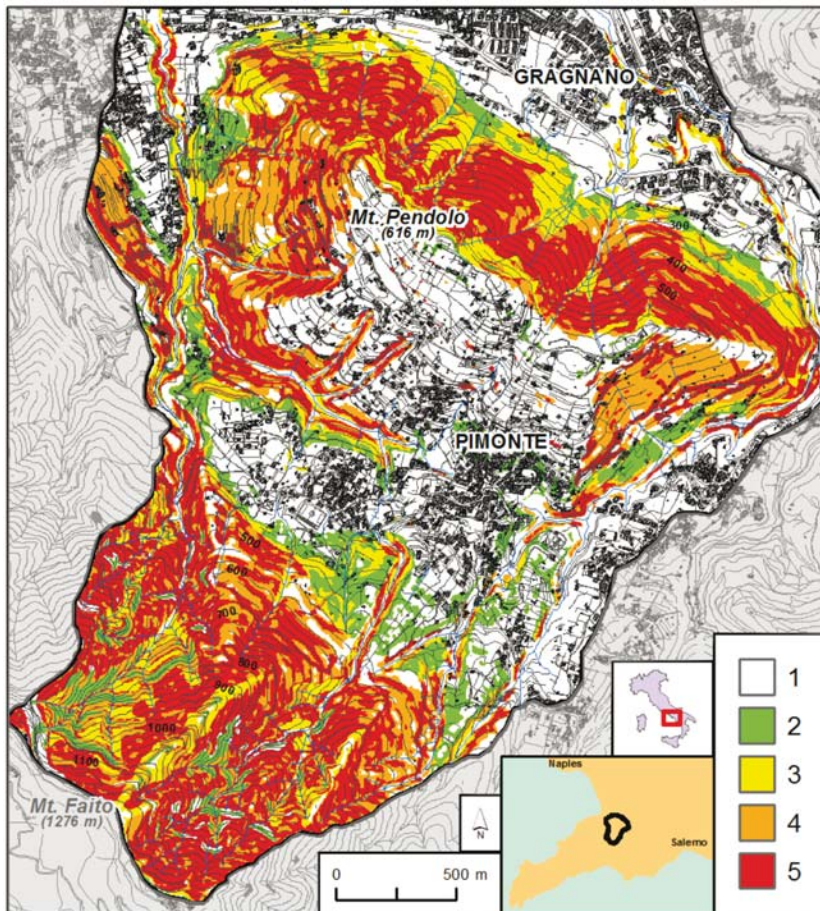


Fig. 7 - Carta della suscettibilità all'innescò di colate rapide di fango ottenuta mediante approccio statistico: Legenda: 1) molto bassa; 2) bassa; 3) media; 4) alta; 5) molto alta
- Susceptibility map drawn up with a statistical approach. Legend: 1) extremely low; 2) low; 3) medium; 4) high; 5) very high

APPLICAZIONE DEL GIS E VERIFICA DEL METODO

Come area test è stata scelta quella dei Monti Lattari, perché, storicamente più volte interessata da frane da colata rapida di fango. L'area, localizzata sul versante nord della dorsale carbonatica, è caratterizzata da versanti acclivi con elevate energie di rilievo, profondamente incisi e diffusamente coperti da materiale piroclastico. I comuni scelti sono: Tramonti, Cetara, Maiori, Vietri sul mare, Minori, S. Egidio del Montealbino, Lettere, Gragnano, Corbara, Castellammare di Stabia.

La figura 7 rappresenta un esempio di carta di suscettibilità per le aree di Pimonte e Gragnano. Le classi a suscettibilità alta e altissima sono localizzate nelle aree montane, nella porzione sommitale di piccolo bacini, o in aree di versante poste a quote più basse con elevate acclività e dove sono presenti fattori specifici come cornici o sentieri. Le classi a suscettibilità media si riscontrano sui crinali dove lo spessore delle coperture piroclastiche e la pendenza sono bassi, mentre, le classi a suscettibilità bassa coincidono con le aree pedemontane. Le zone in cui il substrato affiora o dove le acclività sono minori di 15° risultano stabili.

Per testare il metodo si è tenuto conto di un inventario di frane (n.°

TESTING AND CHECKING THE METHOD

As a test area we selected a sector of the Monti Lattari ridge, repeatedly affected in the past by flowslides. The area, located on the northern slope of the ridge, is characterized by steep slopes, high relief energy, deeply incised channels and is widely covered by pyroclastic deposits. The municipalities affected are those of Tramonti, Cetara, Maiori, Vietri sul mare, Minori, S. Egidio del Montealbino, Lettere, Gragnano, Corbara and Castellammare di Stabia.

The figure 7 shows an example of the susceptibility maps drawn for the areas of Pimonte and Gragnano. The high and very high susceptibility classes are located in the mountain area, in the upper part of small drainage basins, or along a lowland slope with high acclivities, where specific factors like rocky cliffs or artificial tracks are also present. Middle susceptibility classes are typical of divide zones where the thickness of the pyroclastic cover and acclivity are lower, while the low classes of triggering susceptibility coincide with foothill areas. The areas where carbonate bedrock crops out or where acclivities are less than 15° belong to stable areas.

Aiming at test the method, the landslides inventory data (774 events) of the Sarno and Sele River Basin Authority and the National

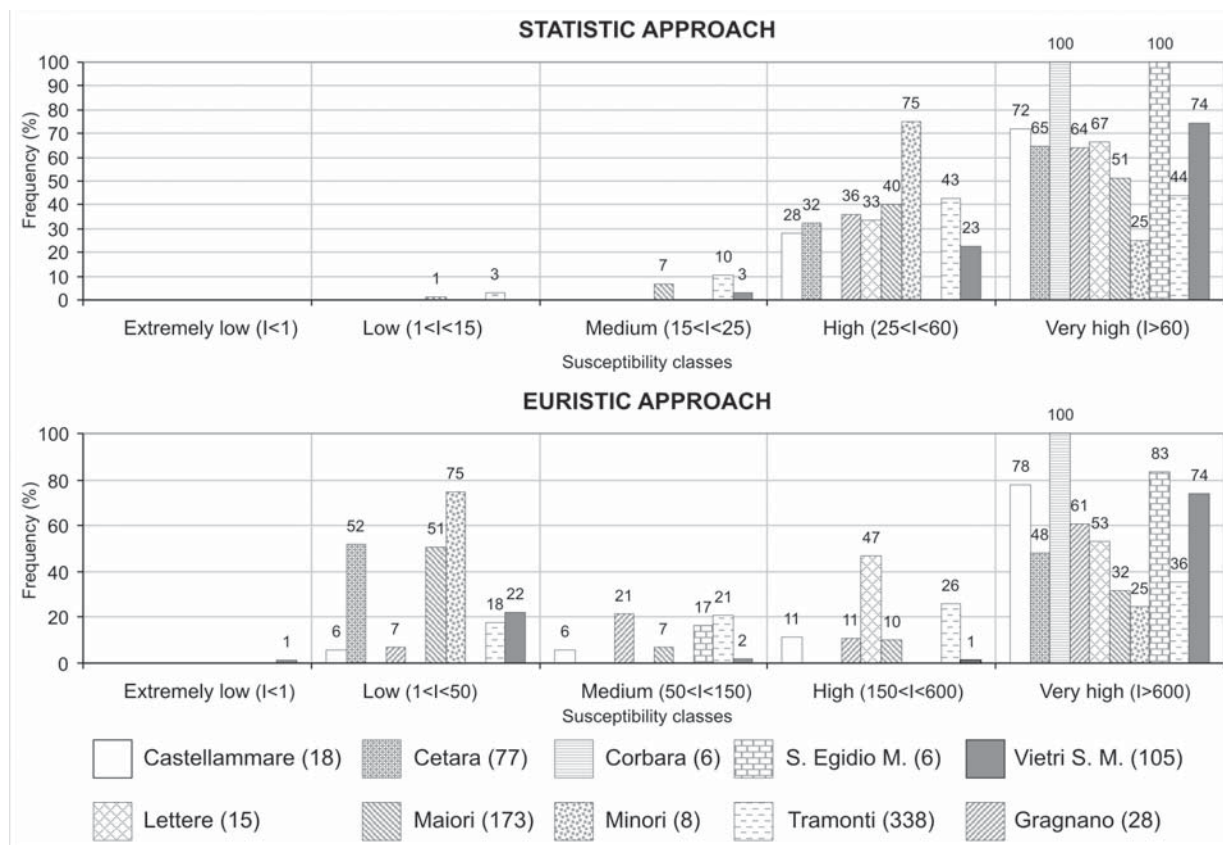


Fig. 8 - Frequenza di distribuzione delle aree sorgenti delle frane (n° = 774 per le differenti classi di suscettibilità per i comuni considerati (n° = 10) - Frequency of landslides (n° = 774) for the different susceptibility classes in the considered municipalities (n° = 10)

774) censite dalle Autorità di Bacino del Sarno e del Destra Sele ed in parte dal Progetto Nazionale IFFI (Progetto IFFI, 2006). Tali frane non erano state incluse nel nostro database poichè non si disponeva per esse di dati morfometrici precisi, a causa anche delle ridotte dimensioni. Esse pertanto sono risultate utili per testare il metodo proposto.

Attraverso l'utilizzo del GIS è stata infatti determinata la frequenza di frane per ogni singola classe di suscettibilità individuata. Il confronto è risultato incoraggiante dal momento che buona parte delle frane ricade nelle aree classificate a suscettibilità alta o altissima sia con il metodo euristico che statistico (Fig. 8).

Il metodo statistico mostra risultati decisamente migliori (Fig. 9) in quanto solo il 2% delle frane ricade nelle zone a bassa suscettibilità (rispetto al 28% nel caso del metodo euristico) e il 54% in quella ad altissima suscettibilità (rispetto al 44% per quello euristico). In particolare sommando le percentuali delle classi di alta ed altissima suscettibilità si hanno valori del 59% per il metodo euristico e del 91% per il metodo statistico.

In qualche caso è stato possibile verificare la bontà del metodo direttamente. La figura 10 riporta uno stralcio della carta della

research IFFI Project (Progetto IFFI, 2006) were taken into account. These data were not included in our database due to the small entity of the events or the absence of morphometric data. Nevertheless they were significant to check the proposed method.

By means of the GIS, each map was compared with the above-mentioned landslide inventory, evaluating the landslide frequency for each class of susceptibility. The comparison was encouraging since most of the events were grouped in the high or very high susceptibility classes, both for the heuristic and statistic approach (Fig. 8).

The statistical approach undoubtedly provides the best fit (Fig. 9) given that only 2% of the landslide sample is located within the low susceptibility areas (versus 28% in the case of the heuristic approach) and that 54% is within the high susceptibility areas (versus 44% in the case of the heuristic approach). Adding percentages of high and very high class values of 59% and 91% can be obtained for the heuristic and the statistic approach, respectively.

In some case it was possible to check the good quality of the method directly. The figure 10 reports a 3D extract of the susceptibility map of the Tramonti municipality showing the high and very

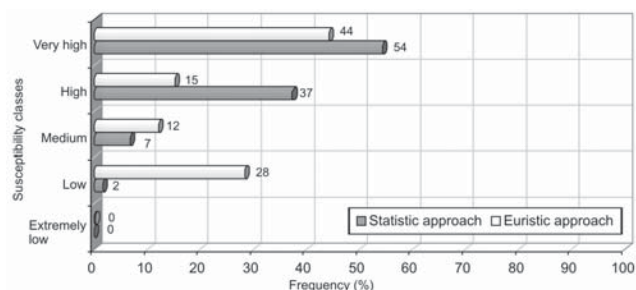


Fig. 9 - Percentuali di frane per le differenti classi di suscettibilità (n = 774)
- Occurrences of the landslides for the different susceptibility classes (n = 774)

suscettibilità in 3D del comune di Tramonti che mostra le aree a suscettibilità alta e altissima. Dopo la redazione delle carte di suscettibilità, nella stessa area si sono verificate 6 colate rapide le cui aree di innesco sono localizzate nelle aree classificate a suscettibilità alta e altissima.

CONCLUSIONI

La metodologia proposta è basata su un grande numero di dati morfometrici relativi a frane da colata rapida raccolti negli ultimi dieci anni in Campania. Sulla scorta di questi dati è stato possibile selezionare e pesare i fattori più significativi per l'innesco di questo tipo di frane. Per pesare le carte sono stati impiegati sia un approccio euristico che statistico; quest'ultimo è quello che ha dato i risultati migliori. La possibilità di utilizzare un numero elevato di dati ha conferito al metodo adottato una maggiore consistenza rispetto a quelli precedentemente proposti in letteratura.

Uno dei vantaggi principali del metodo è rappresentato dalla relativa semplicità di applicazione, in quanto i parametri utilizzati, essendo principalmente di tipo geologico e geomorfologico, possono essere rilevati facilmente sul campo. Per questa ragione la procedura è particolarmente adatta per studi a scala di bacino dove a causa della vastità delle aree da indagare, è generalmente difficile raccogliere dati sperimentali di tipo geotecnico, idraulico ed idrogeologico.

La valutazione della suscettibilità all'innesco rappresenta il primo importante passo per la definizione delle situazioni di maggiore rischio a scala di bacino. Essa infatti è necessaria per la perimetrazione delle potenziali zone di invasione e quindi delle aree a maggior rischio.

Per studi di maggiore dettaglio, la metodologia proposta può essere integrata da ulteriori analisi da effettuarsi nelle zone a maggiore suscettibilità, che tengano in considerazione altri fattori quali: la circolazione idrica nel substrato carbonatico e le caratteristiche geotecniche dei materiali. Il metodo, pertanto, può essere importante nella pianificazione di possibili interventi per la mitigazione del rischio, che potrebbero essere identificati con maggiore precisione e minore dispendio economico.

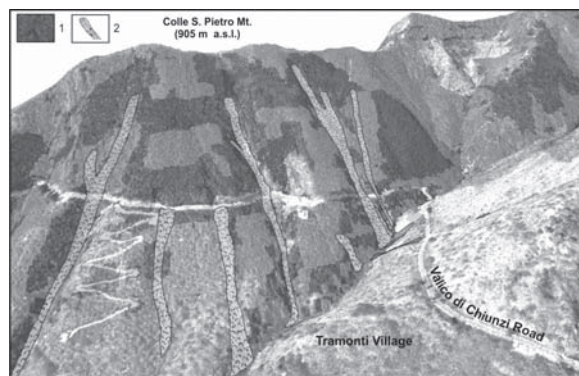


Fig. 10 - Visione in 3D della carta di suscettibilità di Tramonti. Legenda: 1) zone a suscettibilità molto alte; 2) Frane verificatesi a marzo del 2005
- 3D view of the susceptibility map of Tramonti area: Legend: 1) very high susceptibility zones; 2) landslides occurred in March 2005

high susceptibility areas. After the drawing of the map 6 wide flowslides occurred whose source areas were perfectly located in the high and very high susceptibility classes.

CONCLUSIONS

The method proposed herein has benefited from a large sample of morphometric data on flowslides collected in the last ten years in Campania. On the basis of these data it was possible to select and weight the most significant factors for triggering this kind of landslide. Both a heuristic and a statistical approach were adopted in weighting the maps, the latter providing the best fit for the method. The possibility of analyzing such a broad sample of data gives the method in question a sound basis to other procedures previously proposed.

The main advantages of the method is that it is relatively simple to use, basing on geological and geomorphologic parameters that can be easily plotted on the ground. For this reason the procedure is particularly suitable for studies at the river basin scale where it is generally difficult to collect experimental data, well distributed, such as geotechnical, hydraulic and hydrogeological parameters.

Estimation of triggering susceptibility is the first fundamental step for defining the high risk situations at the river basin scale. Only afterwards it is possible to draw up a map of potential inundation which, if combined with that of vulnerability, provides us with a map of the specific risk.

At a more detailed scale, the method can be improved by further investigation, taking into consideration for the high susceptibility zones, other factors, such as groundwater circulation in carbonates, together with the geotechnical characteristics of materials. This aspect appears to be particularly important during a planning phase, especially in light of possible interventions of risk reduction that could be implemented with greater precision and at lower cost.

PROPOSAL OF A NEW SEMIQUANTITATIVE METHODOLOGY FOR FLOWSLIDES TRIGGERING SUSCEPTIBILITY ASSESSMENT IN THE CARBONATE SLOPE CONTEXTS OF CAMPANIA (SOUTHERN ITALY)

OPERE CITATE/REFERENCES

- ABBATTISTA F., D'AGOSTINO G., DEL MONACO G., DI FILIPPO 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* 1/2005: 26-40.
- ALEOTTI P. & CHOWDHURY R. (1999) - *Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives*. *Bull. Eng. Geol. Env.*, **58**: 21-44.
- ALEOTTI P., CANUTI P., IOTTI A. & POLLONI G. (2000) – *Debris Flow Hazard and Risk Assessment Using Airborne Laser Terrain Mapping Techniques (ALTM)*. *Proc of the VIII Int. Simp. On Landslides*, Cardiff, 26-30 June 2000, **1**: 19-26.
- AMANTI M., CHIESSI V., CONTE G., MOTTERAN G. & VENTURA R. (1998) – *Utilizzo di un GIS per la valutazione della suscettibilità del territorio Campano alle colate rapide di fango. Un caso di studio alla scala 1:25000*. Servizio Geologico Nazionale.
- AMBROSIO M., DELLO MONACO G., FAGIOLI M.T., GIANNINI F., PARESCHI M.T., PIGNATELLI L., ROSI M., SANTACROCE R., SULPIZIO R. & ZANCHETTA G. (2002) -*Utilizzo di fioretto meccanico e carotiere microstratigrafico inguainante per la valutazione degli spessori e della stratigrafia delle coltri vulcanoclastiche soggette a fenomeni di colata rapida di fango*. *Geologia Tecnica & Ambientale*, **1**: 23-32
- ANBALAGAN R. (1992)– *Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain*. *Engineering Geology*, **32**: 269-277.
- AYALEW L. & YAMAGISHI H. (2005) – *The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan*. *Geomorphology*, **65**: 15-31
- BAEZA C. & COROMINAS J. (1996) - *Assessment of shallow landslide susceptibility by means of statistical techniques*. *Proc VII Int Symp on Landslides*, Trondheim, June 1996, **1**: 147-152
- BERNKNOFF R.L., CAMPBELL R.H., BROOKSHIRE D.S. & SHAPIRO C.D. (1988) - *A probabilistic approach to landslide hazard mapping in Cincinnati, Ohio, with application for economical evaluation*. *Bull. of the Assoc Engin Geologists*, **25**: 39-56.
- BRABB, E.E., (1984) - *Innovative approaches to Landslide hazard and risk mapping*. *Proc. Fourth International Symposium on Landslides*, I. Canadian Geotechnical Society, Toronto, Canada: 307–324.
- BRABB, E.E., PAMPEYAN, E.H. & BONILIA, M.G. (1972) – *Landslide susceptibility in San Mateo County, California*. U.S. Geol. Survey Misc. Field investigatoti Map, MF 360.
- BRANCACCIO L., CINQUE A., RUSSO F. & SGAMBATI D. (1999)– *Osservazioni geomorfologiche sulle frane del 5-6 maggio 1998 del Pizzo d'Alvano (Monti di Sarno, Campania)*. Estratto da “Studi geografici e geologici in onore di Severino Belloni”, Genova 1999: 81-123.
- CAIRO R & DENTE G. (2003) - *A flow slide in a pyroclastic soil fill*. *Atti Conf. Int. su “ Fast Slope Movements – Prediction and Prevention for Risk Mitigation”*. Napoli, Patron Editore Bologna **1**: 93-100.
- CALCATERRA D., DE RISO R. & DI MARTIRE D. (2004) – *Valutazione della suscettibilità da frana nella Conca di Agnano (Napoli) mediante applicazione di un modello su base fisica (SHALSTAB)*. I Workshop Modeci, Arcavacata di Rende, 30-31 marzo 2004.
- CALCATERRA D., DE RISO R. & SANTO A. (2003) – *Landslide hazard and risk mapping: experiences from Campania, Italy*. *Proc. Intern. Conf. On Fast Slope Movements: Prediction and Prevention for Risk Mitigation*, **1**: 63-70. Naples: Patron Editore.
- CALCATERRA D., SANTO A., DE RISO R., BUDETTA P., DI CRESCENZO G., FRANCO I., GALIETTA G., IOVINELLI R., NAPOLITANO P. & PALMA B. (1997) – *Fenomeni franosi connessi all'evento pluviometrico del Gennaio 1997 in Penisola Sorrentina - M.ti Lattari: primo contributo*. *Atti IX Congresso Nazionale dei Geologi*, Roma 17-20 aprile 1997.
- CALCATERRA, D. & SANTO A., (2004) - *The January 10, 1997 Pozzano Landslide, Sorrento Peninsula, Italy*. *Eng. Geol.*, **75**: 181-200.
- CANUTI P., GARZONIO C.A., RODOLFI G., & VANNOCCI P. (1985) - *Stabilità dei versanti nell'area rappresentativa di Montespertoli (Firenze). Carta di attività delle forme e di densità dei fenomeni franosi*. Tipografia S.EL.CA. Firenze.
- CARRARA A. (1983) – *Multivariate Models for landslide Hazard Evaluation*. *Mathematical Geology*, **15**.
- CARRARA A., CARDINALI M., DETTI R., GUZZETTI F., PASQUI V. & REICHENBACH P. (1991) - *Gis Techniques and Statistica! Models in Evaluating Landslides Hazard*. *Earth Suri. Proces. and Landforms*, **16**: 427-445.
- CARRARA A., CARDINALI M., GUZZETTI F. & REICHENBACH P. (1995) – *Gis based technique for mapping landslide hazard*. Kluwer Publ., Dordrecht, the Netherlands, 135-175.
- CASCINI L., GUIDA D., ROMANZI G., NOCERA G. & SORBINO G. (2000) – *A preliminary model for the landslides of May 1998 in Campania Region*. *Proc. 2nd Intern. Symp. On Hard Soil Rocks*. Balkema, Rotterdam: 1623-1649.
- CASCINI L., SORBINO, G. & CUOMO S. (2003) - *Modelling of flowslide triggering in pyroclastic soils*. *Atti Conf. Int. su “ Fast Slope Movements –Prediction and Prevention for Risk Mitigation”*. Napoli, Patron Editore Bologna **1**: 93-100.
- CELICO P.B. & GUADAGNO F.M. (1998) - *L'instabilità delle coltri piroclastiche delle dorsali carbonatiche in Campania: attuali conoscenze*. *Quaderni di Geologia Applicata*, **5-1**: 75-133, Bologna.
- CHUNG C.F., FABBRI A.G. & VAN WESTERN C.J. (1995) – *Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation*. Kluwer Publ., Dordrecht, the Netherlands.
- CLERICI A. & DALL'OLIO N. (1995) – *La realizzazione di una Carta della stabilità potenziale dei versanti mediante tecniche di Analisi Statistica Multivariata e un Sistema d'Informazione Geografica*. *Geologia tecnica e Ambientale*, n° 4.
- CROSTA G. B. & DAL NEGRO P. (2003) – *Observations and modelling of soil slip- debris flow initiation processes in pyroclastic deposits: the Sarno 1998 event*. *Natural Hazard and Earth System Sciences*, **3**: 53-69.

**PROPOSTA DI UN NUOVO METODO SEMIQUANTITATIVO 2PER LA VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ ALL'INNESCO DI COLATE RAPIDE DI FANGO
NEI CONTESTI CARBONATICI DELLA CAMPANIA**

- CRUDEN D.M. & VARNES D.J. (1996) - *Landslide types and processes*. In TURNER A.K. & SCHUSTER R.L. (eds.) - *Landslides: investigation and mitigation*. Nat. Res. Counc., Transp. Res. Board Sp. Rep. **247**: 36-75.
- DE FALCO M., DE RISO R. & DUCCI D. (1997) - *La piovosità della Penisola Sorrentina e dei M.ti Lattari in relazione all'evento del Gennaio 1997*. Atti IX Congr. Ordine Naz. Geologi.
- DE GRAFF J. & CANUTI P. (1988) - *Using isopleth mapping to evaluate landslide activity in relation to agricultural practices*. Bulletin of the Association of Engineering Geology, **38**: 61-71.
- DE RISO R., BUDETTA P., CALCATERRA D., DE LUCA, DEL PRETE S., DI CRESCENZO G., GUARINO P., MELE R., PALMA G., SANTO A. & SGAMBATI D. (2004) - *Fenomeni di instabilità dei versanti dei Monti Lattari e dell'Area Flegrea (Campania)*. Quaderni di Geologia Applicata, **11-1**.
- DE RISO R., BUDETTA P., CALCATERRA D. & SANTO A. (1999) - *Le colate rapide in terreni piroclastici del territorio campano*. Convegno su "Previsione e prevenzione di movimenti franosi rapidi", Trento 17-19 giugno 1999, GEAM.
- DEL FURIA L. & VALENTINI F. (2004) - *Modello monodimensionale per la valutazione delle aree di probabile invasione da colata rapida di fango*. Quaderni di Geologia Applicata, **11- 1**.
- DEL PRETE M. & DEL PRETE R. (1999) - *Il caso di Quindici (AV) del 5 maggio 1998 nel quadro dei movimenti di massa distruttivi delle coltri piroclastiche della Campania occidentale*. Quaderni di Geologia Applicata, **6 (1)**.
- DEL PRETE M., GUADAGNO F. M. & HAWKINS A. B. (1998) - *Preliminary report on the landslides of 5 May 1998, Campania, southern Italy*. Bull. Eng. Geol. Env., **57**: 113-129.
- DE VITA P., CELICO P., SINISCALCHI M. & PANZA R. (2006) - *Distribuzione, caratteri idrogeologici e suscettibilità a franare delle coltri piroclastiche sui versanti carbonatici peri-vesuviani (Italia)*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, **1**: 75-98.
- DI CRESCENZO G. & SANTO A. (1999) - *Analisi geomorfologica delle frane da scorrimento-colata rapida in depositi piroclastici della Penisola Sorrentina (Campania)*. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, **22**: 57-72.
- DI CRESCENZO G. & SANTO A. (2005) - *Nuovo contributo sul ruolo svolto dai livelli pomicei nelle aree di distacco delle frane di colata rapida dei massicci carbonatici campani*. Convegno Nazionale La mitigazione del rischio da colate di fango a Sarno e negli altri Comuni colpiti dagli eventi del maggio 1998. Napoli, 2 e 3 maggio 2005 - Sarno 4 e 5 maggio 2005.
- DI CRESCENZO G. & SANTO A. (2005) - *Debris slides-rapid earth flows in the carbonate massifs of the Campania region (Southern Italy): Morphological and morphometric data for evaluating triggering susceptibility*. Geomorphology, **66**: 255-276.
- DI VITO M. (1999) - *Distribuzione dei depositi dell'eruzione delle pomici di Avellino nell'area napoletana e ricostruzione del paleoambiente prima e dopo l'eruzione*. Atti del Seminario Internazionale di Ravello: L'eruzione Vesuviana delle Pomici di Avellino e la facies di Palma Campania. Centro Europeo per i Beni Culturali, Ravello 15-17 luglio: 83-91.
- GUADAGNO F. M. (1991) - *Debris flow in the campanian volcanoclastic soils (Southern Italy)*. Proc. Int. Conf. on "Slope stability engineering developments and applications", Institution of Civil Engineering, Thomas Telford, 113-121
- GUADAGNO F.M. & PERRIELLO ZAMPPELLI S. (2000) - *Triggering mechanism of the landslides that invested Sarno, Quindici, Siano and Bracigliano (Southern Italy) on May 5-6, 1998*. In: BROMHEAD E.M., DIXON J, JENSEN M.L. (eds). Proc. 8th Int. Symp. On Landslides, June, Cardiff. Publ. 2. Thomas Telford, London: 671-676.
- GUADAGNO F.M., MARTINO S. & SCARASCIA MUGNOZZA G. (2003) - *Influence of man-made cuts on the stability of pyroclastic covers (Campania, Southern Italy): a numerical modelling approach*. Environmental Geology, **43**: 371-384.
- GUADAGNO F.M. & REVELLINO P. (2005) - *Debris avalanches and debris flows of the Campania Region (Southern Italy)*. In: Debris-Flow Hazard and Related Phenomena. Matthias Jacob and Oldric Hungr (eds.), Springer and Praxis editorials.
- GUIDA. D., GUIDA M., IACCARINO G., LAMBIASE, S., METCALF G., SALZANO G., VALLANO A. & VECCHIO V. (1978) - *Una proposta per l'elaborazione di carte delta franosità*. Boll. Soc. Natur. in Napoli, **87**: 337-361.
- HUNGR O., EVANS S.G., BOVIS S.G. & HUTCHINSON J.N. (2001) - *A review of the classification of landslides of the flow tupe*. Environmental & Engineering Geoscience, **7 (3)**: 1-18.
- HUTCHINSON JN (1988) - *General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology*. Proc 5th Int Symp on Landslides, Lausanne. Balkema, Rotterdam: 3-36.
- JADE S. & SARKAR S. (1993) - *Statistical models for slope stability classification*. Engineering Geology, **36**: 91-98.
- JOHNSON A.M. & RODINE J.R. (1984) - *Debris flow*. In "Slope instability" (chapter 8), Ed. By Brunsten & Priorr, John Wiley & Sons Ltd, 257-361.
- LIRER, L., MUNNO, R., PETROSINO, P. & VINCI, A. (1993) - *Tephrostratigraphy of the A.D. 79 Pyroclastic deposits in perivolcanic areas of Mt. Vesuvio (Italy)*. J. Volcanol. Geotherm. Res., **58**: 133-149.
- MELE R. & DEL PRETE S. (1999) - *Lo studio della franosità storica come utile strumento per la valutazione della pericolosità da frane. Un esempio nell'area di Gragnano (Campania)*. Boll. Soc. Geol. It., **118**: 91-111.
- MIGALE L.S. & MILONE A. (1998) - *Mud flows in pyroclastic of the Campania. First data from historical research*. Rassegna Storica Salernitana **30**, **15 (2)**: 235-271.
- MONTGOMERY, D. R. AND DIETRICH, W. E. (1994) - *A physically based model for the topographic control of shallow landsliding*. Water Resour. Res., **30 (4)**:

**PROPOSAL OF A NEW SEMIQUANTITATIVE METHODOLOGY FOR FLOWSLIDES TRIGGERING SUSCEPTIBILITY ASSESSMENT
IN THE CARBONATE SLOPE CONTEXTS OF CAMPANIA (SOUTHERN ITALY)**

1153–1171.

- MUSO A. & OLIVARES L. (2004) - *Flowslides in pyroclastic soils – transition from “static liquefaction” to “fluidification”*. In L. PICARELLI (ed.), Occurrence and Mechanism of Flows in Natural Slopes and Earthfills, Proceed. Int. Workshop, Sorrento, 14-16 May, 117-127, Patron Ed. Bologna.
- OLIVARES L. & PICARELLI, L. (2001) - *Occurrence of flowslides in soils of pyroclastic origin and considerations for landslides hazard mapping*. Proceed 14th South-east Asian Conf., Hong Kong: 881-886.
- OLIVARES L. & PICARELLI L. (2006) - *Modelling of flowslides behaviour for risk mitigation*. Proc. 6th Int. Conf. Physical Modelling in Geotechnics, Hong Kong. Taylor & Francis, London, **1**: 99-112
- PACK R.T., TARBOTON D.G. & GOODWIN CN (1998) - *The SINMAP approach to terrain stability mapping*. In: MOORE D.P. & HUNGR O. (eds) Proceedings international congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment 8, 2, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands: 1157–1165.
- PARESCHI M. T., SANTACROCE R, CAVARRA L., FAVALLI M., GIANNINI F., SULPIZIO R., & ZANCHETTA G. (1998A) – *Contributo alla zonazione della pericolosità e alla valutazione del rischio connessi allo scorrimento di colate di fango nel bacino dei torrenti Cranio e Acqualonga*. Rischio idrogeologico nelle aree della Campania, Unità Operativa Valle del Cranio, Professional paper, 31 pp.
- PARESCHI M. T., SANTACROCE R, SULPIZIO R. & ZANCHETTA G. (2002) – *Volcanoclastic debris flow in the Clanio Valley (Campania, Italy): insights for the assessment of hazard potential*. *Geomorphology*, **43**: 219-231
- PEARSON T. C. & COSTA J.E. (1987) - *A rheologic classification of subaerial sediment-water flows*. *Geol Soc Am Rev Eng Geol*, **7**: 1-12.
- PICARELLI, L. & OLIVARES L. (2001) - *Innesco e formazione di colate di fango in terreni sciolti di origine piroclastica*. Forum su Fenomeni di colata rapida di fango, maggio 1998: 26-38.
- PROGETTO IFFI – *Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (2006)*: www.mais.sinanet.apat.it/cartanetiffi/default_nosso.asp
- RADBMOCH HALL, D.H., COLTON. R.B., DAVIES, W.E., LUCCHITTA, L., SKIPP, B.A. & VARNES. DJ. (1982) - *Landslide overview map of the Conterminous United States*. U.S. Geol. Survey Prof. Paper 1183.
- 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**: 295-311.
- ROLANDI G. (1997) - *The Eruptive History of Somma-Vesuvius Volcanism and Archeology in Mediterranean Area*. De Vivo and Cortini. Ed.
- ROLANDI, G., MARAFFI S., PETROSINO P. & LIRER L. (1993a) - *The Ottaviano eruption of Somma-Vesuvius (8000 y b.p.): a magmatic alternating fall and flow-forming eruption*. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **58**: 43– 65.
- ROLANDI G., MASTROLENZO G., BARRELLA A.M. & BORRELLI A. (1993b) - *The Avellino plinian eruption of Somma- Vesuvius (3760 y b.p): the progressive evolution from magmatic to hydromagmatic style*. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **58**: 67–88.
- ROLANDI G., MUNNO R. & POSTIGLIONE C. (2003) - *The A.D. 472 eruption of Somma volcano*. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **129**: 291-319.
- SIGURDSSON, H., CASHDOLLAR, S. & SPARKS, S.R.J. (1982) - *The eruption of Vesuvius in A.D. 79: reconstruction from historical and volcanological evidence*. *Am. J. Archaeol.*, **86**.
- SIRANGELO B. & BRACA G. (2004) - *Identification of hazard conditions for mudflow occurrence by hydrological model Application of FLalR model to Sarno warning system* *Engineering Geology*, **73**: 267–276.
- SOETERS R. & VAN WESTEN C.J. (1996) - *Slope stability: recognition, analysis and zonation*. In: Turner AK, Shuster RL (eds) “Landslides: investigation and mitigation”. Transportation Research Board – National Research Council, Special Report **247**: 129-177.
- TERLIEN, M.T.J., VAN ASCH, TH.W.J. & VAN WESTEN, C.J. (1995). - *Deterministic modelling in GIS-based landslide hazard assessment*. In: CARRAR A., GUZZETTI F. (Eds.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer, London: 57-77.
- TURRINI M. C. & VISINTAINER P. (1998) - *Proposal of a method to define areas of landslide hazard and application to an area of the Dolomites, Italy*. *Engineering Geology*, **50**: 255–265.
- TURRINI M.C., BERNARDINELLO D. & VISINTAINER P. (1998) – *Esempi di metodi cartografico-numeric per la zonazione della pericolosità da frana ad applicazioni ad aree dolomitiche*. *Mem. Soc. Geol. It.*, **53**: 295-310.
- VAN WESTEN C.J. (1993) – *Application of GIS to landslide hazard zonation*. ITC Publication n°15, ITC, Enschede, 245 pp.
- VAN WESTEN C. J., RENGERS N., TERLIEN R. & SOETERS M. T. J. (1997) - *Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation*. *Geol Rundsch*, **86**: 404-414.
- WIECZOREK G.F., GORI P.L., JAGER S., KAPPEL W.M. & NEGUSSEY D. (1996) - *Assessment and management of landslide hazards near Tully Valley landslide, Syracuse, New York, USA*. Proc VII Int Symp Landslides, Trondheim, June 1996, **1**: 411–416.
- WP/WLI (1993) - *A suggested method for describing the activity of a landslide*. *Bull. Int. Ass. Eng. Geol.*, **47**: 53-57.
- WU W., & SIDLE R.C. (1995) - *A distributed slope stability model for steep forested basins*. *Water Resources Research*, **31** (8): 2097–2110.
- YIN K.L & YAN T.Z. (1988) – *Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rock*. Proc 5th Int. Symp. Landslide, Lausanne, 2: 1269-1272.

Received July 2007 - Accepted January 2008