



Internationales Symposion INTERPRAEVENT 2004 – RIVA / TRIENT

ANALISI INTEGRATA DEI FENOMENI DI COLATA DETRITICA NEI BACINI TORRENTIZI SUD-GARGANICI (ITALIA MERIDIONALE)

INTEGRATED DEBRIS FLOW ANALYSIS IN SOUTH-GARGANO WATERSHEDS (SOUTHERN-ITALY)

Tiziana Bisantino¹, Francesco Gentile², Salvatore Puglisi³

RIASSUNTO

Nel presente lavoro si intende descrivere una metodologia di analisi delle colate detritiche verificatesi nei bacini torrentizi del versante meridionale del Gargano (Puglia-Italia) a seguito di eventi pluviometrici di notevole intensità.

In particolare è stato esaminato il comportamento geo-meccanico delle coltri detritiche sui versanti, lungo l'alveo e nelle zone di deposito mediante sondaggi in sito e prove di laboratorio. Successivamente sono state valutate le aree di produzione di detriti ed osservate le forme deposizionali mediante l'interpretazione di foto aeree ed è stato valutato il potenziale detritico mediante l'applicazione del modello combinato di stabilità SHALSTAB.

In ultima analisi sono state eseguite la trasformazione afflussi-deflussi nel bacino di monte e la simulazione della colata detritica nel tratto di trasporto e nella zona conoidale mediante applicazione del modello bidimensionale Flo-2D.

Parole chiave: Colate detritiche, stabilità dei pendii, sorgenti di sedimento, modelli di simulazione

ABSTRACT

This paper describes a methodology to analyse debris flow phenomena occurring in the torrential watersheds located on the southern side of Gargano (Puglia-Italy), following intense rainfall.

The geo-mechanic behaviour of sediments on the hillslopes, along the torrents bed and on the alluvial cone, was studied by field surveys and sampling and testing soil in laboratory.

Subsequently sediment source areas were evaluated and shapes of alluvial cone were observed, by means of photo-aerial interpretation. Potential debris flow volume was estimated, using the combined stability model SHALSTAB.

1 Dottoranda di ricerca, Dip. PROGESA-Sez. di Sistemazioni idraulico-forestali, Università di Bari, via Amendola 165/A, 70124 Bari; e-mail: t.bisantino@agr.uniba.it

2 Professore associato, Dip. PROGESA-Sez. di Sistemazioni idraulico-forestali, Università di Bari, via Amendola 165/A, 70124 Bari; e-mail: francesco.gentile@agr.uniba.it

3 Professore ordinario di Sistemazioni idraulico-forestali nell'Università di Bari dal 1975 al 2002, via della Resistenza 48H/2, 70125 Bari; e-mail: gsm.puglisi@virgilio.it

Finally the rainfall-runoff relation and the debris flow simulation along the torrent bed and on the alluvial cone were carried out using the two-dimensional model Flo-2D.

Key words: Debris flow, slope stability, sediment sources, flood routing models

INTRODUZIONE

Il versante meridionale del promontorio del Gargano è solcato da una serie di torrenti il cui sviluppo risulta essere strettamente legato alla natura delle rocce calcaree, soggette nel tempo a consistenti fenomeni di disgregazione.

In occasione di eventi meteorici di lieve entità, e per effetto della permeabilità e fessurazione delle rocce calcaree, i detriti prodotti dall'erosione meccanica non vengono trasportati a valle ma permangono nel luogo della loro formazione e più spesso nei burroni (Puglisi, 1977).

Le precipitazioni più intense, invece, non potendo essere disperse in profondità, travolgono tutti i materiali accumulati sui versanti e li trasportano verso valle dando origine a colate caratterizzate da un materiale più grossolano che occupa la zona inferiore della corrente, e da una superficie liquida in forte turbolenza con sospensione del materiale solido più minuto.

Le colate si muovono verso valle, in preferenza lungo impluvi naturali, e raccolgono materiale non coesivo che incontrano lungo il loro cammino. Data l'elevata capacità distruttiva di questi fenomeni, spesso si osserva anche il trasporto di blocchi di notevoli dimensioni.

I fattori che favoriscono la disgregazione delle rocce sono l'esposizione ed il gradiente termico, inoltre, l'energia erosiva e trascicante delle acque di ruscellamento aumenta con l'aumentare della pendenza dei versanti e con l'aumentare del volume di precipitazione affluito (Mouloupoulos, 1929).

Un elevato distacco dei detriti dalle pendici è causato anche dalle vicende della copertura vegetale sui versanti, i quali essendo rimasti nudi e privi di vegetazione, sono esposti a temperature estreme ed all'energia chimico - meccanica delle intense precipitazioni e dei forti venti.

I primi tentativi di simulazione dei debris flow furono fatti mediante modelli bidimensionali, schematizzati alle differenze finite, che si basavano sulla teoria di resistenza di Coulomb e sulle ipotesi di fluido dilatante introdotte da Bagnold nel 1954. Tali modelli tenevano conto delle tensioni dispersive associate alle collisioni intergranulari e, solo successivamente, furono introdotti gli effetti della turbolenza (Takahashi, 1991).

In seguito ad alcune sperimentazioni reologiche, tuttavia, fu dimostrato che le colate con alte concentrazioni di materiale fine si comportano alla Bingham; nei miscugli aventi basse concentrazioni di sedimenti predominano le tensioni di turbolenza; i miscugli con elevate concentrazioni di materiale grossolano e basse concentrazioni di materiale fine generano notevoli tensioni dispersive (O'Brien e Julien, 1988).

Quest'ultima teoria è stata, recentemente, proposta in un modello quadratico che permette di descrivere il regime di flusso di un miscuglio, sia nel caso di fluido viscoso sia nel caso di fluido turbolento o dispersivo (O'Brien, 1993).

Negli ultimi anni, oltre a definire la generazione delle colate, è sorta la necessità di localizzare le zone potenzialmente a rischio e conoscere la quantità di materiale in possibile movimento. A tal fine sono stati effettuati numerosi studi sperimentali che hanno previsto l'utilizzo di stazioni di misura e costosi rilievi in campo oppure l'applicazione di relazioni empiriche individuate su basi statistiche (Tropeano e Turconi, 1999).

L'approccio utilizzato in questo lavoro ha inteso suddividere l'analisi dei processi di formazione di una colata detritica in quattro fasi distinte:

- nella prima fase sono state effettuate indagini geomorfologiche per la caratterizzazione

della coltre detritica;

- nella seconda fase sono state utilizzate tecniche di aereo-fotointerpretazione per la perimetrazione delle potenziali aree sorgenti di sedimenti;
- nella terza fase è stato esaminato il rischio di movimentazione del materiale superficiale attraverso l'analisi del ruolo della topografia e della convergenza del deflusso sottosuperficiale;

Questa fase ha previsto l'applicazione di un modello di stabilità combinato con un modello idrologico stazionario (SHALSTAB-Montgomery e Dietrich, 1994; Montgomery et al., 1998) in grado di valutare il grado di saturazione dell'ammasso granulare e, conseguentemente, la riduzione delle forze di taglio in grado di opporsi al moto;

- nella quarta fase è stata effettuata la trasformazione afflussi-deflussi nel bacino di monte e la simulazione della colata detritica nel tratto di trasporto e nella zona conoidale mediante l'applicazione di un modello bidimensionale di generazione dei deflussi (Flo-2D-O'Brien, 2001).

Quest'ultima applicazione ha permesso di ricavare informazioni dettagliate sulle altezze di deflusso e sulle velocità nel tratto di trasporto e sul conoide consentendo, pertanto, di descrivere la variabilità spazio-temporale del fenomeno.

DESCRIZIONE DELL'AREA DI INDAGINE

L'area di indagine comprende il territorio interessato dal bacino idrografico del torrente Pulsano e dalle aree conoidali localizzate nella zona di valle.

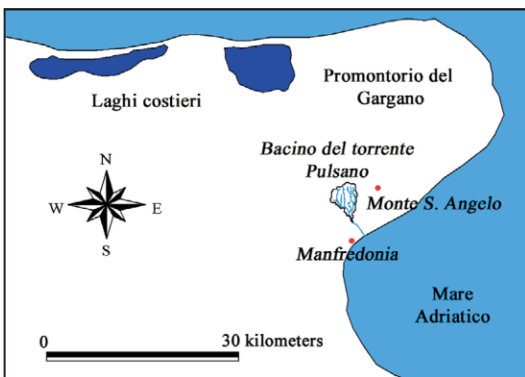


Fig.1 Localizzazione del bacino idrografico del torrente Pulsano

Fig.1 Location of the Pulsano catchment

Il territorio, compreso fra i Comuni di Manfredonia e di Monte S. Angelo in provincia di Foggia, si sviluppa, con andamento N-S, dal Crinale degli Angeli fino alle coste del Golfo di Manfredonia.

Il bacino in esame appartiene ad uno dei gruppi di bacini torrentizi che caratterizzano il versante sud-orientale del Promontorio del Gargano e raccoglie le acque dei torrenti Mollica e Valle Campanile che congiungendosi originano il torrente Pulsano.

Il primo gruppo di torrenti comprende i torrenti Paradiso, Scaloria e Ripa di Sasso 1° e 2°, i quali incombono sull'area urbana del Comune di Manfredonia; il secondo gruppo comprende i torrenti Pulsano, Fazzino, Petrulo e Malpasso, i quali gravano sull'area industriale della stessa città; il terzo gruppo, infine, comprende i torrenti S. Martino, S. Pasquale, Varcaro che sovrastano l'area agricola e turistica del Comune di Monte S. Angelo.

In parte, l'area in cui ricade il bacino appartiene al Parco Nazionale del Gargano (Legge Quadro n. 394 del 6/12/92) e risulta sottoposta a vincolo idrogeologico sia per il notevole valore naturalistico che paesaggistico.

In seguito ad eventi catastrofici, causati da piogge eccezionali, il bacino è stato sottoposto, negli anni, ad alcuni interventi di sistemazione idraulico – forestale.

In particolare sono stati realizzati due canali collettori, ad Ovest e ad Est dell'abitato di Manfredonia, aventi lo scopo di raccogliere le acque dei torrenti Paradiso, Scaloria e Ripa di Sasso e dei torrenti Fazzino, Petrulo e Malpasso e di convogliarle verso impluvi naturali e precisamente nella Valle di S. Lazzaro e nel Vallone Pulsano.

Lungo l'alveo del torrente, inoltre, sono state realizzate 14 briglie in calcestruzzo, a partire da quota 100 m s.l.m. sino alla confluenza con i torrenti Mollica e Valle Campanile.

Nel tratto finale del torrente Valle Campanile è stata realizzata una briglia filtrante in calcestruzzo posta a quota 242.6 m s.l.m., mentre nel torrente Mollica vi sono 3 briglie filtranti in calcestruzzo sino a quota 270 m s.l.m.

Tra le altre opere di sistemazione vi sono dei muri in gabbioni, realizzati lungo il Vallone Pulsano, a protezione delle sponde e due reti metalliche, costituite da cavi in acciaio e fissate ai versanti del torrente Valle Campanile a quota 265 m s.l.m., per evitare il rotolamento dei massi instabili.

Il Pulsano, inoltre, nel tratto vallivo, presenta muri spondali in calcestruzzo e soglie di fondo realizzati per la regimazione dei deflussi provenienti da monte.

In tabella 1 sono riportate le caratteristiche del bacino idrografico del torrente Pulsano:

Tab. 1 Caratteristiche principali del bacino idrografico del torrente Pulsano

Tab. 1 Main characteristics of the Pulsano catchment

Bacino Idrografico			Reticolo Idrografico		
Superficie	15.6	km ²	Lunghezza totale	30.5	km
Superficie planimetrica	14.6	km ²			
Sup./Sup. plan.	1.1		Torrente Pulsano		
Perimetro	24	km	Lunghezza alveo naturale	2.2	km
Quota media	464	m s.l.m.	Lunghezza tratto canalizzato	1.7	km
Quota massima	884	m s.l.m.			
Quota minima	100	m s.l.m.			

Dal punto di vista altimetrico il bacino risulta ubicato in parte sui rilievi montuosi facenti parte dell'abitato di Monte S. Angelo ed in parte sul debole pendio che va da quota 200 m s.l.m. sino al livello del mare.

Questa variazione deriva, prevalentemente, dalle caratteristiche morfologiche e tettoniche del promontorio che, emerso durante il Cretacico, presenta una dorsale, che raggiunge gli 880 m s.l.m., delimitata da sistemi di faglie ritenute ancora attive ed aventi andamento E-O e NO-SE. Il substrato roccioso che caratterizza l'area è costituito principalmente da calcari dolomitici del periodo triassico-cretacico, di spessori dell'ordine di migliaia di metri.

I calcari affioranti, appartenenti in prevalenza alla formazione di Monte S. Angelo, si presentano compatti, biancastri e riccamente organogeni, discretamente permeabili per fessurazione e in alcune zone intercalati da calcareniti e calciruditi a stratificazione irregolare. Ai piedi del bacino si sviluppa una conoide detritico-torrentizia che si innesta nel ripido canale discendente dall'altopiano.

Essa è costituita da frammenti e blocchi calcarei in matrice limoso-argillosa, a volte provenienti dal disfacimento delle sottostanti breccie cementate.

La vegetazione prevalente nel bacino è il pascolo naturale, mentre, nei pressi del crinale, vi sono praterie di alta quota e boschi di latifoglie.

Scendendo verso valle, si rinvencono xerogramineti con lembi di macchia ad Olivo selvatico che si congiungono agli uliveti coltivati sui terrazzamenti, realizzati sui versanti a ridosso degli alvei sino a 500-600 m s.l.m.

Nella parte media ed inferiore del bacino si riscontrano formazioni di giovani fustaie alternate

a vaste radure, nelle aree conoidali prevalentemente l'Olivo, mentre in prossimità dell'alveo canalizzato si rinvergono colture agricole e aree naturali.

Questo tipo di copertura vegetale dà al bacino il caratteristico aspetto dovuto all'assenza di vegetazione arborea.

Il grafico in figura 2 riporta le superfici, in percentuale, occupate dalle principali formazioni vegetali del bacino (Progetto Corine 1999).

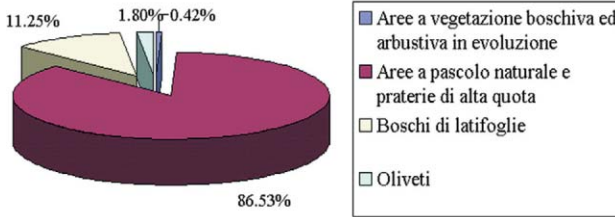


Fig.2 Percentuali di uso del suolo
Fig.2 Percentage of land cover

L'EVENTO DEL 15 LUGLIO 1972

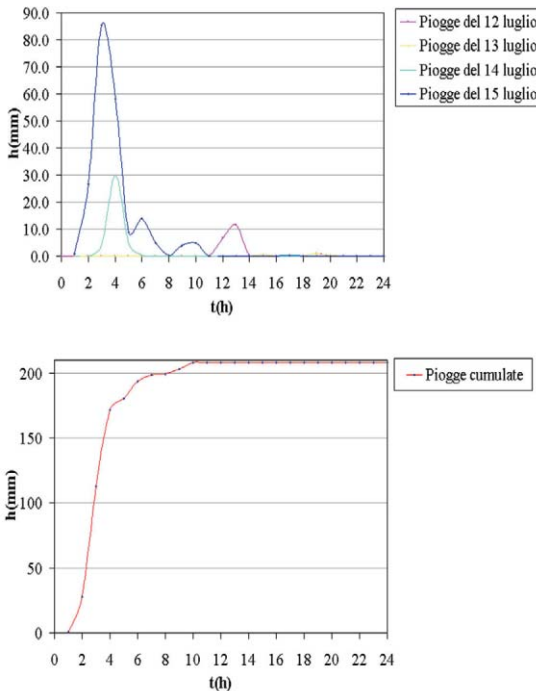


Fig.3 Precipitazioni orarie dal 12 al 15 Luglio 1972 e cumulate del 15 Luglio
Fig.3 Hourly rainfalls since July, 12 to July, 15 1972 and cumulative rainfall referred to July, 15

Il territorio compreso tra i Comuni di Monte S. Angelo e Manfredonia è stato interessato, nel corso degli anni, da alcune importanti alluvioni che hanno provocato notevoli danni.

Vanno ricordate, in particolare, quelle relative agli eventi meteorici del 26 luglio 1951, 24 e 25 ottobre 1964, 4 novembre 1966, 18 settembre 1970, 15 luglio 1972 e 29 luglio 1976 (Curci et al., 2001).

Al fine di inquadrare gli eventi eccezionali in un quadro climatico più ampio, in questa sezione si intendono definire le principali caratteristiche climatiche dell'area oggetto di studio.

In particolare sono stati esaminati i dati pluviometrici e le temperature di due stazioni del Servizio Idrografico Italiano: Monte S. Angelo e Manfredonia. La prima, posta a quota 843 m s.l.m., è ubicata esattamente all'estremo settentrionale del

territorio oggetto di studio, mentre la seconda, posta a quota 4 m s.l.m, si trova all'estremo meridionale del bacino.

Il clima risulta caratterizzato da una lunga stagione calda concentrata nei mesi estivi, con temperature medie di 23.7 °C per Manfredonia e di 23.0 °C per Monte S. Angelo, e con una stagione fredda, con temperature medie di 7.5 °C per Manfredonia e 3.8 °C per Monte S. Angelo.

Il regime pluviometrico presenta un periodo di massima piovosità in autunno ed un periodo piuttosto secco in estate, con una piovosità media annua di 780 mm per la stazione di Monte S. Angelo e 450 mm per Manfredonia.

Da quanto evidenziato, si deduce che l'aumento della quota nelle fasce pedemontane influenza sostanzialmente la distribuzione delle precipitazioni. Osservando, inoltre, la distribuzione degli eventi estremi, nei diversi periodi dell'anno, si nota che la causa delle alluvioni abbattutesi sull'abitato di Manfredonia è da ricondursi alle piogge eccezionali verificatesi a Monte S. Angelo (Guerra, 1996).

Le precipitazioni estive, infatti, presentano una elevata intensità e sono in grado di saturare i primi strati di terreno, confluendo nei valloni che incidono il rilievo sud-Garganico.

Nelle prime ore del 15 luglio 1972, la città di Manfredonia è stata colpita da un'alluvione provocata dalle acque di ruscellamento dei valloni a Nord dell'abitato che hanno provocato notevoli danni e alcune vittime (Bissanti, 1972).

L'evento, registrato nella stazione di Monte S. Angelo, presenta un valore massimo di precipitazione di 85.6 mm caduto intorno alle ore 3 del mattino e un valore di 208.3 mm caduto complessivamente in meno di 12 ore.

Le acque hanno rapidamente raggiunto il centro abitato, nelle prime ore del mattino, trascinando con sé una notevole quantità di detriti provenienti dai versanti.

Tale brevità deriva dalla elevata intensità di pioggia caduta e dalla notevole velocità di ruscellamento causata dalle caratteristiche morfologiche delle aree contribuenti al deflusso. I diagrammi in figura 3 riportano i valori delle piogge orarie cadute a Monte S. Angelo dal 12 al 15 luglio 1972.



Fig. 4-5 La città di Manfredonia dopo l'alluvione del 1972

Fig. 4-5 The city of Manfredonia after the 1972 flood

UN MODELLO COMBINATO DI STABILITA'

Il modello a base fisica, utilizzato per la previsione della mobilitazione potenziale di detriti, è costituito da una componente di stabilità e da una componente idrologica.

Il principio fondamentale, alla base della teoria, stabilisce che l'instabilità di un pendio avviene quando l'entità del deflusso superficiale e di quello sottosuperficiale determinano uno

sbilibrato statico fra l'azione destabilizzante della gravità agente sul fluido e sui sedimenti e l'azione stabilizzante legata all'attrito e alla eventuale coesione del materiale. La componente di stabilità si basa sull'applicazione della legge di Mohr-Coulomb ad un pendio infinitamente lungo e non confinato lateralmente, caratterizzato da pendenza e spessore uniformi, giacente su una superficie impermeabile e costituito da materiale granulare omogeneo e isotropo.

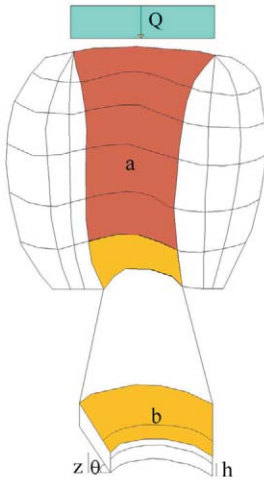


Fig. 6 Aree contribuenti
Fig. 6 Contributing areas

La componente idrologica del modello si basa sulla teoria del moto di filtrazione parallela al pendio in condizioni stazionarie (O'Loughlin, 1986; Beven e Kirby, 1979).

Essa stabilisce che, per effetto della riduzione della conducibilità idraulica negli strati più profondi del terreno, si verifica un deflusso sottosuperficiale verso valle.

La convergenza topografica, inoltre, favorisce l'incremento del contenuto d'acqua in direzione del flusso e si formano zone in cui il terreno è in completa saturazione.

La topografia del sistema è definita da un modello digitale del terreno (DTM), avente una dimensione della maglia in grado di caratterizzare significativamente i processi idrologici superficiali (Montgomery, 1994).

Il modello combinato è rappresentato dall'equazione:

$$Q = \frac{T \text{sen } \theta}{a/b} \left\{ \frac{c}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan \phi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right\} \quad (1)$$

in cui, oltre ai simboli noti, compaiono:

- tre termini topografici, definiti dalla superficie numerica usata nel modello digitale del terreno (area di drenaggio per unità di lunghezza a/b e pendenza del versante θ);
- due termini idrologici (trasmissività T e pioggia efficace Q);
- tre termini geo-meccanici (densità del suolo ρ_s , coesione c e angolo di attrito ϕ).

L'equazione permette di definire, a scala di cella, la soglia di innesco delle situazioni di instabilità al variare degli afflussi meteorici efficaci, le condizioni sotto le quali l'ammasso viene mobilitato, in che misura e per effetto di quali possibili cause.

GENERAZIONE DELLE COLATE DETRITICHE

Flo-2D è un modello bidimensionale di generazione dei deflussi non confinati su superfici topograficamente complesse. Esso, inoltre, simula i deflussi mono-dimensionali lungo i corsi d'acqua, i deflussi iperconcentrati, le colate detritiche e di fango e il trasporto solido. Consente, infine, di modellare gli effetti di strutture quali ponti, strade, edifici, arginature, ecc. Il modello si basa sull'integrazione numerica delle equazioni di conservazione del volume e dell'equazioni del moto che vengono risolte alle differenze finite, suddividendo il dominio in una griglia e calcolando l'altezza d'acqua e la velocità nelle otto possibili direzioni di ciascuna maglia.

La modellazione numerica delle colate detritiche si basa su un modello quadratico, proposto da O'Brien e Julien (1988), che permette di descrivere il regime di flusso di un miscuglio sia

nel caso di un fluido viscoso sia nel caso di fluido turbolento o dispersivo.
 Il modello quadratico proposto può essere così schematizzato:

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \quad (2)$$

dove τ è la tensione totale, τ_c è la tensione dovuta alla coesione, τ_{mc} è la tensione di Mohr-Coulomb, τ_v è la tensione dovuta alla viscosità, τ_t è la tensione dovuta alla turbolenza e τ_d è la tensione dispersiva.

Integrando l'equazione lungo la verticale al piano di scorrimento ed esprimendola in termini di deformazione si ha:

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K\eta V}{8\gamma_m h^2} + \frac{n_{td}^2 V^2}{h^{4/3}} \quad (3)$$

dove S_f rappresenta l'angolo di attrito del miscuglio, K è il parametro di resistenza del flusso laminare, n_{td}^2 è il parametro di resistenza per effetto delle tensioni di turbolenza e di dispersione (equivalente al parametro n di Manning), γ_m è il peso specifico del miscuglio, V è la velocità media lungo la sezione trasversale, h è l'altezza del miscuglio, η e τ_y sono i parametri reologici che rappresentano la viscosità e la somma delle tensioni di Mohr-Coulomb e di coesione. I parametri reologici vengono calcolati mediante le seguenti relazioni empiriche:

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \quad (4)$$

$$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \quad (5)$$

con α_i e β_i parametri sperimentali e C_v concentrazione volumetrica del materiale solido espressa dalla relazione:

$$C_v = \frac{\text{volume dei sedimenti}}{(\text{volume dell'acqua} + \text{volume dei sedimenti})} \quad (6)$$

La densità del miscuglio, invece, viene espressa in funzione della densità dell'acqua γ_w , della densità dei sedimenti γ_s e della loro concentrazione C_v attraverso la relazione:

$$\gamma_m = \gamma_w + C_v (\gamma_s - \gamma_w) \quad (7)$$

La base di dati morfologici richiesti dal modello consiste nella rappresentazione a griglia delle superfici potenziali di flusso e nella conoscenza della geometria d'alveo, quando si voglia simulare anche il moto unidimensionale.

Se il flusso eccede la capacità del corso d'acqua, il modello calcola il volume in eccesso e lo trasforma in deflusso bidimensionale, distribuendolo sulle superfici adiacenti. Questa procedura è valida in entrambi i sensi e permette, pertanto, di calcolare anche il ritorno dei volumi liquidi al corso d'acqua. Il modello consente, inoltre, di effettuare trasformazioni afflussi-deflussi, sia nel bacino a monte del sistema che sulle superfici di flusso, mediante il modello di infiltrazione di Green-Ampt.

APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA AL TORRENTE PULSANO

L'analisi integrata delle colate detritiche ha previsto, come detto, l'elaborazione di quattro fasi.

Nella prima fase sono state effettuate alcune indagini sperimentali al fine di caratterizzare il comportamento geo-meccanico della coltre detritica.

In particolare sono stati eseguiti il campionamento del materiale in sito e alcuni sondaggi, aventi lo scopo di distinguere la componente detritica dal substrato roccioso, nonché prove di laboratorio che hanno permesso di caratterizzare le proprietà fisiche e meccaniche dei materiali presenti nel bacino (peso dell'unità di volume, contenuto naturale d'acqua, permeabilità, resistenza al taglio e granulometria).

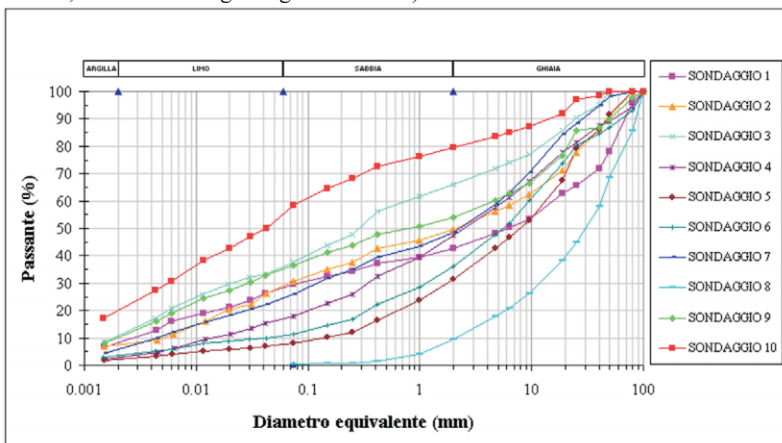


Fig.7 Fuso granulometrico

Fig.7 Grain size distribution of sediments

Dai risultati delle perforazioni è stato possibile distinguere le zone lambite marginalmente dalle alluvioni, che nel corso degli ultimi 30 anni hanno interessato il torrente, dalle zone direttamente interessate dalle colate.

Dall'esame delle curve granulometriche (Fig.7), è emersa una sostanziale omogeneità tra i vari campioni esaminati, i quali presentano una granulometria ben assortita, dal grossolano al fine (limo-sabbia, ghiaia pulita).

Nel corso dei campionamenti è stata effettuata, inoltre, una misura della densità in sito del materiale ($\gamma=1.4\text{ g/cm}^3$) che è risultata essere ben confrontabile con il valore medio ottenuto in laboratorio.

Per quanto riguarda la misura di resistenza a taglio, va sottolineato che la prova è stata eseguita sul campione che presentava la curva granulometrica più assortita e con percentuali simili di sabbia e limo. Al termine della prova è stato possibile determinare l'angolo di attrito Φ e la coesione c del materiale.

La seconda fase ha riguardato la perimetrazione delle aree sorgenti di sedimento.

A partire dalle foto aeree, rilevate nel 2001 a quota 2400 m ed aventi la scala dei fotogrammi pari a 1:15000, sono state differenziate le aree sorgenti di detrito dagli affioramenti rocciosi. Successivamente tali aree sono state suddivise in base allo spessore medio e sono stati localizzati i grossi massi presenti sulle pendici, al fine di ottenere una completa distribuzione spaziale delle varie unità geologiche del bacino. I valori delle caratteristiche fisiche dei terreni

sono riportati di seguito:

- coesione $c = 2500 \text{ N/m}^2$;
- angolo di attrito $\Phi=31^\circ$;
- conducibilità idraulica saturata $k=10^{-6} \text{ m/s}$;
- densità saturata del terreno $\gamma_{sat}=1.6 \text{ g/cm}^3$;
- spessore medio del terreno $s=0.5 \text{ m}$

Nella terza fase è stato applicato il modello combinato di stabilità Shalstab alle zone potenziali sorgenti di sedimentazione e sono state differenziate le aree caratterizzate da elevata instabilità da quelle che presentano una bassa instabilità, nelle ipotesi di un evento pluviometrico uguale a quello avvenuto il 15 Luglio 1972.

Le informazioni morfologiche sulla superficie del bacino e sulle aree di deposizione sono state ottenute costruendo il modello digitale del terreno (Fig. 8) a partire dalle curve di livello della Carta Tecnica Regionale (CTR) alla scala 1:5000.

Dal modello digitale del terreno sono state ricavate due griglie: la prima, avente dimensione della maglia pari a 10 m, ha rappresentato la base topografica per la valutazione del potenziale detritico, la seconda, invece, avente dimensione della maglia pari a 50 m, è servita per la modellazione afflussi-deflussi e per la simulazione bidimensionale della colata detritica.

Per la determinazione della geometria delle sezioni trasversali del torrente è stato costruito un nuovo modello digitale del terreno. Tale modello è stato ricavato da un insieme di punti quotati, distanti fra loro 5 m e ottenuti dalla sovrapposizione stereoscopica delle foto aeree.

La scelta delle dimensioni delle griglie ha rappresentato un compromesso tra la precisione e la velocità di simulazione dei modelli applicati e la qualità dei dati topografici.

Al termine dell'applicazione il 5.8% della superficie del bacino risulta caratterizzato da una elevata instabilità, mentre il restante 94.2% presenta una bassa instabilità (Fig. 9) ed il volume detritico potenzialmente instabile risulta di 452.500 m^3 .

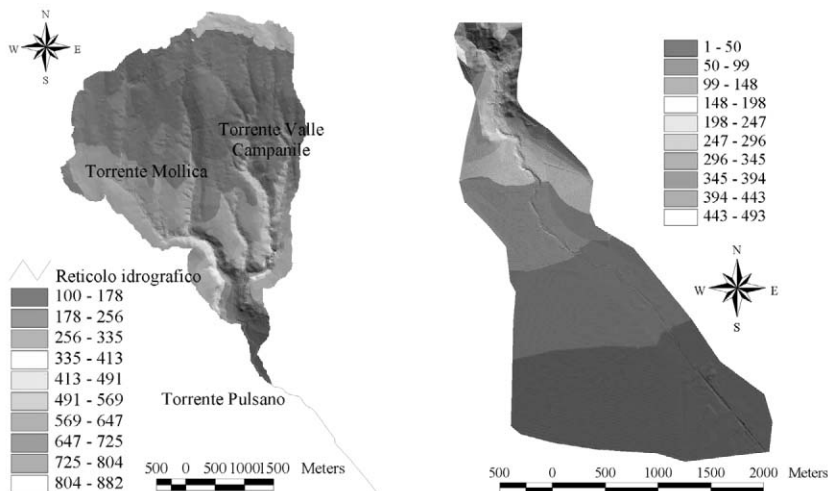


Fig. 8 Modelli digitali del terreno del bacino idrografico e dell'alveo del torrente Pulsano

Fig. 8 Digital terrain models of Pulsano catchment and related main stream

Nella quarta fase sono state effettuate la trasformazione afflussi-deflussi e la simulazione della colata detritica.

L'idrogramma liquido in ingresso nel sistema è stato ricavato attraverso la generazione bidimensionale dei deflussi e l'applicazione del modello d'infiltrazione di Green Ampt, implementato nel software Flo-2D. I parametri idraulici necessari alla simulazione sono stati desunti dalle indagini sperimentali e il suolo, inoltre, è stato considerato in uno stato di parziale saturazione per effetto delle precipitazioni dei giorni precedenti.

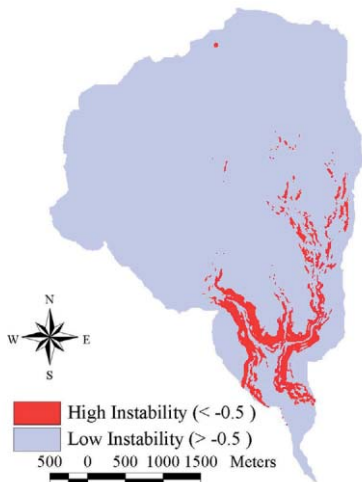


Fig.9 Rappresentazione delle aree instabili
Fig.9 Map of unstable areas

La scabrezza e il numero di Froude sono stati assegnati in base alla pendenza dei versanti e dell'alveo, nonché in funzione della copertura vegetale e delle caratteristiche dei sedimenti presenti. Sulla base della letteratura esistente, pertanto, si è posto il coefficiente di scabrezza n (secondo Manning), sia per l'alveo principale che per le superfici adiacenti, pari a $0.02 \text{ m}^{-1/3}/\text{s}$ e il numero di Froude limite pari a 0.9.

Al termine della trasformazione afflussi-deflussi è stato ottenuto un idrogramma di piena utilizzato, poi, come idrogramma in ingresso nel sistema per la generazione della colata.

I volumi potenzialmente instabili, precedentemente ricavati, sono stati utilizzati per tarare il modello di calcolo Flo-2D e precisamente per definire le concentrazioni volumetriche in ingresso.

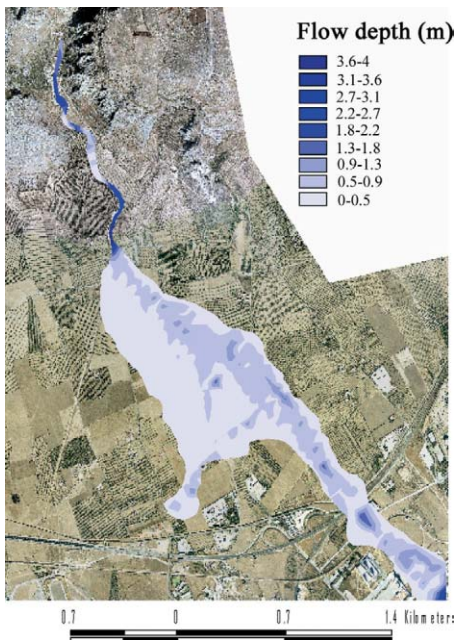


Fig. 10 Rappresentazione delle aree inondate
Fig. 10 Map of flooded areas

per definire le concentrazioni volumetriche in ingresso.

Al fine di stabilire le concentrazioni più idonee a riprodurre il fenomeno, sono state effettuate varie simulazioni, variando tale parametro e confrontando i risultati con quelli ottenuti dalle indagini geomorfologiche. Gli output principali del modello sono i livelli idrometrici del miscuglio e le velocità della corrente per ogni cella della griglia nonché i volumi del miscuglio, in ingresso e in uscita dal sistema e la rappresentazione delle aree inondate. Questi ultimi risultati sono stati visualizzati in ambiente GIS e riportati in figura 10.

CONCLUSIONI

Negli ultimi anni, la conoscenza più approfondita dei processi di formazione delle colate detritiche ha permesso di mettere

a punto modelli di stabilità combinati nonché modelli numerici bidimensionali di generazione dei deflussi, in grado di descrivere la variabilità del fenomeno a partire dalla soglia di innesco sino alla definizione delle aree di deposizione.

L'utilizzo di metodologie di analisi integrata e di accurati sistemi di descrizione delle proprietà fisiche del bacino, quali sono la aereo-fotointerpretazione, le indagini geologiche in sito ed in laboratorio e la modellazione numerica delle superfici topografiche, permette di rappresentare il fenomeno nella sua globalità.

L'applicazione dei modelli SHALSTAB e FLO-2D nel presente lavoro ha messo in evidenza che le aree instabili sono concentrate presso il reticolo idrografico, soprattutto nella zona di valle del bacino, e che le zone di deposito, invece, risultano localizzate principalmente in prossimità dell'alveo e si estendono, a causa dell'andamento morfologico, anche in una vasta area in destra idrografica del torrente.

Tali risultati mostrano notevole corrispondenza con gli esiti dei sondaggi geologici consentendo, quindi, di perfezionare le tecniche di progettazione e realizzazione delle opere di mitigazione del rischio finalizzate al controllo dell'evoluzione del territorio e alla salvaguardia delle risorse presenti a valle.

BIBLIOGRAFIA

- Beven, K. e Kirkby, M. J. (1979). "A physically based, variable contributing area model of basin hydrology" *Hydrol. Sci. Bull.*, 24, pp. 43-69.
- Bissanti, A.A. (1972). "L'alluvione del luglio 1972 a Manfredonia" *Memorie Ist. Geogr. Fac. Econ. Comm. Univ.*, n.5 Bari.
- Curci, D. Gentile, F. e Puglisi, S. (2001). "Sulla difesa idraulica della città di Manfredonia". *Convegno AIIA 2001: Ingegneria Agraria per lo sviluppo dei paesi del mediterraneo*. Vieste
- Guerra, U. (1996). "Analisi degli eventi piovosi estremi potenzialmente catastrofici nell'area di Manfredonia". Tesi di laurea in Geomorfologia applicata- Università di Bari.
- Montgomery, D. R. (1994). "Channel Network Source Representation Using Digital Elevation Models". *Water Resources Research*, vol . 29 n.12 pp.3925-3934.
- Montgomery, D. R. e Dietrich, W. E. (1994). "A physically based model for topographic control on shallow landsliding". *Water Resources Research*, vol . 30 n.4 pp.1153-1171.
- Montgomery, D. R. (1994). "Road surface drainage, channel initiation, and slope instability". *Water Resources Research*, vol . 30 n.6 pp.1925-1932.
- Mouloupoulos, C. (1929). "I torrenti della Grecia Meridionale. Fattori della loro formazione, risultati della loro azione e mezzi per la loro correzione". Salonicco (in greco)
- O'Brien, J.S. e Julien, P.Y. (1988). "Laboratory analysis of debris flow properties". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 114 (8), 877-887
- O'Brien, J.S. (2001). "FLO-2D Users manual".
- O'Loughlin, E.M. (1986). "Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis". *Water Resources Research*, vol .22 n.5 pp.794-804.
- Puglisi, S. (1977). "Carattere degli interventi di sistemazione idraulico-forestale" in Bagnaresi, Puggelli, Puglisi: La sistemazione del suolo nei territori montani. *Edagricole* pp.29-45.
- Takahashi, T. (1991). "Debris flow. IAHR Monograph" *A.A. Balkema*, Rotterdam.
- Tropeano, D. e Turconi, L. (1999). "Valutazione del potenziale detritico in piccoli bacini delle Alpi Occidentali e Centrali". *CNR-IRPI/GNDCI* Pubblicazione n. 2058 Torino