

SILVIO GRISOTTO

L'innesco delle colate detritiche in ambiente alpino: una metodologia d'analisi del fenomeno

Introduzione

Con questa relazione ci si propone di affrontare il problema delle colate detritiche (*debris flow*) in ambiente montano, in particolare il fenomeno del loro innesco, spesso trascurato dalle analisi dirette alla pianificazione e gestione dei bacini montani, non sicuramente per superficialità, ma per la conoscenza ancora limitata che si ha dello stesso, essendo stato studiato approfonditamente solo nell'ultimo decennio anche a seguito di eventi catastrofici che hanno colpito diverse località dell'arco alpino.

Si cerca perciò di individuare una metodologia generale di analisi del fenomeno d'innesco attraverso l'osservazione di un evento di colata verificatosi nel settembre del 1994 nel bacino di Val della Vecchia (TN), indagando i meccanismi e i vari aspetti idrologici, idraulici e meccanici alla base del fenomeno.

Debris flow: definizione, fattori predisponenti e meccanismi d'innesco

Una colata detritica è un rapido flusso verso valle dovuto alla forza di gravità di un impasto melmoso solido-liquido costituito da tre componenti fondamentali: liquida, solida e organica. Quella liquida è rappresentata dall'acqua, derivante general-

mente da precipitazioni piovose e/o scioglimento delle nevi, in quantità sufficiente da distribuire le particelle su tutta la sezione. Quella solida è rappresentata da materiale granulare di diverse dimensioni (dalle argille fino a massi di alcuni metri di diametro). Infine la componente organica, anche se non sempre presente, costituita da alberi e materiale vegetale vario asportato dalla colata durante il suo cammino.

Nel fronte di una colata, generalmente inclinato e di spessore variabile, sono presenti le particelle di maggiori dimensioni, mentre nel corpo e nella coda quelle di dimensioni minori e una maggiore quantità d'acqua.

La distribuzione granulometrica del *debris flow* risulta generalmente eterogenea e più o meno ampia, variabile sia entro una stessa colata a seconda della parte considerata (generalmente più ristretta man mano che ci si allontana dal fronte), sia chiaramente tra colate derivanti da materiale di composizione litologica differente, influenzando il comportamento reologico della colata stessa, conferendole un comportamento macroviscoso o granulo-inerziale a seconda rispettivamente che sia ampia o ristretta. In natura si osservano vari tipi di *debris flow* distinti per composizione e tipo di distribuzione del materiale lungo il profilo (colate di massi, fango, miste).

È largamente riconosciuto come l'innesco di una colata detritica avvenga a seguito di una combinazione critica di fattori idro-

logici, idraulici, geotecnici e morfologici: un pendio o canale sufficientemente inclinato (generalmente 14-25°), una sufficiente quantità di detrito mobilizzabile e una certa quantità cumulata e intensità dell'*input* idrico. In zona alpina, la fonte principale di *input* idrici innescanti il fenomeno è rappresentata da scrosci piovosi di breve durata a forte intensità anche se non sono rare colate innescatesi a seguito di periodi più o meno lunghi di pioggia a bassa intensità. Accanto a queste è da annoverare il rapido scioglimento delle nevi, spesso direttamente collegato alle precipitazioni liquide.

Condizione necessaria affinché una colata possa originarsi è la coesistenza di due processi meccanici elementari: innescamento (primo movimento del materiale) e mobilizzazione (trasformazione di un flusso carico di sedimenti in una colata detritica).

Nel nostro lavoro l'attenzione è stata posta principalmente sui meccanismi di innescamento ossia di primo movimento del materiale, che generalmente possono essere di tre tipi fondamentali: per processi erosivi da impatto e ruscellamento ad alta velocità (*rill* e *gully erosion*), per deflusso superficiale su ammasso detritico saturo e per collasso di un pendio parzialmente saturo interessato da moti di filtrazione.

Da osservare come questa distinzione valga solamente a scopo puramente didattico essendo tali meccanismi strettamente collegati fra loro e in molti casi addirittura coesistenti.

Un caso studio: il debris flow del 14 settembre 1994 in Val della Vecchia (TN)

Dopo aver inquadrato in via generale il fenomeno, si presenta ora lo schema metodologico seguito per analizzare un caso reale, ossia il *debris flow* originatosi il 14 settembre 1994 nel bacino di Val della Vecchia.

Morfometria e idrografia del bacino

Il bacino, affluente di sinistra del Torrente Cismon, si trova nella vallata di Primiero

| | | | |
|-----------------------|-----------------------|-------------|-------------|
| Superficie | km² | 3.2 | 1.85 |
| Pendenza media | % | 84 | 92 |
| Quota min. | m s.l.m. | 1040 | 1600 |
| Quota max. | m s.l.m. | 2801 | 2801 |

Tab. 1 - Caratteristiche morfometriche del bacino di Val della Vecchia e del sottobacino contribuente alla sezione d'innescamento del *debris flow*.

al confine tra le province di Trento e Belluno, ed è caratterizzato da una ridotta estensione (3.2 km²), un'elevata pendenza media e un tempo di corrivazione (calcolato mediante la formula di Giandotti) stimato attorno a 0.5 h. Lo studio ha però interessato solamente una parte del bacino, in particolare il sottobacino contribuente alla sezione d'innescamento della colata, le cui caratteristiche principali sono riassunte nella tabella 1. Si nota subito come si tratti di un sottobacino con una risposta alla precipitazione estremamente rapida, sia per la ridotta superficie e per l'elevata pendenza media, che per la presenza alla testata di un imponente barriera rocciosa costituita dalla parte sud delle Pale di S. Martino. Si osserva inoltre, dall'analisi del profilo longitudinale, come sia caratterizzato dalla presenza di due soglie morfologiche principali, che ne fanno variare bruscamente la pendenza, portando all'alternanza di zone in forte erosione con zone di deposizione e accumulo di detrito, caratteristiche che possono favorire il verificarsi delle condizioni predisponenti un *debris flow*.

Il sottobacino considerato presenta un'idrografia assai complessa, essendo costituito da un canale principale collegato ad un fitto intreccio di canali effimeri solcanti il ghiaione detritico alla base delle pareti rocciose.

Dissesti e aree instabili

L'analisi morfometrica del bacino è stata quindi seguita da una successiva analisi riguardante la valutazione delle zone più instabili e suscettibili a cedimento all'interno dell'area, che fossero cioè in grado di for-

nire materiale mobilizzabile da un eventuale evento piovoso critico. Per far ciò, oltre ad una doverosa ricognizione in campo, è stata eseguita l'applicazione di un modello per la valutazione dei fenomeni gravitativi di versante innescati da precipitazioni brevi e intense (BORGHA *et al.*, 1998). Trattasi di un modello su base *raster* composto da due parti principali: un modello idrologico di instabilità a scala di cella, che descrive il processo di filtrazione in moto uniforme parallelo al pendio, accoppiato ad un modello basato sulla teoria dell'equilibrio limite di un pendio indefinito.

Tale modello determina per ogni singolo elemento del bacino (cella 5 m x 5 m), sulla base di caratteristiche topografiche (area drenata e larghezza della cella), idrologiche (pioggia efficace e trasmissività del materiale) e geotecniche (peso di volume del suolo saturo e angolo d'attrito interno), la

cosiddetta "pioggia critica", ossia l'intensità di pioggia giornaliera che porta alla destabilizzazione della cella in esame:

$$i_{e,cr} = T \operatorname{sen} \theta \frac{b}{A} \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w} \left[1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right]$$

in cui $i_{e,cr}$ è l'intensità di pioggia critica, T la trasmissività del materiale, θ l'angolo d'inclinazione locale, b la larghezza della cella nella direzione del moto di filtrazione, A l'area drenata dalla cella in esame, γ_{sat} il peso di volume del suolo saturo e γ_w il peso di volume dell'acqua, ϕ l'angolo di attrito interno del materiale.

Ciò ha permesso di ottenere un *raster* che individua tre classi di stabilità entro il bacino (fig. 1):

- Roccia
- Incondiz. stabile
- Incon. instabile
- 0-50 mm/giorno
- 50-100 mm/giorno
- 100-200 mm/giorno
- >200 mm/giorno

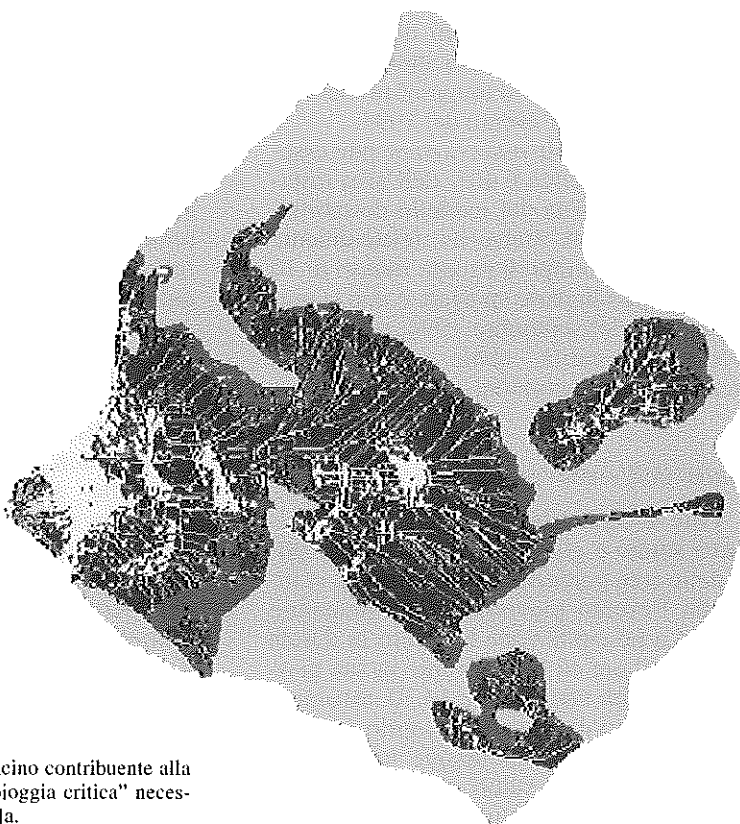


Fig. 1 - Val della Vecchia, Sottobacino contribuente alla sezione d'innescò: *raster* della "pioggia critica" necessaria per l'instabilità a scala di cella.

- 1) **zone incondizionatamente stabili** (ammasso stabile anche se completamente saturo);
- 2) **zone incondizionatamente instabili** (ammasso instabile anche in condizioni asciutte);
- 3) **zone potenzialmente destabilizzabili da piogge comprese tra 0 e 200 mm/giorno** per aumento della superficie freatica, caratterizzate da pendenze comprese tra quelle caratteristiche delle due categorie precedenti.

L'analisi della figura denota come le aree riconosciute instabili e soggette a franamento ricadano con buona frequenza in corrispondenza delle zone caratterizzate da un minor valore di pioggia critica o nella categoria delle aree incondizionatamente instabili, indicando come il fattore topografico (pendenza) sia abbastanza accurato nella discriminazione dei siti maggiormente propensi all'instabilità superficiale.

Una successiva ricognizione in campo ha inoltre confermato come le zone indicate instabili o destabilizzabili dal modello, corrispondessero in maniera attendibile alle zone in cui si è avuto il maggior prelievo di materiale durante l'evento del 1994.

Un'ulteriore utile osservazione può essere inoltre come circa il 40% dell'area instabile venga prevista dal modello destabilizzabile da eventi meteorici relativamente frequenti, con tempi di ritorno minori di 10 anni. Ciò può in parte spiegare come la precipitazione del settembre 1994, pur di non eccezionale entità, abbia innescato un evento di tali proporzioni.

Analisi dell'evento piovoso critico

Viste le caratteristiche fondamentali dell'area studio e già una prima classificazione delle aree potenzialmente instabili, si inquadra l'evento piovoso del 14 settembre 1994. La precipitazione ha avuto la durata di circa 10 ore ed ha raggiunto la sua massima intensità verso le ore 13.30, assumendo i connotati di un vero e proprio nubifragio (36 mm/h). È comunque ipotizzabile una sottostima dei valori quali-quantitativi dell'evento avendo considerato i dati relati-

vi alla stazione pluviometrica di Tonadico, riconosciuta come la più significativa tra quelle in zona, ma situata a qualche chilometro in linea d'aria dalla zona d'innescamento.

È stata inoltre ipotizzata l'importanza delle condizioni di parziale saturazione dell'ammasso detritico al momento dell'evento critico, preceduto da 15 giorni molto piovosi, durante i quali sono caduti circa 140 mm di pioggia, dei quali almeno 90 nei 5 giorni precedenti l'evento.

Una valutazione qualitativa dell'evento piovoso è stata eseguita confrontando i valori di pioggia per diverse durate (1, 3, 6, 12 e 24 ore) con le curve di possibilità pluviometrica ottenute mediante elaborazione statistico probabilistica di Gumbel della serie storica relativa alla stazione di misura più vicina e significativa. Il confronto ha evidenziato come la precipitazione del 14 settembre 1994 abbia avuto caratteristiche di notevole intensità, almeno per la durata di 1 e 3 ore (tempo di ritorno 50 anni), pur non avendo le caratteristiche di eccezionalità che il fenomeno di colata originata potrebbe far supporre.

L'analisi della precipitazione innescante ha comunque indicato una buona relazione tra le caratteristiche dell'evento piovoso e l'innescamento del *debris flow*, tenendo presente anche il ruolo giocato dalle condizioni di umidità antecedente, che in altri bacini non influisce affatto sull'innescamento, ma che in questo caso sembra essere stato rilevante.

Stima delle portate defluenti

L'analisi idrologica quantitativa dell'evento non poteva chiaramente prescindere dalla stima della portata liquida defluente alla sezione d'innescamento originata dall'evento piovoso. Come base per questa analisi è stato utilizzato il modello digitale del terreno (DEM, *Digital Elevation Model*) ottenuto dal vettoriale della Carta Tecnica Regionale 1:10000 della Provincia Autonoma di Trento (PAT) (fig. 2). Viste le ridotte dimensioni del bacino e la necessità di lavorare in dettaglio si è scelta una dimensione della cella del *raster (pixel)* pari a 5 x 5 m.

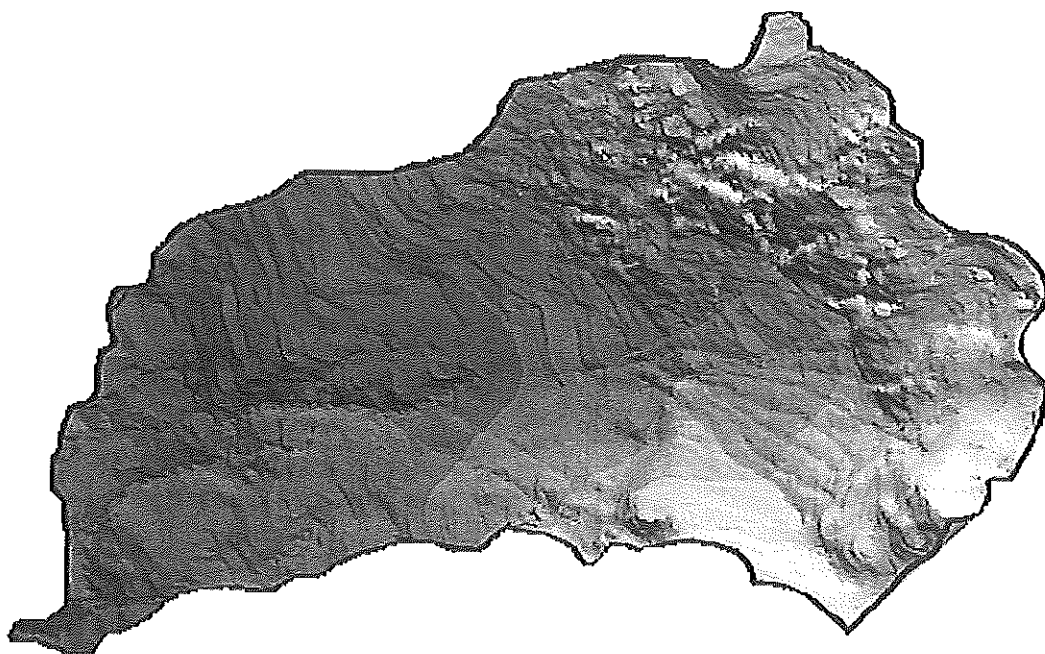


Fig. 2 – Val della Vecchia: modello digitale tridimensionale delle elevazioni (pixel 5 x 5 m) alla base dell'analisi idrologica.

La stima delle portate defluenti è stata eseguita applicando un modello di trasformazione afflussi efficaci-deflussi, allo scopo di fornire una descrizione matematica dei processi idrologici nel bacino interessato dall'evento meteorico intenso. Il software utilizzato in questa fase è Woditem (*Watershed Oriented Digital Terrain Model*), un GIS (*Geographic Information Systems*) di tipo *raster* espressamente concepito per lo studio dei processi idrologici a scala di bacino (CAZORZI, 1996). Il modello idrologico ad esso collegato calcola l'idrogramma superficiale defluente ad una qualsiasi sezione di chiusura applicando il metodo SCS (*Soil Conservation Service*) distribuito per il calcolo della "pioggia efficace", il metodo cinematico per la propagazione del deflusso alla sezione di chiusura considerata e un serbatoio lineare per simulare il deflusso di base.

Gli *input* principali del modello sono rappresentati da un file di precipitazione e da 3 *raster*: CN (*Curve Number*), lunghez-

za del reticolo e lunghezza del versante. A questi vanno aggiunti alcuni parametri obbligatori quali la velocità della corrente nel reticolo e sui versanti (in m/sec).

Il modello è stato applicato alla sezione d'innescò della colata a quota 1600 m s.l.m., ove è stata stimata una portata liquida superficiale al picco variabile tra 6 e 7 m³/s, variabilità dovuta all'incertezza nell'assegnazione di alcuni parametri di *input* utilizzati dal modello, in particolare i valori di CN da assegnare alle singole classi di suolo e i valori della velocità di deflusso sul versante. L'analisi dell'idrogramma di piena derivato denota come il picco liquido si origini circa 30 minuti dopo il picco di pioggia, in corrispondenza del momento riconosciuto come quello in cui si è avuto l'innescò del *debris flow*.

Il modello è stato inoltre applicato alle precipitazioni dei due giorni precedenti per rendersi conto se fosse plausibile ipotizzare un dilavamento delle granulometrie più fini da parte dei deflussi da esse eventualmente

generati, con influenza sulle caratteristiche idrauliche del materiale (BOVIS, DAGG, 1988), e una loro partecipazione nelle condizioni di parziale saturazione dell'ammasso. In particolare, quest'ultima ipotesi vale per l'evento del 13 settembre, avvenuto circa 10 ore prima dell'evento principale con 30 mm di pioggia caduti e portate liquide defluenti di circa $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Caratteristiche della corrente e modelli d'innescò

Per poter affrontare e dare un'interpretazione razionale al fenomeno dell'erosione e del trasporto di massa che ne consegue, non si può fare a meno di condurre preliminarmente un'analisi delle caratteristiche peculiari della corrente idrica generata dal deflusso superficiale stimato dal modello afflussi-deflussi alla sezione d'innescò.

Al riguardo è stato utilizzato un modulo basato sull'equazione di Gauckler-Strickler, che calcola la profondità della corrente, supposta a regime uniforme entro il canale, note la portata defluente, le caratteristiche geometriche della sezione, la pendenza del fondo e la scabrezza del canale.

Per tener conto della variabilità spaziale del coefficiente di scabrezza (K_s) sia in alveo che sulle sponde e del fatto che in un alveo naturale il letto non è regolare e i sedimenti non sono uniformemente distribuiti, si sono scelti per il calcolo diversi valori di K_s variabili tra 9 e 17.

Il valore di portata liquida utilizzato nella formula è stato ottenuto sottraendo ai valori dell'idrogramma di piena precedentemente descritto la relativa portata di filtrazione alla sezione d'innescò valutata secondo l'equazione di Stephenson del 1979, impiegando dei valori del diametro caratteristico (d_{50}) derivati dalla curva granulometrica desunta da rilievi in campagna:

$$Q_f = \eta \cdot \left(\tan \theta \cdot g \cdot \frac{d}{K^1} \right)^{0.5}$$

in cui η è la porosità del materiale (0.4-0.45), θ l'angolo d'inclinazione del pendio,

g l'accelerazione di gravità (9.81 m/sec^2), d il diametro caratteristico del materiale (0.25 m) e K un coefficiente che per materiale grossolano vale circa 4.

Questa "depurazione" della portata al picco è stata eseguita sempre nell'ipotesi che gli eventi dei giorni precedenti avessero comportato una parziale rimozione delle granulometrie più fini dall'ammasso detritico aumentandone la conducibilità idraulica e la conseguente capacità di filtrazione.

Da questa elaborazione si sono ottenuti dei valori di profondità della corrente alla sezione d'innescò variabili tra 0.27 e 0.4 m.

Partendo quindi dal presupposto che la colata si sia innescata per formazione sopra l'ammasso detritico ormai saturo di un deflusso superficiale di una certa entità, si è proseguita l'analisi applicando alcuni modelli per la valutazione della profondità della corrente in grado di destabilizzare un ammasso detritico saturo e la valutazione della profondità dello strato mobilitato.

Il modello di Takahashi (1978, 1991)

Trattasi di un modello basato sull'equilibrio delle forze agenti su uno strato detritico di spessore y_f . Le forze esterne, per unità di lunghezza, parallele alla superficie del letto e agenti sullo strato sono rappresentate dalla sforzo tangenziale t e dallo sforzo resistente τ_f (fig. 3):

$$\tau = \left[v^* (\rho_s - \rho) y_f + \rho_f (y_f + h) \right] g \sin \theta$$

$$\tau_f = v^* (\rho_s - \rho) g y_f \cos \theta \tan \phi$$

dove v^* è la concentrazione volumetrica del materiale a riposo, ρ_s la densità del materiale, ρ la densità dell'acqua, h la profondità della corrente in superficie, y_f lo spessore dello strato instabile, g l'accelerazione di gravità, θ l'inclinazione del pendio e ϕ l'angolo di attrito interno del materiale.

Ponendo $\tau = \tau_f$ si ottiene una relazione che fornisce l'angolo limite q per cui si ha la destabilizzazione dello strato y_f :

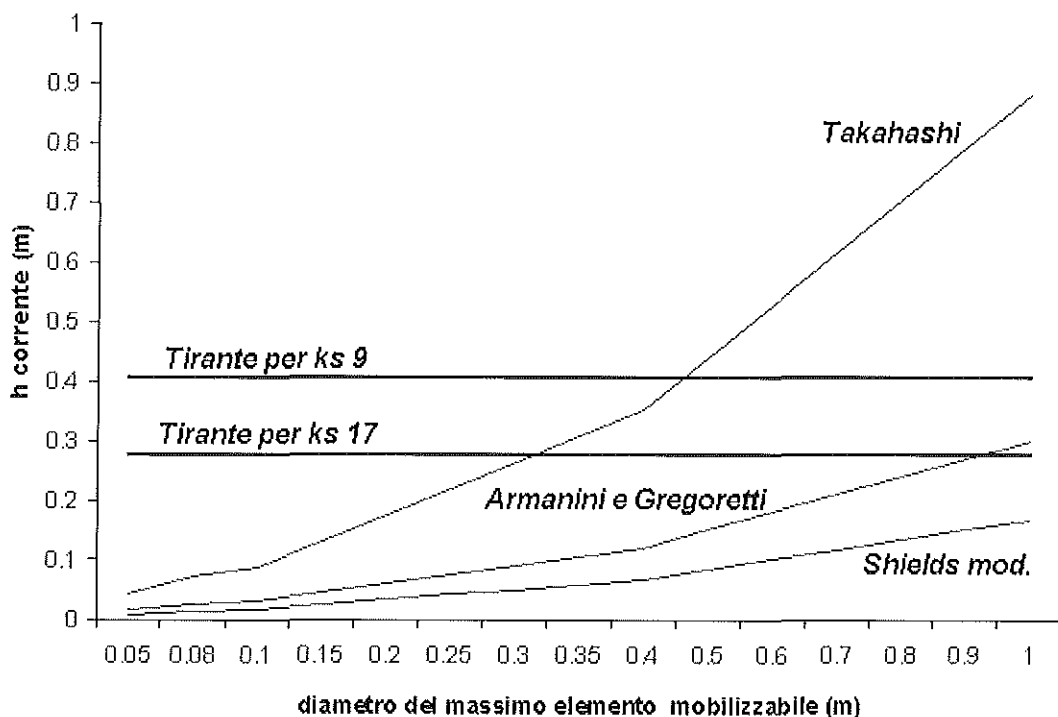


Fig. 3 - Profondità di moto incipiente delle particelle superficiali per la sezione d'innescio del *debris flow* stimate con i modelli di Takahashi, Armanini - Gregoretti e Shields modificato.

$$\tan \theta \geq \frac{v^* (\rho_s - \rho)}{v^* (\rho_s - \rho) + \rho \left(1 + \frac{h}{y_f} \right)}$$

Confrontando questa equazione con dati ottenuti su *debris flow* in campo, Takahashi ha determinato delle condizioni additive affinché si sviluppi una colata, ossia che h/d (con $n \geq 1$ e d diametro caratteristico del materiale costituente l'ammasso) e y_f/h 10.7.

L'incipiente movimento di Shields (1936) modificato da Gregoretti (2000a)

Un limite inferiore per l'inizio dei fenomeni di trasporto solido che può essere preso come termine di confronto è quello dovuto a Shields (1936), che fornisce la condizione di moto incipiente in un letto piano

di sedimenti non coesivi sulla base della dipendenza tra lo sforzo tangenziale e il numero di Reynolds (Re). Tale relazione, però, risulta valida solo per letti virtualmente impermeabili.

Su letto impermeabile lo sforzo tangenziale critico deve essere modificato per tener conto delle forze di filtrazione agenti sulla superficie inferiore dei grani superficiali, dell'effetto destabilizzante dovuto alla gravità lungo la direzione del flusso e delle condizioni di bassa sommergenza.

Viene così proposta la relazione per la stima del tirante idrico che conduce all'incipiente movimento dei grani (GREGORETTI, 2000a):

$$h = 0.06C \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) d \frac{K}{\sin \theta} - 0.5d(1 - v^*)$$

in cui C è il coefficiente di bassa sommergenza (ARMANINI, 2000), K è il coefficiente

di correzione per l'effetto della gravità (CHRISTENSEN, 1995), d il diametro del grano mobilitato, θ l'inclinazione del letto, v^* la concentrazione volumetrica del materiale, γ e γ' le densità del materiale e dell'acqua.

Il modello di Armanini e Gregoretti (2000)

In questo nuovo approccio al problema dell'instabilità di un ammasso granulare saturo dovuta a deflusso superficiale, gli autori tengono conto del diverso e irregolare posizionamento dei grani alla superficie del letto detritico, che provoca una loro differente esposizione alla corrente idrica e quindi un diverso grado di mobilità. Introducono perciò, nel bilancio delle forze agenti sul singolo grano, la variabile "e" definita grado di esposizione relativa del sedimento alla corrente.

Dall'osservazione della figura 3, la condizione di moto incipiente in condizioni di corrente uniforme è data dalla condizione:

$$\tan \phi = \frac{F_D + F_\tau + W_t + S_c}{W_n - B - F_L}$$

dove F_D rappresenta la forza di drag (forza di trascinamento), F_τ lo sforzo dell'acqua agente sulla parte non esposta, W_t la componente del peso nella direzione del moto, S_c la forza di filtrazione, W_n la componente del peso lungo la normale al moto, B la forza di galleggiamento e F_L la forza di lift (forza di sollevamento, o di spinta, verso l'alto).

Attraverso una serie laboriosa di passaggi matematici, che si tralasciano per motivi di chiarezza e semplicità, e introducendo il parametro e , si arriva alla definizione della condizione di moto incipiente come funzione della pendenza del letto θ :

$$\tan \phi = \frac{h}{\Delta d} \frac{c_1}{c_2} (f_1(C_D + C_L \tan \phi) f_d^2 + f_3) + \frac{\rho_s}{\rho} + \frac{0.5(1-f_2)}{\Delta}$$

in cui f_1, f_2 e f_3 sono funzioni di forma che esprimono rispettivamente la superficie esposta, il volume esposto e la superficie non direttamente esposta alla corrente di una particella supposta sferica, c_1 e c_2 dei fattori di forma, C_D e C_L i coefficienti di drag e lift, f_d è una funzione dipendente da e , h/d e m (costante di Von Kàrmàn), e Δ dato dal rapporto $(\rho_s - \rho)/\rho$.

Il modello è stato confrontato con dati sperimentali di inizio di debris flow in canaletta inclinata su materiale irregolare di diametro variabile e angolo di attrito interno f compreso tra 47 e 51° (GREGORETTI, 2000a); per inclinazioni sull'orizzontale comprese tra 12 e 20°, impiegando un C_D di 0.42 e trascurando C_L per valori di $e > 0.2$ (СЕРПИЛ, 1961), si è ottenuta concordanza tra i dati teorici e sperimentali per valori di e compresi tra 0.3 e 0.6.

Dinamica del fenomeno d'innescò

L'applicazione dei tre modelli appena descritti alla sezione d'innescò della colata del 1994 ha fornito dei risultati abbastanza diversi ma sicuramente significativi ed esplicativi di quanto ipotizzato (fig. 3).

Il calcolo delle altezze di deflusso per l'inizio del trasporto solido e l'innescò della colata è stato eseguito per grani di diametro variabile tra 0.05 e 1 m, utilizzando un valore della concentrazione solida v^* pari a 0.6, un valore medio dell'angolo di attrito interno del materiale ϕ di 40° e il valore reale della pendenza alla sezione d'innescò θ pari a 17.7°. Per il modello proposto da Armanini e Gregoretti (2000) si è utilizzato un rapporto h/d costante pari a 0.3 ottenuto assumendo un grado di esposizione alla corrente e di 0.4.

L'analisi dei risultati ha evidenziato l'inapplicabilità al caso studiato del modello di Shields modificato da Gregoretti, in quanto i valori di h da esso forniti risultano essere sicuramente troppo esigui per mobilitare il materiale di maggiori dimensioni coinvolto nell'evento.

I modelli di Takahashi e di Armanini - Gregoretti sembrano invece fornire dei valori sicuramente più plausibili e sufficienti

a spiegare l'evento, seppur abbastanza diversi l'uno dall'altro. Tali differenze sono probabilmente imputabili al fatto che il primo è stato ottenuto mediante un bilancio di forze in regime statico, mentre il secondo mediante un bilancio di forze in regime idrodinamico.

Una critica che può essere mossa al modello di Takahashi è che, considerando una superficie di riferimento dello strato mobilitato come piana, compie un errore, non tenendo conto dell'irregolarità della superficie del letto.

È sembrato perciò più ragionevole correggere l'equazione considerando una superficie di riferimento pari a $0.8d$, riconosciuta per grani superficiali come quella che eguaglia il volume dei vuoti superiore a quello inferiore. In questo modo si sono ottenuti dei valori del diametro mobilitato più vicini a quelli calcolati con l'equazione di Armanini e Gregoretti.

L'inadeguatezza del modello di Takahashi a descrivere l'innescò, almeno nelle sue fasi iniziali, è stata inoltre confermata da esperienze in laboratorio condotte da Gregoretti (2000a), che hanno dimostrato la tendenza dell'equazione a sovrastimare il valore della profondità per possibile inizio del *debris flow* non tenendo debitamente conto della natura della superficie del letto.

Sembra perciò che il fenomeno possa essere inquadrato meglio attraverso il modello di Armanini e Gregoretti. Al riguardo, comunque, si deve notare come l'utilizzo di un rapporto h/d costante pari a 0.3 risulti una semplificazione; in realtà, infatti, tale rapporto tende gradualmente a diminuire all'aumentare del grado di esposizione del grano alla corrente.

Il letto detritico, infatti, è formato da elementi di varia granulometria: quando la profondità della corrente è limitata a pochi centimetri solo le granulometrie più fini vengono allontanate scoprendo via via i clasti di maggiori dimensioni.

L'erosione continua in questo modo finché il grado di esposizione degli elementi più grossolani non supera 0.5. A questo punto anche i massi più grossi vengono

mobilitati trascinando a valle anche i diametri minori rimasti ancora sul posto, generando la colata detritica.

Criteri di soglia sperimentali per l'innescò di un *debris flow*

Si illustrano brevemente due criteri di soglia dei deflussi superficiali relativi rispettivamente all'inizio e allo sviluppo di una colata detritica. Entrambi sono stati ottenuti da prove d'innescò in laboratorio condotte in canaletta inclinata rispettivamente da Gregoretti (2000) e da Tognacca e Bezzola (2000). Gli autori, partendo dai dati sperimentali, esprimono la condizione di incipiente movimento del materiale tramite la portata unitaria critica secondo le seguenti relazioni:

$$qc = \frac{0.21}{\tan \theta^{1.27}} \quad (\text{Gregoretti})$$

$$qc = \frac{1}{\tan \theta^{1.17}} \quad (\text{Tognacca e Bezzola})$$

dove qc è la portata critica adimensionale e θ l'angolo di inclinazione del fondo.

Le due curve limite sperimentali sono state confrontate con valori di portata unitaria reali innescanti *debris flow* in Giappone, Svizzera e con il dato di Val della Vecchia. I risultati evidenziano come l'equazione di Gregoretti (2000) tenda a sottostimare la portata unitaria d'innescò, mentre quella di Tognacca e Bezzola (2000) tenda almeno in alcuni casi a sovrastimarla.

Le due curve possono perciò essere utilizzate ragionevolmente rispettivamente come soglia inferiore e superiore per l'innescò di *debris flow*.

Conclusioni

Risulta doveroso ricordare come tutto il lavoro sia incentrato in maniera quasi

esclusiva su uno dei vari meccanismi d'innescamento possibili, ossia l'innescamento per destabilizzazione di un ammasso detritico completamente saturo interessato da un deflusso superficiale di una certa entità, ipotizzato come il più probabile per l'evento considerato. Non si esclude, comunque, la possibilità che tale meccanismo sia stato combinato ad una destabilizzazione conseguente ad un abbondante deflusso sottosuperficiale che ha saturato completamente l'accumulo detritico ancor prima dell'arrivo alla sezione d'innescamento dell'onda di piena a picco.

Questo secondo *meccanismo* non può essere trascurato perché è ben noto, dalla letteratura (TAKAHASHI, 1991) e da prove sperimentali condotte in laboratorio, che a pendenze inferiori ai 20° com'era la sezione studiata, l'instabilità del pendio richiede, come requisito fondamentale, la completa saturazione del materiale, cioè che i vuoti siano riempiti d'acqua e l'andamento delle pressioni idriche sia di tipo idrostatico.

La metodologia proposta, quindi, non ha assolutamente la presunzione di essere completa ed esaustiva in tutte le sue parti e applicabile in tutte le situazioni ambientali, ma utilizzabile come schema minimo di partenza per un'analisi del fenomeno sufficientemente dettagliata, almeno ove sia ipotizzabile un meccanismo d'innescamento del tipo accennato.

Ci si rende anche conto, comunque, come una metodologia del tipo proposto in questa relazione possa risultare assai laboriosa e dispendiosa in termini di tempo per essere applicata a livello prettamente professionale; nonostante ciò ci si sente in dovere di sostenerla almeno come integrazione analitica alla normale analisi del fenomeno basata quasi esclusivamente su evidenze raccolte direttamente in campo, sicuramente molto valide ma spesso non esenti da errori di tipo soggettivo.

dott. Silvio Grisotto

Dipartimento TESAF – Università di Padova
Via Romea, Agripolis, Legnaro (PD)
e-mail: sgrisot@libero.it

BIBLIOGRAFIA CITATA E DI RIFERIMENTO

- ARMANINI A., 2000 - *Principi di idraulica fluviale*. Bios Editore.
- ARMANINI A., GREGORETTI C., 2000 - *The triggering of debris flow: a comparison between theoretical mechanics and experimental results*. II International Conference, Taiwan, 16-18 August.
- ARMANINI A., MICHIEU M., 1997 - *Recent developments on debris flows*. Lecture Notes in Earth Sciences, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1-46.
- BAGNOLD R. A., 1955 - *Some flume experiments on large grains but little denser than the transporting fluid*. Proc. Inst. Civil Eng., Pt. 3, Paper n.6041: 174-205.
- BLJENBERG H. M., 1998 - *Rolling Stones? Triggering and frequency of hillslope debris flow in the Bachelard Valley, southern French Alps*. Tesi di dottorato, Buren, 25 Agosto 1998, 29-114.
- BORGA M., DALLA FONTANA G., DA ROS D., MARCHI L., 1998 - *Shallow landslide hazard assessment using a physically based model and digital elevation data*. Environmental Geology, 35 (2-3), August 1998: 81-88.
- BOVIS M. J., DAGG B. R., 1988 - *A model for debris accumulation and mobilization in steep mountain streams*. Hydrological Sciences Journal, 33, 6, 12/1988: 589-604.
- CAORZI F., 1996 - *Watershed Digital Terrain Model. Manuale per l'utente, versione win 95*. Dipartimento TESAF - Laboratorio IDEA, Agripolis, Università di Padova.
- CHEPIL W. S., 1961 - *The use of spheres to measure lift and drag on wind-eroded soil grains*. Soil Science Society Proceedings, vol. 25, n. 3: 343-345.
- CHRISTENSEN B. A., 1995 - *Incipient sediment motion on non-horizontal slopes*. Discussion on Journal of Hydraulics Research, vol. 32, n. 5: 649-660.
- CNR-IRPI (AAVV), 1996 - *Studi sui debris flow*. Supplemento a: GEAM - Geingegneria Ambientale e Mineraria, Torino, Anno XXXIII, 2-3: 33-43.
- GREGORETTI C., 2000a - *The initiation of debris flow at high slopes: experimental results*. Journal of Hydraulic Research, n.38, Vol.2, 6-15 pp.
- GREGORETTI C., 2000b - *Interpraevent 2000*, Villach, 26-30 Giugno.
- GREGORETTI C., in stampa - *Experimental evidence from the triggering of debris flow along a ganular slope*. Physic and Chemistry on Earth: 1-4.
- PASUTO A., SILVANO S., 1998 - *Rainfall as a trigger of shallow mass movements. A case study in the Dolomites, Italy*. Environmental Geology, 35 (2-3): 184-189.
- RICKENMANN D., ZIMMERMANN M., 1993 - *The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis*. Geomorphology, 8: 175-189.

STEPHENSON G. R., 1979 - *Rockfill in Hydraulic Engineering*. Elsevier, Amsterdam.

SHIELDS A., 1936 - *Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und turbulenzforschung auf die geschlebebewegung*. Mitteilungen Preuss. Versuchsanst. Wasser. Erd. Schiffbau, n. 26, Berlin.

TAKAHASHI T., 1978 - *Meccanical characteristics of debris flow*. Journal of Hydraulic Division ASCE, 104: 1153-1169.

TAKAHASHI T., 1981 - *Debris flow*. In: Van Dyke M., Wehauer J. V., Lumley J. L., *Annual review of fluid mechanics*. Palo Alto, California, Annual Reviews, 13: 55-77.

TAKAHASHI T., 1991 - *Debris flow*. IAHR Monograph, A. A. Balkema, Rotterdam, 63-75.

TOGNACCA C., BEZZOLA G. R., 2000 - *Debris flow initiation by channel-bed failure*. First International Conference Debris Flow Hazard Mitigation, 44-53.

Riassunto

Il presente lavoro propone un'approfondita analisi del fenomeno delle colate detritiche in ambiente alpino, ponendo particolare attenzione all'innesco per destabilizzazione di un ammasso detritico saturo interessato da deflusso superficiale. Viene proposta altresì una metodologia d'analisi del fenomeno stesso, incentrata su evidenze geomorfologiche, geotecniche ed idrologiche e sull'applicabilità di alcuni modelli di movimentazione del materiale proposti in letteratura.

L'applicazione, facilitata dall'utilizzo di un sistema GIS tipo *raster*, ha permesso di identificare la validità della linea metodologica seguita per l'analisi del fenomeno evidenziandone la sua possibile applicabilità per scopi progettuali e pianificatori a livello di bacino idrografico.

Summary

Debris flow triggering in alpine zones: a working methodology

The present work describes a detailed analysis of the triggering dynamics of debris flows in alpine zones, with particular regard to channel bed failures due to saturation and surface runoff. Furthermore, a methodology based on geomorphological, geotechnical and hydrological factors is also discussed along with the applicability of some predictive models found in literature.

The implementation of such a methodology, by using a specific raster GIS software, allowed to test its reliability, highlighting its potential use for planning and designing purposes in watershed management.