

DEBRIS FLOW NEL BACINO DI VAL DELLA VECCHIA: ANALISI DEL FENOMENO E DEGLI INTERVENTI DI SISTEMAZIONE IDRAULICO-FORESTALE

DEBRIS FLOW IN THE VAL DELLA VECCHIA CATCHMENT: PROCESS ANALYSIS AND HYDRAULIC-FOREST CONTROMEASURES

Silvio Grisotto¹, Stefano Cappelletti²

RIASSUNTO

Nel presente lavoro viene proposta un'approfondita analisi della colata detritica originatasi sul rio Val della Vecchia (Valle di Primiero- Trentino – Italia) il 14 settembre 1994, ponendo particolare attenzione sui possibili scenari d'innesco, sulla stima del sedimentogramma e sulla valutazione dei volumi totali mobilizzati dall'evento.

Vengono applicate alcune tra le metodologie di analisi più diffuse e conosciute nel campo della tecnica confrontandone i risultati ed applicate al caso in studio.

Il lavoro ha lo scopo di proporre una metodologia generale d'analisi dei fenomeni di debris flow, incentrata su evidenze geo-morfologiche, granulometriche ed idrologiche testando l'applicabilità a casi reali di alcuni modelli proposti in letteratura riguardanti l'instabilità superficiale, la movimentazione del sedimento e la stima dei volumi mobilitati.

Il lavoro si conclude con la descrizione del progetto di sistemazione, tuttora in corso di esecuzione a cura del Servizio Sistemazione Montana della Provincia di Trento, mediante la realizzazione combinata di opere di tipo classico in calcestruzzo armato con opere in massi cementati e legati con funi di acciaio a basso impatto paesaggistico.

Parole chiave: colata detritica, innesco, metodologia di analisi, interventi di sistemazione

ABSTRACT

In the present work a detailed analysis of the debris flow triggered on September 14th 1994 in the Val della Vecchia catchment (Primiero Valley – Trentino- Italy) is proposed, with particular regard on the potential triggering and mobilization factors and the solid volume estimation.

¹ Libero professionista, Via Falzeni 15, Tonadico, Trento - Italia (Tel.: +39-0439-64162; Mobile: +39-349-7886772; e-mail: studiogrs@libero.it)

² Funzionario, Provincia Autonoma di Trento - Servizio Sistemazione Montana, Via G.B. Trener 3, 38100 Trento – Italia (Tel.: +39-0461-495829; Fax: +39-0461-495772; e-mail: stefano.cappelletti@provincia.tn.it)

Some of the mostly diffused hydrologic and sedimentologic methodologies are used to the case study, comparing their results and proposing a general methodology to analyze the debris flow phenomena and applicable to other real events, similar to the proposed one.

The work ends with the detailed description of the interventions measures plan, actually in progress, carried out by the Torrent Control Office of the Autonomous Province of Trento.

The project consists in realization of classical concrete structures (consolidation dams) combined with low environmental impact structures.

Key words: Debris flow, triggering, analysis methodology, contromeasures

INTRODUZIONE

Con questo contributo ci si propone di analizzare in chiave applicativa il problema delle colate detritiche in ambiente dolomitico e con specifico riferimento all'evento verificatosi nel bacino di Val della Vecchia (Trentino – Italia); si affronta in particolare il fenomeno dell'innescò, che sempre più spesso entra a far parte delle analisi dirette alla pianificazione e gestione del territorio.

Si illustra, inoltre, il progetto di sistemazione idraulico-forestale eseguito a seguito dell'evento succitato, mediante l'utilizzo combinato di strutture classiche ad altre a basso impatto ambientale.

AREA STUDIO

Inquadramento geografico, morfometrico e geologico

Il rio Val della Vecchia è l'undicesimo affluente di sinistra del Torrente Cison, che scorre in direzione N-S lungo la verde vallata del Primiero (Trentino – Italia), al confine con la vicina Regione Veneto. Il bacino è caratterizzato da una ridotta estensione (3.2 km²), un'elevata pendenza media e tempi di risposta alla precipitazione assai brevi (Fig.1 e 2).

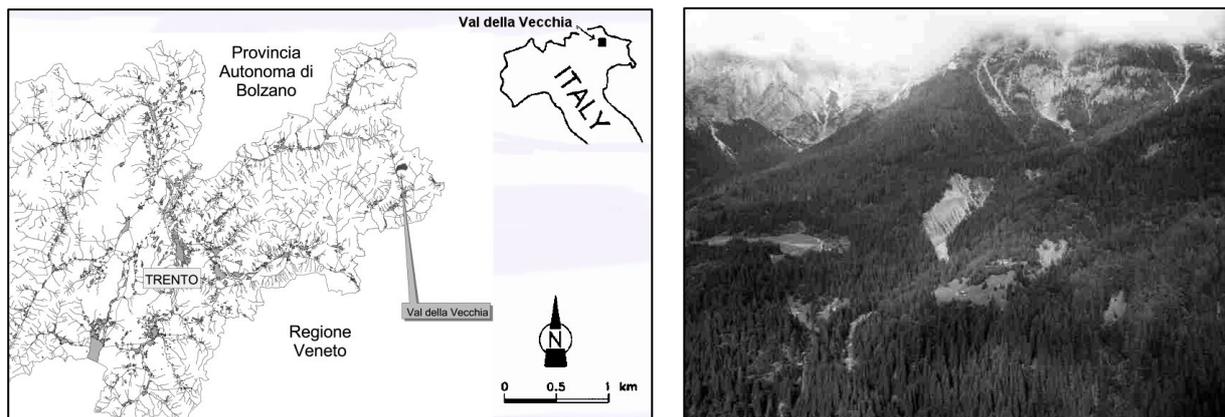


Fig.1 e 2: Inquadramento geografico del bacino e vista frontale della zona d'innescò del debris flow
Fig. 1 and 2: Geographical position of the basin and frontal view of the debris flow triggering zone.

La rapida risposta alla precipitazione è favorita dalla presenza alla testata di un imponente barriera rocciosa dolomitica costituita dalla parte sud delle Pale di S.Martino. Il suo profilo longitudinale risulta caratterizzato dalla presenza di alcune 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 di fenomeni di burronamento e *debris flow*.

L'idrografia si presenta assai complessa, essendo costituita da un canale principale collegato ad un fitto intreccio di canali effimeri solcanti il ghiaione detritico alla base delle pareti rocciose. La rete drenante del bacino è, comunque, continuamente in evoluzione, in particolare nella parte alta del bacino, caratterizzata dalla presenza di canali effimeri soggetti a variazioni di percorso ad ogni evento piovoso di una certa entità.

Dal punto di vista geologico il bacino a monte della zona d'innescò è caratterizzato dai vasti affioramenti dolomitici triassici delle Pale di S.Martino con alla base imponenti depositi detritici più o meno grossolani frammisti a morena, caratterizzati dalla presenza di granulometrie abbastanza eterogenee. Trattasi, nel complesso, di materiali ad altissima erodibilità e la cui permeabilità, nel complesso media, è funzione della percentuale di matrice fine sabbioso-limosa presente. Nella zona d'innescò del debris flow affiora la formazione del Werfen, mediamente erodibile ed a bassa permeabilità, la cui presenza è stata identificata come una delle cause principali d'innescò del fenomeno, avendo favorito la risalita della falda e, in particolare, avendo agito da superficie di scivolamento e di rottura del materiale detritico sciolto sovrastante.

DESCRIZIONE ED ANALISI DEL FENOMENO

Descrizione generale

Il 14 settembre 1994 una violenta perturbazione ha investito la Provincia di Trento, colpendo in particolare la zona circostante il gruppo delle Pale di S.Martino. La precipitazione è iniziata nelle prime ore del mattino (7.00-7.30) raggiungendo la sua massima intensità all'incirca tra le 13 e le 14, periodo durante il quale ha assunto i connotati di un vero e proprio nubifragio.

Fra i vari dissesti verificatisi, il maggiore è stato la colata detritica nel rio Val della Vecchia, affluente di sinistra del torrente Cismon. Il dissesto si è innescato a valle del Rifugio Velo della Madonna provocando dapprima la formazione di una serie di piccole colate di ghiaia dal catino detritico più a monte, depositatesi in corrispondenza della soglia morfologica posta a quota 1600 m slm. Da qui il deflusso superficiale via via crescente proveniente da diversi collettori, combinato alla saturazione dal basso dell'ammasso detritico, ha innescato la colata detritica. Il debris flow, scendendo lungo la valle, si è alimentato ed arricchito di altro materiale, sia fine che grossolano, distruggendo alcune vecchie briglie, approfondendo il letto di 2-3 m e destabilizzando alla base il versante destro (Fig 3 e 4).



Fig.3 e 4: Zona di innescò e propagazione della colata. Ben evidente è l'erosione dell'alveo e delle sponde.
Fig. 3 and 4: Triggering and propagation zone with evident erosion of the channel and the banks.

Tra le quote 1100 e 1050 m slm l'alveo restringe la sua sezione e piega bruscamente verso destra; ciò ha provocato una superelevazione in curva della colata che, solo per poche decine di cm, non è tracimata (cosa che avrebbe fatto depositare il materiale sulla sottostante Centrale Idroelettrica). Nell'ultimo tratto il debris flow, il cui fronte, dal limite di sopraelevazione lasciato in curva, doveva presentare un'altezza di circa 4-5 m, ha danneggiato il plinto della condotta forzata che attraversa l'alveo senza però lesionare la condotta stessa. Una volta raggiunto l'alveo del torrente Cismon, ha danneggiato l'opera di derivazione ENEL, depositando sullo sghiaiatore tre massi di volume superiore a 100 m³, ed ha percorso l'alveo del Cismon distruggendo un ponte in calcestruzzo armato di accesso alla centrale idroelettrica.

Analisi meteorologica

La precipitazione ha avuto la durata di circa 11 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). E' comunque ipotizzabile una sottostima quali-quantitativa dell'evento, avendo considerato i dati relativi alla stazione pluviometrica di Tonadico, riconosciuta come la più significativa tra quelle in zona, ma sita a qualche chilometro in linea d'aria dalla zona d'innescò. Si ipotizza, infatti che, almeno per intervalli inferiori all'ora, l'intensità di pioggia sul bacino possa essere stata superiore a quella misurata dal pluviometro. La quantità cumulata di pioggia è stata pari a 94 mm (Fig.5)

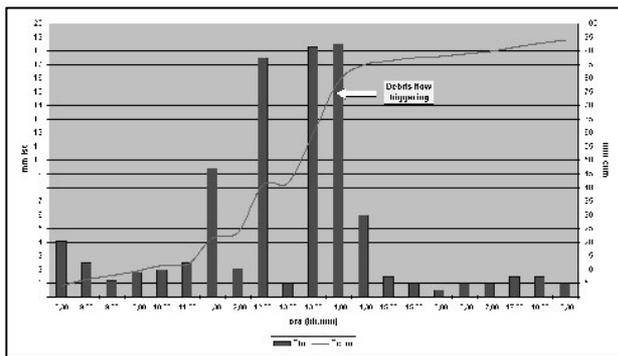


Fig.5: Precipitazione del 14-09-94: pioggia/30 min e pioggia cumulata
 Fig. 5: Cumulative and 30 min/rainfall of 14-09-94.

E' 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. L'analisi della precipitazione innescante ha comunque indicato una buona relazione tra le caratteristiche di intensità e durata dell'evento piovoso e l'innescò del debris flow, tenendo presente anche del ruolo giocato dalle condizioni di umidità antecedente, che in altri bacini non condizionano affatto l'innescò, ma che in questo caso sembrano aver giocato un ruolo importante.

Analisi granulometrica della sezione d'innescò

Allo scopo di caratterizzare il materiale detritico presente nella zona d'innescò sono state condotte delle analisi granulometriche, distinte tra la matrice più fine e il materiale più grossolano superficiale. La prima è stata campionata raccogliendone circa 2 Kg ed

analizzandola con un metodo ponderale dopo essiccazione e setacciatura. Il materiale superficiale più grossolano è stato invece campionato mediante un metodo numerale tipo *grid by number*, misurando il diametro medio dei ciottoli che ricadevano sui nodi di una maglia a celle quadrate di 1 x 1 m e su una superficie totale di 100 m². In più sono stati aggiunti i diametri di maggiori dimensioni rilevati nell'area di campionamento.

L'analisi ha evidenziato come il deposito detritico della zona d'innesco sia caratterizzato da uno strato superficiale grossolano e sciolto con d_m 115 mm.

Più in profondità, il detrito si trova invece immerso in un abbondante matrice fine, classificabile come una sabbia limosa con ghiaia, i cui parametri geotecnici ed idrologici principali sono risultati i seguenti: $\phi = 40^\circ$, $\gamma_{sat} = 2650 \text{ kg/m}^3$, $k_{sat} = 2.85 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$.

Stima delle portate liquide defluenti

La stima delle portate defluenti è stata eseguita applicando un modello di trasformazione afflussi efficaci-deflussi, basato sull'applicazione del metodo SCS (*Soil Conservation Service*).

Il modello è stato applicato al sottobacino contribuente alla sezione d'innesco della colata (1.4 Km²), ove è stata stimata una portata liquida superficiale al picco variabile tra 6 e 7 m³/s (4.5 – 5 m³s⁻¹km⁻²), 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.

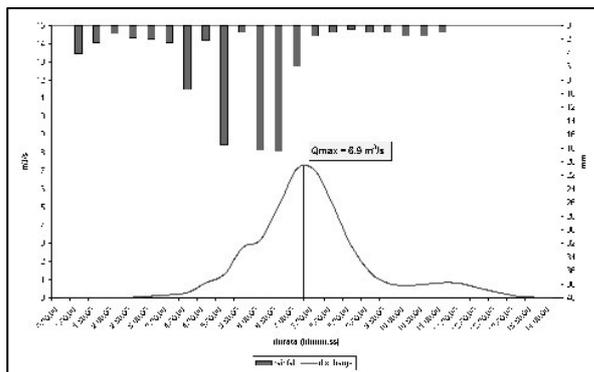


Fig.6: Idrogramma di piena simulato alla sezione d'innesco del debris flow.

Fig.6: Simulate flow hydrograph at the debris flow triggering section.

L'analisi dell'idrogramma di piena derivato (Fig.6) denota come il picco liquido si origini circa 30 minuti dopo il picco di pioggia, in corrispondenza della massima pendenza della curva di pioggia cumulata e del momento riconosciuto come quello in cui si è avuto l'innesco del *debris flow*.

Meccanica del fenomeno d'innesco

Dalle valutazioni eseguite in campo sembra chiaro come l'innesco del debris flow si sia originato per un meccanismo di tipo erosivo dell'ammasso detritico, completamente saturato dalla risalita della falda freatica favorita dalla non elevatissima pendenza della sezione (18°) e dalla presenza di un substrato roccioso sottostante a bassissima permeabilità e non drenante (Formazione di Werfen).

L'ipotesi più plausibile è che l'accumulo di materiale ormai completamente saturo sia stato improvvisamente mobilizzato a causa dell'arrivo di un forte deflusso superficiale corrispondente alla fase più intensa dell'idrogramma liquido.

Partendo quindi dal presupposto che la colata si sia innescata con un meccanismo simile a quello sopra descritto, si è proseguita l'analisi applicando alcuni modelli per la valutazione della profondità della corrente in grado di destabilizzare un ammasso detritico saturo:

- A) il modello di Tognacca et al. (1999)
- B) quello classico di Takahashi (1978, 1991).

A) Partendo dai dati morfometrici e granulometrici medi della zona d'innescò è possibile eseguire una stima della teorica portata liquida d'innescò, ossia la portata in grado di innescare un debris flow per erosione e destabilizzazione progressiva del letto.

Utilizzando quindi una pendenza media della zona d'innescò attorno a 18°, un diametro del materiale mobilizzabile pari al d_{50} estratto dalla curva granulometrica superficiale (115 mm), una densità dell'acqua e del materiale rispettivamente di 1000 e 2650 Kg/m³, si può stimare la portata di innescò del debris flow mediante il metodo proposto recentemente da Tognacca et al. (2000):

$$q_{DI} = \left(\frac{\rho_m}{\rho_s} - 1 \right)^{0.5} \cdot g^{0.5} \cdot \frac{d_m^{1.5}}{(\tan \theta)^{1.17}}$$

dove

g = accelerazione di gravità (m/s²)

d_m = diametro medio della distribuzione granulometrica (m)

ρ_s = densità dell'acqua (Kg/m³)

ρ_m = densità del materiale (Kg/m³)

θ = pendenza della zona d'innescò (°)

Tale applicazione fornisce una portata unitaria d'innescò pari a 0.58 m²/s. Considerando, dalle sezioni rilevate, una larghezza media del canale in erosione pari a circa 5.5 m, si ottiene una portata d'innescò di 3.2 m³/s, ben inferiore al valore al picco dell'idrogramma di piena.

B) Seguendo l'impostazione di Takahashi (1991), l'altezza della corrente idrica in grado di mobilizzare lo strato superficiale di un ammasso detritico saturo posto su di un fondo impermeabile può essere stimato mediante l'equazione:

$$\frac{h_0}{y_f} = \frac{(\rho_s - \rho_w)c^*}{\rho_w} \cdot \left(\frac{\tan \phi}{\tan \theta} - 1 \right) - 1$$

dove:

h_0 = profondità della corrente per il moto incipiente

y_f = profondità dello strato mobilizzato

θ = angolo del canale sull'orizzontale

c^* = concentrazione di massimo impaccamento del materiale

ρ_w = densità dell'acqua

ρ_s = densità del materiale solido

ϕ = angolo d'attrito interno del materiale

Il calcolo delle profondità di moto incipiente e d'innescò della colata è stato eseguito per grani di diametro variabile, e per valori della concentrazione solida c^* tra 0.6 e 0.8.

I risultati ottenuti sono stati confrontati con la profondità reale di moto uniforme del deflusso superficiale originati dal picco dell'idrogramma alla sezione d'innesco (0.35 m)

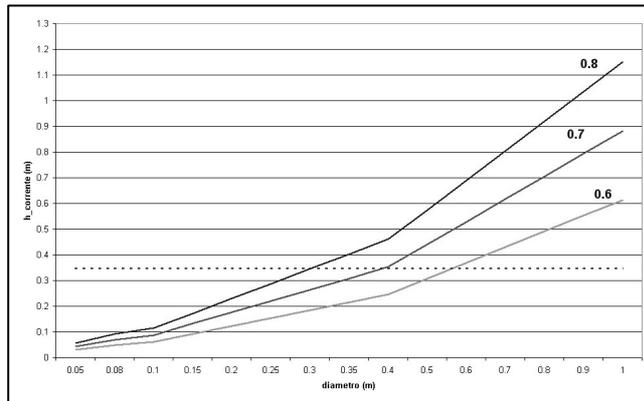


Fig.7 : Confronto tra le profondità di moto incipiente e la profondità reale della corrente alla sezione d'innesco.
Fig.7: Comparison between incipient motion depths and real water depth at the triggering section.

Considerando come più attendibili le due curve relative a c^* 0.6 e 0.7, si deduce come il deflusso superficiale calcolato alla sezione d'innesco risulti ben superiore alle profondità di moto incipiente stimate con il metodo di Takahashi e quindi certamente sufficiente a mobilitare uno strato di materiale (o un grano) di diametro ben superiore al d_m della distribuzione granulometrica. Ciò fornisce, almeno parzialmente, una logica spiegazione e conferma di quanto realmente accaduto.

Stima del sedimentogramma da colata

Per la stima dell'onda di piena generata dalla colata detritica, vista l'elevata complessità del fenomeno e delle possibili variabili in gioco, si è scelto di applicare una metodologia costruita su alcune ipotesi di base che, semplificando la problematica nei suoi aspetti principali, ne rende possibile una quantificazione di massima (D'Agostino & Marchi, 2003). Tali ipotesi sono:

- 1 - La colata viene generata da un evento pluviometrico di forte intensità e breve durata; generalmente, infatti, all'interno di una precipitazione è sempre il picco di notevolissima intensità che causa l'innesco del fenomeno.
- 2 - L'alveo dispone di una quantità illimitata di sedimenti; viene cioè mobilitato tutto il sedimento asportabile della portata "idrologica".
- 3 - La portata di picco del debris flow (Q_d), intesa come somma della portata liquida (Q_l) e della portata solida (Q_s), viene determinata nell'ipotesi di scorrimento di una portata di acqua pulita su di un ammasso granulare completamente saturo. Q_d può allora stimarsi con la formula:

$$Q_d = \left(\frac{C_*}{C_* - C_{eq}} \right) \cdot Q_l \quad (a)$$

dove:

C_* = concentrazione di massimo impaccamento del materiale costituente l'ammasso; può in genere assumersi $C_* = 0.65$ (Armanini, 1999).

C_{eq} = concentrazione volumetrica di equilibrio del fronte stazionario della colata in movimento in moto uniforme; per pendenze del fondo superiori al 35% la concentrazione C_{eq} è esprimibile come:

$$C_{eq} = \alpha C^* \quad (b)$$

con α prossimo a 0.9.

L'equazione (b) è supportata dai riscontri sperimentali di diversi autori. Nella nostra simulazione è stato utilizzato un valori del coefficiente α pari a 0.75.

4 - L'ultima ipotesi quella di far iniziare l'onda della colata in corrispondenza al transito di una portata liquida pari alla portata di innesco dei debris flow per cedimento progressivo del materiale costituente il letto, così come calcolato in precedenza con il metodo proposto da Tognacca et al. (2000) determinando il primo valore della portata del debris flow Q_d per un valore di $C_{eq} = 0.2$. E' noto infatti che l'arrivo di una colata detritica viene spesso preceduto da un flusso iperconcentrato. Considerando, quindi, il tempo di crescita del debris flow, come l'intervallo che separa, sull'idrogramma liquido, gli istanti in cui si verificano le portate $Q_l = Q_{DI}$ e $Q_l = Q_{max}$, si determinano i successivi valori di Q_d ammettendo una variazione lineare nel tempo di C_{eq} (da $C_{eq min}$ a $C_{eq max}$). Per la fase di esaurimento della colata, caratterizzata generalmente da una durata maggiore ed una pendenza minore, la concentrazione verrà fatta variare in modo non lineare ma logaritmico tra C_{eq} e 0.1 (normale bedload).

Il risultato dell'applicazione è riportato nel grafico in figura 8:

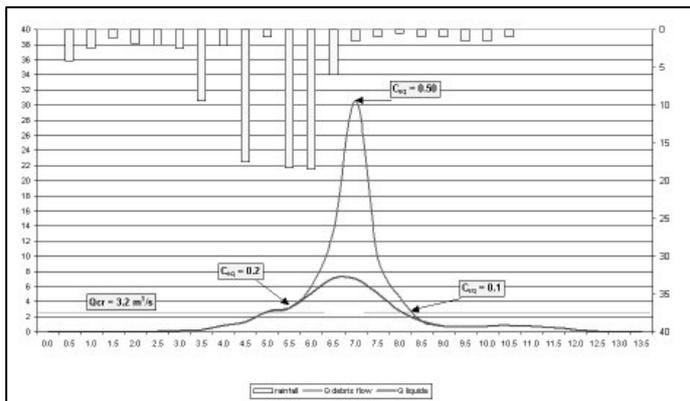


Fig.8: Sedimentogramma simulato della colata detritica in Val della Vecchia.

Fig.8: Sediment flow hydrograph of the debris flow in the Vecchia Valley

Il volume totale movimentato dall'evento simulato si aggira sui 42000 m^3 , valore molto vicino al volume reale misurato in campo alla sezione di chiusura del bacino, ossia 40000 m^3 circa.

IL MODELLO DI INSTABILITA' SUPERFICIALE

L'analisi del bacino è stata completata da una valutazione delle zone maggiormente instabili e suscettibili a cedimento, che fossero cioè in grado di fornire materiale mobilizzabile da un eventuale evento piovoso critico. Per far ciò, accanto alla 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 (Borga et al. 1998; Montgomery & Dietrich, 1994; Dietrich et al., 1995).

Tale modello determina per ogni singolo elemento del bacino (cella raster 5 m x 5 m), sulla base di alcune caratteristiche topografiche, idrologiche e geotecniche, la cosiddetta “pioggia critica”, ossia l’intensità di pioggia giornaliera che porta alla destabilizzazione della cella in esame:

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

in cui T è 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.

Ciò ha permesso di ottenere un raster che individua tre classi di stabilità entro il bacino (Fig.9):

- Zone incondizionatamente stabili** (ammasso stabile anche se completamente saturo)
- Zone incondizionatamente instabili** (ammasso instabile anche in condizioni asciutte)
- 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.

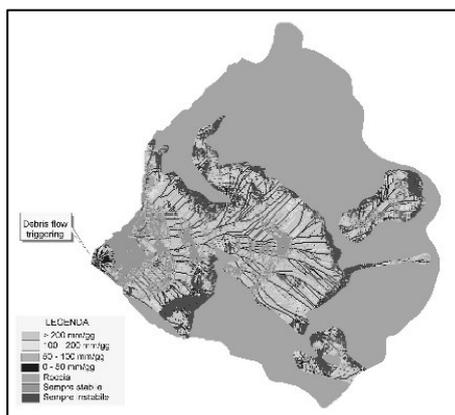


Fig. 9: Instabilità superficiale nel sottobacino contribuente alla zona d’innescò.
Fig. 9: Shallow instability in the debris flow sub-basin.

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 molto attendibile alle zone in cui si è avuto il maggior prelievo di materiale durante l’evento del 1994.

L’ INTERVENTO DI SISTEMAZIONE

L’obiettivo della sistemazione va individuato principalmente nella necessità di controllare e limitare il trasporto solido del rio in funzione della sicurezza idraulica del torrente Cismon (torrente in cui confluisce il rio Val della Vecchia) e quindi il territorio urbanizzato della piana del Primiero. Nel caso infatti di una alluvione che interessasse generalmente il territorio del

Primiero il dissesto ed il conseguente trasporto solido proveniente dal rio Val della Vecchia si sommerebbe a quello proveniente da altre situazioni analoghe e ciò determinerebbe un notevole aumento del rischio di esondazione nella zona urbanizzata di fondovalle.

In particolare la sistemazione è stata progettata per impedire il formarsi di una nuova colata detritica con dimensioni superiori a 30-40.000 m³, mentre risulterebbe accettabile il formarsi di colate di più piccole dimensioni tali da causare eventualmente solo danni lievi alle strutture più esposte ed un trasporto solido compatibile con le opere di laminazione presenti in fondovalle.

Il vincolo posto alla progettazione è stato quello di realizzare una sistemazione adeguata a limitare il dissesto senza impiegare eccessive risorse economiche e riducendo al minimo l'impatto ambientale dell'intervento, in particolare nella parte alta del bacino posta al confine del parco naturale Paneveggio-Pale di San Martino, ad elevatissimo valore ambientale/paesaggistico.



Fig. 10 e 11: sistemazione della zona d'innesco e di propagazione della colata con opere miste in massi e calcestruzzo armato.

Fig. 10 and 11: hydraulic works in the triggering and propagation zones with stone and concrete dams.

L'intervento, tuttora in corso nella parte intermedia del bacino mentre è terminato nella parte superiore, è stato progettato ed eseguito dalla Provincia Autonoma di Trento, Servizio Sistemazione montana nella forma dell'amministrazione diretta (maestranze ed attrezzature proprie e macchine operatrici prese a nolo). Nel 1999 sono iniziati i lavori con l'approntamento del cantiere, la sistemazione della strada di accesso ed il depezzamento dei massi più grossi presenti in loco che sono poi stati utilizzati per realizzare le opere. Nel 2000 si è eseguita la sistemazione del burronamento che ha originato la colata detritica, a circa m 1660 s.l.m., realizzando soglie in massi cementati, legati fra loro con funi di acciaio. Il tratto sistemato è di circa 140 m, a cui va aggiunta la lunghezza dei due collettori ivi confluenti da monte per circa 30 m. Sul collettore principale sono state realizzate opere trasversali di altezza limitata (max 2,5 m) con profilo della sezione di deflusso a corda molle ed andamento planimetrico ad arco. Lo scopo di tali opere è quello di impedire un ulteriore approfondimento dell'erosione che, data la conformazione dei luoghi arretrerebbe molto velocemente verso monte, generando una gran quantità di trasporto solido. Inoltre la conformazione della sistemazione (profilo a corda molle e spalle interrato nel versante protetto da scogliere) è idonea a resistere al transito di colate detritiche provenienti da monte. I due collettori di monte sono stati a loro volta consolidati per un breve tratto, mediante un selciato in massi cementati e legati fra loro, con forma molto irregolare in modo da determinare il massimo di dispersione di energia e simulare, per quanto possibile, le forme torrentizie naturali. L'impatto ambientale di questa tipologia di opere, a lavori ultimati (vedi foto 10 e 11), è risultato essere perfettamente compatibile con il pregio ambientale di questa zona, posta a confine di un parco naturale.

Il tratto intermedio del rio Val della Vecchia presenta una situazione geologica differente rispetto alla parte superiore che è decisamente caratterizzata da potenti depositi quaternari. Nel tratto intermedio il substrato roccioso è caratterizzato, soprattutto in sponda sinistra, dalla formazione di Bellerophon, composta da siltiti scure fortemente alterate ed erodibili. A tale formazione si sovrappone un deposito gravitativo costituito essenzialmente da ciottoli, con ghiaie e sabbie provenienti dal disfacimento e successiva rideposizione delle formazioni dolomitiche presenti a monte. Nei tratti dove il torrente è in erosione tale strato tende a scivolare verso valle con velocità e quantità differenziate a seconda delle situazioni morfologiche.

In questo tratto erano già presenti alcune briglie in pietrame costruite negli anni '30 e successivamente distrutte. La colata detritica avvenuta nel 1994 si è qui notevolmente alimentata erodendo il piede di due grandi frane.

Da ciò è nata la necessità di provvedere con la sistemazione anche al consolidamento dei versanti, mediante la realizzazione di briglie in calcestruzzo armato, con altezza di circa 5 metri fino al piano gàveta e 2 metri di spalle: tali opere determinano un netto innalzamento della quota dell'alveo e quindi contribuiscono alla stabilizzazione dei versanti. Il tratto in argomento è nascosto nel fondo vallivo, profondamente inciso e pertanto questa tipologia costruttiva, seppure di per sé ad alto impatto, è risultata la più adatta a raggiungere gli scopi dalla sistemazione. L'utilizzo di opere in massi è stato escluso per via dei costi proibitivi derivanti dal fatto che il materiale non era più reperibile in loco, come nel caso della sistemazione della parte alta, e non esistevano cave di massi calcarei nel raggio di 50 km.



Fig.12 e 13: sistemazione del tratto intermedio

Fig.12 and 13: hydraulic works in the intermediate reach

Durante l'esecuzione delle opere si è resa necessaria la messa in sicurezza del cantiere, poichè il versante manifestava evidenti segni di scivolamento a valle. Circa 50 metri a monte del cantiere si è evidenziata nel deposito gravitativo una crepa profonda alcuni metri, che è stata attentamente monitorata mediante fessurimetri. Gli scavi delle opere sono stati inoltre consolidati il più possibile con scogliere in massi e protetti dalla caduta di sassi con reti o palificate in legname. Il rischio di franamento è stato evitato anche grazie alla velocità di esecuzione delle opere e quindi con la massima riduzione dei tempi di esposizione al pericolo, provvedendo immediatamente alla fine delle varie fasi di elevazione dell'opera alla chiusura degli scavi. Un operaio era appositamente incaricato di controllare i fessurimetri provvedendo nel caso di movimenti significativi a dare l'allarme ed ad evacuare la zona pericolosa utilizzando delle vie di fuga appositamente predisposte.

CONCLUSIONI

Nonostante la metodologia d'analisi riportata in questo studio sia stata condotta su un evento già accaduto e del quale già si conoscevano le dinamiche, ci sentiamo di proporre il suo utilizzo anche in sede preventiva, come schema minimo di partenza per un'analisi del fenomeno sufficientemente dettagliata, almeno ove sia ipotizzabile un meccanismo d'innescio del tipo accennato. Ci si rende conto, comunque, come la sua applicabilità nella pratica non sia esente da problemi legati principalmente ai tempi ed ai costi di esecuzione, richiedendo spesso dati rilevabili solamente con dispendiose indagini di campo.; 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.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Armanini A. (1999) – Previsione e prevenzione del rischio da colata di detriti, *Atti del Convegno dei Lincei*, 154: 13-44.

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 pp.

Cazorzi F. (1996), “Watershed Digital Terrain Model – Manuale per l'utente”, Laboratorio IDEA, Agripolis, Università di Padova.

D'Agostino V., Marchi L. (2003), “Geomorphological estimation of debris flow volumes in alpine basin” in *Debris flow Hazard Mitigation: Mechanichs, Prediction and Assessment*, Rickenmann & Chen (eds), Millpress, Rotterdam.

Dietrich W. E et al. (1995), “A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data”, *Hydrological Processes*, v. 9, pp. 383-400.

Montgomery D. R., Dietrich W. E., (1994), “A Physically-based model for the topographic control on shallow landsliding”, *Water resource Research*, v. 30, pp. 1153-1171.

Takahashi T., (1991), *Debris flow*, IAHR Monograph, A.A. Balkema, Rotterdam, 63-75 pp.

Tognacca et al., (2000), “Threshold criterion for debris flow initiation due to channel-bed failure”, in *Debris flow Hazard Mitigation: Mechanichs, Prediction and Assessment*, G.F. Wieckzorek & N.D. Naeser Eds., 2000 Balkema, Rotterdam, 89-98 pp.

Vigna I., (1999), “Relazione geologica per il bacino di Val della Vecchia”, Provincia Autonoma di Trento – Servizio Sistemazione Montana, relazione tecnica inedita.