

# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Geoscienze Direttore Prof. Cristina Stefani

#### TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

# RILIEVO E INTERPRETAZIONE DI ALCUNI PARAMETRI GEOMORFOLOGICI DELL'AREA DA COLATE DETRITICHE DEL RIO ACQUABONA (ALPI ORIENTALI, BL, ITALIA)

Relatore: Prof. Paolo Scotton

Correlatore/i: Dr. Daniele Dalla Valle

Laureando: Federico Tancon

# **INDICE**

# LISTA DEI SIMBOLI

INTRODUZIONE	pg. 1
Cap. 1 DEBRIS-FLOW	pg. 2
Par. 1.1 Caratteristiche generali del fenomeno	pg. 2
Par. 1.2 Classificazione e terminologia	pg. 6
Par. 1.3 Caratteristiche geologiche, geomorfologiche e geotecniche	pg. 8
Par. 1.3.1 Aree idonee allo sviluppo delle colate detritiche e aspetti geologici	pg. 8
Par. 1.3.2 Aspetti geomorfologici, area di innesco, di trasporto e di accumulo	pg. 9
Par. 1.3.3 Parametri fisici, climatici e geotecnici del fenomeno	pg. 11
Cap. 2 IL BACINO DI ACQUABONA	pg. 13
Par. 2.1 Inquadramento geografico e geologico	pg. 13
Par. 2.2 Geomorfologia dell'area	pg. 17
Par. 2.3 Il bacino delle colate	pg. 20
Par. 2.3.1 Area di innesco	pg. 20
Par. 2.3.2 Canale del debris-flow o di trasporto	pg. 20
Par. 2.3.3 Area di accumulo	pg. 22
Par. 2.4 Sistema di monitoraggio del sito	pg. 24
Cap. 3 FOTO AEREE PER L'UTILIZZO DEL SOFTWARE ARCGIS	pg. 29
Par. 3.1 Elaborazione statistica dei dati relativi ai canali di colata e ai bacini	
idrografici di alimentazione limitrofi al sito in esame	pg. 29
Par. 3.1.1 Fasi di lavoro	pg. 29
Par. 3.1.2 Misurazione e determinazione dei dati	pg. 33
Par. 3.1.3 Analisi statistica dei parametri sopra descritti	pg. 37
Par. 3.2 Evoluzione morfologica degli argini del canale di colata del rio Acquabona	pg. 55
Par. 3.2.1 Procedimento operativo	pg. 55
Par. 3.2.2 Risultati ottenuti	pg. 56
Par. 3.2.3 Possibile evoluzione futura del sistema	pg. 61

Cap. 4 RILIEVO SPEDITIVO LUNGO IL CANALE DI ACQUABONA	pg. 62
Par. 4.1 Rilievo topografico speditivo in sito	pg. 62
Par. 4.1.1 Modalità di esecuzione e finalità	pg. 62
Par. 4.1.2 Risultati	pg. 67
Par.4.1.3 Considerazioni finali	pg. 77
Cap. 5 PROVE DI LABORATORIO: ANALISI GRANULOMETRICHE	pg. 78
Par. 5.1 Prelievo e preparazione dei campioni per la prova	pg. 78
Par. 5.2 Esecuzione dell'analisi granulometrica	pg. 81
Par. 5.2.1 Fasi operative	pg. 81
Par. 5.2.2 Risultati ottenuti	pg. 86
Par. 5.3 Discussione dei risultati	pg. 89
Cap. 6 CONDIZIONI DI INNESCO IDRO-GEOLOGICHE SECONDO TAKAHASHI	pg. 90
Par. 6.1 Applicazione dell'equazione di Takahashi	pg. 90
Par. 6.1.1 Parametri presenti nel modello considerato	pg. 90
Par.6.1.2 Risultati	pg. 93
CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	pg. 101
ALLEGATI	pg. 102
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	pg. 117
<u>RINGRAZIAMENTI</u>	pg. 118

# LISTA DEI SIMBOLI

a [-]	attività del canale (valore 1 se attivo e valore 2 se inattivo);
a <sub>L</sub> [m]	spessore di materiale solido coinvolto nella colata;
$A [m^2]$	area del bacino idrografico proiettata sul piano x, y;
B [m]	larghezza massima delle sezioni;
C <sub>c</sub> [-]	coefficiente di curvatura;
C <sub>u</sub> [-]	coefficiente di uniformità;
C* [-]	concentrazione di volume delle particelle solide (varia tra 0 e 1);
D [m]	distanza tra i punti centrali delle sezioni;
$D_D[1/m]$	densità di drenaggio dei bacini idrografici;
Do [m]	distanza proiettata sul piano tra i punti centrali delle sezioni;
Dp [m]	distanza progressiva (somma cumulata dei valori di Do);
Esp [°]	esposizione indicativa dei bacini;
FS [-]	fattore di sicurezza;
$F_D [1/m^2]$	frequenza di drenaggio dei bacini idrografici;
$g [m/s^2]$	accelerazione di gravità;
$h_0[m]$	spessore idrico al di sopra del materiale solido;
H [m]	profondità massima della sezione;
$i_m$ [°]	inclinazione media della traccia (rapporto tra $\Delta c$ e l);
$I_{M}$ [-]	invariante di Mellor;
1 [m]	distanza sul piano x, y tra punto iniziale e finale della traccia dei canali;
L [m]	lunghezza sul piano x, y della traccia dei canali;
$L_{A.P.}[m]$	lunghezza dell'asta principale del reticolo idrografico dei bacini sul piano x, y;
$L_c[m]$	lunghezza totale dei canali sul piano x, y;
$L_{d}[m]$	lunghezza del reticolo di drenaggio dei bacini sul piano x, y;
$N_{\rm C}$ [-]	numero dei canali facenti parte del conoide a valle di ogni bacino;
$N_{G}[N]$	componente normale di galleggiamento;
$N_{M}[N]$	componente normale del materiale;
$N_u$ [-]	numero dei segmenti della rete di drenaggio dei singoli bacini;
p [-]	pendenza (rapporto tra Δs e Do);

P [m] perimetro del bacino idrografico proiettato sul piano x, y;

Pp [g] peso passante all'i-esimo vaglio;

Pp [%] % in peso di passante all'i-esimo vaglio;

Pt [g] peso trattenuto all'i-esimo vaglio;

 $Q_m$  [m s.l.m.] quota media della traccia dei canali;

Q<sub>max</sub> [m s.l.m.] quota massima dei bacini; Q<sub>min</sub> [m s.l.m.] quota minima dei bacini;

Qr [m] quota relativa (somma cumulata dei valori di  $\Delta$ s);

R<sup>2</sup> [-] coefficiente di determinazione;

R<sub>K</sub> [-] indice di forma;

R<sub>KG</sub> [-] fattore di forma di Gravelius;

R<sub>KH</sub> [-] indice di forma di Horton;

T [%] tortuosità relativa della traccia;

T<sub>G</sub> [N] componente di taglio idrica intergranulare;

T<sub>i</sub>[N] componente di taglio idrica;

T<sub>M</sub> [N] componente di taglio del materiale;

 $\alpha$  [°] inclinazione del pendio;

 $\alpha_{v}$  [°] angolo verticale (zenit) tra i punti centrali delle sezioni;

Δb [m] dislivello dei bacini (differenza tra quota massima e minima);

Δc [m] dislivello tra punto iniziale e finale della traccia dei canali;

Δs [m] dislivello tra i punti centrali delle sezioni;

θ [°] angolo orizzontale rispetto al nord (azimut) tra i punti centrali delle sezioni;

ρ [kg/m<sup>3</sup>] densità del fluido interstiziale durante l'innesco;

 $\rho_s$  [kg/m<sup>3</sup>] densità del materiale solido;

σ [-] scarto quadratico medio;

 $\sigma^2$  [-] varianza;

 $\phi$  [°] angolo d'attrito del materiale granulare;

Φ [mm] dimensione caratteristica dei grani;

 $\Phi_{10}$  [mm] dimensione corrispondente al valore 10% di passante;  $\Phi_{30}$  [mm] dimensione corrispondente al valore 30% di passante;  $\Phi_{60}$  [mm] dimensione corrispondente al valore 60% di passante.

# **INTRODUZIONE**

I debris-flow o colate detritiche rappresentano tutt'oggi un argomento di studio molto importante per la scienza che da anni cerca di definirne le modalità d'innesco, le proprietà reologiche, i meccanismi di propagazione e le condizioni che ne determinano l'arresto.

Questi fenomeni avvengono, talvolta, in modo rapido ed imprevedibile con perdite sia economiche che umane. Tuttavia la loro capacità distruttiva viene spesso sottovalutata.

Una delle zone maggiormente interessate da questo tipo di dissesto, nel panorama italiano, sono le Dolomiti dove, la presenza di detrito sciolto alla base di ripide pareti rocciose e la tipologia di precipitazioni che si verificano durante il periodo estivo (anche 15 mm in 10 min.), rappresentano le condizioni ideali per l'innesco dei debris-flow.

L'area di studio scelta si trova in località Acquabona (Cortina d'Ampezzo, Dolomiti, Alpi Orientali) ed è caratterizzata dalla presenza di un canale di scorrimento delle colate, le quali vengono alimentate dal detrito sciolto delle falde esistenti e dai materiali fini che vengono asportati dagli affioramenti della Formazione di Raibl.

Nel sito scelto è attualmente presente un sistema di monitoraggio composto da due stazioni, rispettivamente poste sopra all'area di innesco delle colate (1715 m s.l.m.) e lungo il canale di trasporto (1185 m s.l.m.).

In questo lavoro si cercherà di analizzare e interpretare alcuni parametri morfologici e idrologici che caratterizzano i canali di colata e i loro rispettivi bacini in roccia. Verrà poi valutata l'evoluzione morfologica del canale di colata del rio Acquabona, definendo le principali aree erose dal 1982 al 2013 e le zone che potrebbero essere interessate in futuro da fenomeni di degradazione.

Lungo la zona di scorrimento del canale di colata, per un tratto di circa 290 m, è stato svolto un rilievo topografico speditivo allo scopo di determinare i parametri morfometrici caratterizzanti lo stesso. Successivamente sono stati prelevati, lungo il canale considerato, cinque campioni e con le analisi granulometriche effettuate al laboratorio di geoscienze dell'università di Padova si sono valutate le dimensioni caratteristiche delle particelle ed eventuali differenze presenti tra un campione e l'altro.

Infine è stata verificata l'applicabilità dell'equazione di Takahashi per l'innesco delle colate detritiche determinando i potenziali spessori di materiale movimentato per determinati valori di inclinazione del pendio, angolo di attrito delle particelle solide e livello di saturazione dell'ammasso granulare.

# **CAP. 1 DEBRIS-FLOW**

# Par. 1.1 Caratteristiche generali del fenomeno

I debris-flow sono miscele estremamente mobili di sedimento poco classato ad elevata concentrazione, generalmente caratterizzato da un piccolo quantitativo di frazione argillosa.

I materiali solidi possono costituire fino al 90 % in peso della massa fluida, quindi l'acqua occupa una percentuale molto piccola della massa totale [1]. Le principali caratteristiche delle colate detritiche sono descritte in Tab. 1:

Parametro	Range di valori
Velocità	media: 3-4 m/s
	massima: 20 m/s
Densità	1,8-2 g/cm <sup>3</sup>
X7.1	Da qualche centinaio al
Volume	milione di m <sup>3</sup>
Altezza del fronte	1-10 m
Durata	Da qualche minuto
	all'ora
Granulometria	Dall'argilla a blocchi di
	svariati m <sup>3</sup>

Tab. 1: caratteristiche dei debris-flow [2].

L'acqua è l'elemento determinante per l'innesco di una colata detritica. Quando una massa di materiale granulare sciolto arriva a saturazione, la forza di gravità e l'aumento delle pressioni interstiziali che provocano una diminuzione delle resistenze attritive tra i grani, fanno si che essa scivoli verso valle come una colata incorporando il materiale presente sul letto e sulle sponde del canale.

I grossi quantitativi d'acqua possono provenire da precipitazioni brevi e intense (temporali estivi), rapida fusione di nevai o ghiacciai, cedimento di un invaso naturale o artificiale e da sismi o esplosioni [2].

I debris-flow sono descritti mediante diversi modelli reologici, i quali risultano molto importanti perché permettono di comprendere le modalità di propagazione ed avere una stima della distanza di arresto dalla zona di innesco che può arrivare fino a qualche km. I principali e di maggior interesse sono i seguenti [1]:

- 1. Il modello newtoniano:
- 2. Il modello visco-plastico di Bingham;
- 3. Il modello visco-plastico di Coulomb.

Il modello newtoniano è il modello più semplice per la descrizione delle colate detritiche. La resistenza dell'acqua a subire una deformazione è sintetizzata dall'equazione  $\tau = \mu_N * (du/dy)$  dove  $\tau$  è la resistenza al taglio (espressa in Pascal),  $\mu_N$  la viscosità dinamica, u la velocità ed y la profondità della corrente. Forse a causa della sua semplicità, in questo modello, non viene spiegata né la formazione di argini e lobi su pendenze relativamente alte (superiori a  $10^\circ$ ), né la presenza del "plug" rigido che si osserva spesso in un debris-flow, né la gradazione inversa che, a volte, mostrano i depositi. Considerando che la colata è trattata come un fluido newtoniano (lo sforzo di taglio è proporzionale al gradiente di velocità), si ha una deformazione istantanea regolata dalla viscosità tranne nel caso in cui le concentrazioni di sedimento siano elevate.

I modelli visco-plastici di Bingham e Coloumb sono espressi rispettivamente dalle equazioni  $\tau = \tau_0 + \mu_B*(du/dy)$  e  $\tau = \tau_0 + \mu_C*(du/dy)$  in Pascal dove  $\tau_0$  è la resistenza limite al taglio,  $\mu_B$  e  $\mu_C$  la viscosità e il rapporto du/dy la velocità di deformazione. Essi si differenziano dal precedente modello perché prima che il fluido si possa muovere e generare una deformazione deve superare un valore limite dello sforzo tangenziale chiamato yield stress ( $\tau_0$ ). Superata questa soglia la deformazione non è più elastica (comportamento uguale ad una molla) ma diventa plastica.

Inoltre spiegano l'esistenza di una regione centrale della corrente, dove lo sforzo tangenziale è inferiore alla resistenza al taglio, cosicché non avviene alcuna deformazione (rigid plug). Questa zona rigida, limitata lateralmente da zone più o meno larghe soggette a flusso laminare, spiega la caratteristica forma ad "U" assunta dal canale dopo il passaggio di una colata.

Anche la formazione di argini e lobi laterali su pendenze relativamente elevate può essere spiegata in termini di resistenza del materiale: quando lo spessore del flusso si assottiglia, sino ad un valore minimo critico y<sub>0</sub>, il debris-flow si arresta.

In Fig. 1 è rappresentato il diagramma  $\tau$ - du/dy dove da 0 a 1 si ha un comportamento elastico, mentre da 1 a 2 e da 0 a 2 diventa viscoso.

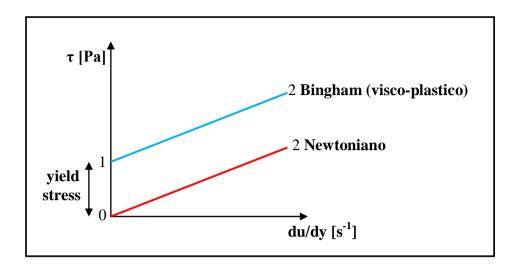


Fig. 1: modello di Newton e Bingham.

Distribuzioni di velocità che concordano con il modello di flusso di Bingham sono state misurate sia su correnti sperimentali sia in colate detritiche naturali (Marchetti, 2000).

Come si può osservare nella figura 2, la distribuzione di velocità è di tipo parabolico tra yo e yd, mentre al di sopra del piano di scivolamento la resistenza limite non è superata ( $\tau o$ ) e quindi il materiale si muove con una velocità uniforme in assenza di deformazione interna (rigid plug).

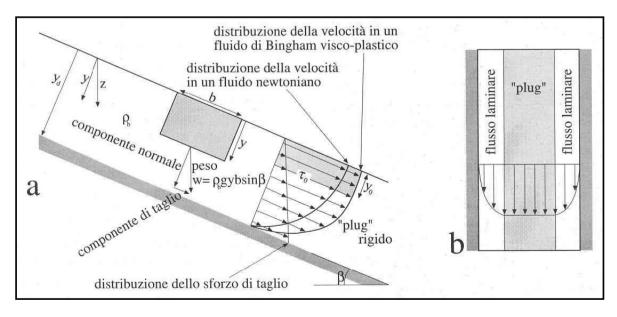


Fig. 2: a) distribuzioni dello sforzo di taglio e della velocità per un fluido newtoniano e visco-plastico di Bingham su un pensio infinito; b) distribuzione della velocità sulla superficie di un debris-flow (Marchetti, 2000).

Le colate detritiche, a causa del loro comportamento pulsante, presentano più fronti di avanzamento con una caratteristica forma lobata o a ventaglio (conoidi di deiezione) ad elevata viscosità, intervallati a fluidi meno viscosi newtoniani (Fig. 1) contraddistinti da una minor frazione solida. Sono costituite da materiale grossolano nella parte superiore con movimento rigido (rigid plug) e da una granulometria mista nella zona centrale con un fluido viscoso interstiziale (acqua e frazione fine) e clasti con dimensioni maggiori (ghiaia, ciottoli, blocchi - Fig. 3).

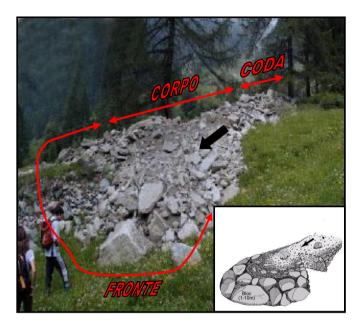


Fig. 3: vista in pianta di un debris flow.

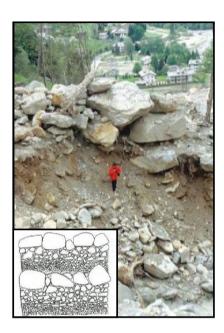


Fig. 4: sezione trasversale con materiali più piccoli verso il basso, blocchi verso l'alto.

Dal punto di vista morfologico si riconoscono tre zone: area sorgente dove l'erosione prevale sulla deposizione, area di trasporto che consiste generalmente in un canale di scorrimento con erosione pari al deposito e area di accumulo caratterizzata da una bassa pendenza e da processi deposizionali prevalenti rispetto a quelli erosivi (zona di formazione del conoide di deiezione). Queste tre aree, con differenti caratteristiche geologiche, geomorfologiche e topografiche verranno trattate più approfonditamente nel Par. 1.3.

# Par. 1.2 Classificazione e terminologia

Le colate detritiche, dal punto di vista classificativo, vengono considerate come fenomeno franoso. Le classificazioni proposte da diversi autori sono molte ma saranno citate le più significative.

Cruden, nel 1996 riprende quella maggiormente conosciuta elaborata da Varnes, nel 1978 la quale si basa sia sul tipo di movimento sia sul tipo di materiale roccioso coinvolto. In relazione alla tipologia di movimento si distinguono cinque classi principali (crolli, ribaltamenti, scorrimenti – a loro volta suddivisi in traslativi e rotazionali – espandimenti laterali e colamenti) a cui si aggiunge una sesta classe (fenomeni complessi). Ognuna di queste sei classi è poi suddivisibile, sulla base del tipo di materiale interessato dal processo franoso (roccia, detrito e terra), in tre sottoclassi, per un totale di diciotto tipi possibili.

Tipo di movimento		Tipo di materiale			
		Roccia	Detrito	Terreni fini	
crollo	(fall)	crolli di roccia	crolli di detrito	crolli di terra	
ribaltamento (topple)		ribaltamento di roccia	ribaltamento di detrito	ribaltamento di terra	
Scivolamento	rotazionale	scorrimento rotazionale di roccia	scorrimento rotazionale di detrito	scorrimento rotazionale di terra	
(slide)	(slide) traslativo		scorrimento traslazionale di detrito	scorrimento traslazionale di terra	
Espansione laterale (spread)		espandimenti laterali di roccia	espandimenti laterali di detrito	espandimenti laterali di terra	
Colata (flows) flussi di roc		flussi di roccia	flussi di detrito	flussi di terra	
Fenomeni (comp	L compinazione di Z o più fipi nello spazio e/o nel femp		nzio e/o nel tempo		

Tab. 2: classificazione dei movimenti franosi di Cruden e Varnes, 1996.

Tale classificazione è inoltre arricchita da indicazioni sulla velocità dei movimenti che può essere messa in relazione con il danno prodotto (Tab. 3).

È facile notare come delle sette classi di movimento, solo la prima ("frane estremamente lente") non è caratterizzata da significativi danni alle strutture. Inoltre, per le classi da 1 a 3 ("frane lente") sono possibili lavori di rinforzo e di stabilizzazione del pendio. Invece, per le classi da 5 a 7, non solo sono possibili danni alle strutture ma è messa in pericolo la stessa vita umana.

Classe di velocità	Descrizione	Danni osservabili	Velocità tipiche
1	Estremamente lente	Costruzione di edifici possibile	< 16 mm/anno
2	Molto lente	Alcune strutture permanenti possono non essere danneggiate dal movimento	16 mm/anno
3	Lente	Possibilità di intraprendere lavori di rinforzo e di restauro durante il movimento	1.6 m/anno
4	Moderate	Alcune strutture temporanee e poco danneggiabili possono essere mantenute	13 m/mese
5	Rapide	Distruzione di strutture, immobili ed installazioni permanenti	1.8 m/h
6	Molto rapide	Velocità troppo elevata per permettere l'evacuazione delle persone	3 m/min
7	Estremamente rapide	Edifici distrutti per l'impatto del materiale spostato. Fuga impossibile	5 m/sec

Tab. 3: scala di intensità delle frane (Cruden e Varnes, 1996).

Un'altra classificazione proposta è quella di Innes (1983) nella quale si suddividono le colate in quattro categorie in funzione del volume depositato in conoide, definendo debris-flow di media grandezza quelli che depositano volumi superiori a 1000 m<sup>3</sup> e di eccezionale grandezza quelli che superano i 10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>.

Infine, Costa nel 1984 propone una classificazione di tipo reologico che distingue le colate detritiche da altri tipi di flusso in relazione ai parametri fisici caratterizzanti quali la frazione solida, densità, resistenza, tipo di fluido e tipo di deposito (Tab. 4).

Flusso	Frazione solida [% in peso]	Densità [t/m³]	Resistenza [Pa]	Tipo di fluido	Tipo di depositi
Flusso d'acqua	1-40	1.01-1.3	<10	Newtoniano	Classati, stratificati
Flusso iperconcentrato	40-70	1.3-1.8	10-20	Appross. Newtoniano	Poco classati, debolmente stratificati
Debris flow	70-90	1.8-2.6	>20	Visco- plastico	Argini e lobi di detrito poco classato

Tab. 4: classificazione reologica di flussi sedimento/acqua nei canali, Costa 1984.

Essa però non considera il contenuto in matrice fine dei debris-flow, diversamente da quanto fatto da Nemec e Steel (sempre nel 1984), che ne hanno tenuto conto riconoscendo la sua influenza nel definire le caratteristiche reologiche e, conseguentemente, le modalità di propagazione e arresto delle colate. Oltre a questo parametro viene considerato anche il tipo di flusso e il comportamento fisico-meccanico dello stesso.

Per quanto riguarda la terminologia sono molti i sinonimi che descrivono i debris-flow. I più utilizzati sono:

- "Colata di detriti" o "colata detritica";
- > "Lava torrentizia", che deriva dal francese "lave torrentielle";
- "Mura", che deriva dal tedesco "mure";
- ➤ "Debris torrent" (osservato nelle Alpi italiane), a indicare debris-flow incanalati, termine di transizione con i debris flood. Questi ultimi sono invece fenomeni di trasporto torrentizio che interessa miscele di tipo newtoniano (senza frazione grossolana), con movimento privo del carattere pulsativo tipico dei debris-flow;
- ➤ "Lahar": colate detritiche in materiale piroclastico.

# Par. 1.3 Caratteristiche geologiche, geomorfologiche e geotecniche

#### Par. 1.3.1 Aree idonee allo sviluppo delle colate detritiche e aspetti geologici

I requisiti di base richiesti perché si verifichi un evento di debris-flow in un'area sono pendenza accentuata, sufficiente volume di materiale detritico relativamente facile da mobilizzare e sufficiente acqua meteorica perché si inneschi il flusso. Queste caratteristiche si riscontrano in zone montuose come le Alpi, dove i conoidi e le falde sottostanti a ripide pareti rocciose sono l'ambiente ideale per l'innesco (Fig. 5). Nonostante la rigidezza e la bassa erodibilità, i calcari, le dolomie e i graniti che costituiscono queste pareti sono soggetti a processi di degradazione fisica (crioclastismo o termoclastismo) e dissoluzione chimica (carsismo) che, avendo potere disgregante, contribuiscono alla formazione di falde o conoidi. Questo materiale sottostante alle pareti rocciose può essere interessato da fenomeni di colata che si possono diffondere sia in canali preesistenti che in pendii non vegetati costituiti da ghiaia, ciottoli, blocchi.

L'apporto di acqua necessario per l'innesco del debris-flow, proveniente da precipitazioni intense e di breve durata, è garantito dalla presenza di bacini in roccia a monte dei canali di colata che presentano tempi di corrivazione molto brevi e dimensioni di qualche km². All'interno dei conoidi deposizionali si formano delle strutture sedimentarie che derivano dall'accumulo delle colate (suoli, superfici erosive, paleoalvei, lobi di accumulo, lenti o lingue).



Fig. 5: accumuli di colate di detrito ai piedi delle Canadian Rockies.

#### Par. 1.3.2 Aspetti geomorfologici, area di innesco, di trasporto e di accumulo

Dal punto di vista geomorfologico, i debris-flow scorrono su pendenze che variano dai 3° ai 20°. In sezione trasversale al flusso assumono una forma "ellittica" mentre gli argini del canale, costituiti da materiale grossolano derivante dalla colata in movimento, delimitano una forma a "V". In pianta hanno un caratteristico aspetto lobato.

I depositi sono costituiti da strati di spessore relativamente uniforme di solidi granulari in cui la frazione grossolana è disposta in modo apparentemente casuale all'interno della matrice più fine. I blocchi presenti al suo interno possono raggiungere anche dimensioni metriche. La gradazione è inversa e l'asse più lungo dei singoli clasti appiattiti è rivolto in direzione del flusso.

Il cono detritico è la forma deposizionale più frequentemente associata ai debris-flow. Esso si genera per accumulo di materiale derivante da diversi meccanismi di trasporto quali le colate, la gravità, trasporto solido selettivo e può avere uno spessore di decine di metri su pendenze dell'ordine di 3°-10° [1].

Come già detto nel Par. 1.1, in un debris-flow si riconoscono tre aree caratteristiche (Fig. 6):

- 1. Area di innesco o sorgente;
- 2. Area di trasporto (area di propagazione);
- 3. Area di accumulo o di deposito.

L'individuazione di queste aree è molto importante per una corretta pianificazione territoriale e quindi per ridurre il più possibile il rischio verso persone o cose. La presenza o meno di un canale di flusso distingue tra debris-flow canalizzati e di versante.

1. Area di innesco: si trova alla chiusura di piccoli bacini in roccia i quali presentano pendenze anche superiori ai 30°. Erosione attiva che prevale sull'abbondante quantità di detrito sciolto che può essere mobilizzato da piogge intense di breve durata. La copertura vegetale è scarsa o assente, le pendenze sono elevate, sull'ordine dei 15°-20° (Fig. 7.1);

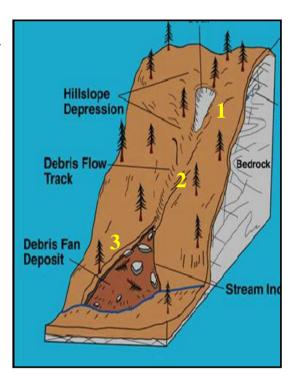
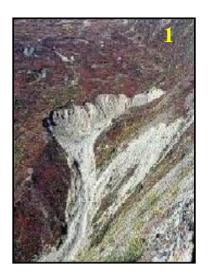


Fig. 6: aree caratteristiche di una colata detritica [2].

2. Area di trasporto: zona in cui la colata inizia a scorrere, erosione e deposizione sono circa bilanciate. Consiste generalmente in un canale dove passa il flusso che si arricchisce di materiale a differente litologia, erodendo sia il fondo che le sponde dandogli una caratteristica forma a "V". La vegetazione dipende dallo stato di attività del conoide ma in genere è scarsa, pendenze che vanno dai 10° ai 15° (Fig. 7.2);

3. Area di accumulo o di deposito: è la zona più a valle dove i processi di deposizione prevalgono sui processi erosivi. Nella sua parte superiore è spesso costituita da un canale con argini laterali le cui sponde rigide generalmente presentano una gradazione inversa, in continuità con le forme presenti nella parte inferiore della zona di trasporto. La copertura vegetale è presente in alternanza ad accumuli recenti, le pendenze sono basse (sull'ordine dei 3°-10° - Fig. 7.3).



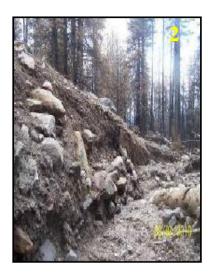




Fig. 7: area di innesco 1, di trasporto 2 e di accumulo 3 di un debris-flow.

#### Par. 1.3.3 Parametri climatici, fisici e geotecnici del fenomeno

Per capire come si comporta la colata durante il suo percorso diventa importante studiarne le proprietà reologiche. I parametri fisici, climatici e geotecnici più significativi per l'innesco e la fase di trasporto sono molti. Non essendo semplice lo studio teorico, diversi autori hanno proposto modelli empirici e reologici basati su dati di campagna e sperimentali come Takahashi (1978, 1980, 1981) che però presenta delle limitazioni e restrizioni specifiche come ad esempio lo scorrimento superficiale, terreno non coesivo, moti di filtrazione parallela al pendio, rottura bidimensionale ecc.

#### Parametri climatici

Dai dati raccolti nel corso degli anni da ricercatori è stato dimostrato che la maggior parte dei debris-flow che si sviluppano in Dolomiti sono innescati da precipitazioni di breve durata ma intense.

Caine (1980) propose una soglia pluviometrica per l'innesco di frane e colate detritiche determinata utilizzando i dati relativi ad una settantina di fenomeni avvenuti in diverse zone del mondo, caratterizzate da differenti condizioni geologiche, morfologiche e climatiche. Secondo questa relazione, il verificarsi o meno di una colata, dipende essenzialmente dall'intensità media (I) e dalla durata (D) dell'evento pluviometrico che colpisce l'area: **I=14.82D**<sup>-0.39</sup>.

I [mm/h] intensità di precipitazione;D [h] durata della precipitazione.

#### Parametri fisici- idraulici

I principali parametri fisici dei debris-flow risentono sia della distribuzione granulometrica del materiale coinvolto che della concentrazione dei solidi.

V [m/s] velocità della colata;

 $Q_s[m^3/s]$  portata solida;

 $Q_1[m^3/s]$  portata liquida;

 $\alpha$  [°] inclinazione canale;

h [m] altezza di scorrimento;

V [m<sup>3</sup>] volume trasportato.

#### Parametri geotecnici-reologici

I principali parametri geologico-tecnici che determinano e caratterizzano l'innesco delle colate detritiche riguardano principalmente le caratteristiche del fluido interstiziale e del materiale grossolano coinvolto e le forze che agiscono sull'intera massa in movimento.

 $\rho_s [kg/m^3]$  densità dei solidi;

ρ [kg/m³] densità del fluido interstiziale;

K [m/s] permeabilità;

 $\varphi$  [°] angolo d'attrito materiali;  $\Sigma$  [Pa] tensione normale al fondo;

U [Pa] pressione neutra; τ [Pa] sforzi di taglio;

 $\mu_f[kg/m*s]$  viscosità fluido interstiziale;

d [mm] dimensione caratteristica dei grani.

# CAP. 2 IL BACINO DI ACQUABONA

# Par. 2.1 Inquadramento geografico e geologico

Il sito di Acquabona, interessato dallo scorrimento delle colate detritiche, si trova nelle Dolomiti orientali poco a NNW della linea dell'Antelao, sulla sinistra orografica della valle del Boite fra gli abitati di San Vito di Cadore e Cortina d'Ampezzo in provincia di Belluno (Fig. 8).

La quota del bacino di ritenzione dei sedimenti è di 1125 m s.l.m. e le sue coordinate U.T.M. sono E 33T 282330 m N 5154015 m (Fig. 9) mentre la massima elevazione del bacino di roccia è 2667 m s.l.m. con pendenza media di circa 43° [6].

Il bacino di colata si trova sul versante sud-occidentale sottostante al massiccio del Sorapiss (3205 m s.l.m.) e lo percorre per circa 1600 m dall'area di innesco fino alla zona di deposizione.



Fig. 8: inquadramento geografico del sito di Acquabona.



Fig. 9: localizzazione del bacino di ritenzione.

Dal punto di vista geologico le Dolomiti rappresentano una zona con delle caratteristiche particolari tanto da essere riconosciuta come patrimonio dell'Unesco, differenziandosi così dal resto delle Alpi. Sono collocate nella parte sud-orientale della catena alpina.

La storia genetica delle Dolomiti è quanto mai complessa e prolungata nel tempo. La maggior parte delle rocce che ne costituiscono l'articolata stratigrafia si formarono nell'arco temporale compreso tra la fine del Paleozoico (Permiano) e la fine del Mesozoico (Cretacico): stiamo parlando quindi di più di 150 Ma. Questo senza considerare che il processo di evoluzione, caratterizzato da innalzamento, deformazione ed erosione, è continuato fino ai giorni nostri (e continua tuttora).

Durante l'orogenesi alpina (Miocene Sup.-Pliocene, 10-2 Ma), i sedimenti di bacino formatisi

lateralmente alle scogliere e ai blocchi calcareo-dolomitici durante il Triassico (250-200 Ma) e Giurassico (200-145 Ma) fino al Miocene, non sono stati interessati da processi metamorfici, a differenza della maggior parte dell'arco alpino nelle zone a nord e a ovest del lineamento insubrico (Fig. 10) [7].

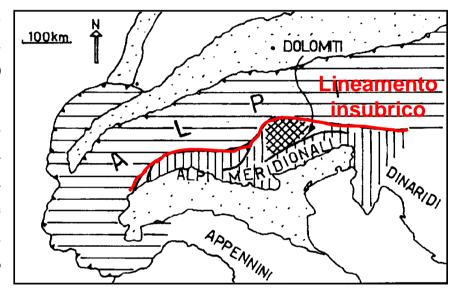


Fig. 10: tettonica: la linea rossa delimita il lineamento insubrico che separa le Alpi meridionali dal resto della catena [5].

Le scogliere calcareo-dolomitiche, a differenza del materiale depositatosi lateralmente ad esse in milioni di anni, non sono state interessate in maniera significativa dall'esarazione glaciale attiva soprattutto nel Pleistocene (1,8 Ma-10000 a) a causa della loro rigidezza e scarsa erodibilità. Una volta ritirate le lingue glaciali, negli ultimi 10000 anni, le valli ormai prive di sedimento sono state riempite da materiale di origine diversa (depositi glaciali, frane, alluvioni) generando così la conformazione topografica attualmente presente.

Nel sito di monitoraggio in esame sono state riscontrate tre principali formazioni geologiche: i depositi di versante, la Dolomia Principale e la Formazione di Raibl; in Fig. 11 sono rappresentate in sezione stratigrafica, mentre in Fig. 12 segnate in carta nel bacino del rio Acquabona.

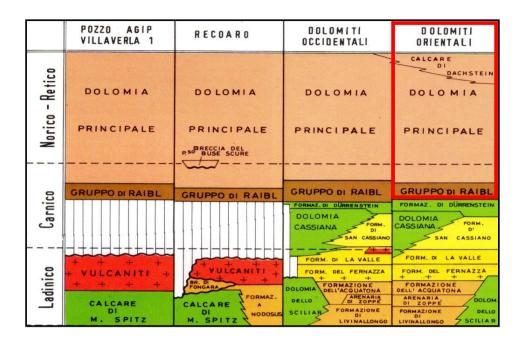


Fig. 11: schema stratigrafico delle formazioni geologiche presenti nel sito di Acquabona. Il tratteggio orizzontale indica le lacune stratigrafiche [7].

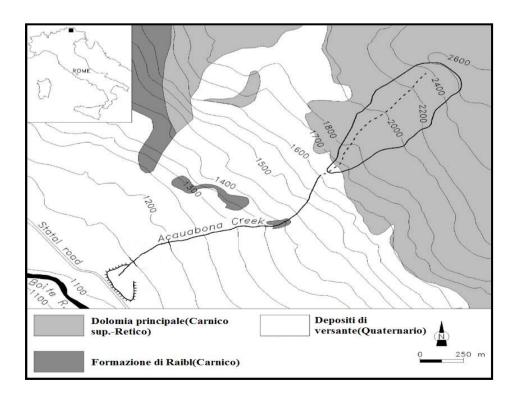


Fig. 12: formazioni geologiche sopra descritte: localizzazione in carta nel sito di Acquabona [4].

<u>Dolomia Principale (Carnico sup.-Retico)</u>: formata da un importante pacco di strati dolomitici e calcareo-dolomitici che si sono deposti in ambiente tidale, in parte stromatolitici e ricchi di megalodonti [7]. Nel bacino di Acquabona essa affiora sopra i 1600-1700 m s.l.m. a seconda della copertura sedimentaria quaternaria (Fig. 13).



Fig. 13: formazione della Dolomia Principale.

*Formazione di Raibl:* questa sottile unità è formata da arenarie e peliti varicolori, con larga dominanza del rosso. Vi si associano conglomerati, dolomie, dolomie oolitiche e gessi di ambiente da continentale a lagunare [7]. Affiora sulla destra orografica del canale di colata tra 1300 m s.l.m. e 1350 m s.l.m. e all'interno dello stesso tra 1350 m s.l.m. e 1450 m s.l.m. (Fig. 14).



Fig. 14: affioramento della Formazione di Raibl.

<u>Depositi di versante (Quaternario)</u>: composti prevalentemente da materiale granulare con blocchi da dimensioni metriche fino a limi e argille movimentati per brevi distanze da colate o fenomeni di trasporto selettivo. Si depositano in conoidi e falde detritiche alla base di pareti rocciose in seguito a fenomeni di disgregazione delle litologie presenti fino ad arrivare all'alveo del fiume Boite (Fig. 15).



Fig. 15: depositi di versante.

# Par. 2.2 Geomorfologia dell'area

Il bacino di drenaggio in roccia, posto al di sopra dei depositi di versante che costituiscono il conoide di deiezione presente, si estende su una superficie limitata, con un dislivello tra la quota massima e minima di circa 1000 m e una pendenza media molto elevata.

La permeabilità delle rocce, soprattutto a causa dell'elevata fessurazione, è molto alta e insieme ai parametri descritti in Tab. 5, determinano un tempo di corrivazione alla sezione di chiusura molto limitato in corrispondenze di piogge ad elevata intensità. I debris-flow hanno così la possibilità di coinvolgere grandi quantitativi d'acqua in breve tempo su superfici limitate.

.

In tabella 5 sono riportati i principali parametri morfometrici del bacino in roccia.

Area	$0.27 \text{ km}^2$
Quota massima	2667 m s.l.m.
Quota minima	1650 m s.l.m.
Pendenza media	43°
Lunghezza della linea di drenaggio principale	1100 m
Lunghezza dell'asse minore	400 m
Fattore di forma	2,5
Esposizione	SW
Litologia	Dolomia

Tab. 5: principali parametri morfometrici del bacino in roccia [1].

Al di sotto del bacino in roccia è presente il canale di colata che presenta un dislivello tra la quota massima e minima di circa 500 m con una pendenza media elevata. In seguito sono elencati i parametri morfometrici principali del canale stesso (Tab. 6).

Lunghezza	1632 m
Pendenza media	18°
Quota massima	1650 m s.l.m.
Quota minima	1140 m s.l.m.
Litologia	Depositi quaternari e Formazione di Raibl

Tab. 6: caratteristiche morfometriche del canale di scorrimento [1].

La parte finale del canale di colata corrisponde all'area di deposito, con una pendenza media piuttosto bassa e con dislivello inferiore ai 20 m. I parametri morfometrici relativi a questa zona sono riportati in Tab. 7. In Fig. 16 è riportato l'evento del 18 luglio 2009.

Quota massima	1140 m s.l.m.
Quota minima	1125 m s.l.m.
Lunghezza	120 m
Larghezza	70 m
Pendenza media	7°

Tab. 7: parametri morfometrici della zona di deposito [1].

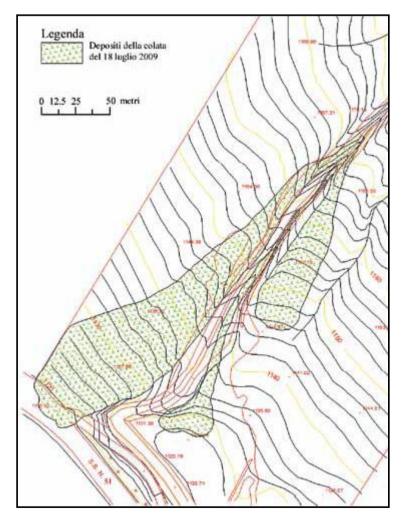


Fig. 16: mappa geomorfologica della colata del 18 luglio 2009 sul rio Acquabona [8].

#### Par. 2.3 Il bacino delle colate

#### Par. 2.3.1 Area d'innesco

L'area di innesco è localizzata al di sotto del bacino in roccia (Fig. 17), circa alla sua sezione di chiusura, fra le quote 1550 m s.l.m. e 1650 m s.l.m. [1]. I debris-flow vengono innescati prevalentemente da fenomeni di tipo "firehose", ovvero delle bombe d'acqua che provengono dalle pareti rocciose soprastanti gli accumuli di detrito organizzato in falde. L'apporto di queste grandi quantità d'acqua in breve tempo, specialmente su depositi già parzialmente saturati e disposti su pendenze elevate, determina la mobilitazione di grandi volumi di materiale sciolto.



Fig. 17: localizzazione dell'area di innesco.

# Par. 2.3.2 Canale del debris-flow o di trasporto

Il canale di trasporto, che va da circa 1600 m s.l.m. a 1140 m s.l.m. è fortemente inciso soprattutto a monte, nel detrito di versante e su depositi di antichi debris-flow dove le pendenze si aggirano tra i 20° e 30°. Spesso si notano fenomeni gravitativi superficiali che contribuiscono a fornire materiale nella parte terminale della zona di trasporto dove le pendenze sono minori (circa 10°-15°).

Ai lati del canale si notano alcuni massi di notevoli dimensioni che, insieme ad altri materiali con diverse caratteristiche geotecniche e reologiche come il detrito di falda, marne, siltiti, peliti della Formazione di Raibl, possono influenzare il comportamento della colata. A seconda della sua viscosità è possibile determinarne la velocità, tenendo conto anche del volume di materiale coinvolto ad ogni singolo evento.

La parte iniziale della zona di scorrimento (Fig. 18), compresa tra le quote 1600 m s.l.m. e 1300 m s.l.m., con una pendenza più elevata rispetto al tratto finale, è incisa significativamente nei depositi di versante (gli argini presentano pendenze importanti dell'ordine di 40°-50°). Questi depositi, insieme alle rocce e terreni della Formazione di Raibl ben visibili nel canale, vengono inglobati dal debris-flow in avanzamento per erosione laterale e ruscellamento; da notare l'assenza quasi totale dei depositi sul fondo. In questo segmento, inoltre, è presente una curva delimitata dalla Formazione di Raibl da un lato e dal conoide di deiezione dall'altro.

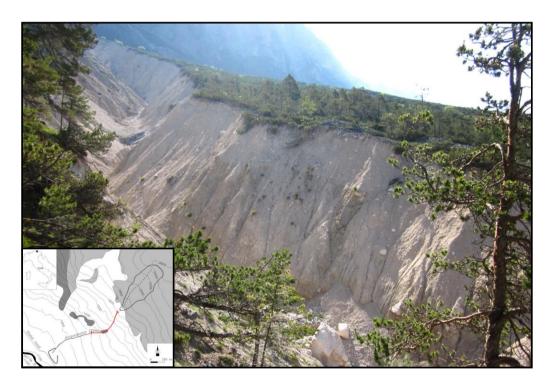


Fig. 18: tratto iniziale della zona di scorrimento. Notevole la profondità del canale.

Nella parte finale del tratto di propagazione delle colate (Fig. 19) che va da 1300 m s.l.m. a 1140 m s.l.m., sono presenti zone di erosione, zone di accumulo di detrito e strozzature generate dalla presenza di grandi massi. Rispetto al tratto iniziale, gli argini presentano pendenze minori e il canale è riempito dai depositi presenti alternandosi ad incisioni più o meno profonde.

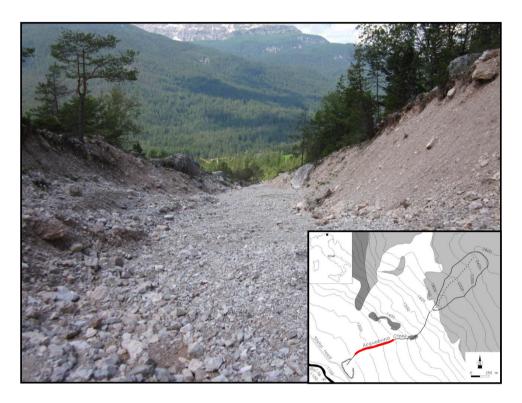


Fig. 19: tratto finale dell'area di scorrimento. Canale meno profondo rispetto alla zona precedente.

#### Par. 2.3.3 Area di accumulo

Il deposito terminale è confinato da un bacino di ritenuta dei sedimenti (Fig. 20), costruito all'inizio degli anni '80 per proteggere la sottostante S.S. 51 di Alemagna dalle colate detritiche, evitando così il possibile coinvolgimento delle automobili e persone che transitano lungo questa strada.

I depositi presenti hanno una forma per la maggior parte lobata, con granulometria eterogenea prevalentemente grossolana in quanto il fine viene dilavato. Si nota la presenza del "rigid plug" e materiale grossolano sul fronte e in corrispondenza degli argini mentre non si riscontrano strutture sedimentarie o stratificazioni.

La maggior parte dei sedimenti, prima di arrivare in questa zona, si ferma temporaneamente all'interno del canale, e viene successivamente rimossa e trasportata nel bacino di ritenzione (Fig. 22).

Per impedire alla colata di seguire un percorso non corretto ed eventuali tracimazioni sono stati costruiti degli argini artificiali (Fig. 21) anche se questi non impediscono del tutto la fuoriuscita del materiale dal letto, soprattutto nei punti in cui il fondo dell'alveo si è alzato e gli argini sono meno elevati. L'accumulo dei depositi che raggiungono il bacino viene regolarmente rimosso e trasporto altrove con dei camion.



Fig. 20: bacino di ritenuta dei sedimenti.

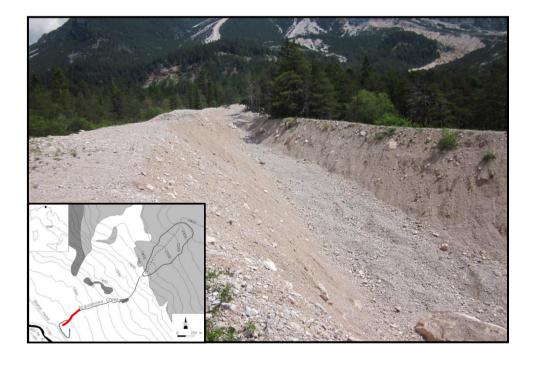


Fig. 21: argini artificiali per evitare le tracimazioni.



Fig. 22: depositi nella parte terminale del canale prima di entrare nel bacino di ritenuta.

#### Par. 2.4 Sistema di monitoraggio del sito

Il monitoraggio del rio Acquabona consente di osservare e caratterizzare fisicamente le diverse fasi di innesco, movimento e arresto delle colate detritiche tipiche delle aree dolomitiche.

I parametri più comunemente misurati forniscono informazioni sulle condizioni idrologiche all'innesco, sulle proprietà dinamiche e sui processi di arresto del flusso. Per raccogliere questi dati sono necessari dei sistemi di monitoraggio automatici visto che i parametri che descrivono questo fenomeno sono molto variabili nel tempo, anche durante un unico evento. Inoltre le colate si producono generalmente in aree poco frequentate e di difficile accesso.

Nel 1997, in collaborazione con l'USGS, si è deciso così di installare nel canale di Acquabona, percorso con frequenza annuale da debris-flow, un primo sistema di monitoraggio M1 composto da tre stazioni posizionate rispettivamente nella zona di innesco delle colate (S1 M1; 1565 m s.l.m.), nel tratto superiore (S2 M1; 1310 m s.l.m.) e nella parte inferiore (S3 M1; 1175 m s.l.m.) del canale di trasporto (Fig. 27).

Stazione S1 M1: è equipaggiata da un pluviometro, un geofono ed un sistema video (composto da videocamera che inquadra il deposito all'interno del canale) e da quattro trasduttori di pressione dell'acqua sul fondo [8];

Stazione S2 M1: è dotata di tre geofoni e un anemometro [8];

Stazione S3 M1: comprende tre geofoni, una cella di misura della pressione totale sul fondo, un sensore ad ultrasuoni, un trasduttore di pressione dell'acqua, un sistema video di registrazione, un'antenna radio ricevente e trasmittente e un'unità di analisi dei dati [8].

Nel 2000 si è deciso di modificare il sistema di monitoraggio M1 e così entrò in funzione un secondo sistema più sviluppato chiamato M2 che presentava comunque lo stesso numero di stazioni di M1: la prima (S1 M2; 1565 m s.l.m.) posizionata nello stesso posto della stazione S1 M1 e dotata circa degli stessi strumenti, la seconda (S2 M2; 1175 m s.l.m.) in corrispondenza della S3 M1 con aggiunta di un piezometro e un geofono e la terza (S3 M2; 1120 m s.l.m.) posta sopra al bacino artificiale di ritenzione dei sedimenti (Fig. 27). Quest'ultima è stata equipaggiata con un trasduttore di pressione dell'acqua, un sistema di misura della pressione totale, un misuratore di distanza ad ultrasuoni e un sistema video di registrazione. Una volta acquisiti, i dati venivano trasmessi via radio ad una stazione situata vicino al sito di monitoraggio studiato.

In seguito all'evento del 18 luglio 2009 (vedi Fig. 16) le stazioni di monitoraggio presenti furono danneggiate e sostituite dalle due attualmente in uso sul rio Acquabona (M3). La prima S1 M3 (Fig. 23) è situata a 1715 m s.l.m. (Fig. 27), si trova al di sopra dell'area di innesco delle colate ed è stata installata per la misurazione e trasmissione di dati relativi a precipitazione, temperatura dell'aria, direzione del vento, umidità relativa e pressione atmosferica (Fig. 24).

La seconda stazione S2 M3 (Fig. 25) è stata posta poco più a monte rispetto alla posizione di S3 M1 o S2 M2 ad una quota di 1185 m s.l.m. (Fig. 27). E' costituita da un braccio metallico tenuto in equilibrio da una gabbia contenente dei sassi, ancorata ad un grande masso che si trova in sinistra orografica del canale. All'estremità di questo braccio si trova la strumentazione costituita da un pluviometro, un misuratore di distanza ad ultrasuoni, un sistema video ad infrarossi per riprendere anche di notte e un'antenna radio per ricevere i dati provenienti dalla stazione di monte (Fig. 26). Risulta possibile inoltre controllare in via remota i dati registrati dal processore tramite internet ad alta velocità [8].

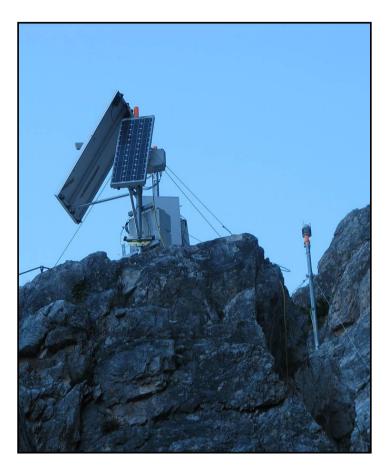


Fig. 23: stazione di monitoraggio a monte S1 M3 [8].

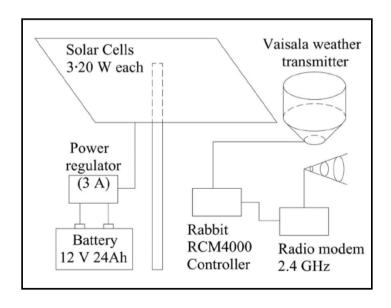


Fig. 24: schema generale della strumentazione S1 M3 [8].



Fig. 25: stazione di monitoraggio S2 M3.

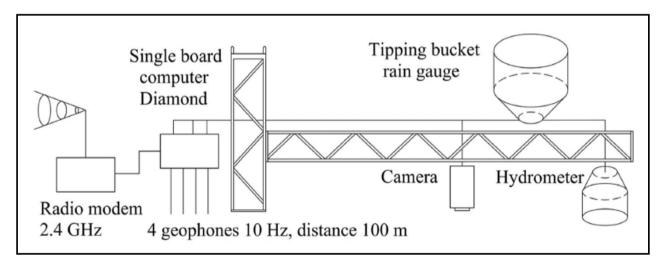


Fig. 26: schema generale della strumentazione in S2 M3 [8].

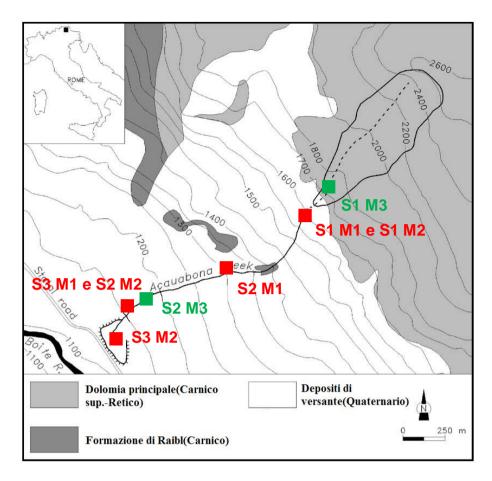


Fig. 27: posizione delle stazioni dei sistemi di monitoraggio installate nel 1997 (M1), nel 2000 (M2) e nel 2009 (M3).

Il monitoraggio in sito del rio Acquabona è stato particolarmente intenso e fruttuoso soprattutto attorno agli anni Duemila. Sono state registrate varie colate e descritte le proprietà dei materiali che le costituiscono: informazioni particolarmente importanti per la formulazione dei modelli concettuali e numerici del fenomeno.

L'acquisizione dei dati in tempo reale risulta molto importante perché permette di creare sistemi di allarme che si attivano quando gli strumenti registrano valori critici per l'innesco dei debris-flow, risultando, insieme ad altri metodi passivi, un buon meccanismo per limitare il più possibile rischi alle persone e strutture.

# 3. FOTO AEREE PER L'UTILIZZO DEL SOFTWARE ARCGIS

# Par. 3.1 Elaborazione statistica dei dati relativi ai canali di colata e ai bacini idrografici di alimentazione limitrofi al sito in esame

#### Par. 3.1.1 Fasi di lavoro

In questo paragrafo viene presentata l'attività svolta per descrivere alcuni parametri geomorfologici e statistici legati ai canali di colata e ai bacini presenti nell'area del sito di Acquabona.

Tramite l'utilizzo di foto aeree georeferenziate su una base topografica sono stati individuati e segnati in carta i principali canali di colata sia attivi che non attivi e i loro rispettivi bacini idrografici di alimentazione. Con i dati ottenuti è stata poi svolta un'elaborazione statistica sui parametri geomorfologici e morfometrici individuati.

Il software ArcGis che si è deciso di utilizzare include al suo interno ArcMap e ArcCatalog.

Questo programma Gis, acronimo di Geographic Information Systems è un sistema per la gestione, l'analisi e la visualizzazione di informazioni con contenuto geografico/spaziale. Consente di assegnare ad un file un'informazione geografica in modo da poterlo posizionare all'interno di un sistema di coordinate facente riferimento ad un preciso datum il quale, con la sua forma ad elissoide, approssima la superficie terrestre, definendo le dimensioni del semiasse maggiore e minore, lo schiacciamento polare, l'orientamento e l'azimut. Il datum può essere scelto arbitrariamente ma va tenuto in considerazione che ad esempio quello utilizzato in Italia (Roma 40) rende minimo lo scostamento tra elissoide e geoide (solo in Italia, quindi in un'area limitata).

Il processo di georeferenziazione consiste nel far coincidere i punti di un file privo di coordinate geografiche con i punti di un altro file posizionato nello spazio e facente riferimento ad un datum specifico. Risulta così necessario definire, sul file da georeferenziare, dei punti di controllo fissi come ad esempio edifici, vertici del foglio cartografico, intersezioni facilmente visibili, punti trigonometrici ecc. Questi punti, chiamati control point, vanno fatti coincidere esattamente con la loro posizione reale, che dipende dal sistema di riferimento scelto e dal file raster di coordinate note. La maggior difficoltà nello svolgere questa operazione si ha quando i file da georeferenziare sono foto aeree perché in molti casi esse non coincidono perfettamente con la superficie topografica di base a causa della loro distorsione (a meno che non siano pressoché verticali). Per risolvere questo problema bisogna distribuire equamente i punti fissi sull'immagine in modo tale che il programma, tramite delle trasformazioni polinomiali, riesce a distorcere la stessa facendola coincidere il più fedelmente possibile con il file raster già posizionato nello spazio.

Il processo di georeferenziazione permette quindi di posizionare nello spazio dei file specifici i quali saranno poi utili per l'individuazione delle forme presenti.

Dal geoportale del sito della Regione del Veneto e dall'ufficio cartografico situato a Mestre (Ve) sono state recuperati i seguenti file:

- C.T.R. del Veneto in scala 1:10000 in formato TIFF elementi 029060, 029070, 029100, 029110;
- Foto aeree della zona interessata in formato TIFF (raster) relative all'anno 2006.

Il sistema di coordinate proiettate utilizzato è l'U.T.M.-zona 33N-proiezione U.T.M. di Mercatore e fa riferimento al datum WGS 84. Le sue caratteristiche sono [9]:

- 1- Elissoide WGS 84;
- 2- Utilizzo della proiezione di mercatore;
- 3- Suddivisione del globo in 60 fusi e 20 fasce;
- 4- Falsa origine di 500000 m per evitare i numeri negativi;
- 5- Coordinata X è la distanza in metri dal meridiano centrale del fuso;
- 6- Coordinata Y è la distanza in metri dall'equatore.

Terminata la georeferenziazione delle foto aeree sono state segnate in carta le tracce dei canali attivi e non, utilizzando le immagini TIFF del 2006 a disposizione. A monte dei principali canali attivi sono stati individuati nove bacini idrografici con i loro rispettivi reticoli (Fig. 28) facendo riferimento in questo caso alla base topografica in quanto, a causa dell'elevata pendenza di alcune zone, si sono riscontrati problemi di georeferenziazione. Per l'individuazione dei canali di colata (Fig. 29) si è fatto ricorso all'interpretazione personale delle foto aeree georeferenziate.

Per ogni bacino è stata individuata la relativa sezione di chiusura da cui si è partiti per la delimitazione del perimetro del bacino stesso (seguendo la normale alle isoipse). Per definire il reticolo idrografico invece sono state individuate le principali linee di deflusso superficiale facendo riferimento alla base topografica.

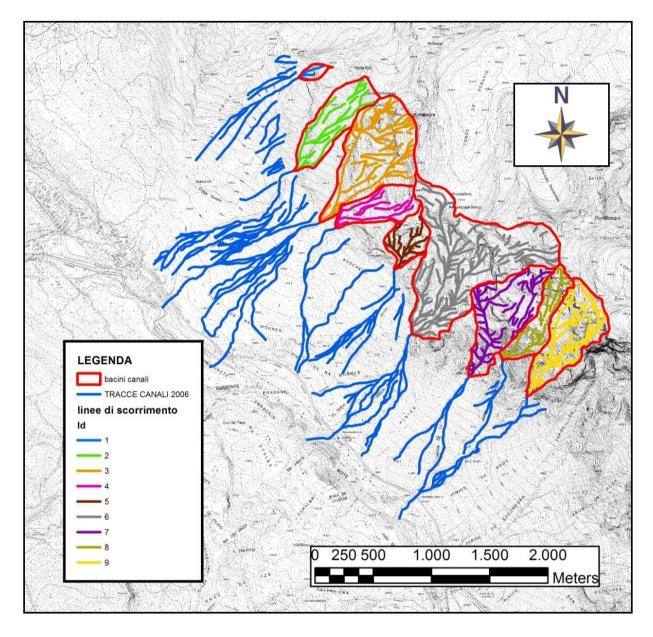


Fig. 28: con il software ArcGis sono stati tracciati in carta i nove bacini idrografici che alimentano i principali canali attivi e i loro rispettivi reticoli di drenaggio.

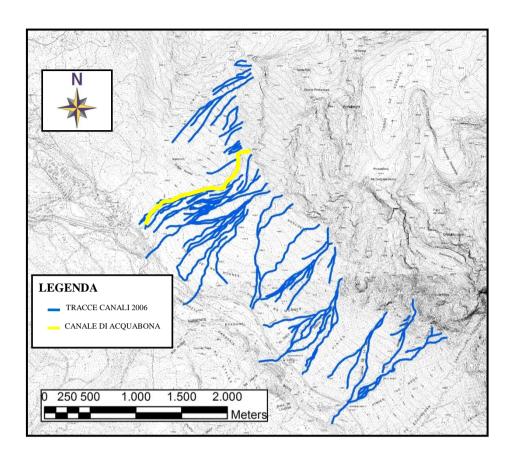


Fig. 29: si può notare come la parte sommitale dei canali si trovi al piede delle pareti rocciose e come la distribuzione degli stessi a ventaglio generi le conoidi di deiezione.

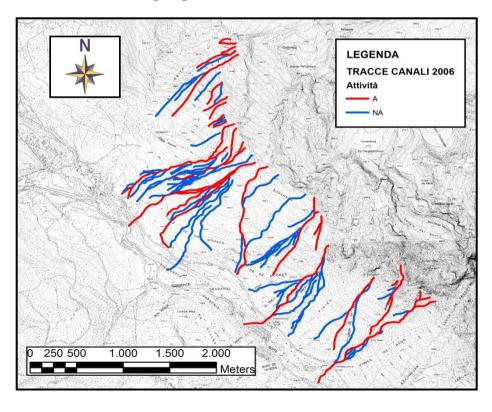


Fig. 30: in rosso sono segnati i canali considerati attivi mentre in blu quelli non attivi.

#### Par. 3.1.2 Misurazione e determinazione dei dati

Dopo aver svolto le operazioni descritte nel precedente paragrafo sono stati determinati i parametri caratterizzanti i canali di colata, i bacini e le relative reti idrografiche. Alcuni vengono ricavati o misurati tramite l'utilizzo del programma ArcGis, altri calcolati con delle tabelle create con Excel.

# Parametri dei canali di colata

- L [m] lunghezza misurata sul piano x, y del percorso effettivo compiuto dal canale di colata;
- 1 [m] distanza sul piano x, y tra punto iniziale e finale della traccia;
- Δc [m] dislivello tra punto iniziale e finale della traccia (differenza tra quota max. e min.);
- Q<sub>m</sub> [m s.l.m.] quota media della traccia (semisomma tra quota massima e minima);
- $i_m[^{\circ}]$  inclinazione media della traccia (rapporto tra  $\Delta c$  e I);
- T [%] tortuosità della traccia calcolata con la seguente formula:

$$T = \frac{L - l}{l} * 100$$

La tortuosità dei canali indica quanto è diversa la lunghezza (L) rispetto alla distanza tra punto iniziale e finale della traccia (l). Si ha valore 0 se queste due lunghezze coincidono;

a [-] attività del canale. Per canali attivi, A, si intendono quelli interessati recentemente da eventi di colata, privi di vegetazione all'interno dell'alveo e che non manifestano segni di ossidazione del materiale presente al loro interno. Questo lo si può notare dalla colorazione in foto aerea (Fig. 31).

Per canali inattivi, NA, si intendono invece quelli caratterizzati dalla presenza di vegetazione al loro interno, una ossidazione del materiale e argini poco evidenti (Fig. 32). Sono stati considerati attivi (A) anche quei canali che lo sono solo parzialmente, in genere nella parte apicale, mentre quelli non attivi (NA) lo sono per tutta la loro lunghezza.

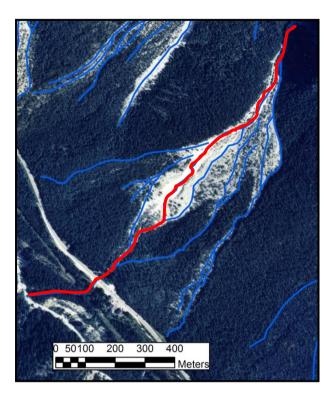


Fig. 31: in rosso è segnato un esempio di canale attivo. Viene definito non attivo il resto dei canali della conoide.

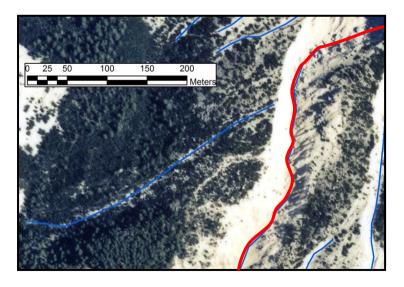


Fig. 32: in blu il canale considerato non attivo e in rosso quello attivo.

# Parametri dei bacini e relative reti idrografiche a monte dei canali attivi

L<sub>d</sub> [m] lunghezza del reticolo di drenaggio sul piano x, y (somma della lunghezza

dei tratti che costituiscono la rete idrografica);

P [m] perimetro del bacino idrografico sul piano x, y;

A [m<sup>2</sup>] area del bacino idrografico sul piano x, y;

Q<sub>max</sub> [m s.l.m.] quota massima del bacino;

Q<sub>min</sub> [m s.l.m.] quota minima del bacino;

Δb [m] dislivello del bacino (differenza tra quota massima e minima);

Esp [°] esposizione indicativa del bacino;

L<sub>A.P.</sub> [m] lunghezza dell'asta principale del reticolo idrografico sul piano x, y;

D<sub>D</sub> [1/m] densità di drenaggio del bacino idrografico (rapporto tra la lunghezza totale del reticolo idrografico e la superficie del bacino [8]):

$$D_D = \frac{\sum_{i=1}^{N_u} L_{u,i}}{A}$$

Indica quanto è ramificato il bacino. Per alti valori di  $D_D$  si hanno bacini costituiti da terreni impermeabili mentre per valori bassi (scarsa ramificazione del sistema di drenaggio) i terreni risultano permeabili;

 $F_D$  [1/m<sup>2</sup>] frequenza di drenaggio del bacino idrografico (rapporto tra il numero totale di segmenti del reticolo idrografico e l'area del relativo bacino [8]):

$$F_{D} = \frac{\sum_{u=1}^{k} N_{u}}{\Delta}$$

Esprime quanti elementi della rete idrografica sono presenti nel bacino, indipendentemente dalla loro lunghezza;

 $I_{M}$ [-] invariante di Mellor (rapporto tra la frequenza di drenaggio e il quadrato della densità di drenaggio [8]):

$$I_{M} = \frac{F_{D}}{D_{D}^{2}}$$

Indica se un bacino è maturo (sviluppato) o immaturo (in fase di formazione);

R<sub>KG</sub> [-] fattore di forma di Gravelius (rapporto tra il perimetro del bacino e la circonferenza del cerchio avente la stessa area del bacino) [8]:

$$R_{KG} = \frac{P}{\pi * D} = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Fornisce informazioni sulla compattezza del bacino. A seconda del valore a cui tende il coefficiente la forma del bacino si presenta in modo diverso (tondeggiante, ovale rotonda, ovale allungata, ecc.);

R<sub>KH</sub> [-] indice di forma di Horton (rapporto tra l'area del bacino e il quadrato della lunghezza dell'asta principale [8]):

$$R_{KH} = \frac{A}{L_{A.P.}^2}$$

R<sub>K</sub> [-] indice di forma (rapporto tra la lunghezza dell'asta principale del reticolo e il diametro del cerchio avente la stessa area del bacino [8]):

$$R_K = \frac{L_{A.P.}}{D} = 0.89 * \frac{L_{A.P.}}{\sqrt{A}}$$

- $N_C$  [-] numero dei canali a valle di ogni singolo bacino che appartengono al sistema conoide ad esso associato;
- L<sub>c</sub> [m] lunghezza totale dei canali sopra citati sul piano x, y.

# Par. 3.1.3 Analisi statistica dei parametri sopra descritti

In questo paragrafo viene riportato un esempio delle tabelle utilizzate per raccogliere i dati relativi ai canali (Tab. 8) e ai bacini idrografici con le loro reti di drenaggio (Tab. 9). Successivamente vengono visualizzati dei grafici che permettono di comprendere meglio il significato dei parametri ricavati.

Id	L [m]	l [m]	Δc [m]	a [-]	i <sub>m</sub> [rad]	<b>i</b> <sub>m</sub> [°]	T [-]	Q <sub>max</sub> [m s.l.m.]	Q <sub>min</sub> [m s.l.m.]	Q <sub>m</sub> [m s.l.m.]
0	1610	1424	520	1	0,35	20,1	13,1	1640	1120	1380
1	298	295	185	1	0,56	32,1	1,0	1745	1560	1653
2	255	246	125	1	0,47	26,9	3,7	1495	1370	1433
3	369	341	150	1	0,41	23,7	8,2	1575	1425	1500
4	90	88	35	1	0,38	21,7	2,3	1535	1500	1518

Tab. 8: dati relativi ai canali di colata tracciati in carta.

	A [m <sup>2</sup> ]	P [m]	L <sub>d</sub> [m]	N <sub>c</sub> [-]	L <sub>c</sub> [m]	D <sub>D</sub> [1/m]	R <sub>KG</sub> [-]	R <sub>KH</sub> [-]
1	236768	2382	3901	25	8444	0,016	1,37	0,40
2	480326	3186	8653	10	8133	0,018	1,29	0,28
3	168003	1898	2805	2	1891	0,017	1,30	0,24
4	117240	1571	2154	8	3448	0,018	1,28	0,36
••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••

R <sub>K</sub> [-]	F <sub>D</sub> [1/m <sup>2</sup> ]	I <sub>M</sub> [-]	L <sub>A.P.</sub> [m]	Esp [°]	Q <sub>max</sub> [m s.l.m.]	Q <sub>min</sub> [m s.l.m.]	Δb [m]
1,59	0,00007	0,25	773,5	225	2630	1640	990
1,88	0,00011	0,33	1300,5	225	2845	1535	1310
2,03	0,00007	0,23	830,5	245	2640	1570	1070
1,67	0,00012	0,35	571,0	200	2555	1665	890
••••		••••	••••	••••	••••	•••••	

Tab. 9: dati relativi ai bacini dei canali attivi principali.

#### Risultati ottenuti per i canali segnati in carta

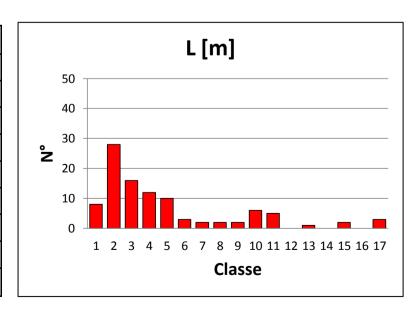
Dalla tabella 10, dove vengono riassunti i valori calcolati sui circa 100 canali tracciati in carta (vedi Allegato 1), si può notare come la differenza tra valori massimi e minimi sia elevata, in conseguenza della forte variabilità dei valori dei parametri ottenuti per i canali individuati. Per ridurre questo effetto verrà successivamente fatta una distinzione tra canali attivi (A) e non attivi (NA) ma per il momento li tratteremo ancora tutti assieme.

	L [m]	l [m]	Δc [m]	<b>i</b> <sub>m</sub> [°]	T [%]	Q <sub>m</sub> [m s.l.m.]
MAX	1667,0	1537,0	615,0	39,6	38,3	2035,0
MIN	45,0	44,0	15,0	9,3	0,0	1140,0
MEDIA	438,2	412,4	157,7	20,7	4,7	1383,0
σ	392,4	357,6	135,5	7,9	5,0	203,0

Tab. 10: riassunto dei parametri morfometrici principali dei circa cento canali tracciati in carta.

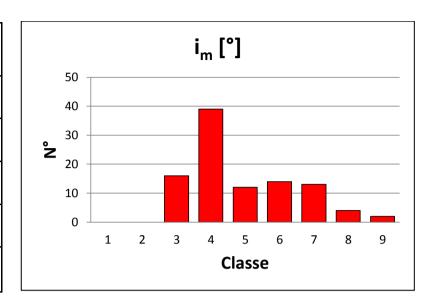
Gli istogrammi seguenti (Graf. 1, 2, 3, 4, 5) contengono i valori di alcuni parametri considerati distribuiti in classi di frequenza. In ordinata non è stata inserita la frequenza relativa bensì il numero di canali che ricade nelle varie classi di frequenza (intervalli definiti dall'operatore) in quanto sono casualmente cento.

classi	L [m]	classi	L [m]
1	0-100	10	901-1000
2	101-200	11	1001-1100
3	201-300	12	1101-1200
4	301-400	13	1201-1300
5	401-500	14	1301-1400
6	501-600	15	1401-1500
7	601-700	16	1501-1600
8	701-800	17	1601-1700
9	801-900		



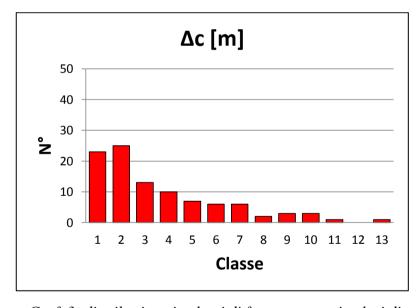
Graf. 1: distribuzione in classi di frequenza per i valori della lunghezza misurata sul piano x, y (L).

classi	<b>i</b> <sub>m</sub> [°]	classi	<b>i</b> <sub>m</sub> [°]
1	0-5	6	25,1-30
2	5,1-10	7	30,1-35
3	10,1-15	8	35,1-40
4	15,1-20	9	40,1-45
5	20,1-25		



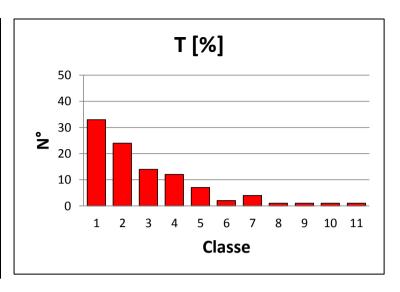
Graf. 2: distribuzione in classi di frequenza per i valori dell'inclinazione media  $(i_m)$ .

classi	Δc [m]	classi	Δc [m]
1	0-50	8	351-400
2	51-100	9	401-450
3	101-150	10	451-500
4	151-200	11	501-550
5	201-250	12	551-600
6	251-300	13	601-650
7	301-350		



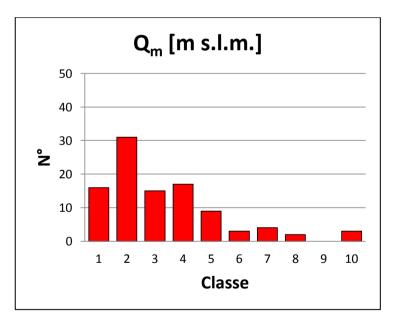
Graf. 3: distribuzione in classi di frequenza per i valori di dislivello dei canali ( $\Delta c$ ).

classi	T [%]	classi	T [%]
1	0-2	7	12,1-14
2	2,1-4	8	14,1-16
3	4,1-6	9	16,1-18
4	6,1-8	10	18,1-20
5	8,1-10	11	20,1-40
6	10,1-12		



Graf. 4: distribuzione in classi di frequenza per i valori di tortuosità relativa (T).

classi	Q <sub>m</sub> [m s.l.m.]	classi	Q <sub>m</sub> [m s.l.m.]
1	1100-1200	6	1601-1700
2	1201-1300	7	1701-1800
3	1301-1400	8	1801-1900
4	1401-1500	9	1901-2000
5	1501-1600	10	2001-2100



Graf. 5: distribuzione in classi di frequenza per i valori di quota media  $(Q_m)$ .

Si analizzano ora le relazioni che intercorrono tra i parametri descritti in precedenza, eseguendo delle regressioni lineari semplici e multiple sui dati a disposizione. Utilizzando il software Statgraphics, dopo aver specificato qual è la variabile dipendente e quali quelle indipendenti si stabilisce la combinazione che meglio rappresenta la variabilità totale dei dati tramite un coefficiente di determinazione (R<sup>2</sup>). Viene definita inoltre una relazione lineare che presenta questa forma:

$$\dot{y} = a_0 + a_1 * x_1 + a_2 * x_2 + \dots + a_n * x_n$$

- y variabile dipendente;
- x<sub>1,2...n</sub> variabili indipendenti (predittori);
- a<sub>0</sub> intercetta della retta;
- a<sub>1,2,...n</sub> coefficienti (repressori) delle variabili indipendenti (predittori). Rappresentano i coefficienti angolari delle rette che si otterrebbero facendo variare il predittore corrispondente e mantenendo gli altri costanti.

Considerando l'equazione in senso geometrico, essa rappresenta una retta in due dimensioni se si considera una sola variabile indipendente, un piano in tre dimensioni se si hanno due variabili indipendenti e un iperpiano nello spazio multi-dimensionale se le variabili indipendenti sono più di due.

Il coefficiente di determinazione, R<sup>2</sup>, (variabile tra 0 e 100) è definito dal seguente rapporto [11]:

$$R^{2} = \frac{\sum_{i} (\dot{y}_{i} - \overline{y})^{2}}{\sum_{i} (y_{i} - \overline{y})^{2}} * 100$$

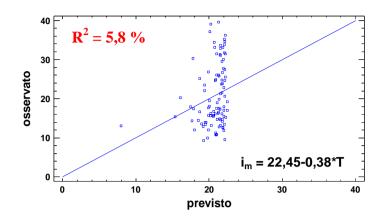
- y

  i valori del modello;
- $\overline{y}$  media dei valori;
- y<sub>i</sub> valori sperimentali;
- i numero di osservazioni.

Esso, attraverso l'equazione lineare appena descritta, ci da quindi un'idea di quanto bene il modello rappresenti la variabilità dei dati a nostra disposizione.

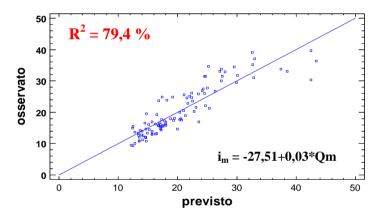
Nei grafici riportati di seguito (Graf. 6, 7, 8, 9, 10, 11) si è deciso di scegliere come variabile dipendente la pendenza media  $i_m$  e come variabili indipendenti T,  $Q_m$ ,  $\Delta c$  e L.

#### Regressione lineare semplice



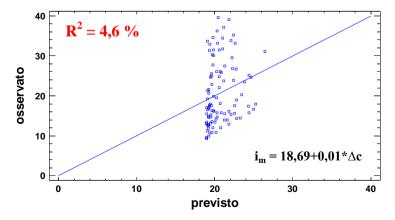
*Graf.* 6: relazione tra valori previsti [°] e osservati [°] di  $i_m$  considerando T come variabile indipendente.

#### Regressione lineare semplice



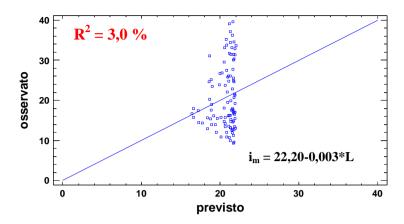
Graf. 7: relazione tra valori previsti [°] e osservati [°] di  $i_m$  considerando  $Q_m$  come variabile indipendente.

#### Regressione lineare semplice



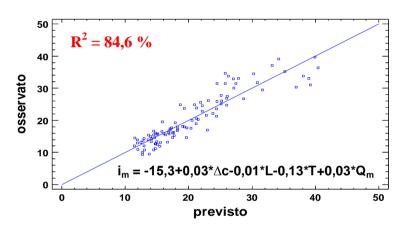
Graf. 8: relazione tra valori previsti [°] e osservati [°] di  $i_m$  considerando  $\Delta c$  come variabile indipendente.

#### Regressione lineare semplice



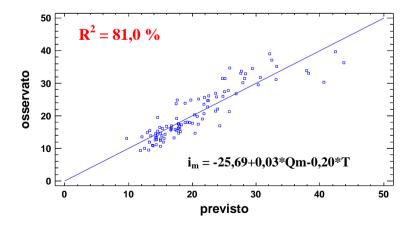
*Graf.* 9: relazione tra valori previsti [°] e osservati [°] di  $i_m$  considerando L come variabile indipendente.

# Regressione lineare multipla



*Graf.* 10: relazione tra valori previsti [°] e osservati [°] di  $i_m$  considerando tutte le variabili indipendenti.

## Regressione lineare multipla



Graf. 11: relazione tra valori previsti [°] e osservati [°] di  $i_m$  considerando T e  $Q_m$  come variabili indipendenti.

Per quanto riguarda le regressioni lineari semplici si può notare nei Graf. 6, 7, 8, 9 come l'unico parametro fortemente correlato con l'inclinazione media,  $i_m$ , sia la quota media,  $Q_m$ , (Graf. 7) con un coefficiente di determinazione pari a 79, 4 %. Gli altri parametri T,  $\Delta c$  e L hanno valori di  $R^2$  molto più bassi (dal 3 % al 5,8 %).

Nel Graf. 10, in cui è presente una regressione lineare multipla che considera tutte le variabili indipendenti, il coefficiente di determinazione è piuttosto alto ( $R^2 = 84,6$  %) il che significa che buona parte della variabilità dei dati è rappresentata dal modello.

Infine, con una regressione lineare multipla che consideri due variabili indipendenti, la combinazione che fornisce valori di  $R^2$  maggiori è T -  $Q_m$  ( $R^2$  = 81 %, Graf. 11).

Ora, come detto precedentemente, suddividiamo i circa 100 canali fin qui trattati come unico gruppo in attivi, A e non attivi, NA, (vedi Allegato 2, Allegato 3 e Fig. 30) cercando di capire se le relazioni tra i vari parametri sono simili alle precedenti oppure no. Si può notare nelle Tab. 11 e Tab. 12 che i canali considerati attivi hanno valori medi dei parametri morfometrici molto più elevati rispetto ai non attivi, tranne nel caso della tortuosità media che risulta quasi uguale in entrambe le condizioni.

Questa differenza può essere spiegata dal fatto che i canali attivi si sviluppano per lunghezze maggiori mentre quelli inattivi non sono stati percorsi recentemente da colate e quindi difficilmente individuabili in tutta la loro lunghezza.

		CANALI CONSIDERATI ATTIVI [A] n° = 33						
	L [m]	l [m]	Δc [m]	<b>i</b> <sub>m</sub> [°]	T [%]	Q <sub>m</sub> [m s.l.m.]		
MAX	1667,0	1537,0	615,0	39,6	16,9	2035,0		
MIN	45,0	44,0	30,0	14,3	0,6	1140,0		
MEDIA	584,4	544,0	230,9	25,8	5,0	1512,8		
σ	535,5	485,5	166,7	7,8	4,5	227,5		

Tab. 11: sintesi dei dati ottenuti per i canali attivi.

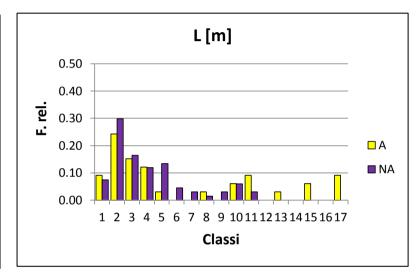
	(	CANALI CONSIDERATI NON ATTIVI [NA] $n^{\circ} = 67$						
	L [m]	l [m]	Δc [m]	<b>i</b> <sub>m</sub> [°]	T [%]	Q <sub>m</sub> [m s.l.m.]		
MAX	1092,0	1029,0	455,0	37,1	38,3	1865,0		
MIN	65,0	47,0	15,0	10,9	0,0	1145,0		
MEDIA	366,1	347,6	124,7	18,9	4,5	1319,3		
σ	275,5	254,1	98,3	6,2	5,3	154,8		

Tab. 12: sintesi dei dati ottenuti per i canali non attivi.

Gli istogrammi seguenti (Graf. 12, 13, 14, 15 e 16) spiegano proprio la diversità tra le medie dei parametri caratteristici dei canali attivi e non attivi descritte in precedenza. Alcuni parametri come la lunghezza della traccia (L), il dislivello ( $\Delta c$ ), l'inclinazione media ( $i_m$ ) e la tortuosità relativa (T) sono stati divisi in classi e messi in relazione con la frequenza relativa. I canali non attivi mostrano valori sostanzialmente compresi nelle classi medio - basse di frequenza mentre quelli attivi hanno valori anche per le classi di frequenza più elevate (il discorso non vale per la T).

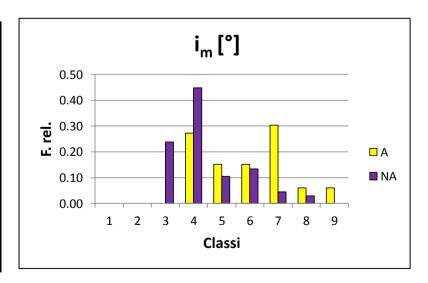
L'area studiata è quindi composta per la maggior parte da canali non attivi che però mostrano L,  $i_m$ ,  $Q_m$  e  $\Delta c$  minori rispetto a quelli attivi.

classi	L [m]	classi	L [m]
1	0-100	10	901-1000
2	101-200	11	1001-1100
3	201-300	12	1101-1200
4	301-400	13	1201-1300
5	401-500	14	1301-1400
6	501-600	15	1401-1500
7	601-700	16	1501-1600
8	701-800	17	1601-1700
9	801-900		



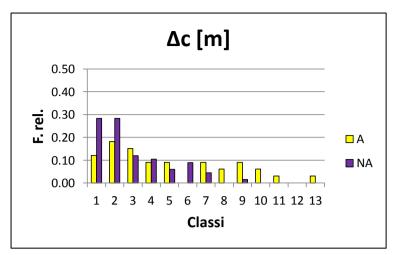
Graf. 12: lunghezza della traccia misurata sul piano x, y divisa in classi e relazionata con la frequenza relativa.

classi	<b>i</b> <sub>m</sub> [°]	classi	<b>i</b> <sub>m</sub> [°]	
1	0_5	6	25,1_30	
2	5,1_10	7	30,1_35	
3	10,1_15	8	35,1_40	
4	15,1_20	9	40,1_45	
5	20,1_25			



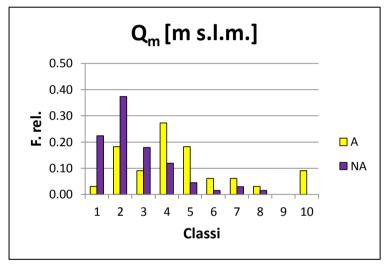
Graf. 13: inclinazione media divisa in classi e relazionata con la frequenza relativa.

classi	Δc [m]	classi	Δc [m]	
1	0-50	8	351-400	
2	51-100	9	401-450	
3	101-150	10	451-500	
4	151-200	11	501-550	
5	201-250	12	551-600	
6	251-300	13	601-650	
7	301-350			



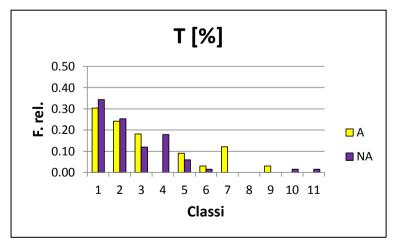
Graf. 14: dislivello dei canali diviso in classi e relazionato con la frequenza relativa.

classi	Q <sub>m</sub> [m s.l.m.]	classi	Q <sub>m</sub> [m s.l.m.]	
1	1100-1200	6	1601-1700	
2	1201-1300	7	1701-1800	
3	1301-1400	8	1801-1900	
4	1401-1500	9	1901-2000	
5	1501-1600	10	2001-2100	



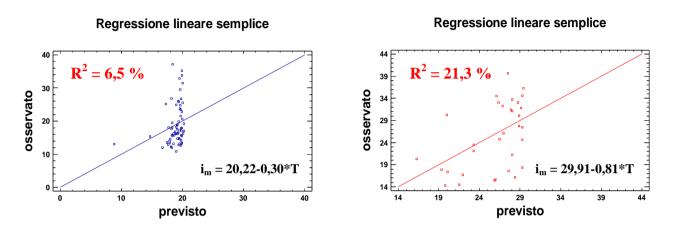
Graf. 15: quota media divisa in classi e relazionata con la frequenza relativa.

classi	T [%]	classi	T [%]
1	0_2	7	12,1_14
2	2,1_4	8	14,1_16
3	4,1_6	9	16,1_18
4	6,1_8	10	18,1_20
5	8,1_10	11	20,1_40
6	10,1_12		

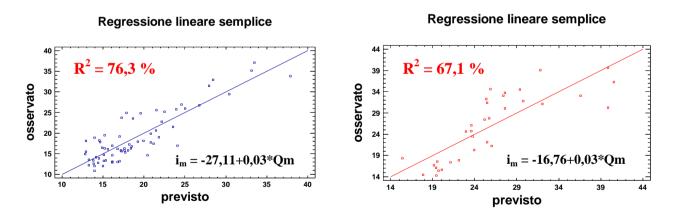


Graf. 16: tortuosità relativa divisa in classi e relazionata con la frequenza relativa.

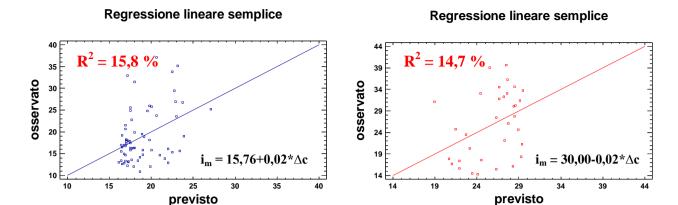
Sempre utilizzando le regressioni lineari semplici e multiple come fatto in precedenza vengono valutate le possibili relazioni tra vari parametri morfometrici facendo questa volta differenza tra canali attivi (A) e non attivi (NA). Come variabile dipendente è stata presa sempre l'inclinazione media,  $i_m$ , il cui valore previsto e osservato all'interno dei grafici sotto riportati è espresso in gradi mentre le variabili indipendenti sono T, Qm,  $\Delta c$  e L.



*Graf.* 17: relazione tra valori previsti [°] e osservati [°] di  $i_m$  considerando T come variabile indipendente e distinguendo tra canali attivi (in rosso) e non attivi (in blu).

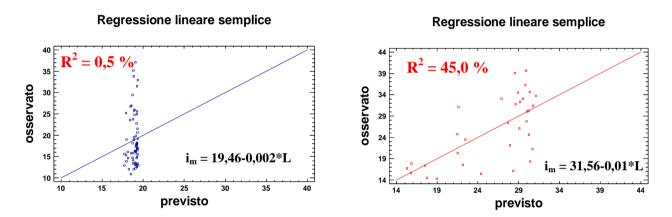


Graf. 18: relazione tra valori previsti [°] e osservati [°] di  $i_m$  considerando  $Q_m$  come variabile indipendente e distinguendo tra canali attivi (in rosso) e non attivi (in blu).

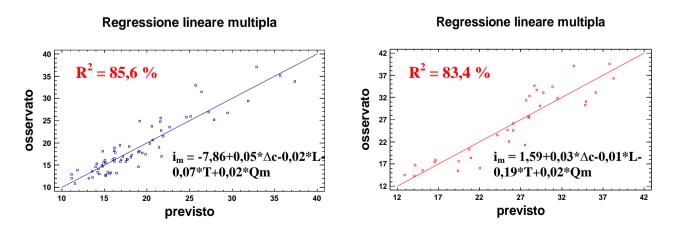


Graf. 19: relazione tra valori previsti [°] e osservati [°] di  $i_m$  considerando  $\Delta c$  come variabile indipendente e distinguendo tra canali attivi (in rosso) e non attivi (in blu).

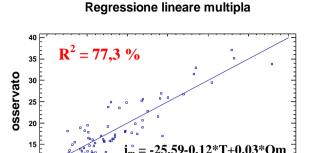
previsto



*Graf.* 20: relazione tra valori previsti [ $^{\circ}$ ] e osservati [ $^{\circ}$ ] di  $i_m$  considerando L come variabile indipendente e distinguendo tra canali attivi (in rosso) e non attivi (in blu).

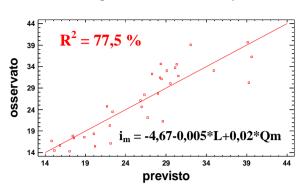


*Graf.* 21: relazione tra valori previsti [°] e osservati [°] di  $i_m$  considerando tutte le variabili indipendenti e distinguendo tra canali attivi (in rosso) e non attivi (in blu).



previsto

#### Regressione lineare multipla



Graf. 22: relazione tra valori previsti [°] e osservati [°] di  $i_m$  considerando L e  $Q_m$  come variabili indipendenti nel caso degli attivi (in rosso) mentre nel caso dei non attivi (in blu)  $Q_m$  e T.

Dai grafici appena descritti si può osservare che i valori dei parametri morfometrici distribuiti in classi di frequenza evidenziano la loro diversità di ripartizione nel caso in cui i canali siano suddivisi in attivi (A) e non attivi (NA). Questo è evidenziato da L,  $i_m$ ,  $\Delta c$  e  $Q_m$  per i canali attivi che presentano valori concentrati prevalentemente nelle classi alte di frequenza mentre per i canali non attivi si ha una concentrazione anche nelle classi di frequenza più basse (Graf. 12, 13, 14, 15). La tortuosità risulta l'unico parametro non molto influenzato dalla distinzione tra canali attivi e non attivi (Graf. 16).

La quota media,  $Q_m$ , (Graf. 18) rappresenta la variabile indipendente maggiormente correlata con la variabile dipendente  $i_m$  sia nel caso che i canali siano attivi (A) che non attivi (NA). Nei canali attivi la tortuosità, T, (Graf. 17) e ancora maggiormente la lunghezza della traccia, L, (Graf. 20) danno coefficienti di determinazione ( $R^2$ ) molto bassi (6,5 % e 0,5 % rispettivamente) mentre per i canali non attivi le variabili indipendenti L, T e  $\Delta c$  sono maggiormente correlate con la variabile dipendente  $i_m$  ( $R^2 = 45$  %, 21,3 % e 14,7 % rispettivamente).

Infine, nel caso in cui si considerino tutte le variabili indipendenti, il coefficiente di determinazione presenta valori simili sia se si considerano tutti i circa 100 canali insieme (Graf. 10) sia che li si distingua in attivi e non attivi (Graf. 21).

In Fig. 33 sono rappresentati i nove bacini idrografici segnati in carta identificati tramite i numeri utilizzati nella successiva tabella (Tab. 13) dove viene riportata una sintesi riferita ai valori dei parametri calcolati per questi bacini. Dato l'elevato numero di parametri calcolati, in seguito verranno trattati solo i risultati ritenuti più significativi.

	A [m <sup>2</sup> ]	P [m]	L <sub>d</sub> [m]	N <sub>c</sub> [-]	L <sub>c</sub> [m]	D <sub>D</sub> [1/m]	R <sub>KG</sub> [-]	R <sub>KH</sub> [-]
1	236768	2382	3901	25	8444	0,016	1,37	0,40
2	480326	3186	8653	10	8133	0,018	1,29	0,28
3	168003	1898	2805	2	1891	0,017	1,30	0,24
4	117240	1571	2154	8	3448	0,018	1,28	0,36
5	837169	5052	13585	11	5725	0,016	1,55	0,32
6	357724	2925	5833	4	2482	0,016	1,37	0,35
7	170082	2336	3259	5	1405	0,019	1,59	0,23
8	318865	2791	6201	9	2924	0,019	1,38	0,17
9	23217	685	423	3	1691	0,018	1,26	0,42
MAX	837169	5052	13585	25	8444	0,019	1,59	0,42
MIN	23217	685	423	2	1405	0,016	1,26	0,17
MEDIA	301044	2536	5202	9	4016	0,018	1,38	0,31

R <sub>K</sub> [-]	F <sub>D</sub> [1/m <sup>2</sup> ]	I <sub>M</sub> [-]	L <sub>A.P.</sub> [m]	Esp [°]	Q <sub>max</sub> [m s.l.m.]	Q <sub>min</sub> [m s.l.m.]	Δb [m]
1,59	0,00007	0,25	773,5	225	2630	1640	990
1,88	0,00011	0,33	1300,5	225	2845	1535	1310
2,03	0,00007	0,23	830,5	245	2640	1570	1070
1,67	0,00012	0,35	571,0	200	2555	1665	890
1,78	0,00009	0,35	1628,0	225	3155	1410	1745
1,70	0,00011	0,43	1017,0	225	3095	1435	1660
2,09	0,00013	0,35	862,0	225	3155	1640	1515
2,41	0,00013	0,36	1363,5	225	3135	1525	1610
1,54	0,00013	0,39	234,5	245	2435	2035	400
2,41	0,00013	0,43	1628,0	245	3155	2035	1745
1,54	0,00007	0,23	234,5	200	2435	1410	400
1,85	0,00011	0,34	953,4	227	2849	1606	1243

Tab. 13: valori dei parametri calcolati per i nove bacini idrografici rappresentati in carta.

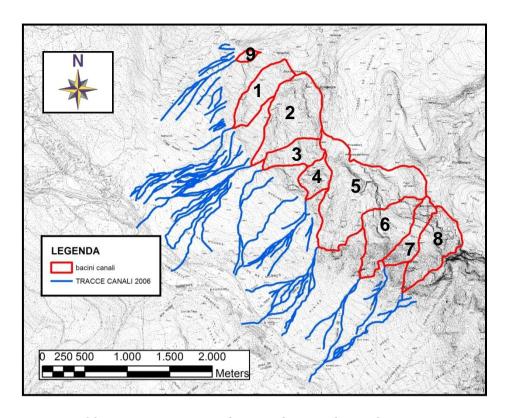
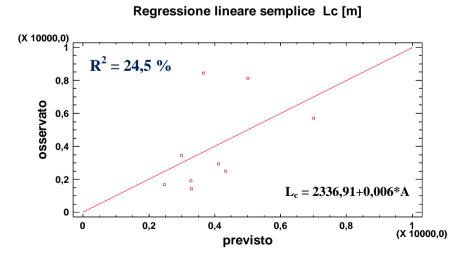


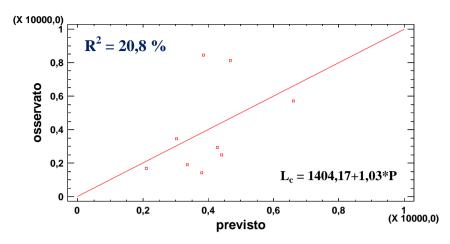
Fig. 33: rappresentazione dei nove bacini idrografici numerati.

Ora, a differenza di quanto fatto per i canali, ci si limiterà ad utilizzare alcuni dei parametri più significativi in Tab. 13 per l'analisi dei dati relativi ai bacini idrografici. Nelle regressioni lineari semplici e multiple eseguite si è deciso di scegliere come variabile dipendente,  $L_c$ , in quanto rappresenta i canali a valle dei bacini mentre per quanto riguarda le variabili indipendenti sono stati utilizzati i parametri morfometrici che meglio rappresentano i bacini stessi ovvero A, P,  $D_D$ ,  $F_D$ ,  $R_{KG}$ ,  $\Delta b$  e  $I_M$ .



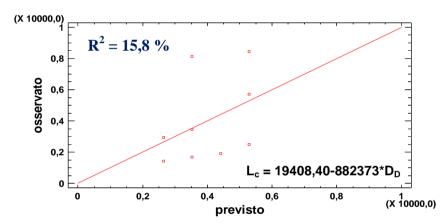
Graf. 23: relazione tra valori previsti [m] e osservati [m] di  $L_c$  considerando A come variabile indipendente.

#### Regressione lineare semplice Lc [m]



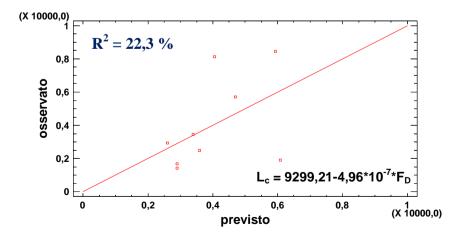
Graf. 24: relazione tra valori previsti [m] e osservati [m] di  $L_c$  considerando P come variabile indipendente.

#### Regressione lineare semplice Lc [m]



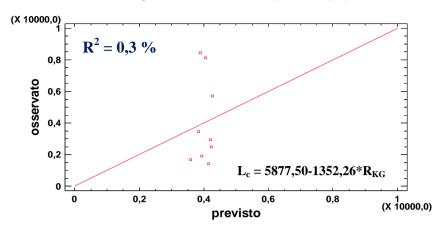
Graf. 25: relazione tra valori previsti [m] e osservati [m] di  $L_c$  considerando  $D_D$  come variabile indipendente.

## Regressione lineare semplice Lc [m]



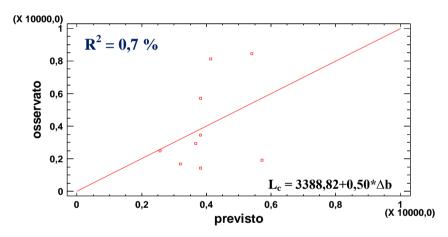
Graf. 26: relazione tra valori previsti [m] e osservati [m] di  $L_c$  considerando  $F_D$  come variabile indipendente.

#### Regressione lineare semplice Lc [m]



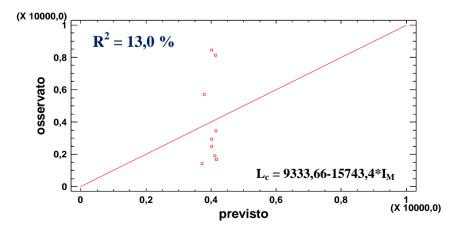
Graf. 27: relazione tra valori previsti [m] e osservati [m] di  $L_c$  considerando  $R_{KG}$  come variabile indipendente.

#### Regressione lineare semplice Lc [m]



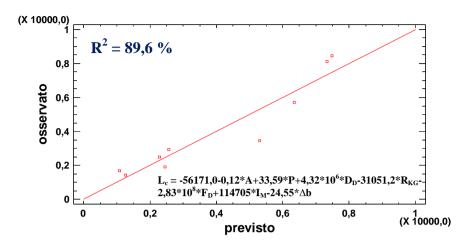
Graf. 28: relazione tra valori previsti [m] e osservati [m] di  $L_c$  considerando  $\Delta b$  come variabile indipendente.

#### Regressione lineare semplice Lc [m]



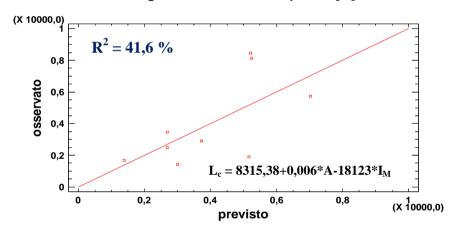
Graf. 29: relazione tra valori previsti [m] e osservati [m] di  $L_c$  considerando  $I_M$  come variabile indipendente.

#### Regressione lineare multipla Lc [m]



Graf. 30: relazione tra valori previsti [m] e osservati [m] di  $L_c$  considerando P, A,  $D_D$ ,  $F_D$ ,  $R_{KG}$ ,  $\Delta b$   $I_M$  come variabili indipendenti.

#### Regressione lineare multipla Lc [m]



Graf. 31: relazione tra valori previsti [m] e osservati [m] di  $L_c$  considerando A e  $I_M$  come variabili indipendenti.

Dai grafici sopra riportati si può osservare come i parametri relativi ai bacini idrografici A, P e  $F_D$  (Graf. 23, 24 e 26) indichino una qualche correlazione con la variabile dipendente Lc ( $R^2 = 24,5 \%$ , 20,8 % e 22,3 % rispettivamente) a differenza degli altri che presentano un coefficiente di determinazione ( $R^2$ ) inferiore.

Nel Graf. 30, in cui sono considerate tutte le variabili indipendenti, il valore di R<sup>2</sup> è pari a 89,6 % il che significa una buona rappresentazione della variabilità dei dati da parte del modello.

Infine, considerando una regressione lineare multipla a due variabili indipendenti A e  $I_M$  (Graf.31), si è osservato che queste ultime danno un coefficiente di determinazione,  $R^2$ , più alto rispetto alle altre correlazioni.

# Par. 3.2 Evoluzione morfologica degli argini del canale di colata del rio Acquabona

# Par. 3.2.1 Procedimento operativo

Lo studio della variazione della posizione degli argini del canale di colata nel tempo è molto importante per capire lo sviluppo morfologico futuro del bacino di Acquabona. L'individuazione approssimativa delle possibili aree di erosione o deposizione permette di capire quali siano le zone più a rischio, in modo tale da poter utilizzare dei metodi attivi (opere di difesa) e passivi (sistemi di allarme) utili per la salvaguardia delle persone e strutture senza tuttavia modificare troppo l'area interessata.

In questo paragrafo non viene più studiata solo la parte spaziale dei vari sistemi dinamici costituiti dai canali di colata e dai loro rispettivi bacini di alimentazione descritti nel Par. 3.1, ma viene fatta anche un'analisi temporale relativa al canale di Acquabona, analizzando le variazioni di posizione degli argini dello stesso dal 1982 fino al 2012.

Dal geoportale del sito della Regione del Veneto e dall'ufficio cartografico di Mestre (Ve), oltre che con l'utilizzo di Bing Maps sono state recuperati i seguenti file:

- > C.T.R. del Veneto in scala 1:10000 formato TIFF elementi 029060, 029070;
- Foto aeree della zona formato TIFF (raster) degli anni 1982, 1991 e 2006;
- ➤ Immagine satellitare dell'area dell'anno 2012.

Tramite l'utilizzo del software ArcGis sono stati elaborati i file raster acquisiti procedendo nel seguente modo:

- ➤ Georeferenziazione dei file raster delle foto aeree e dell'immagine satellitare sul file TIFF (topografia), già posizionato nello spazio tramite sistema di riferimento (già descritta nel Par. 3.1);
- > Creazione di file vettoriali shp per rappresentare gli argini del canale in due dimensioni;
- ➤ Individuazione in carta, tramite polilinee vettoriali shp, degli argini del canale con il solo utilizzo delle foto aeree e l'osservazione di quanto visto in sito.

## Par. 3.2.2 Risultati ottenuti

Il sito di Acquabona, come già detto in precedenza, è fortemente influenzato da variazioni morfologiche che interessano gli argini e il canale di scorrimento inciso all'interno dei depositi quaternari di versante. Queste modifiche col passare degli anni danno origine a diversi fenomeni come ad esempio esondazioni dei debris-flow al di fuori dell'alveo, dighe costituite dalle frane che interessano gli argini, erosioni localizzate che mobilitano grossi volumi di materiale, variazione della larghezza e profondità del canale ecc.

Vista l'importanza dello studio di questi elementi per capire il possibile sviluppo futuro del sito in esame, è stata tracciata in carta la posizione degli argini del canale dal 1982 al 2012. Questa operazione tuttavia non ha una precisione ottimale in quanto la risoluzione delle foto aeree non è delle migliori e gli errori durante il processo di georeferenziazione sono inevitabili. Come base è stata utilizzata sia la C.T.R. del Veneto in scala 1:10000 (Fig. 34) ma anche una foto aerea del 2006 (Fig. 35).

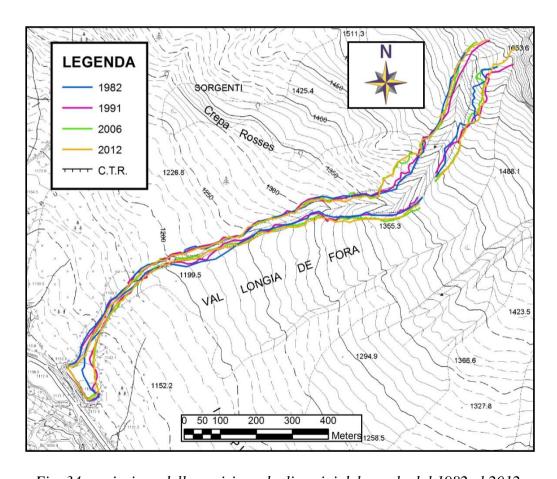


Fig. 34: variazione della posizione degli argini del canale dal 1982 al 2012 su base C.T.R. Veneto in scala 1:10000.

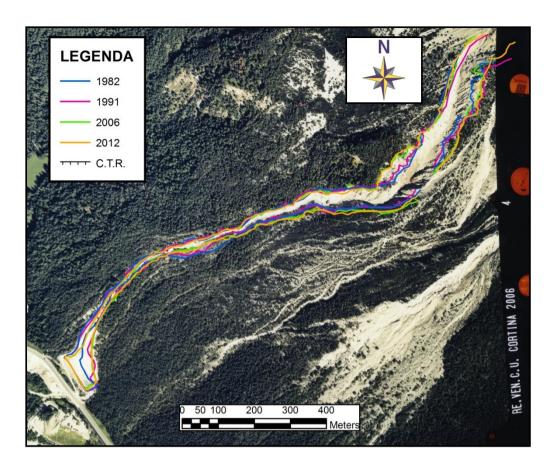


Fig. 35: variazione della posizione degli argini del canale dal 1982 al 2012 su base foto aerea del 2006.

Nelle Fig. 36 e 37, riportate in seguito sia su base foto aerea del 2006 che su base C.T.R. del Veneto in scala 1:10000, sono state riscontrate principalmente cinque zone, da monte verso valle, dove la variazione dei limiti del canale risulta significativa nel periodo di tempo considerato (1982, 1991, 2006 e 2012).

- ➤ Zona 1: si trova in sinistra orografica del canale ed è attualmente soggetta da fenomeni di erosione localizzata. La larghezza dell'alveo aumenta da quota 1600 m s.l.m. a quota 1450 m s.l.m. in direzione SE a causa dello spostamento verso l'esterno dell'argine in sinistra orografica;
- ➤ Zona 2: la larghezza dell'alveo aumenta da quota 1400 m s.l.m. a 1300 m s.l.m. verso S sempre a causa della variazione verso l'esterno dell'argine in sinistra orografica;

- ➤ Zona 3: posizionata in destra orografica, soggetta a continua erosione dalla quota 1450 m s.l.m. a 1400 m s.l.m. È l'unica zona in destra orografica che ha subito variazioni morfologiche importanti dell'argine, la restante parte è rimasta più o meno stabile;
- > Zona 4: presenta un evidente restringimento dell'alveo da quota 1240 m s.l.m. a 1200 m s.l.m.;
- ➤ Zona 5: la larghezza dell'alveo diminuisce anche in questa zona a causa di fattori antropici. La costruzione di argini di contenimento ha indirizzato il flusso verso il bacino di ritenzione dei sedimenti.

Si può così concludere che analizzando il canale da monte verso valle le zone a maggior pendenza (Fig. 36, zone 1, 2, 3) presentano un allargamento dell'alveo mentre le zone a minor pendenza con quote circa inferiori ai 1250 m s.l.m. (Fig. 37, zone 4, 5) tendono ad avere un restringimento del canale sempre più evidente. Questo può essere spiegato ad esempio dall'alternanza tra erosione e deposizione che, alternandosi, non variano eccessivamente la profondità dell'alveo e non determinano esondazioni delle colate oppure dalla presenza di un'importante copertura vegetale che rende gli argini più stabili. Va considerato inoltre che nella parte terminale essi sono modificati dall'uomo e il materiale che giunge nel bacino di ritenzione viene periodicamente rimosso.

Infine si nota come col passare degli anni le tracimazioni delle colate siano notevolmente diminuite, aumentando così la stabilità degli argini che creano un confinamento della zona di scorrimento dei debris-flow.

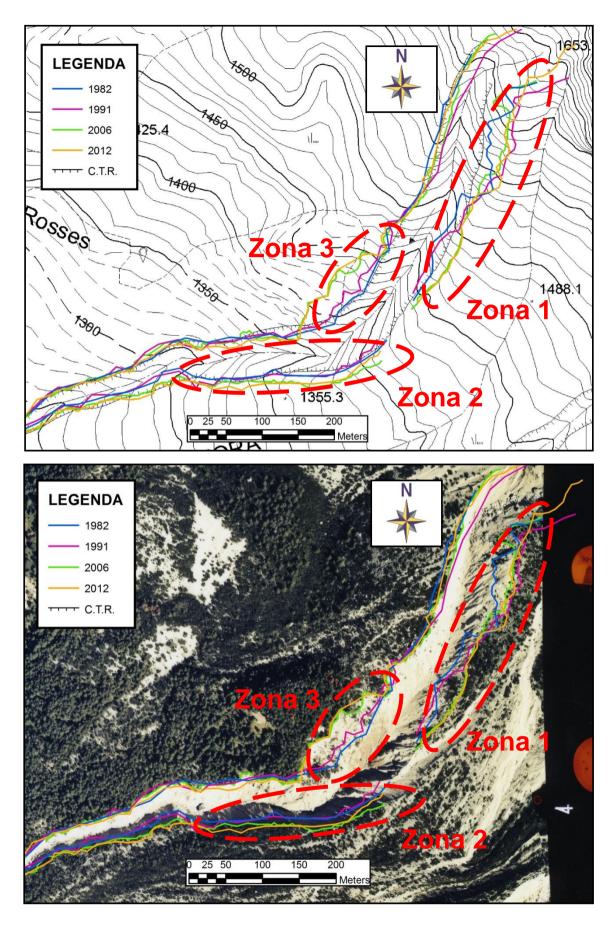


Fig. 36: parte alta del canale a maggior pendenza su base C.T.R. Veneto in scala 1:10000 e su base foto aerea del 2006 rispettivamente.

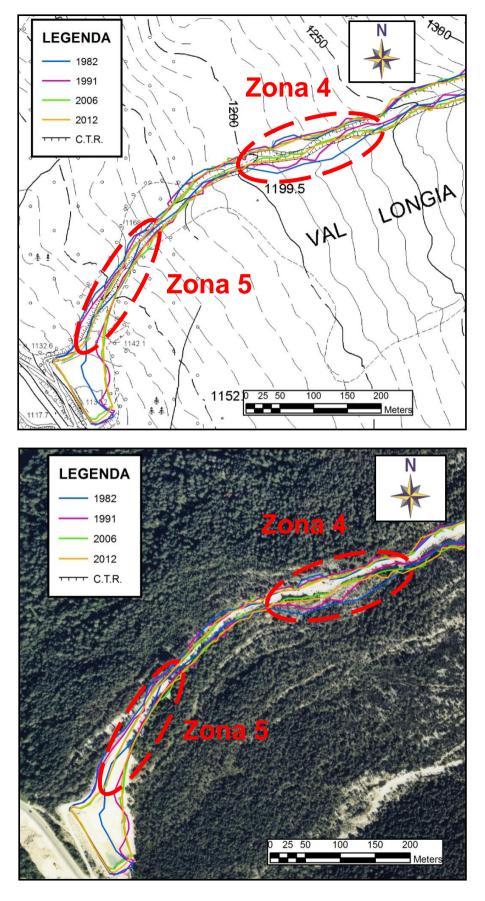


Fig. 37: tratto terminale del canale a minor pendenza su base C.T.R. Veneto in scala 1:10000 e su base foto aerea del 2006 rispettivamente.

# Par. 3.2.3 Possibile evoluzione futura del sistema

Sulla base delle considerazioni fatte in precedenza e con il lavoro svolto in campagna si possono fare delle ipotesi di previsione sulla futura evoluzione della morfologia dell'alveo.

Nella parte alta (Fig. 36) il canale sarà interessato sempre con maggior frequenza da fenomeni erosivi che colpiranno sia gli argini che il fondo dell'alveo stesso oltre che la Formazione di Raibl. I meccanismi erosivi che agiscono e agiranno in futuro sono molteplici. Tuttavia i più importanti e determinanti sono i fenomeni gravitativi quali le frane, i crolli, le piccole colate, l'erosione localizzata e il fenomeno del dilavamento.

Vista la profondità del canale di colata non dovrebbero esserci variazioni future riguardanti la posizione della parte alta dello stesso (sopra i 1300 m s.l.m.).

Per quanto riguarda la parte bassa del canale (Fig. 37) l'azione dell'uomo ha avuto e avrà un ruolo fondamentale per l'evoluzione morfologica della stessa. La costruzione di argini artificiali di ritenzione e la costante rimozione del materiale che arriva nell'area di accumulo aiutano infatti a stabilizzare la posizione dell'alveo e limitare la tracimazione dei debris-flow. Chiaramente ciò non esclude comunque una possibile variazione della posizione del canale in futuro. Esso infatti potrebbe cambiare direzione in seguito ad eventi molto intensi che interessano una grande quantità di materiale oppure a causa del recente innalzamento del fondo del canale, circa in corrispondenza della stazione S2 M3 posta a quota 1185 m s.l.m.

# 4. RILIEVO SPEDITIVO LUNGO IL CANALE DI ACQUABONA

# Par. 4.1 Rilievo topografico speditivo in sito

# Par. 4.1.1 Modalità di esecuzione e finalità

Lungo la zona di scorrimento del canale di Acquabona, per un tratto di circa 290 m, è stato eseguito un rilievo topografico speditivo partendo dalla stazione S2 M3 posta a quota 1185 m s.l.m. fino ad un punto lungo il canale che si trova a quota 1238 m s.l.m. tracciando un profilo longitudinale e determinando venti sezioni ortogonali a quest'ultimo. Questo metodo, di veloce esecuzione, presenta precisioni minori rispetto ad altri metodi di rilievo topografico ed è adatto al rilievo in condizioni topografiche disagiate, anche dal punto di vista della visibilità satellitare, dove la precisione non è l'esigenza principale.

Per il rilievo svolto è stato utilizzato un clisimetro-bussola (Fig. 38) che permette di misurare sia l'azimut (angolo orizzontale rispetto al nord) che lo zenit (angolo verticale) tra due punti e un distanziometro laser per misurare la distanza tra di essi (aiutandosi con un cannocchiale montabile sullo strumento nel caso in cui la distanza sia superiore a circa 20 m).





Fig. 38: a sinistra è raffigurato il clisimetro-bussola mentre a destra il distanziometro laser utilizzati per il rilievo topografico speditivo.

Per vedere le possibili variazioni all'interno del canale studiato si è svolto il rilievo due volte, utilizzando il 2° metodo raffigurato in Fig. 39 per le sezioni e il metodo in Fig. 40 per il profilo longitudinale. Inizialmente, per le prime dieci sezioni del primo rilievo, era stato utilizzato il 1° metodo (Fig. 39) ma a causa dei tempi lunghi richiesti per la sua esecuzione, si è deciso di non proseguire. Esso infatti prevedeva che i due operatori si spostassero entrambi progressivamente dal punto iniziale della sezione al punto finale misurando l'angolo verticale (puntando sul compagno a mezza altezza) e la distanza, richiedendo molto più tempo rispetto al 2° metodo e quindi risultando non conveniente.

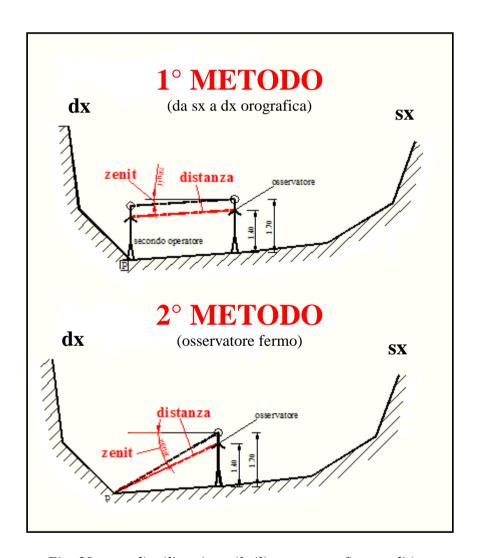


Fig. 39: metodi utilizzati per il rilievo topografico speditivo.

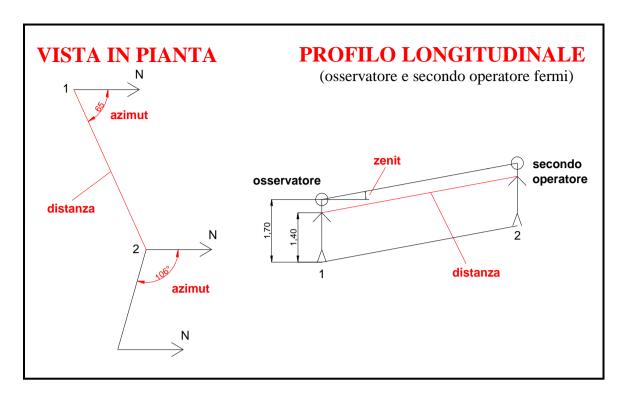


Fig. 40: metodo di rilievo utilizzato per ottenere la vista in pianta e il profilo longitudinale del tratto considerato.

Le procedure operative per lo svolgimento del rilievo con il secondo metodo sono le seguenti:

Posizionamento dell'operatore al centro della sezione e misura di due parametri per ogni punto: lo zenit portando il clisimetro-bussola agli occhi puntando verso il punto individuato di cambio pendenza (Fig. 42) e la distanza misurata posizionando il distanziometro sul petto e puntando sempre nel punto individuato. In Fig. 41 viene illustrato come si ricava la sezione, con i cerchi che rappresentano le distanze di ogni singolo punto da quello centrale, le linee nere con inclinazione secondo lo zenit e la linea rossa indicante la sezione finale;

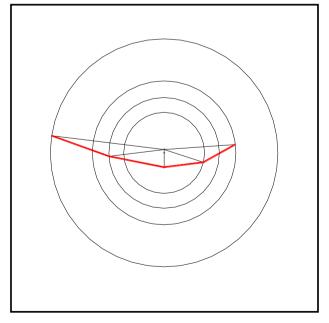


Fig. 41: esempio di sezione ortogonale al canale.



Fig. 42: misura dell'angolo verticale (zenit) con il clisimetrobussola da parte dell'operatore.

- Determinazione del profilo longitudinale e della vista in pianta (Fig. 40): l'osservatore con il clisimetro-bussola e il distanziometro si posiziona al centro della sezione mentre un secondo operatore si colloca nel punto centrale della sezione successiva. Vengono misurati dal primo l'angolo verticale (puntando verso gli occhi del secondo), l'angolo orizzontale (clisimetro-bussola tenuto ad altezza occhi orizzontalmente e puntando in direzione del secondo operatore) e la distanza misurata al petto dell'altro operatore. Questa operazione, insieme a quella del punto precedente, viene ripetuta per tutte e venti le sezioni rilevate;
- Individuazione della stazione S2 M3 come punto di riferimento (successivamente segnato come punto 0) tramite la misura dello zenit, dell'azimut e della distanza dal punto centrale della prima sezione (Fig. 43).

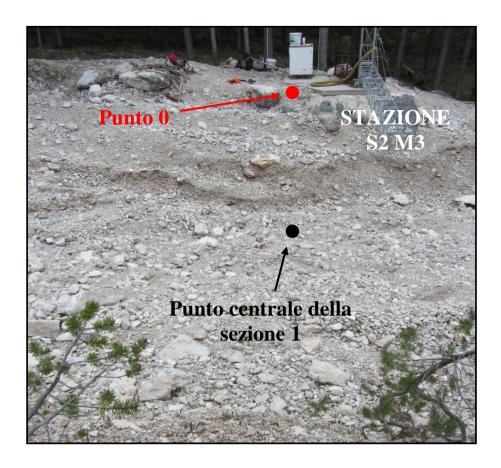


Fig. 43: punto di riferimento 0 in corrispondenza della stazione S2 M3 e punto centrale della sezione 1.

Questo lavoro, come detto precedentemente, è stato svolto per verificare l'eventuale variazione nel tempo della morfologia del canale e stimare i volumi depositati ed erosi nel tratto esaminato. I due rilievi sono stati svolti nel giugno-luglio e nel settembre del 2013, periodo durante il quale la attività del canale è stata limitata, come si deduce dai risultati illustrati nel seguito.

Le Tab. 14 e 15 sono degli esempi di tabelle utilizzate in campagna per la raccolta dei dati necessari a rappresentare le sezioni e il profilo longitudinale dove D indica la distanza,  $\alpha_v$  rappresenta l'angolo verticale (zenit) e  $\theta$  indica l'angolo orizzontale (azimut).

SEZIONE 1	PUNTI	D [m]	$\alpha_{\mathrm{v}}$ [°]	NOTE
	1	5,28	2	
	2	2,67	-36	
	3	2,86	-27	
	4	5,17	0	
FOTO				

Tab. 14: tabella utilizzata per il rilevamento delle sezioni.

PUNTI	D [m]	$\alpha_{\mathrm{v}}$ [°]	θ [°]
0-S1	5,65	-34	317
S1-S2	23,96	10,5	44,5
S2-S3	13,06	11	43
S3-S4	9,05	11	53

Tab. 15: tabella utilizzata per rilevare i parametri tra i punti centrali delle sezioni.

#### Par. 4.1.2 Risultati

In seguito vengono riportate le sezioni ricavate dai due rilievi effettuati (Fig. 44). Quelle rilevate tra giugno e luglio 2013 sono indicate in nero mentre quelle rilevate il 9 settembre 2013 sono evidenziate in rosso. Tra i due rilievi eseguiti non ci sono grosse variazioni morfologiche dell'alveo. Alcune limitate differenze possono essere causate da errori nell'interpretazione e misurazione da parte degli operatori (l'errore nella misura degli angoli è dell'ordine di  $\pm$  1/4° deg; l'errore nella misura delle distanze è dell'ordine del decimetro). L'unica variazione significativa è presente nella sezione 2 dove l'accumulo di materiale depositato è ben evidente in Fig. 45.

In Fig. 44 si nota come ci sia alternanza di forma del fondo del canale, sia piatto (sezione 6, 8, 13) che inciso (sezione 4, 14, 19) e una notevole variazione dell'altezza degli argini, in aumento dalla prima sezione all'ultima.

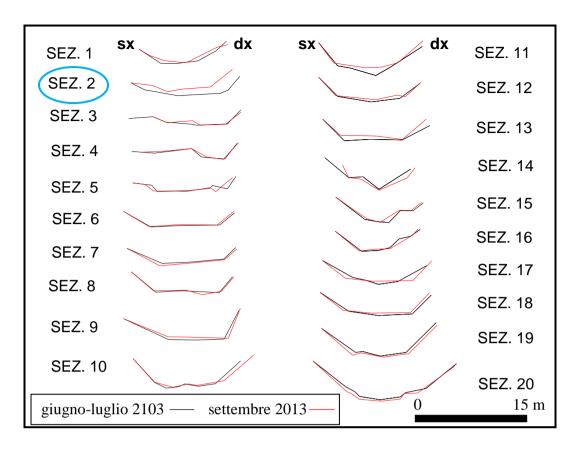


Fig. 44: sezioni ricavate dai due rilievi eseguiti da sinistra a destra orografica guardando da monte verso valle.



Fig. 45: accumulo di materiale depositato nella sezione 2, vista da monte verso valle.

Per avere un idea generale della morfologia del canale nel tratto rilevato sono rappresentate, in Fig. 46 e Fig. 47 rispettivamente, la vista in pianta del tratto considerato e le venti sezioni tridimensionali rilevate tra giugno e luglio 2013.

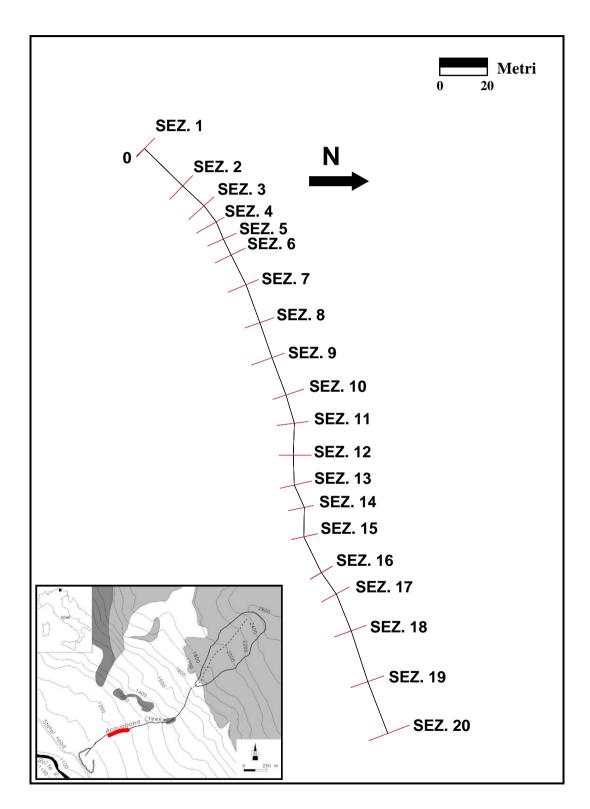


Fig. 46: vista in pianta del rilievo eseguito tra giugno e luglio 2013. Nel riquadro il tratto del canale indagato.

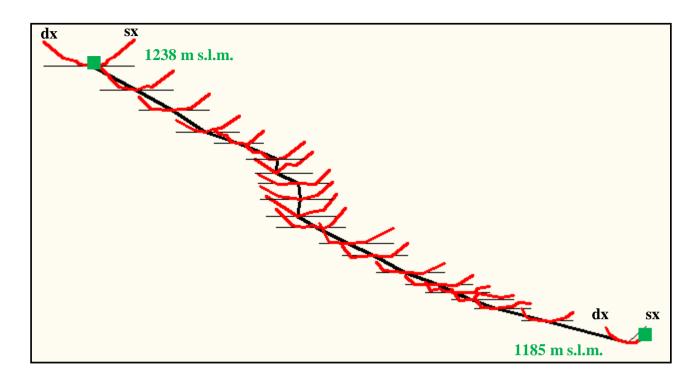


Fig. 47: vista tridimensionale delle venti sezioni del rilievo svolto tra giugno e luglio 2013. In verde sono segnate le quote della stazione S2 M3 e del punto finale di rilievo.

I principali parametri morfometrici misurati e calcolati sono espressi nella Tab. 16 con B che rappresenta la larghezza della sezione, H la profondità e p la pendenza.

	Luglio 2013					
	B [m]	B [m] H [m] p [-]				
MEDIA	14,24	3,17	0,19			
MAX	19,37	5,21	0,25			
MIN	11,46	1,84	0,16			
Lungl	286,35					
Disliv	55,20					

Tab. 16: principali parametri morfometrici misurati e calcolati (B: larghezza della sezione; H: profondità della sezione; p: pendenza).

In Allegato 4, Allegato 5, Allegato 6, Allegato 7 sono riportati i dati rilevati ed elaborati, mentre qui di seguito viene riportato lo schema tabellare utilizzato per questa operazione (Tab. 17).

PUNTI	D [m]	α <sub>v</sub> [°]	θ [°]	Do [m]	α [rad]	Δs [m]
<b>0-S1</b>	5.65	-34	317	4.68	-0.59341	-3.16
S1-S2	23.96	10.5	44.5	23.56	0.18326	4.37
S2-S3	13.06	11	43	12.82	0.191986	2.49
S3-S4	9.05	11	53	8.88	0.191986	1.73
S4-S5						

Qr [m]	Dp [m]	p [-]	B [m]	H [m]	SEZIONE
0.00	0.00	0.19	11.87	3.04	1
4.37	23.56	0.19	14.76	2.50	2
6.86	36.38	0.19	15.12	2.07	3
8.59	45.26	0.19	14.25	1.97	4
					5

Tab. 17: tabella riassuntiva dei principali parametri morfometrici rilevati e calcolati.

### Significato dei parametri utilizzati in tabella 17

D [m] distanza tra i punti centrali delle sezioni. Ad es. D (S1-S2) è la distanza tra il punto centrale della sezione 1 e quello della sezione 2;

 $\theta$  [°] azimut (angolo orizzontale rispetto al nord) tra i punti centrali delle sezioni;

Do [m] distanza proiettata sul piano tra i punti centrali delle sezioni:

 $Do = D * cos \alpha$ 

 $\Delta s$  [m] dislivello tra i punti centrali delle sezioni:

$$\Delta s = D * \sin \alpha$$

Qr [m] somma cumulata dei valori di  $\Delta s$ . Il punto centrale della prima sezione ha quota relativa pari a 0;

Dp [m] somma cumulata dei valori di Do. Il punto centrale della prima sezione ha quota progressiva pari a 0;

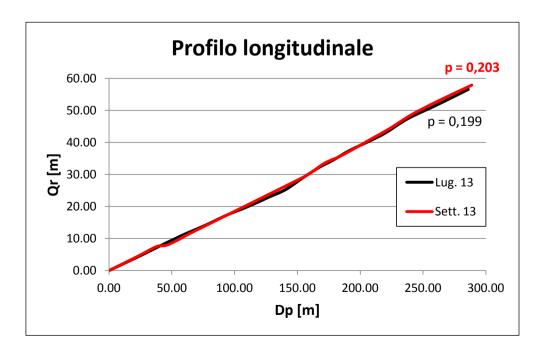
p [-] pendenza data dal rapporto tra  $\Delta$ s e Do:

$$p = \frac{\Delta_{S2-S3} - \Delta_{S1-S2}}{Do_{S2-S3} - Do_{S1-S2}}$$

B [m] larghezza massima della sezione;

H [m] profondità massima della sezione.

Attraverso l'uso dei parametri morfometrici appena descritti si possono ottenere vari grafici. Il primo raffigurato mette in relazione la distanza progressiva con la variazione di quota tra la prima e l'ultima sezione (Graf. 32).

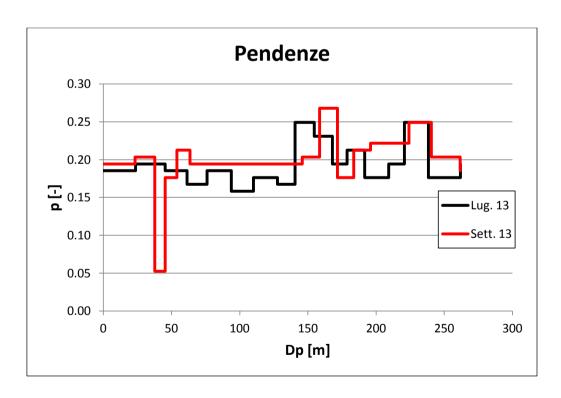


Graf. 32: profilo longitudinale lungo il tratto di rilievo considerato.

In questo grafico sono contenute le serie di dati relative ai due rilievi svolti, il primo in luglio e il secondo in settembre 2013 che forniscono un'idea della pendenza del tratto di rilievo considerato. Quest'ultima dovrebbe essere circa uguale tra i due ma le piccole differenze di quota relativa che si notano tra le due curve possono dipendere dal fatto che i punti centrali delle sezioni non sono perfettamente coincidenti tra il primo e il secondo rilievo effettuato. E' stata ottenuta una pendenza media di circa il 19 % e ciò significa che ogni 10 m di avanzamento sul piano orizzontale ci si alza di circa 1,9 m.

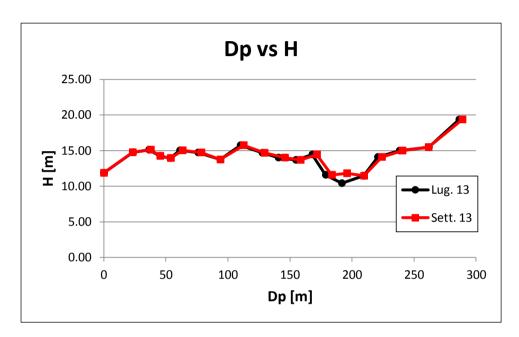
Il secondo grafico (Graf. 33) esprime la relazione presente tra la distanza progressiva e la pendenza, con quest'ultima che assume valori variabili tra 16 % e il 27 % ad eccezione di un valore discorde, pari al 5 %, rilevato nel secondo rilievo.

Fino ad una distanza progressiva di circa 140 m i valori di pendenza sono pressoché costanti mentre poi, superato questo punto, diventano maggiori e maggiormente variabili.

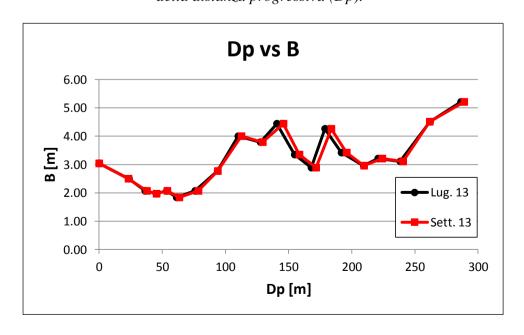


Graf. 33: variazione della pendenza (p) all'aumentare della distanza progressiva (Dp).

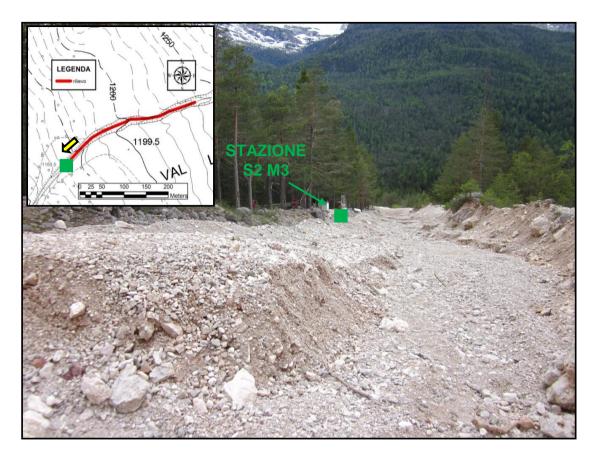
Dagli ultimi due grafici (Graf. 34 e 35), che evidenziano l'andamento della larghezza e della profondità del canale in funzione della progressiva, si può dedurre che c'è un aumento di B e H all'aumentare di questa distanza. Nel Graf. 34 lo si nota solamente nel tratto finale rilevato, dopo la progressiva 200 m. Nel Graf. 35 invece la profondità ha valori più variabili, soprattutto nell'intervallo di distanza compresi tra 75 m e 240 m circa, risentendo probabilmente dell'alternanza tra zone di accumulo del materiale e zone incise anche se i valori maggiori risultano nella parte più a monte dove l'altezza degli argini è maggiore.



Graf. 34: andamento della profondità del canale (H) all'aumentare della distanza progressiva (Dp).



Graf. 35: variazione della larghezza del canale (B) all'aumentare della distanza progressiva (Dp).



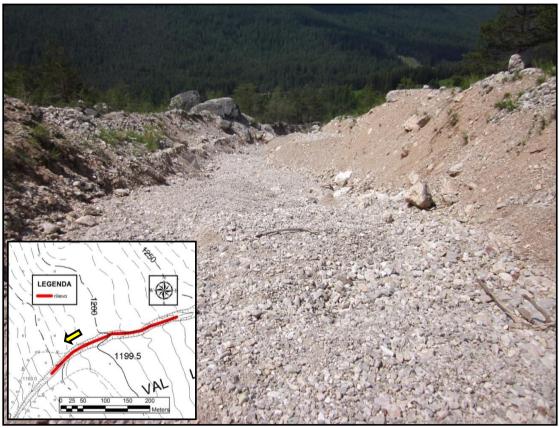
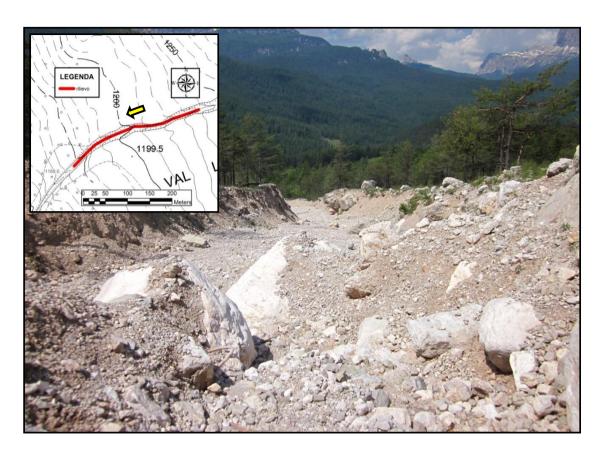


Fig. 48: nelle due foto in successione è rappresentata la parte bassa del tratto rilevato con una pendenza media del 18 %, B media 14,3 m e H media 2,6 m. Le frecce gialle indicano la direzione e la posizione in cui sono state scattate le foto.



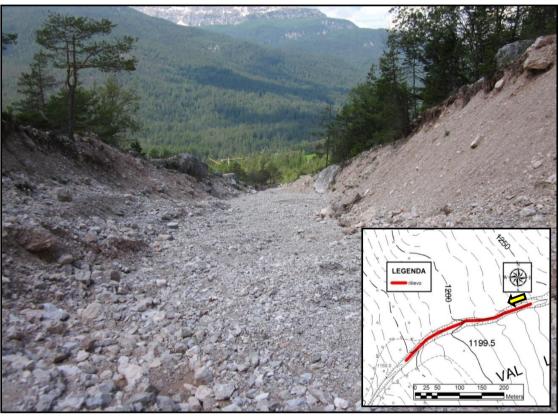


Fig. 49: zona alta del rilievo dopo la sezione 10 con i media del 21 %, B media 14,1 m e H media 3,7 m.

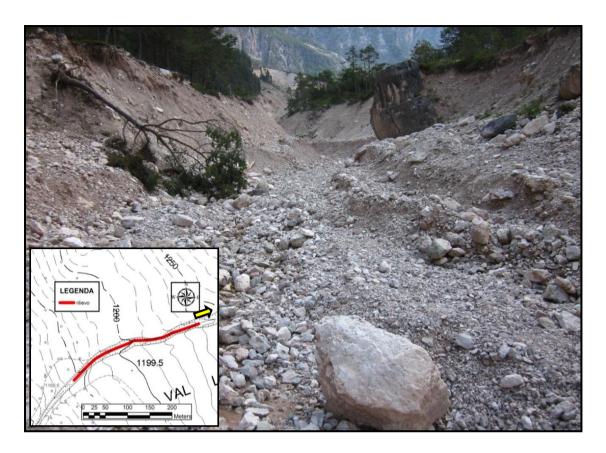


Fig. 50: parte alta della zona di scorrimento dopo la sezione 20 dove si nota il restringimento del canale a causa delle incisioni nei depositi quaternari di versante.

### Par. 4.1.3 Considerazioni finali

Il rilievo topografico speditivo, eseguito in periodi differenti con l'obbiettivo di verificare le eventuali variazioni all'interno del canale e stimare depositi ed erosioni nel tempo, non ha mostrato variazioni significative dell'alveo. Questo in un periodo di assenza di piogge significative sul bacino.

Nonostante ciò si sono potute fare altre importanti considerazioni sulla morfologia e morfometria del tratto di canale studiato. Ad esempio nella parte alta rilevata (Fig. 49) i valori di pendenza, larghezza e altezza del canale sono più elevati rispetto alla parte bassa (Fig. 48). Andando verso il tratto più a monte del rilievo, infatti, esso si allarga, soprattutto dalla sezione 17 alla 20, aumentando di pendenza e profondità (quest'ultima influenzata in modo significativo dalla presenza di zone incise e zone di accumulo detritico come già spiegato precedentemente).

## 5. PROVE DI LABORATORIO: ANALISI GRANULOMETRICHE

## Par. 5.1 Prelievo e preparazione dei campioni per la prova

Per lo svolgimento delle analisi granulometriche sono stati prelevati in situ, lungo il canale di scorrimento, cinque campioni di materiale. Questa prova viene eseguita per determinare la distribuzione granulometrica ovvero le dimensioni caratteristiche dei grani di ogni singolo campione prelevato e per trovare delle possibili correlazioni tra quest'ultima e la pendenza locale di arresto o la distanza percorsa dai debris-flow.

Il numero limitato di prelievi ci impedisce di poter effettuare un'elaborazione statistica affidabile e quindi ci si limiterà a fare solamente delle ipotesi finali.

I campioni, prelevati lungo il tratto in cui si è svolto il rilievo topografico speditivo (Fig. 51), sono stati raccolti superficialmente in corrispondenza della fronte del deposito utilizzando una pala e dei secchi da 15 litri. I punti (C1, C2, C3, C4, C5) sono stati resi poi riconoscibili da dei paletti (Fig. 52). La posizione di questi ultimi viene successivamente rilevata con il gps per poterli inserire in un sistema georeferenziato (Fig. 53, Tab. 18).



Fig. 51: immagine google earth con posizione dei campioni C1, C2, C3, C4 e C5 lungo il tratto di rilievo effettuato.



Fig. 52: secchio da 15 litri per la raccolta del materiale e paletto per il riconoscimento di uno dei punti prelevati.

	COORDINATE DI PRELIEVO DEI PUNTI				
	SISTEMA GAUSS - BOAGA FUSO OVEST (Roma 40)				
	E [m] N [m]				
C1	1742909	5155263			
C2	1742958	5155286			
С3	1743038	5155303			
C4	1743084	5155321			
C5	1743119	5155333			

Tab. 18: coordinate Gauss - Boaga dei campioni prelevati.

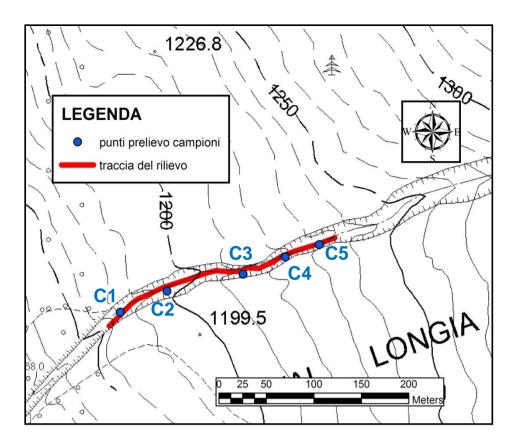


Fig. 53: disposizione dei punti di prelievo del materiale in un sistema georeferenziato. Base: CTR 1:10000 del Veneto.

Una volta prelevati tutti e cinque i campioni, sono stati trasferiti nel Laboratorio di Idrogeologia situato all'interno del Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova e successivamente distesi su dei cartoni per l'asciugatura, fondamentale prima di iniziare la prova granulometrica. Essa infatti è un tipo di prova a secco e quindi necessita che il materiale sia il più asciutto possibile e ben disgregato.

## Par. 5.2 Esecuzione delle prove granulometriche

## Par. 5.2.1 Fasi operative

Dopo essersi assicurati che il materiale disteso in precedenza si sia asciugato è necessario svolgere alcune operazioni allo scopo di preparare i campioni prima di poter iniziare la prova vera e propria. Come prima fase si passa il materiale al vaglio con maglie di 25,4 mm eliminando così i clasti con dimensioni maggiori (Fig. 54).





Fig. 54: materiale al vaglio con maglie di 25,4 mm.

Vista l'elevata quantità di materiale presente, è stata fatta una quartatura per estrarre una parte rappresentativa del campione procedendo nel seguente modo:

- ➤ Suddivisione del passante al vaglio con maglia di 25,4 mm in quattro parti e prelievo di due quarti dello stesso in diagonale (Fig. 55);
- ➤ Ulteriore suddivisione in quattro parti del materiale ricavato al passaggio precedente e prelievo sempre di due quarti in diagonale (Fig. 56);
- Pesata del campione ottenuto con la bilancia (precisione di 1 g e portata di 5 kg);
- ➤ Quartatura e pesata del materiale con dimensioni maggiori di 25,4 mm (Fig. 57).



Fig. 55: quartatura del materiale con dimensioni minori di 25,4 mm.

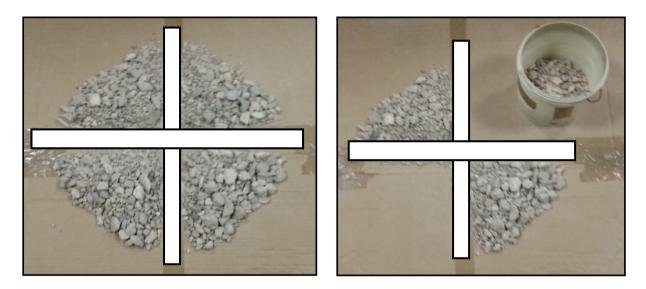


Fig. 56: ulteriore suddivisione in quattro parti e prelievo del materiale per la prova granulometrica.





Fig. 57: quartatura del materiale con dimensioni maggiori di 25,4 mm.

Dalle operazioni precedentemente descritte si ottiene un campione rappresentativo che verrà in seguito lavato in modo tale da togliere la maggior parte di materiale con dimensioni minori di 0,063 mm (Fig. 58). Questo lavaggio viene eseguito sovrapponendo una serie di vagli con maglie di diversa dimensione (tra 0,063 mm e 12,5 mm) e versandoci all'interno il materiale viene eliminata la parte passante al vaglio con maglie di dimensioni inferiori con l'aiuto dell'acqua fatta scorrere dall'alto verso il basso. Terminata questa fase si trasferisce il campione in forno con una temperatura di circa cinquanta gradi per ventiquattro ore (Fig. 59). Successivamente lo si pesa, risultando così pronto per l'analisi granulometrica (vedi Allegato 8).





Fig. 58: lavaggio del materiale per eliminare quello minore di 0,063 mm.



Fig. 59: asciugatura del campione in forno a 50° per 24 h.

I vagli a disposizione per questa prova, come detto precedentemente, hanno maglie di dimensione differente. In ordine decrescente le misure sono (Fig. 60):

- 12,500 mm;
- 9,500 mm;
- 4,750 mm;
- 2,000 mm;
- 0,850 mm;
- 0,500 mm;
- 0,250 mm;
- 0,125 mm;
- 0,063 mm.

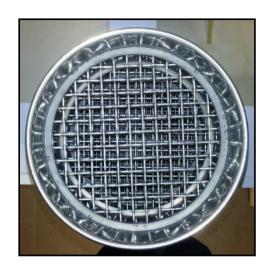


Fig. 60: vista dall'alto delle diverse dimensioni dei vagli a disposizione sovrapposti in ordine di misura decrescente.

Giunti a questo punto il materiale viene diviso in funzione della dimensione delle maglie dei setacci per poter ottenere il risultato finale di questa analisi ovvero un grafico contenente in ascissa la dimensione caratteristica dei grani in scala logaritmica e in ordinata la percentuale in peso del passante ai vari vagli sul totale del peso del campione. Per favorire la separazione granulometrica viene utilizzato un vibrovaglio che scuote la colonna di setacci per un determinato lasso di tempo. Questa macchina è composta da un piatto vibrante su cui viene appoggiato la serie di vagli.

#### **Procedura**

- ➤ Posizionamento della colonna di setacci sul piatto del vibrovaglio e introduzione di una parte del campione al suo interno (Fig. 61);
- Inserimento del coperchio per la chiusura nella parte alta al fine di impedire la fuoriuscita di materiale e accensione dello scuotitore meccanico per circa 5-6 minuti (Fig. 61);
- ➤ Separazione della colonna di setacci per lo svuotamento di ogni singolo vaglio su dei fogli indicanti le dimensioni caratteristiche del trattenuto (Fig. 62). Ripetizione delle operazioni descritte fin ora per alcune volte fino a terminare la quantità di materiale del campione;
- ➤ Pesate del materiale presente su tutti i fogli e calcolo della percentuale in peso del passante ad ogni singolo vaglio (Fig. 63).





Fig. 61: colonna di setacci sul vibrovaglio, inserimento di una parte del campione, chiusura e accensione della macchina.



Fig. 62: suddivisione in funzione delle dimensioni (in mm) del materiale trattenuto ai vagli.





Fig. 63: bilance e contenitore utilizzati per le pesate. Quella arancione a sinistra è stata utilizzata per i pesi totali (precisione 1 g, portata 5 kg) mentre l'altra per la pesata delle singole frazioni di materiale (precisione 0,1 g, portata 2 kg).

#### Par. 5.2.2 Risultati ottenuti

Una volta terminata la prova, vengono raccolti ed elaborati i dati ricavati dalle pesate utilizzando la Tab. 19 (i grafici e i dati relativi a ogni singolo campione sono presenti in Allegato 9, Allegato 10, Allegato 11, Allegato 12 e Allegato 13). Al suo interno viene evidenziato in rosso il peso secco netto prima e dopo la prova risultando leggermente diverso a causa delle inevitabili perdite di materiale durante lo svolgimento di questa prova. Nei valori di Pt e Pp si è tenuto conto sia del materiale relativo alla parte fine lavata ( $\Phi = 0$  mm) che della frazione grossolana quartata e separata nelle fasi iniziali dal campione ( $\Phi = 25,4$  mm).

#### Significato dei parametri in Tab. 19

Φ [mm] dimensione caratteristica dei grani;

Pt [g] peso trattenuto all'i-esimo vaglio;

Pp [g] peso passante all'i-esimo vaglio;

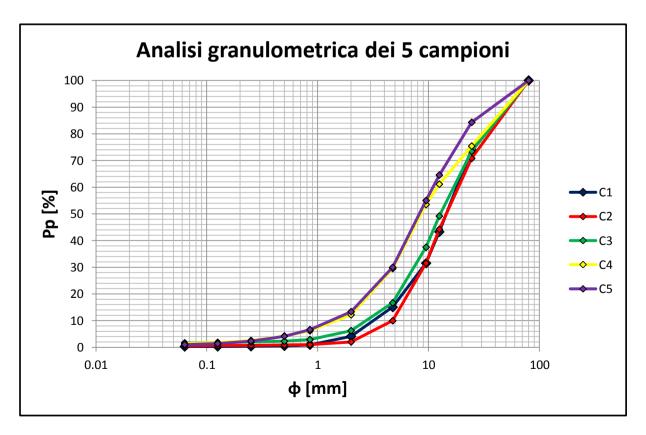
Pp [%] percentuale in peso di passante all'i-esimo vaglio con Ptot peso totale del campione:

$$Pp = \frac{Pp}{Ptot} * 100$$

ANALISI G	RANULOMETRI	CA ACQUABONA (	CAMPIONE C1	
Peso sec	Peso secco netto del campione [g]			
ф [mm]	Pt [g]	Pp [g]	% Pp [%]	
0,000	13,7	0,0	0,00	
0,063	1,5	13,7	0,28	
0,125	2,8	15,2	0,31	
0,250	7,4	18,0	0,37	
0,500	20,4	25,4	0,52	
0,850	155,4	45,8	0,93	
2,000	537,1	201,2	4,11	
4,750	805,6	738,3	15,07	
9,500	576,1	1543,9	31,50	
12,500	1509,5	2120,0	43,26	
24,500	1271,0	3629,5	74,06	
80,000	0	4900,5	100,00	
P tot.	4900,5			

Tab. 19: organizzazione dei dati ottenuti per il campione C1.

Con la percentuale in peso di passante all'i-esimo vaglio e la dimensione caratteristica dei grani si possono costruire le curve granulometriche per i cinque campioni considerati (Graf. 36) e determinare i parametri caratteristici come il coefficiente di uniformità e di curvatura (Tab. 20).



Graf. 36: curve di distribuzione granulometrica per i campioni C1, C2, C3, C4, C5.

	C <sub>u</sub> [-]	C <sub>c</sub> [-]	Φ <sub>10</sub> [mm]	Ф <sub>30</sub> [mm]	Ф <sub>60</sub> [mm]
C1	5,6	1,4	3,2	9,0	18,0
C2	3,8	0,9	4,8	9,0	18,0
С3	6,1	1,2	2,8	7,5	17,0
C4	8,7	1,2	1,5	4,8	13,0
C5	9,2	1,5	1,3	4,8	12,0

*Tab.* 20: parametri caratteristici ricavati dalle curve granulometriche.

### Significato dei parametri utilizzati in Tab. 20

C<sub>u</sub> [-] coefficiente di uniformità delle curve nel Graf. 36 [12]:

$$C_u = \frac{\Phi_{60}}{\Phi_{10}}$$

C<sub>c</sub> [-] coefficiente di curvatura delle curve nel Graf. 36 [12]:

$$C_{c} = \frac{\Phi_{30}^{2}}{\Phi_{60} * \Phi_{10}}$$

 $\Phi_{10}$  [mm] dimensione corrispondente al valore 10 % di passante;

 $\Phi_{30} \ [mm]$  dimensione corrispondente al valore 30 % di passante;

 $\Phi_{60} \ [mm] \qquad \mbox{dimensione corrispondente al valore 60 \% di passante}.$ 

#### Par. 5.3 Discussione dei risultati

Osservando il Graf. 36, rappresentante le curve di distribuzione granulometrica per i campioni studiati, si può notare come le dimensioni caratteristiche delle particelle inferiori ad un millimetro siano presenti in percentuale molto basse mentre le frazioni più grossolane sono decisamente prevalenti. Questo può essere dovuto al fatto che i campioni sono stati prelevati in superficie dove la frazione più grossolana è maggiore oppure a causa del dilavamento superficiale della frazione fina.

Sempre dal Graf. 36 si può osservare come le curve dei campioni situati più a valle (C1, C2, C3) presentino un contenuto in materiale con diametro compreso tra 1 mm e 20-30 mm minore rispetto ai campioni prelevati più a monte (C3, C4). Ciò è dimostrato anche dai valori del coefficiente di uniformità, C<sub>u</sub>, presenti in Tab. 20 che sono più bassi per le curve C1, C2, C3 e più alti per le curve C4 e C5. Le zone in cui sono stati prelevati i cinque campioni presentano una inclinazione media del fondo del canale variabile tra i 10,3° (C1, C2, C3) e gli 11,6° (C4 e C5). L'ipotesi è che le colate da cui sono stati prelevati i campioni si siano originate da zone differenti e quindi abbiano preso in carico materiale con distribuzione granulometrica diversa.

Tutte queste considerazioni fatte fino ad ora ci indicano che siamo in presenza di terreni uniformi, poco gradati, costituiti per la maggior parte da ghiaia mista a ciottoli, sabbia e piccole frazioni di materiale con dimensione minore di 0,063 mm (Tab. 21).

		Φ [mm]
BLOCCHI		>200
CIOTTOLI		60<Ф≤200
	grossa	20<Φ≤60
GHIAIA	media	6<Ф≤20
	fine	2<Φ≤6
	grossa	0,6<Ф≤2
SABBIA	media	0,2<Ф≤0,6
	fine	0,06<Ф≤0,2
	grosso	0,02<Ф≤0,06
LIMO	medio	0,006<Φ≤0,02
	fine	0,002<Φ≤0,006
ARGILLA		≤0,002

Tab. 21: classificazione dei terreni in funzione della dimensione delle particelle.

# CAP. 6 CONDIZIONI DI INNESCO IDRO-GEOLOGICHE SECONDO TAKAHASHI

## Par. 6.1 Applicazione dell'equazione di Takahashi

Dopo aver studiato gli aspetti morfologici delle colate detritiche, ci concentriamo ora sulle loro condizioni d'innesco. Sono molti gli aspetti e le discipline che trattano lo sviluppo dei debrisflow ma in questo caso sarà esaminato un modello teorico che definisce la situazione limite per l'attivazione del fenomeno in esame.

Il modello a cui si fa riferimento è stato sviluppato dal giapponese Takahashi nel 1981, che pone le seguenti condizioni per la sua applicazione [10]:

- Scorrimento superficiale;
- > Rottura bidimensionale;
- > Filtrazione parallela al pendio;
- > Criterio di rottura di Mohr-Coulomb;
- Terreno non coesivo (annullamento nelle fasi iniziali della rottura).

### Par. 6.1.1 Parametri presenti nel modello considerato

Nel modello proposto da Takahashi le forze stabilizzanti e destabilizzanti sono scritte come segue (Fig. 65):

Forze stabilizzanti:  $[(\rho_s - \rho) * g * C^* * a_L] * \cos \alpha * \tan \phi;$ 

 $\label{eq:continuous_problem} \text{Forze destabilizzanti:} \quad \left[ \rho_s * C^* * a_L + \rho * h_0 + \rho * (1 - C^*) * a_L \right] * g * \sin \alpha.$ 

Il rapporto tra queste due forze definisce il fattore di sicurezza (FS) che risulta uguale a uno in condizioni di equilibrio limite e minore di uno in regime di instabilità.

L'equazione che esprime questo concetto è la seguente [10]:

$$FS = \frac{Forze\ stabilizzanti}{Forze\ destabilizzanti} = \frac{\left[\left(\rho_s - \rho\right) * g * C^* * a_L\right] * tan\ \phi}{\left[\rho_s * C^* * a_L + \rho * h_0 + \rho * (1 - C^*) * a_L\right] * g * tan\ \phi}$$

### Significato dei parametri utilizzati nella formula del fattore di sicurezza (Fig. 64)

 $\rho_s [kg/m^3]$ densità del materiale solido;  $\rho [kg/m^3]$ densità del fluido interstiziale durante l'innesco;  $g [m/s^2]$ accelerazione di gravità; C\* [-] concentrazione di volume delle particelle solide (varia tra 0 e 1);  $a_{L}[m]$ spessore di materiale solido coinvolto nella colata;  $h_0[m]$ spessore idrico sopra al materiale solido; α [°] inclinazione del pendio;  $\phi$  [°] angolo d'attrito del materiale granulare.

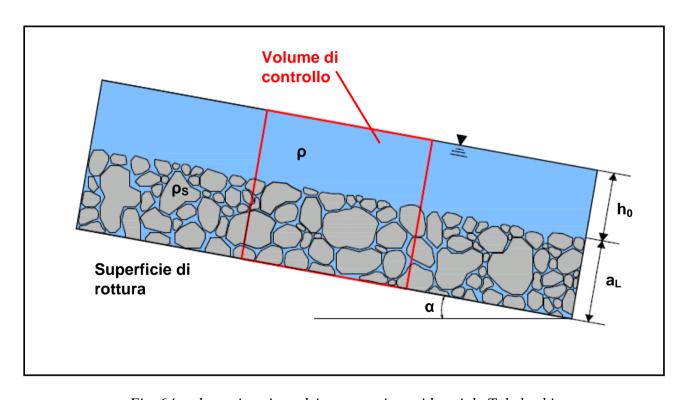


Fig. 64: schematizzazione dei parametri considerati da Takahashi.

Le forze stabilizzanti presenti nell'equazione del fattore di sicurezza proposta da Takahashi sono composte da due componenti (Fig. 65):

 $\triangleright$  Componente normale del materiale:  $N_M = \rho_S * g * C^* * a_L * cos α;$ 

 $\triangleright$  Componente normale di galleggiamento:  $N_G = -\rho * g * C^* * a_L * cos α$ .

Le forze destabilizzanti considerate hanno invece tre componenti:

ightharpoonup Componente di taglio del materiale:  $T_M = \rho_S * g * C^* * a_L * \sin \alpha;$ 

ightharpoonup Componente di taglio idrica:  $T_i = ρ * g * h_0 * \sin α;$ 

ightharpoonup Componente di taglio idrica intergranulare:  $T_G = \rho * g * (1 - C^*) * a_L * \sin α$ .

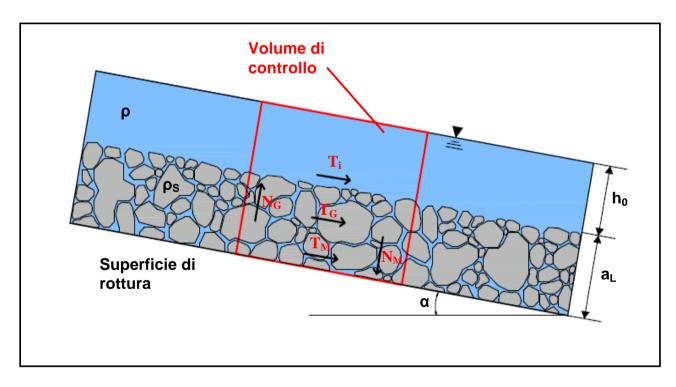


Fig. 65: forze stabilizzanti e destabilizzanti considerate nel modello di Takahashi per il calcolo del fattore di sicurezza FS.

Cerchiamo ora di studiare e comprendere quali sono le condizioni limite per cui avviene l'innesco di un debris-flow al di sopra di una certa superficie di debolezza.

Per fare ciò, dopo aver posto il fattore di sicurezza (FS) uguale a uno e mantenendo costanti i parametri  $\rho_s$ ,  $\rho$ ,  $C^*$  e g, viene determinata la relazione che esiste tra lo spessore del materiale solido coinvolto nella colata (a<sub>L</sub>) e l'altezza idrica al di sopra del materiale solido (h<sub>0</sub>) al variare dell'inclinazione del pendio ( $\alpha$ ) e dell'angolo di attrito del materiale ( $\varphi$ ). Questa relazione ci permette quindi di valutare lo spessore di materiale che viene movimentato a seconda dei valori assunti da  $\alpha$ ,  $\varphi$  e h<sub>0</sub>.

Nell'applicazione di questo modello sono stati utilizzati e mantenuti costanti i seguenti valori dei parametri:

- $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3 \text{ massa volumica dell'acqua};$
- $\rho_S = 2600 \text{ kg/m}^3$  massa volumica della dolomia che costituisce l'ammasso granulare;
- C\* = 0.8;
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ .

Gli altri parametri in gioco quali  $\alpha$ ,  $\varphi$  e  $h_0$  sono stati variati e i risultati ottenuti sono riportati in Tab. 22, Tab. 23 e Tab. 24 insieme all'unica incognita che rimane  $a_L$ , dato che il fattore di sicurezza, FS, come già detto precedentemente è stato posto uguale a uno. Le variazioni sono così espresse:

- $\alpha = 20^{\circ}, 25^{\circ}, 30^{\circ};$
- $\varphi = 30^{\circ}, 35^{\circ}, 40^{\circ};$
- $h_0$  variabile tra 0,05 m e 0,7 m con intervalli di 0,05 m.

#### Par. 6.1.2 Risultati

In Tab. 22, Tab. 23 e Tab. 24 sono riportati i valori di  $a_L$  per un'inclinazione del pendio pari a  $20^{\circ}$ ,  $25^{\circ}$  e  $30^{\circ}$  rispettivamente, con angoli di attrito del materiale granulare di  $30^{\circ}$ ,  $35^{\circ}$ ,  $40^{\circ}$ . In alcune configurazioni  $a_L$  risulta negativo assumendo un valore fisicamente non ammissibile. In queste configurazioni il modello di Takahashi deve essere modificato come nel seguito.

$\alpha = 20^{\circ}$	$\varphi = 30^{\circ}$	$\alpha = 20^{\circ} \ \varphi = 35^{\circ}$		$=30^{\circ} \qquad \qquad \alpha=20^{\circ}  \varphi =35^{\circ} \qquad \qquad \alpha=20^{\circ}  \varphi$		$\varphi = 40^{\circ}$
a <sub>L</sub> [m]	h <sub>0</sub> [m]	a <sub>L</sub> [m]	h <sub>0</sub> [m]	a <sub>L</sub> [m]	h <sub>0</sub> [m]	
-0,20	0,05	0,27	0,05	0,07	0,05	
-0,40	0,10	0,55	0,10	0,15	0,10	
-0,60	0,15	0,82	0,15	0,22	0,15	
-0,80	0,20	1,10	0,20	0,30	0,20	
-1,00	0,25	1,37	0,25	0,37	0,25	
-1,20	0,30	1,64	0,30	0,45	0,30	
-1,40	0,35	1,92	0,35	0,52	0,35	
-1,60	0,40	2,19	0,40	0,60	0,40	
-1,80	0,45	2,47	0,45	0,67	0,45	
-2,00	0,50	2,74	0,50	0,75	0,50	
-2,20	0,55	3,01	0,55	0,82	0,55	
-2,40	0,60	3,29	0,60	0,89	0,60	
-2,60	0,65	3,56	0,65	0,97	0,65	
-2,80	0,70	3,84	0,70	1,04	0,70	

Tab. 22: valori di  $a_L$  per  $\alpha=20^{\circ}$  e  $\varphi=30^{\circ}$ ,  $35^{\circ}$ ,  $40^{\circ}$ , con FS=1.

<i>α</i> = 25°	$\varphi = 30^{\circ}$	$\alpha = 25^{\circ} \ \varphi = 35^{\circ}$		<i>α</i> = 25°	$25^{\circ}                                    $	
a <sub>L</sub> [m]	h <sub>0</sub> [m]	a <sub>L</sub> [m]	h <sub>0</sub> [m]	a <sub>L</sub> [m]	$h_0[m]$	
-0,07	0,05	-0,14	0,05	2,15	0,05	
-0,14	0,10	-0,28	0,10	4,29	0,10	
-0,22	0,15	-0,42	0,15	6,44	0,15	
-0,29	0,20	-0,56	0,20	8,58	0,20	
-0,36	0,25	-0,70	0,25	10,73	0,25	
-0,43	0,30	-0,84	0,30	12,87	0,30	
-0,50	0,35	-0,98	0,35	15,02	0,35	
-0,58	0,40	-1,12	0,40	17,17	0,40	
-0,65	0,45	-1,26	0,45	19,31	0,45	
-0,72	0,50	-1,40	0,50	21,46	0,50	
-0,79	0,55	-1,54	0,55	23,60	0,55	
-0,86	0,60	-1,68	0,60	25,75	0,60	
-0,93	0,65	-1,82	0,65	27,89	0,65	
-1,01	0,70	-1,96	0,70	30,04	0,70	

Tab. 23: valori di  $a_L$  per  $\alpha=25^{\circ}$  e  $\varphi=30^{\circ}$ ,  $35^{\circ}$ ,  $40^{\circ}$ , con FS=1.

$\alpha = 30^{\circ} \ \varphi = 35^{\circ}$		$\alpha = 30^{\circ} \ \varphi = 40^{\circ}$		
a <sub>L</sub> [m]	h <sub>0</sub> [m]	a <sub>L</sub> [m]	h <sub>0</sub> [m]	
-0,07	0,05	-0,12	0,05	
-0,14	0,10	-0,24	0,10	
-0,21	0,15	-0,36	0,15	
-0,27	0,20	-0,48	0,20	
-0,34	0,25	-0,60	0,25	
-0,41	0,30	-0,71	0,30	
-0,48	0,35	-0,83	0,35	
-0,55	0,40	-0,95	0,40	
-0,62	0,45	-1,07	0,45	
-0,69	0,50	-1,19	0,50	
-0,76	0,55	-1,31	0,55	
-0,82	0,60	-1,43	0,60	
-0,89	0,65	-1,55	0,65	
-0,96	0,70	-1,67	0,70	

*Tab.* 24: valori di  $a_L$  per  $\alpha = 30^{\circ}$  e  $\varphi = 35^{\circ}$ ,  $40^{\circ}$ , con FS = 1.

Il modello di innesco di Takahashi non fornisce configurazioni fisicamente accettabili quando la differenza tra l'angolo d'attrito del materiale e l'angolo di inclinazione del pendio è sufficientemente piccola. Lo schema statico viene modificato come in Fig. 66.

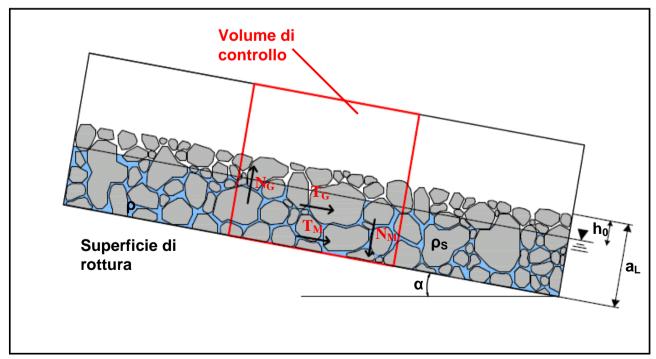


Fig. 66: nuovo schema statico, adottato nelle configurazioni fisiche nelle quali lo schema di Takahashi fornisce risultati fisicamente non accettabili.

Con il nuovo modello considerato variano anche le forze stabilizzanti e destabilizzanti per la determinazione del fattore di sicurezza, FS, che sono le seguenti:

Forze stabilizzanti: 
$$[\rho_S * a_L - \rho * (a_L - h_0)] * C^* * \cos \alpha * \tan \varphi;$$

Forze destabilizzanti: 
$$\left[\rho_S * C^* * a_L + \rho * (1 - C^*) * (a_L - h_0)\right] * \sin \alpha.$$

Le componenti che descrivono queste due forze variano così (Fig. 66):

Componente normale del materiale: 
$$N_M = \rho_S * g * C^* * a_L * cos α;$$

► Componente normale di galleggiamento: 
$$N_G = -\rho * g * C^* * (a_L - h_0) * \cos \alpha;$$

Componente di taglio del materiale: 
$$T_M = \rho_S * g * C^* * a_L * \sin \alpha;$$

► Componente di taglio idrica intergranulare: 
$$T_G = ρ * g * (1 - C^*) * (a_L - h_0) * sin α$$
.

Come si nota dalla Fig. 66 il livello idrico non si trova più al di sopra del materiale granulare come nelle Fig. 64 e Fig. 65 ma si trova ad una quota compresa tra la parte più alta del materiale e la superficie di rottura. Il fattore di sicurezza (FS) va calcolato con le nuove forze stabilizzanti e destabilizzanti come espresso dalla seguente formula:

$$FS = \frac{Forze\ stabilizzanti}{Forze\ destabilizzanti} = \frac{\left[\rho_S*a_L - \rho*(a_L - h_0)\right]*C^**tan\,\phi}{\left[\rho_S*C^**a_L + \rho*(1-C^*)*(a_L - h_0)\right]*tan\,\alpha}$$

Per le tabelle precedenti (Tab. 22, 23, 24) che presentavano valori di a<sub>L</sub> negativi questi ultimi sono stati ricalcolati, tenendo sempre il fattore di sicurezza (FS) uguale a uno. I nuovi risultati ottenuti sono rappresentati in Tab. 25 e Tab. 26.

$\alpha = 20^{\circ}$	$\varphi$ [°] = 30°	$\alpha = 25^{\circ} \ \varphi = 30^{\circ}$		$=30^{\circ} \qquad \alpha=25^{\circ}  \varphi=30^{\circ} \qquad \alpha=25^{\circ}$		$\alpha = 25^{\circ}$	$\varphi = 35^{\circ}$
a <sub>L</sub> [m]	h <sub>0</sub> [m]	a <sub>L</sub> [m]	h <sub>0</sub> [m]	a <sub>L</sub> [m]	$\mathbf{h}_0[\mathbf{m}]$		
0,29	0,05	0,09	0,05	0,20	0,05		
0,59	0,10	0,17	0,10	0,39	0,10		
0,88	0,15	0,26	0,15	0,59	0,15		
1,18	0,20	0,34	0,20	0,78	0,20		
1,47	0,25	0,43	0,25	0,98	0,25		
1,77	0,30	0,51	0,30	1,17	0,30		
2,06	0,35	0,60	0,35	1,37	0,35		
2,35	0,40	0,68	0,40	1,57	0,40		
2,65	0,45	0,77	0,45	1,76	0,45		
2,94	0,50	0,86	0,50	1,96	0,50		
3,24	0,55	0,94	0,55	2,15	0,55		
3,53	0,60	1,03	0,60	2,35	0,60		
3,83	0,65	1,11	0,65	2,54	0,65		
4,12	0,70	1,20	0,70	2,74	0,70		

Tab. 25: nuovi valori di  $a_L$  seguendo lo schema di Fig. 66.

$\alpha \ [^{\circ}] = 30^{\circ} \ \varphi \ [^{\circ}] = 35^{\circ}$		$\alpha$ [°] = 30° $\varphi$ [°] = 40°		
a <sub>L</sub> [m]	$h_0[m]$	a <sub>L</sub> [m]	h <sub>0</sub> [m]	
0,08	0,05	0,16	0,05	
0,16	0,10	0,32	0,10	
0,24	0,15	0,49	0,15	
0,32	0,20	0,65	0,20	
0,40	0,25	0,81	0,25	
0,48	0,30	0,97	0,30	
0,56	0,35	1,14	0,35	
0,64	0,40	1,30	0,40	
0,72	0,45	1,46	0,45	
0,80	0,50	1,62	0,50	
0,88	0,55	1,79	0,55	
0,96	0,60	1,95	0,60	
1,05	0,65	2,11	0,65	
1,13	0,70	2,27	0,70	

Tab. 26: nuovi valori di  $a_L$  seguendo lo schema di Fig. 66.

Infine viene valutato l'andamento di a<sub>L</sub> rispetto ad h<sub>0</sub> (Graf. 37) e di h<sub>0</sub> in relazione ad a<sub>L</sub> (Graf. 38) in funzione dei parametri utilizzati. Nel Graf. 37 sono raffigurate le condizioni di instabilità che si verificano nella configurazione di Fig. 64 mentre nel Graf. 38 si ha destabilizzazione lungo il piano di rottura secondo lo schema presente in Fig. 66 in funzione dei parametri utilizzati.

$$\alpha = 20^{\circ} \text{ e } \phi = 35^{\circ}$$
  $a_L = 5,48 * h_0$ 

$$\alpha = 20^{\circ} \text{ e } \phi = 40^{\circ}$$
  $a_L = 1,49 * h_0$ 

Graf. 37

$$\alpha = 20^{\circ} \text{ e } \phi = 30^{\circ}$$
  $h_0 = 0.17 * a_L$ 

$$\alpha = 25^{\circ} e \phi = 30^{\circ}$$
  $h_0 = 0.58 * a_L$ 

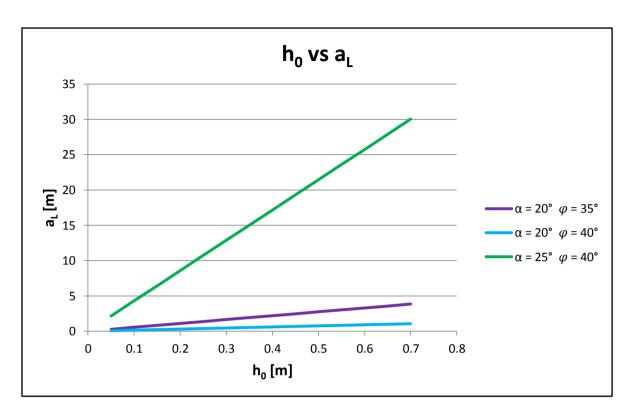
$$\alpha = 25^{\circ} \text{ e } \phi = 35^{\circ}$$
  $h_0 = 0.25 * a_L$ 

Graf. 38

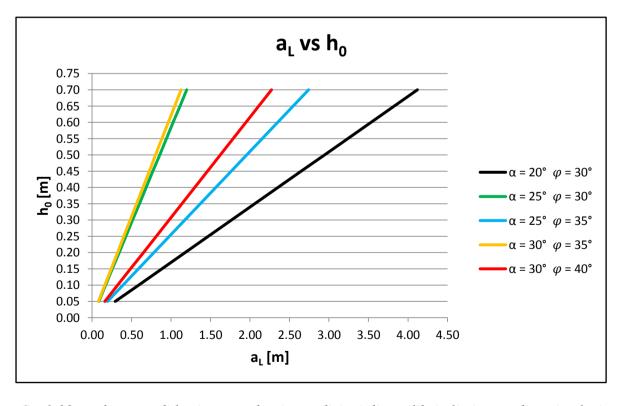
$$\alpha = 30^{\circ} \text{ e } \phi = 35^{\circ}$$
  $h_0 = 0.62 * a_L$ 

$$\alpha = 30^{\circ} \text{ e } \phi = 40^{\circ}$$
  $h_0 = 0.31 * a_L$ 

Nel Graf. 37 la variabile dipendente è a<sub>L</sub> mentre nel Graf. 38 è h<sub>0</sub>. Questo scambio tra variabile dipendente e indipendente si è reso necessario a causa del diverso significato di h<sub>0</sub> nei due schemi considerati.



Graf. 37: andamento di  $a_L$  in funzione di  $h_0$  in condizioni di equilibrio limite per diversi valori di  $\alpha$  e  $\varphi$  secondo lo schema di Fig. 64.



Graf. 38: andamento di  $h_0$  rispetto ad  $a_L$  in condizioni di equilibrio limite per diversi valori di  $\alpha$  e  $\varphi$  secondo lo schema di Fig. 66.

Le valutazioni finali che si possono fare dopo aver studiato e analizzato i modelli rappresentativi descritti in questo capitolo sono le seguenti:

- Il modello sviluppato nel 1981 da Takahashi (Fig. 64) non è applicabile a tutti gli intervalli di valori assunti dall'angolo di inclinazione del pendio, α, e angolo di attrito del materiale granulare, φ, ma solo per alcuni. Le condizioni in cui a<sub>L</sub> assume valore negativo necessitano di una modifica del modello secondo lo schema in Fig. 66;
- La teoria di Takahashi (Graf. 13, Fig. 64) mostra che all'aumentare della differenza di α e φ aumenta il valore di h<sub>0</sub> necessario per destabilizzare uno strato di materiale con spessore a<sub>L</sub> costante (Tab. 22);
- Nel Graf. 14 facente riferimento al modello modificato di Takahashi (Fig. 66) si osserva che maggiore è la differenza tra l'inclinazione del pendio (α) e l'angolo di attrito del materiale (φ) minore è il valore di h<sub>0</sub> necessario a muovere uno strato di materiale con spessore a<sub>1</sub>;
- ➤ Nel modello proposto da Takahashi non vengono considerati diversi fattori: la quantità di vegetazione presente e quindi il peso che la stessa esercita sul terreno, l'effetto di ritenuta delle sue radici, la coesione interna, la scabrezza del fondo ed eventuali argini laterali di contenimento. Tutti questi fattori non considerati nel modello risultano importanti perché potrebbero influenzare le modalità d'innesco del fenomeno.

## **CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE**

La distinzione tra canali attivi e non attivi evidenzia una distribuzione in classi di frequenza dei valori dei parametri morfologici considerati diversa nei due casi. La tortuosità è l'unico parametro che presenta valori simili in entrambe le situazioni.

Il parametro che esprime una correlazione maggiore con l'inclinazione media dei canali è la quota media. I canali attivi denotano un certo legame anche con lunghezza e tortuosità mentre i non attivi solo con la quota media.

La lunghezza dei canali a valle dei bacini presenta valori di coefficiente di determinazione (R<sup>2</sup>) maggiori relazionandola all'area, al perimetro e alla frequenza di drenaggio dei bacini stessi.

L'evoluzione futura della morfologia del canale tende ad una progressiva erosione della parte a monte e al riempimento dell'alveo nella parte terminale con pericolo di tracimazioni.

Il rilievo topografico speditivo è applicabile con discreti risultati alla misurazione dei parametri morfometrici dei canali di colata.

Dall'analisi granulometrica effettuata è risultato che il terreno è uniforme, poco gradato, costituito per la maggior parte da ghiaia mista a ciottoli, sabbia e piccole frazioni di materiale con dimensione minore di 0,063 mm. I campioni prelevati dai due depositi presenti più a monte (C4 e C5) mostrano un contenuto in sabbia maggiore rispetto ai campioni C1, C2 e C3 posti più a valle, e descrivono, probabilmente, diversi fenomeni di colata.

Il modello di innesco di Takahashi non è applicabile a tutti gli intervalli di valori ragionevolmente assumibili dall'angolo di inclinazione del pendio,  $\alpha$ , e dall'angolo di attrito del materiale granulare,  $\phi$ . Condizioni di destabilizzazione in assenza di scorrimento superficiale devono essere trattate con un modello modificato.

Nel campo di validità del modello di Takahashi, all' aumentare della differenza tra angolo di inclinazione del pendio e angolo d'attrito del materiale, mantenendo lo spessore dell'ammasso granulare (a<sub>L</sub>) costante, aumenta anche il livello idrico necessario per destabilizzare la massa.

## **ALLEGATI**

## **CAPITOLO 3**

Id	L [m]	l [m]	Δc [m]	a [-]	<b>i</b> <sub>m</sub> [°]	T [%]	Q <sub>max</sub> [m s.l.m.]	Q <sub>min</sub> [m s.l.m.]	Q <sub>m</sub> [m s.l.m.]
0	1610	1424	520	1	17,9	13,1	1640	1120	1380
1	298	295	185	1	31,8	1,0	1745	1560	1653
2	255	246	125	1	26,1	3,7	1495	1370	1433
3	369	341	150	1	22,1	8,2	1575	1425	1500
4	90	88	35	1	21,3	2,3	1535	1500	1518
5	207	204	135	1	33,1	1,5	1635	1500	1568
6	351	341	170	2	25,8	2,9	1550	1380	1465
7	203	200	45	2	12,5	1,5	1220	1175	1198
8	394	380	75	2	10,8	3,7	1215	1140	1178
9	290	279	55	2	10,7	3,9	1240	1185	1213
10	190	188	40	2	11,9	1,1	1230	1190	1210
11	152	146	30	2	11,2	4,1	1210	1180	1195
12	120	119	20	1	9,5	0,8	1150	1130	1140
13	153	141	25	2	9,3	8,5	1160	1135	1148
14	460	431	130	2	15,8	6,7	1360	1230	1295
15	1026	878	380	1	20,3	16,9	1635	1255	1445
16	490	461	160	2	18,1	6,3	1430	1270	1350
17	186	184	60	2	17,9	1,1	1360	1300	1330
18	249	242	90	2	19,9	2,9	1420	1330	1375
19	1293	1148	330	1	14,3	12,6	1450	1120	1285
20	1612	1537	455	1	15,8	4,9	1535	1080	1308
21	149	142	45	2	16,8	4,9	1330	1285	1308
22	258	250	75	2	16,2	3,2	1295	1220	1258
23	86	86	30	2	19,2	0,0	1280	1250	1265
24	114	112	45	2	21,5	1,8	1475	1430	1453
25	147	146	90	2	31,5	0,7	1625	1535	1580
26	85	83	55	2	32,9	2,4	1620	1565	1593
27	308	291	250	1	39,1	5,8	1850	1600	1725
28	495	486	280	2	29,5	1,9	1790	1510	1650
29	1019	996	615	1	31,1	2,3	2040	1425	1733
30	403	399	270	2	33,8	1,0	2000	1730	1865
31	476	456	310	1	33,1	4,4	2050	1740	1895
32	169	164	140	1	39,6	3,0	2080	1940	2010
33	177	176	130	1	36,3	0,6	2100	1970	2035
34	137	122	80	1	30,3	12,3	2050	1970	2010
35	635	625	320	2	26,7	1,6	1705	1385	1545
36	258	243	195	2	37,1	6,2	1835	1640	1738

_		-	-						
37	418	414	295	2	35,2	1,0	1875	1580	1728
38	808	751	200	2	13,9	7,6	1340	1140	1240
39	176	171	40	2	12,8	2,9	1210	1170	1190
40	161	157	50	2	17,3	2,5	1325	1275	1300
41	131	131	40	2	17,0	0,0	1260	1220	1240
42	120	119	45	2	20,6	0,8	1415	1370	1393
43	737	702	205	1	15,5	5,0	1395	1190	1293
44	329	323	95	1	16,1	1,9	1330	1235	1283
45	600	569	170	2	15,8	5,4	1355	1185	1270
46	990	834	270	2	15,3	18,7	1420	1150	1285
47	308	291	90	2	16,3	5,8	1350	1260	1305
48	950	880	235	2	13,9	8,0	1310	1075	1193
49	269	257	185	1	34,5	4,7	1730	1545	1638
50	240	239	65	2	15,2	0,4	1315	1250	1283
51	248	244	65	2	14,7	1,6	1315	1250	1283
52	222	214	70	2	17,5	3,7	1420	1350	1385
53	1092	1029	305	2	15,6	6,1	1425	1120	1273
54	353	332	125	2	19,5	6,3	1275	1150	1213
55	146	145	70	2	25,6	0,7	1430	1360	1395
56	325	319	150	2	24,8	1,9	1415	1265	1340
57	444	435	195	2	23,7	2,1	1370	1175	1273
58	151	145	70	2	24,9	4,1	1325	1255	1290
59	453	446	115	2	14,2	1,6	1240	1125	1183
60	1438	1282	450	1	17,4	12,2	1570	1120	1345
61	562	526	285	2	26,9	6,8	1625	1340	1483
62	967	880	455	2	25,2	9,9	1650	1195	1423
63	666	655	295	2	23,9	1,7	1460	1165	1313
64	1035	992	475	1	24,7	4,3	1670	1195	1433
65	328	318	160	2	26,0	3,1	1575	1415	1495
66	45	44	30	1	33,7	2,3	1590	1560	1575
67	162	160	85	1	27,7	1,3	1550	1465	1508
68	394	391	205	1	27,5	0,8	1590	1385	1488
69	442	410	105	2	13,4	7,8	1270	1165	1218
70	597	573	115	2	10,9	4,2	1235	1120	1178
71	400	375	85	2	12,0	6,7	1220	1135	1178
72	134	132	30	2	12,6	1,5	1190	1160	1175
73	776	694	165	2	12,0	11,8	1290	1125	1208
74	1091	1005	250	2	12,9	8,6	1365	1115	1240
75	255	249	60	2	13,2	2,4	1295	1235	1265
76	258	244	60	2	13,1	5,7	1270	1210	1240
77	105	104	25	2	13,4	1,0	1185	1160	1173
78	255	238	45	2	10,0	7,1	1180	1135	1158
79	1412	1279	365	1	14,5	10,4	1410	1045	1228
80	495	478	130	2	14,7	3,6	1275	1145	1210

0.1	1.77	1.47	70	0	177	<i>c</i> 0	1.400	1250	1277
81	157	147	50	2	17,7	6,8	1400	1350	1375
82	866	830	250	2	16,1	4,3	1350	1100	1225
83	932	861	405	1	23,5	8,2	1640	1235	1438
84	178	176	75	2	22,8	1,1	1450	1375	1413
85	131	130	60	1	24,6	0,8	1440	1380	1410
86	82	81	25	2	17,0	1,2	1480	1455	1468
87	82	80	50	1	31,4	2,5	1525	1475	1500
88	964	937	305	1	17,6	2,9	1440	1135	1288
89	310	284	75	2	13,6	9,2	1195	1120	1158
90	90	89	25	2	15,5	1,1	1160	1135	1148
91	150	146	40	2	14,9	2,7	1165	1125	1145
92	101	98	30	2	16,5	3,1	1220	1190	1205
93	65	47	15	2	13,0	38,3	1265	1250	1258
94	245	236	150	1	31,5	3,8	1570	1420	1495
95	123	122	85	1	34,6	0,8	1555	1470	1513
96	173	169	45	2	14,6	2,4	1385	1340	1363
97	1667	1517	500	1	16,7	9,9	1525	1025	1275
98	942	909	325	2	19,0	3,6	1565	1240	1403
99	155	153	90	1	30,1	1,3	1620	1530	1575
MAX	1667,0	1537,0	615,0		39,6	38,3	2100	1970	2035
MIN	45,0	44,0	15,0		9,3	0,0	1150	1025	1140
MEDIA	438,2	412,4	157,7		20,7	4,7	1462	1304	1383
MODA	255,0	146,0	45,0		31,5	2,3	1220	1120	1240
σ	392,4	357,6	135,5		7,9	5,0	228	198	203
$\sigma^2$	153946,2	127842,4	18351,7		62,8	25,4	52154	39161	41070

Allegato 1: valori misurati e calcolati dei parametri morfologici relativi ai canali di colata.

Id	L [m]	l [m]	Δc [m]	a [-]	<b>i</b> <sub>m</sub> [°]	T [%]	Q <sub>m</sub> [m s.l.m.]
0	1610	1424	520	1	17,9	13,1	1380
1	298	295	185	1	31,8	1,0	1653
2	255	246	125	1	26,1	3,7	1433
3	369	341	150	1	22,1	8,2	1500
4	90	88	35	1	21,3	2,3	1518
5	207	204	135	1	33,1	1,5	1568
12	120	119	40	1	18,4	0,8	1140
15	1026	878	380	1	20,3	16,9	1445
19	1293	1148	330	1	14,3	12,6	1285
20	1612	1537	450	1	15,6	4,9	1308
27	308	291	250	1	39,1	5,8	1725
29	1019	996	615	1	31,1	2,3	1733
31	476	456	310	1	33,1	4,4	1895
32	169	164	140	1	39,6	3,0	2010
33	177	176	130	1	36,3	0,6	2035
34	137	122	80	1	30,3	12,3	2010
43	737	702	205	1	15,5	5,0	1293
44	329	323	95	1	16,1	1,9	1283
49	269	257	185	1	34,5	4,7	1638
60	1438	1282	450	1	17,4	12,2	1345
64	1035	992	475	1	24,7	4,3	1433
66	45	44	30	1	33,7	2,3	1575
67	162	160	85	1	27,7	1,3	1508
68	394	391	205	1	27,5	0,8	1488
79	1412	1279	365	1	14,5	10,4	1228
83	932	861	405	1	23,5	8,2	1438
85	131	130	60	1	24,6	0,8	1410
87	82	80	50	1	31,4	2,5	1500
88	964	937	305	1	17,6	2,9	1288
94	245	236	155	1	32,3	3,8	1495
95	123	122	85	1	34,6	0,8	1513
97	1667	1517	500	1	16,7	9,9	1275
99	155	153	90	1	30,1	1,3	1575
MAX	1667,0	1537,0	615,0		39,6	16,9	2035,0
MIN	45,0	44,0	30,0		14,3	0,6	1140,0
MEDIA	584,4	544,0	230,9		25,8	5,0	1512,8
σ	535,5	485,5	166,7		7,8	4,5	227,5
$\sigma^2$	286803,9	235742,5	27783,5		61,2	20,0	51735,8

Allegato 2: valori misurati e calcolati dei parametri morfologici relativi ai canali di colata attivi.

Id	L [m]	l [m]	Δc [m]	a [-]	<b>i</b> <sub>m</sub> [°]	T [%]	Q <sub>m</sub> [m s.l.m.]
6	351	341	170	2	25,8	2,9	1465
7	203	200	65	2	17,8	1,5	1198
8	394	380	135	2	18,9	3,7	1178
9	290	279	85	2	16,3	3,9	1213
10	190	188	45	2	13,3	1,1	1210
11	152	146	50	2	18,2	4,1	1195
13	153	141	50	2	18,1	8,5	1148
14	460	431	130	2	15,8	6,7	1295
16	490	461	160	2	18,1	6,3	1350
17	186	184	60	2	17,9	1,1	1330
18	249	242	90	2	19,9	2,9	1375
21	149	142	45	2	16,8	4,9	1308
22	258	250	75	2	16,2	3,2	1258
23	86	86	30	2	19,2	0,0	1265
24	114	112	45	2	21,5	1,8	1453
25	147	146	90	2	31,5	0,7	1580
26	85	83	55	2	32,9	2,4	1593
28	495	486	280	2	29,5	1,9	1650
30	403	399	270	2	33,8	1,0	1865
35	635	625	320	2	26,7	1,6	1545
36	258	243	195	2	37,1	6,2	1738
37	418	414	295	2	35,2	1,0	1728
38	808	751	210	2	14,6	7,6	1240
39	176	171	40	2	12,8	2,9	1190
40	161	157	50	2	17,3	2,5	1300
41	131	131	40	2	17,0	0,0	1240
42	120	119	45	2	20,6	0,8	1393
45	600	569	170	2	15,8	5,4	1270
46	990	834	270	2	15,3	18,7	1285
47	308	291	90	2	16,3	5,8	1305
48	950	880	235	2	13,9	8,0	1193
50	240	239	70	2	16,3	0,4	1283
51	248	244	70	2	15,8	1,6	1283
52	222	214	70	2	17,5	3,7	1385
53	1092	1029	305	2	15,6	6,1	1273
54	353	332	125	2	19,5	6,3	1213
55	146	145	70	2	25,6	0,7	1395
56	325	319	150	2	24,8	1,9	1340
57	444	435	195	2	23,7	2,1	1273
58	151	145	70	2	24,9	4,1	1290
59	453	446	115	2	14,2	1,6	1183
61	562	526	285	2	26,9	6,8	1483

62	967	880	455	2	25,2	9,9	1423
63	666	655	290	2	23,5	1,7	1313
65	328	318	160	2	26,0	3,1	1495
69	442	410	105	2	13,4	7,8	1218
70	597	573	115	2	10,9	4,2	1178
71	400	375	85	2	12,0	6,7	1178
72	134	132	30	2	12,6	1,5	1175
73	776	694	165	2	12,0	11,8	1208
74	1091	1005	250	2	12,9	8,6	1240
75	255	249	60	2	13,2	2,4	1265
76	258	244	60	2	13,1	5,7	1240
77	105	104	25	2	13,4	1,0	1173
78	255	238	55	2	12,2	7,1	1158
80	495	478	130	2	14,7	3,6	1210
81	157	147	50	2	17,7	6,8	1375
82	866	830	250	2	16,1	4,3	1225
84	178	176	75	2	22,8	1,1	1413
86	82	81	25	2	17,0	1,2	1468
89	310	284	75	2	13,6	9,2	1158
90	90	89	25	2	15,5	1,1	1148
91	150	146	40	2	14,9	2,7	1145
92	101	98	30	2	16,5	3,1	1205
93	65	47	15	2	13,0	38,3	1258
96	173	169	45	2	14,6	2,4	1363
98	942	909	325	2	19,0	3,6	1403
MAX	1092,0	1029,0	455,0		37,1	38,3	1865,0
MIN	65,0	47,0	15,0		10,9	0,0	1145,0
MEDIA	366,1	347,6	124,7		18,9	4,5	1319,3
σ	275,5	254,1	98,3		6,2	5,3	154,8
$\sigma^2$	75895,5	64541,9	9665,1		38,2	28,3	23952,1

Allegato 3: valori misurati e calcolati dei parametri morfologici relativi ai canali di colata non attivi.

# **CAPITOLO 4**

PUNTI	<b>D</b> [m]	$\alpha_{\rm v}[^\circ]$	θ [°]	Do [m]	Δs [m]	Qr [m]	Dp [m]	p [-]
0-S1	5,65	-34,0	317,0	4,68	-3,16	0,00	0,00	0,19
S1-S2	23,96	10,5	44,5	23,56	4,37	4,37	23,56	0,19
S2-S3	13,06	11,0	43,0	12,82	2,49	6,86	36,38	0,19
S3-S4	9,05	11,0	53,0	8,88	1,73	8,59	45,26	0,19
S4-S5	8,34	10,5	67,5	8,20	1,52	10,10	53,46	0,19
S5-S6	7,97	10,5	64,0	7,84	1,45	11,56	61,30	0,17
S6-S7	14,85	9,5	63,5	14,65	2,45	14,01	75,95	0,19
S7-S8	18,11	10,5	70,0	17,81	3,30	17,31	93,75	0,16
S8-S9	16,53	9,0	71,0	16,33	2,59	19,89	110,08	0,18
S9-S10	17,87	10,0	69,5	17,60	3,10	23,00	127,68	0,18
S10-S11	13,16	10,0	73,5	12,98	2,17	25,28	140,64	0,27
S11-S12	14,50	15,0	92,0	14,07	3,51	29,04	154,64	0,25
S12-S13	13,55	14,0	88,0	13,20	3,05	32,31	167,79	0,20
S13-S14	11,01	11,5	66,0	10,81	2,10	34,51	178,58	0,23
S14-S15	13,27	13,0	91,0	12,98	2,76	37,49	191,51	0,19
S15-S16	17,87	10,5	64,0	17,60	3,10	40,75	209,08	0,20
S16-S17	11,66	11,5	55,0	11,45	2,22	43,08	220,51	0,25
S17-S18	18,09	14,0	68,0	17,55	4,38	47,45	238,06	0,19
S18-S19	23,91	10,5	72,0	23,55	4,15	51,81	261,57	0,19
S19-S20	24,95	11,0	69,0	24,49	4,76	56,57	286,06	0,19

Allegato 4: valori misurati e calcolati dei parametri relativi al primo rilievo fatto tra giugno e luglio 2013.

<b>SEZIONE</b>	B [m]	H [m]	<b>SEZIONE</b>	B [m]	H [m]
1	11,87	3,04	11	14,01	4,44
2	14,76	2,50	12	13,69	3,35
3	15,12	2,07	13	14,45	2,89
4	14,25	1,97	14	11,59	4,26
5	13,95	2,07	15	11,81	3,42
6	15,03	1,84	16	11,46	2,96
7	14,73	2,07	17	14,10	3,21
8	13,74	2,77	18	15,00	3,11
9	15,75	4,00	19	15,48	4,51
10	14,68	3,79	20	19,37	5,21

Allegato 5: larghezza e profondità delle sezioni rilevate tra giugno e luglio 2013.

PUNTI	<b>D</b> [m]	$\alpha_{\rm v}$ [°]	θ [°]	Do [m]	Δs [m]	Qr [m]	Dp [m]	p [-]
1-S1	6,24	-32	314,5	5,29	-3,31	0,00	0,00	0,19
S1-S2	23,61	11	41,5	23,18	4,51	4,51	23,18	0,20
S2-S3	14,88	11,5	42,5	14,58	2,97	7,47	37,76	0,05
S3-S4	7,63	3	52,5	7,62	0,40	7,87	45,38	0,18
S4-S5	8,65	10	76	8,52	1,50	9,37	53,90	0,21
S5-S6	9,74	12	57	9,53	2,03	11,40	63,42	0,19
S6-S7	15,38	11	62,5	15,10	2,93	14,33	78,52	0,19
S7-S8	15,64	11	69	15,35	2,98	17,32	93,87	0,19
S8-S9	19,07	11	75	18,72	3,64	20,96	112,59	0,19
S9-S10	17,15	11	63,5	16,83	3,27	24,23	129,43	0,19
S10-S11	16,72	11	82	16,41	3,19	27,42	145,84	0,20
S11-S12	12,90	11,5	85	12,64	2,57	29,99	158,48	0,27
S12-S13	13,64	15	85,5	13,18	3,53	33,52	171,66	0,18
S13-S14	12,24	10	74	12,05	2,13	35,65	183,71	0,21
S14-S15	12,46	12	86	12,19	2,59	38,24	195,90	0,22
S15-S16	14,05	12,5	66	13,72	3,04	41,28	209,62	0,22
S16-S17	14,76	12,5	57,5	14,41	3,19	44,47	224,03	0,25
S17-S18	17,03	14	67,5	16,52	4,12	48,59	240,55	0,20
S18-S19	21,49	11,5	71	21,06	4,28	52,88	261,61	0,19
S19-S20	27,74	10,5	69	27,28	5,06	57,93	288,88	0,19

Allegato 6: valori misurati e calcolati dei parametri relativi al primo rilievo eseguito il 9 settembre 2013.

<b>SEZIONE</b>	B [m]	H [m]	SEZIONE	B [m]	H [m]
1	11,87	3,04	11	14,01	4,44
2	14,76	2,50	12	13,69	3,35
3	15,12	2,07	13	14,45	2,89
4	14,25	1,97	14	11,59	4,26
5	13,95	2,07	15	11,81	3,42
6	15,03	1,84	16	11,46	2,96
7	14,73	2,07	17	14,10	3,21
8	13,74	2,77	18	15,00	3,11
9	15,75	4,00	19	15,48	4,51
10	14,68	3,79	20	19,37	5,21

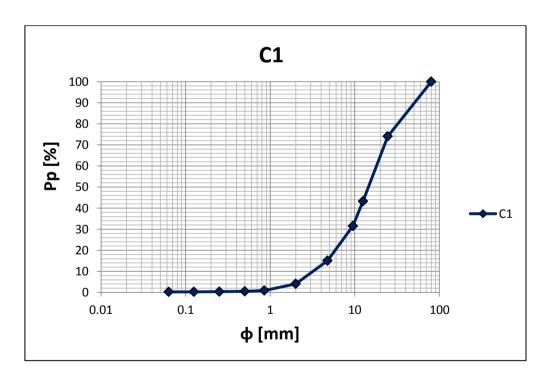
Allegato 7: larghezza e profondità delle sezioni rilevate il 9 settembre 2013.

# **CAPITOLO 5**

Pesi campior	ni quartat	ti (φ<25,4	4 mm)					
	C1	C2	C3	C4	C5			
peso secco lordo [g]	3824	3842	3790	4385	4463			
tara [g]	191	191	191	397	191			
peso secco netto 1 [g]	3633	3651	3599	3988	4272			
Pesi campior	Pesi campioni quartati (φ>25,4 mm)							
	C1	C2	C3	C4	C5			
peso secco lordo [g]	1462	1697	1491	1491	985			
tara [g]	191	191	191	191	191			
peso secco netto 2 [g]	1271	1506	1300	1300	794			
Pesi campioni doj	o il lava	ggio della	a parte fi	ne				
	C1	C2	C3	C4	C5			
peso secco netto [g]	3622,3	3621,8	3519,0	3912,6	4222,4			
parte fine eliminata [g]	10,7	29,2	80,0	75,4	49,6			
parte fine eliminata [%]	0,3	0,8	2,2	1,9	1,2			
peso secco netto totale [g]	4904,0	5157,0	4899,0	5288,0	5066,0			

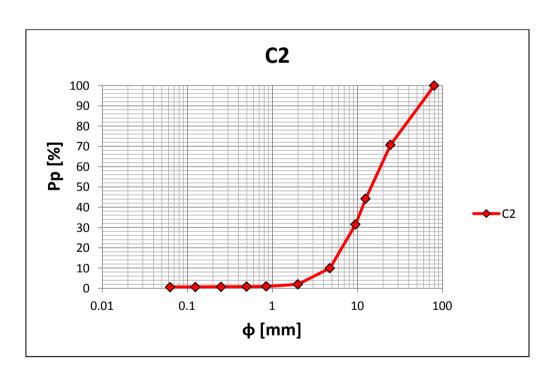
Allegato 8: dati relativi alla parte di quartatura e lavaggio del materiale. Il peso secco netto totale (dopo l'asciugatura in forno) è dato dalla somma tra peso secco netto 1, peso secco netto 2.

ANALIS	ANALISI GRANULOMETRICA ACQUABONA CAMPIONE C1								
Peso secco	Peso secco netto del campione [g]								
φ [mm]	Pt [g]	Pp [g]	Pp [%]						
0,000	13,7	0,0	0,00						
0,063	1,5	13,7	0,28						
0,125	2,8	15,2	0,31						
0,250	7,4	18,0	0,37						
0,500	20,4	25,4	0,52						
0,850	155,4	45,8	0,93						
2,000	537,1	201,2	4,11						
4,750	805,6	738,3	15,07						
9,500	576,1	1543,9	31,50						
12,500	1509,5	2120,0	43,26						
24,500	1271,0	3629,5	74,06						
80,000	0	4900,5	100,00						
TOTALE	4900,5								



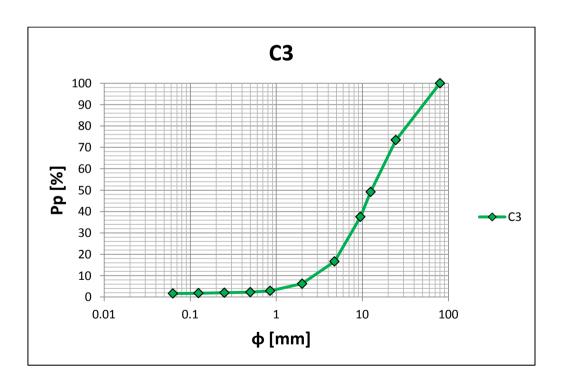
Allegato 9: dati e grafico relativi all'analisi granulometrica effettuata sul campione C1.

ANALIS	ANALISI GRANULOMETRICA ACQUABONA CAMPIONE C2								
Peso secco	Peso secco netto del campione [g]								
φ [mm]	φ [mm] Pt [g] Pp [g]								
0,000	30,8	0,0	0,00						
0,063	3,0	30,8	0,60						
0,125	4,7	33,8	0,66						
0,250	5,7	38,5	0,75						
0,500	6,0	44,2	0,86						
0,850	53,0	50,2	0,97						
2,000	409,7	103,2	2,00						
4,750	1111,0	512,9	9,95						
9,500	654,1	1623,9	31,52						
12,500	1368,6	2278,0	44,21						
24,500	1506,0	3646,6	70,77						
80,000	0,0	5152,6	100,00						
TOTALE	5152,6								



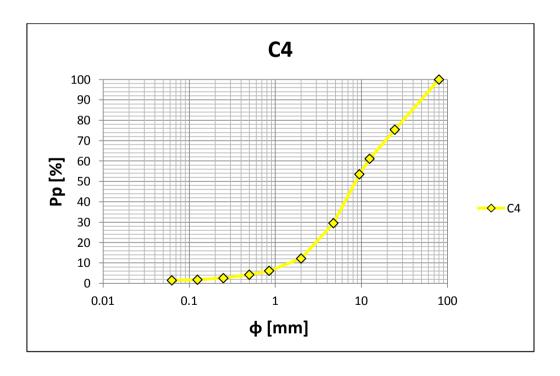
Allegato 10: dati e grafico relativi all'analisi granulometrica effettuata sul campione C2.

ANALIS	ANALISI GRANULOMETRICA ACQUABONA CAMPIONE C3								
Peso secco	Peso secco netto del campione [g]								
φ [mm]	Pt [g]	Pp [g]	Pp [%]						
0,000	81,5	0,0	0,00						
0,063	8,6	81,5	1,67						
0,125	8,4	90,1	1,84						
0,250	12,9	98,5	2,01						
0,500	30,8	111,4	2,28						
0,850	162,6	142,2	2,91						
2,000	510,3	304,8	6,23						
4,750	1019,5	815,1	16,66						
9,500	571,1	1834,6	37,50						
12,500	1187,2	2405,7	49,17						
24,500	1300,0	3592,9	73,43						
80,000	0,0	4892,9	100,00						
TOTALE	4892,9								



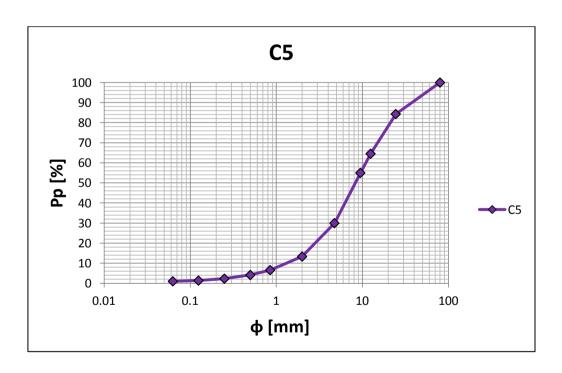
Allegato 11: dati e grafico relativi all'analisi granulometrica effettuata sul campione C3.

ANALIS	ANALISI GRANULOMETRICA ACQUABONA CAMPIONE C4							
Peso secco	Peso secco netto del campione [g]							
φ [mm]	Pt [g]	Pp [g]	Pp [%]					
0,000	77,9	0,0	0,00					
0,063	15,8	77,9	1,47					
0,125	41,1	93,7	1,77					
0,250	88,8	134,8	2,55					
0,500	102,0	223,6	4,23					
0,850	317,9	325,6	6,16					
2,000	915,8	643,5	12,18					
4,750	1267,0	1559,3	29,52					
9,500	401,7	2826,3	53,51					
12,500	753,7	3228,0	61,12					
24,500	1300,0	3981,7	75,39					
80,000	0,0	5281,7	100,00					
TOTALE	5281,7							



Allegato 12: dati e grafico relativi all'analisi granulometrica effettuata sul campione C4.

ANALISI	ANALISI GRANULOMETRICA ACQUABONA CAMPIONE C5							
Peso secco	Peso secco netto del campione [g]							
φ [mm]	Pt [g]	Pp [g]	Pp [%]					
0,000	51,6	0,0	0,00					
0,063	18,3	51,6	1,02					
0,125	47,6	69,9	1,38					
0,250	92,4	117,5	2,32					
0,500	124,2	209,9	4,15					
0,850	340,2	334,1	6,61					
2,000	840,4	674,3	13,34					
4,750	1266,0	1514,7	29,96					
9,500	482,8	2780,7	54,99					
12,500	998,9	3263,5	64,54					
24,500	794,0	4262,4	84,30					
80,000	0,0	5056,4	100,00					
TOTALE	5056,4							



Allegato 13: dati e grafico relativi all'analisi granulometrica effettuata sul campione C5.

## **CAPITOLO 6**

$a_{L} = 5,48 h_{0}$				
$\alpha$ [°] = 20°	$\varphi$ [°] = 35°			

			Y					
ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_s [kg/m^3]$	$g [m/s^2]$	C* [-]	$\mathbf{a}_{\mathrm{L}}[\mathbf{m}]$	$h_0[m]$	α [°]	<b>φ</b> [°]	FS [-]
1000	2600	9,81	0,8	0,27	0,05	20	35	1
1000	2600	9,81	0,8	0,55	0,10	20	35	1
1000	2600	9,81	0,8	0,82	0,15	20	35	1
1000	2600	9,81	0,8	1,10	0,20	20	35	1
1000	2600	9,81	0,8	1,37	0,25	20	35	1
1000	2600	9,81	0,8	1,64	0,30	20	35	1
1000	2600	9,81	0,8	1,92	0,35	20	35	1
1000	2600	9,81	0,8	2,19	0,40	20	35	1
1000	2600	9,81	0,8	2,47	0,45	20	35	1
1000	2600	9,81	0,8	2,74	0,50	20	35	1
1000	2600	9,81	0,8	3,01	0,55	20	35	1
1000	2600	9,81	0,8	3,29	0,60	20	35	1
1000	2600	9,81	0,8	3,56	0,65	20	35	1
1000	2600	9,81	0,8	3,84	0,70	20	35	1
1000	2600	9,81	0,8	4,11	0,75	20	35	1
1000	2600	9,81	0,8	4,38	0,80	20	35	1

Allegato 14: esempio di tabella utilizzata per l'applicazione del modello di Takahashi. I parametri  $\rho$ ,  $\rho_S$ , g,  $C^*$ ,  $\varphi$ ,  $\alpha$  e FS vengono mantenuti costanti,  $h_0$  viene fatto variare tra 0,05 m e 0,80 m con intervalli di 0,05 m per poi determinare  $a_L$ .

### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Studio sperimentale delle colate detritiche rapide mediante sistemi di monitoraggio: il bacino di Acquabona dottorando Antonio Galgaro Università degli studi di Ferrara 2002.
- [2] Le colate detritiche torrentizie a cura di: M. Chiarle, M. Arattano, L. Turconi, M. Giuliano, G. Mortara.
- [3] ISPRA (2006) Fenomeni di dissesto geologico idraulico sui versanti. Manuali e linee guida, Istituto Superiore Protezione Ambiente, Roma.
- [4] Field observations of a debris flow event in the Dolomites Matteo Berti, Rinaldo Genevois, Alessandro Simoni, Pia Rosella Tecca Dipartimento di Scienze della Terra, Universita di Bologna; Dipartimento di Geologia, Padova; Consiglio Nazionale delle Ricerche IRPI, Padova 1998.
- [5] Debris flow monitoring and analysis in the dolomitic region (Upper Boite valley Italian Alps) R. Genevois, M. Berti, M. Ghirotti, A. Simoni, P.R. Tecca Dip. di Geologia, Università di Padova
   Dip. di Scienze della Terra, Università di Bologna C.N.R.-IRPI.
- [6] Development of a remotely controlled debris flow monitoring system in the Dolomites (Acquabona, Italy) Pia R. Tecca, Antonio Galgaro, Rinaldo Genevois and Andrea M. Deganutti.
- [7] Carta geologica del Veneto Servizio geologico nazionale Regione del Veneto scala 1:250000 Venezia 1990.
- [8] The new debris-flows monitoring system of Acquabona torrent (Cortina d'Ampezzo, Bl, Italy) Scotton P., Genevois R., Moro F., Zorzi L., Girardi G., Praticelli N. Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova.
- [9] Manuale d'uso ArcGIS desktop 10 Padova 2012.
- [10] Elementi di idrologia e idraulica Paolo Scotton- Università di Padova 2011.
- [11] Statistica, metodologie per le scienze economiche e sociali Borra S., Di Ciaccio A. Mc Graw Hill 2004.
- [12] Appunti del corso di geotecnica S. Cola Padova 2011.

## **RINGRAZIAMENTI**

Si ringrazia il Prof. Paolo Scotton per la competenza e professionalità fornita nel corso di questa tesi, il Dott. Daniele Dalla Valle per l'aiuto nell'analisi delle foto aeree e immagini satellitari, il Dott. Lorenzo Franceschin per disponibilità e simpatia durante l'esecuzione delle prove granulometriche e il Prof. Mario Floris per la proposta dell'argomento di questa tesi.

Un grazie particolare va ai miei genitori, a cui dedico questo lavoro, per la pazienza e il supporto datomi durante gli anni universitari. GRAZIE MAMMA, GRAZIE PAPÀ!!!!