



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali - TeSAF

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN SCIENZE FORESTALI ED AMBIENTALI

**ANALISI DELL'EVENTO DEL LUGLIO 2010 NEI  
BACINI STRIMO E GADRIA CON L'UTILIZZO  
COMPARATO DI DUE MODELLI MATEMATICI  
BIDIMENSIONALI (FLO-2D E RAMMS)**

Relatore:

*Prof. Vincenzo D'Agostino*

Correlatori:

*Dott. Gabriele Bertoldi*

*Dott. Francesco Bettella*

Laureanda:

*Caterina Ferrato*

Matricola n. 620122

ANNO ACCADEMICO 2011- 2012



*Se tu hai una mela, e io ho una mela, e ce le scambiamo,  
allora tu ed io abbiamo sempre una mela per uno.  
Ma se tu hai un'idea, ed io ho un'idea, e ce le scambiamo,  
allora abbiamo entrambi due idee.*

*George Bernard Shaw*



# INDICE

<b>Riassunto.....</b>	<b>11</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>13</b>
<b>Introduzione.....</b>	<b>15</b>
1.1 <i>Il contesto legislativo.....</i>	16
1.1.1    L'entità del rischio in Italia .....	16
1.1.2    Il vincolo idrogeologico .....	19
1.1.3    Testo Unico Ambientale: DLgs del 3 aprile 2006 n.152 .....	20
1.1.4    Direttiva 2000/60/CE "La direttiva quadro sulle acque".....	21
1.1.5    Direttiva 2007/60/CE "La direttiva alluvioni" .....	22
1.1.6    Il recepimento italiano: DLgs del 23 febbraio 2010 n. 49 .....	23
1.2 <i>Il ruolo dei modelli.....</i>	25
1.3 <i>Le colate detritiche .....</i>	29
1.3.1    Che cos'è una colata detritica o debris flow .....	30
1.3.2    Identificazione del pericolo da debris flow .....	36
1.3.3    genesi di un debris flow .....	41
1.4 <i>Le opere di sistemazione idraulico forestale e il controllo delle colate detritiche .....</i>	43
1.5 <i>Obiettivi.....</i>	46
<b>Caso di studio .....</b>	<b>47</b>
2.1 <i>Il progetto europeo MONITOR II.....</i>	47
2.2 <i>Val Venosta - rio Gadria e rio Strimo -.....</i>	48
2.2.1    Misure di mitigazione.....	55
2.3 <i>Documentazione eventi.....</i>	56
2.3.1    Relazione riassuntiva eventi 2010.....	56
2.3.2    Il sistema di monitoraggio - Progetto MONITOR II .....	61
<b>I parte: Valutazione delle aree sorgenti di sedimento .....</b>	<b>63</b>
3.1 <i>Stima della magnitudo .....</i>	64
3.2 <i>Stima del volume di sedimento disponibile .....</i>	67
3.3 <i>Analisi preparatorie per la stima dei volumi .....</i>	69
3.3.1    I sottobacini del Gadria .....	69
3.3.2    Il reticolo idrografico del rio Gadria .....	71

3.4	<i>Metodo di stima geomorfico in questo caso di studio</i>	73
3.4.1	Stima del volume di sedimento in canale	74
3.4.2	Attività di campo: Censimento aree sorgenti di sedimento:	75
3.4.3	Stima del volume delle sorgenti di sedimento localizzate	78
3.4.4	Stima del volume delle sorgenti di sedimento totali	83
<b>II parte: Valutazione delle problematiche connesse all'utilizzo di modelli 2D</b>		<b>85</b>
4.1	<i>La modellazione</i>	86
4.1.1	FLO-2D	87
4.1.2	RAMMS	90
4.2	<i>Procedura per la definizione dei parametri di input</i>	91
4.2.1	Parametri di input FLO-2D	92
4.2.2	Parametri di input RAMMS	94
4.2.3	Debris-grammi e zone di innesco	96
4.2.4	Implementazione della piazza di deposito	101
4.2.5	Simulazioni preliminari e risoluzione dei problemi	101
4.3	<i>Valutazione dei risultati</i>	103
4.5	<i>Osservazioni e discussione</i>	109
<b>Conclusioni</b>		<b>113</b>
<b>Ringraziamenti</b>		<b>115</b>
<b>Bibliografia</b>		<b>117</b>
<b>Sitografia</b>		<b>123</b>

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Sistema di valutazione utilizzato in Svizzera: rosso alto, blu:medio, giallo :basso, bianco:nessuno pericolo. Le tre diverse gradazioni di colore sono in funzione dell'intensità e della probabilità di un evento (Barbolini, 2008). .....	27
Figura 2: Previsione della forma di trasporto sulla base della pendenza S del cono di deiezione e del numero di Melton del bacino Me (D'Agostino, 1996). .....	29
Figura 3: Classificazione dei movimenti di massa di versante ripidi in funzione della frazione di materiale solido e tipo di materiale (coesivo/granulare) (Coussot, Meunier, 1996). .....	31
Figura 4:schema onda principale debris flow. ....	32
Figura 5: Rappresentazione schematica che illustra la distinzione fra un piccolo grano che rimane sospeso esclusivamente grazie alle forze viscosse (grano A) e un grano di dimensioni maggiori che richiede l'interazione con gli altri grani per restare sospeso (grano B) (Iverson, 1997). .....	33
Figura 6:Geologia e granulometria dei depositi di colata (Moscariello <i>et al.</i> , 2002). .....	34
Figura 7: Innesco di un debris flow per effetto idrante (Togancca, Bezzola, 1997). .....	38
Figura 8: Guida illustrativa che mostra la configurazione delle sezioni trasversali, longitudinali e planimetriche dei principali tipi di fiumi (Rosgen, 1994). .....	39
Figura 9: Forme deposizionali di debris flows canalizzati (Van Dine, 1996). .....	40
Figura 10: Schema dei principali interventi strutturali per la difesa dalle colate detritiche (D'Agostino, 2008). .....	44
Figura 11: Andamento dei rapporti fra velocità U (U2: acqua e sedimento, U1: acqua chiara) e profondità del flusso h (h2: acqua e sedimento, h1: acqua chiara) in funzione della concentrazione volumetrica (C <sub>v</sub> ) (D'Agostino, 2006). .....	45
Figura 12: Panoramica da ortofoto sui bacini idrografici del torrente Gatria e del rio Strimo, la conoide ospita gli abitati di Allitz, Lasa e Corces. ....	49
Figura 13: Curve ipsometriche e relativa quota media. In alto il rio Strimo, in basso il rio Gatria. ....	51
Figura 14: Curve ipsografiche adimensionali con bisettrice di riferimento. A destra il rio Strimo e a sinistra il Rio Gatria. ....	52
Figura 15: Mappa geologica a larga scala del sistema bacino Strimo, Gatria e Allitz basata sull'interpretazione di foto aeree e rilievi LiDAR ad alta risoluzione. I punti di domanda indicano aree di elevata incertezza che richiedono indagini di campo. ....	54
Figura 16: Danni alla strada di accesso a Malga Pastore. ....	59
Figura 17: Immissione ad elevata pendenza del rio Strimo nell'opera di trattenuta. Una porzione di lariceto è stato stroncato e sono visibili gli scortecciamenti agli alberi limitrofi. ....	59
Figura 18: Briglia filtrante vista da monte in corrispondenza dell'immissione del rio Gatria. Il materiale vegetale è proveniente dal lariceto del rio Strimo. ....	60
Figura 19: Briglia filtrante vista da valle. Il deposito di materiale è esiguo e interno al canale di smaltimento. ....	60

Figura 20: Scatterplot della magnitudo di un debris flow rispetto all'area drenata (D'Agostino, Marchi, 2000).....	64
Figura 21: Sottobacini del Gadria.....	70
Figura 22: Reticolo idrografico sintetico del bacino del Gadria classificato secondo l'indice di Horton Strahler (1958).....	72
Figura 23: Stima geomorfica dei sedimenti in alveo.....	74
Figura 24:Stima dei volumi di sedimento relativi al reticolo dell'intero bacino e ai rami di ogni sottobacino. ....	75
Figura 25: Collettore del sottobacino C, una delle aree sorgenti maggiormente sviluppate. ....	77
Figura 26: Sottobacino D, area sorgente di terrazzo glaciale. ....	77
Figura 27: Sottobacino D, aree di cresta sommitale. ....	78
Figura 28 In ordine: Sopralluogo in campo; Analisi GIS: ortofoto; differenza fra DSM e DTM; indice di rugosità.....	78
Figura 29: Perimetrazione delle aree sorgenti localizzate, distinguendo fra vallive, terrazzo glaciale e cresta sommitale. Sono inoltre evidenziate le aree attive non connesse e quelle non attive e non connesse, come evinto dai sopralluoghi effettuati in campo.....	80
Figura 30: Classi di profondità attribuite alle aree sorgenti di versate. Le aree più profondamente incise si trovano nella parte più a nord del bacino, evidenziate in rosso e sono interne ai sottobacini C e D. ....	81
Figura 31:Contributo delle tre tipologie di aree sorgenti di sedimento di versante individuate e sul totale del campione. ....	81
Figura 32: Rappresentazione grafica dei volumi Totale, Attivo, Attivo e Connesso con il relativo errore calcolato.....	82
Figura 33: Schema concettuale della dinamica di alluvionamento di un'area di conoide (da Jakob, 2005). ..	86
Figura 34: Punti di innesco: 1- rio Strimo, 2 - rio Gadria, 3 - stottobacino A, 4 - sttobacino B, 5 - sottobacino C, 6 - sottobacino D.....	97
Figura 35: Sovrapposizione fra i rilievo TLS della piazza di deposito e il DTM LiDAR della superficie dei bacini. ....	101
Figura 36: Area di confluenza fra i due torrenti in cui è presente l'opera di trattenuta. A destra: DTM LiDAR originale. Asinistra: DTM LiDAR finale. ....	102
Figura 37: Immagine georiferita del sedimento depositato nel piazzale e sua perimetrazione.....	103
Figura 38: Schema concettuale delle simulazioni con FLO-2D. Simulazione 1: innesco del solo sottobacino D; simulazione 2: innesco totale del Gadria; simulazione 3: un innesco per ogni sottobacino. ....	104
Figura 39: Schema concettuale delle simulazioni con RAMMS. Sedimentogramma 1, innesco del solo sottobacino D; 2,innesco totale del Gadria. Block release 1, innesco del sottobacino D; 2,innesco totale del Gadria; 3, un innesco per ogni sottobacino. ....	104
Figura 40: FLO-2D, simulazione con 2 inneschi, rio Strimo più il volume totale del Gadria. A destra in giallo la planimetria con $C_{s-v} = 0.50$ e a sinistra in verde la planimetria con $C_{s-v} = 0.60$ .....	105



Figura 41: RAMMS. Sedimentogramma: 1) simulazione con volume del sottobacino D; 2) simulazione con volume totale Gadria. Block release: 3) simulazione con volume totale Gadria; 4) simulazione con un volume per ogni sottobacino (A, B, C, D). .....	106
Figura 42: Rappresentazione schematica del confronto tra area di deposito reale (linea tratteggiata) e simulata (linea continua, da Scheidl e Rickenmann, 2010).....	107

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1:Urbanizzazione delle aree a rischio di frane e alluvioni nei comuni italiani (Dip. P.C., Legambiente, 2011).....	18
Tabella 2: Criteri di definizione delle classi di intensità per le alluvioni (da Barbolini, 2008). .....	27
Tabella 3: Definizione delle zone di pericolo o dei gradi di pericolo, come applicati in Svizzera (Barbolini, 2008). .....	28
Tabella 4: Classificazione della magnitudo delle colate (Jakob, 2005). .....	36
Tabella 5: Tabella riassuntiva dei parametri morfometrici.....	51
Tabella 6: Dati morfometrici del conoide Allitz/Lasa (da Jarman <i>et al.</i> , 2011). .....	53
Tabella 7: Tabella riassuntiva eventi rio Gadria e rio Strimo (Macconi <i>et al.</i> , 2010). .....	58
Tabella 8: Classi litologiche e relativi punteggi per la determinazione dell'indice geologico I.G. (D'Agostino, Marchi, 2003).....	65
Tabella 9: Parametri morfometrici dei sottobacini del sistema idrografico Gadria a confronto.....	71
Tabella 10: Classificazione del reticolo per sottobacini e relative lunghezze dei segmenti (m).....	73
Tabella 11: Gerarchizzazione del reticolo idrografico e rapporto di biforcazione Rb dell'intero sistema bacino Gadria.....	73
Tabella 12: Stima geomorfica dei volumi di sedimento (m <sup>3</sup> ) secondo l'ordine dell'asta torrentizia e il sottobacino di appartenenza, in basso il volume unitario per unità di lunghezza della parte di rete idrografica appartenete a ciascun sottobacino. ....	75
Tabella 13: Stima dei volume di versante e dell'errore relativo per ogni sottobacino e per il sistema Gadria nel suo complesso.....	82
Tabella 14: Stime geomorfiche in metri cubi per le aree sorgenti di versante, totali e attive-connesse e con relativo errore e i volumi in alveo. Totale geomorfico in m <sup>3</sup> per due diverse sommatorie al volume d'alveo, la prima con il volume totale di versante, la seconda con il volume attivo e connesso.....	84
Tabella 15: Valori di stima di evento estremo con formule empiriche di differenti autori e l'equazione di riferimento (n). I dati sono in metri cubi. I.G. :indice geologico utilizzato nella formula. I valori della stima geomorfica sono quelli di volume d'alveo più sorgenti di versante attive e connesse. ....	84
Tabella 16: Valori dei parametri reologici calcolati relativi alla miscela testata con viscosimetro (Bergamo, 2011). .....	92
Tabella 17: Valori della densità reale e apparente del sedimento campione (Bergamo, 2011).....	93
Tabella 18: Scabrezza attribuita alle diverse parti che costituiscono il bacino.....	93

Tabella 19: Tabella di riferimento per i valori di scabrezza assegnati alla voce "altre zone". .....	94
Tabella 20: Angoli di riferimento per la calibrazione del modello, in gradi e in percentuale. ....	95
Tabella 21: Valori del coefficiente di attrito turbolento $\xi$ suggeriti nel User Manual RAMMS. ....	95
Tabella 22: Parametri di input RAMMS. ....	96
Tabella 23: Area media relativa alle sezioni trasversali dei tratti esaminati in corrispondenza dei punti di innesco scelti. ....	97
Tabella 24: Volume e portata totale al picco di origine di tutti gli idrogrammi. ....	99
Tabella 25: Idrogrammi costruiti per il programma di simulazione RAMMS, in cui il tempo (t) è in secondi e la portata è la portata totale del debris flow in metri cubi. ....	99
Tabella 26: Idrogrammi per le diverse concentrazioni volumetriche per la sezione di deflusso del sottobacino A. Il tempo è in ore, il time-lag di 10 minuti (0.167 h) e il picco a 11 minuti, (0.183 h).....	100
Tabella 27: FLO-2D: Indici. Tre simulazioni per ogni concentrazione volumetrica. 1) simulazione con solo il sottobacino D; 2) simulazione con il volume totale del Gadria; 3) simulazione con un idrogramma per sottobacino A, B, C, D. ....	108
Tabella 28: RAMMS: Indici. 1) simulazione con volume del sottobacino D; 2) simulazione con volume totale Gadria. Block release: 3) simulazione con volume totale Gadria; 4) simulazione con un volume per ogni sottobacino (A, B, C, D). ....	108
Tabella 29: Step principali di calibrazione del modello RAMMS. ....	111

## RIASSUNTO

Le calamità naturali come le alluvioni colpiscono duramente le zone abitate non solo nelle conoidi e vallate alpine, ma in tutte le regioni d'Italia senza distinzioni. Questo fenomeno è diffuso e la protezione dal rischio idrogeologico è un argomento trattato a livello europeo. Il progetto MONITOR II è un progetto finanziato a livello europeo nel quale è stato incluso il bacino del torrente Gadria, situato in Val Venosta nella Provincia Autonoma di Bolzano. Il torrente Gadria insieme al vicino torrente Strimo hanno dato origine a una delle più grandi conoidi alpine, che ospita gli abitati di Allitz, Lasa e Còrzes. A causa dei frequenti eventi di colata il bacino del torrente Gadria è stato sottoposto a numerosi interventi di ingegneria idraulica, fra i quali la predisposizione di un'opera di trattenuta.

Lo scopo di questa tesi è quello di valutare i volumi di sedimento disponibile all'ingresso di colate detritiche ed alla loro disposizione, e di valutare gli aspetti complessivi di utilizzo di due programmi di simulazione, FLO-2D e RAMMS, sulla base di un evento di colata avvenuto nel luglio del 2010 scaturito dall'ingresso di entrambi i bacini.

La valutazione geomorfica del bacino del Gadria ha portato alla stima di un volume totale di 1193800 m<sup>3</sup> di sedimento disponibile per essere mobilizzato, con la catalogazione di tutte le aree sorgenti secondo una classificazione definita in campo e con l'uso di strumenti implementati in ambito GIS. L'indagine di campo ha inoltre permesso di stabilire una priorità nella valutazione delle porzioni di bacino più attive in caso di un evento di colata, il sottobacino superiore del Gadria (D) e di stabilire una dinamica d'evento.

La raccolta di questi dati è stata sfruttata nel lavoro di predisposizione dei dati di input ai modelli come la topografia, gli idrogrammi, la scelta dei punti di ingresso e la calibrazione dei parametri reologici. Particolari accorgimenti sono stati presi nella predisposizione dell'informazione topografica, in corrispondenza dell'opera di trattenuta. La calibrazione dei parametri reologici e gli idrogrammi richiesti dai due programmi sono molto diverse fra loro. La valutazione dei risultati finali è stata eseguita per mezzo di un confronto planimetrico. L'area di inondazione simulata dai modelli è stata confrontata con l'area reale di deposito osservata in campo con l'utilizzo di due indici, uno di accuratezza e l'altro di eccedenza dell'area simulata rispetto all'area reale. I modelli hanno mostrato criticità e vantaggi diversi, che sono discussi in modo approfondito nella presente tesi.



## ABSTRACT

Natural disasters such as floods strike inhabited areas not only in the alluvial fans and valleys of the Alps, but in all regions of Italy without discrimination. This phenomenon is widespread, and protection against such hydrogeological risks is an issue dealt with in Europe.

The MONITOR II project, which includes the Gadria stream basin in Val Venosta in the province of Bolzano, is in fact financed by the European Union. The Gadria and the nearby Strimo streams have created one of the largest Alpine alluvial fans, within which lie the villages of Allitz, Lasa and Còrzes. Due to frequent flow events, the Gadria basin has undergone several hydraulic engineering operations, including the placement of a mitigation structures.

The aim of this thesis is to evaluate the volume of sediment available at the trigger point of debris flows and their placement, and to evaluate the overall characteristics of the use of two simulation programs, FLO-2D and RAMMS, based on a flow event which occurred in July 2010 originating at the trigger point of both basins.

The geomorphic evaluation of the Gadria basin provided an estimate of a total volume of 1,193,800 m<sup>3</sup> of sediment available to be transported, with the cataloguing of all river source areas according to a field-defined classification with the use of instruments implemented within the scope of G.I.S. (Geographic Information System).

The field investigation also made it possible to establish priorities in the evaluation of the most active portions of the basin in the event of a flow, the upper sub-basin of the Gadria (D) and to establish hazard scenarios.

The data collected was utilised during the arrangement of data input to models such as topography, hydrographs, the choice of trigger points and the calibration of rheological parameters. Particular attention was placed on the arrangement of the topographical information, corresponding to the mitigation structures. The calibration of rheological parameters and the hydrographs requested by the two programs were very different respect to each other.

The evaluation of the final results was performed by means of planimetric comparison. The flood area simulated by the models was compared to the real deposit area observed on-site by the use of two indices, one of accuracy and one of excess in the simulated area respect to the real area. The models demonstrated the presence of critical issues as well as several advantages, all of which have been discussed at length in this thesis.



## INTRODUZIONE

Frane e alluvioni sono fenomeni naturali artefici dell'evoluzione morfologica del territorio. Limitandoci a valutare anche solo la scala spaziale che può interessare questi fenomeni, ci si rende conto di come questi siano impossibili da impedire e richiedano invece interventi di mitigazione del rischio che ne deriva.

Il rischio idrogeologico in Italia è alto ed è risultante dall'iterazione di fattori quali il clima, caratteristiche geomorfologiche del territorio ed attività antropiche.

I cambiamenti climatici sottopongono il territorio a fenomeni meteorologici sempre più intensi che portano a una maggiore instabilità dei versanti ma studi recenti. Nell'Annuario dei Dati Ambientali dell'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) del 2011, si è evidenziato che molte delle calamità avvenute negli ultimi anni sono innescate da eventi meteorologici non eccezionali. L'incremento del rischio idrogeologico è da attribuire di fatto all'aumento della vulnerabilità del territorio, e le attività antropiche in questo contesto svolgono un ruolo sempre più determinate. Vi sono delle attività umane che aumentano ulteriormente la probabilità che un fenomeno di dissesto si verifichi, e sono legate ad una mancanza di una cultura nell'impiego del suolo che metta al primo posto la prevenzione e la sicurezza del cittadino. Fra queste sicuramente possiamo menzionare la speculazione, l'abusivismo edilizio, l'abbandono delle pratiche selvicolturali, gli incendi e gli spianamenti del terreno per uso agricolo che favoriscono l'erosione e la velocità di deflusso delle acque superficiali, l'alterazione delle dinamiche naturali dei corsi d'acqua, la cattiva gestione delle opere idrauliche, la mancanza di manutenzione del territorio.

Gli insediamenti umani troppo spesso occupano zone ad elevato rischio come le aree golenali (ricavate dalla rettificazione dei meandri delle aste fluviali) o i conoidi dei torrenti alpini, luoghi in cui è naturale che i fenomeni di dissesto idrogeologico si verifichino. Questo ha portato ad una maggiore esposizione dell'uomo al problema con un sensibile aumento dei danni sociali, culturali ed economici che ne derivano.

Il susseguirsi di eventi calamitosi, la maggiore esposizione dell'uomo al pericolo e le ingenti perdite economiche sostenute per affrontare le continue situazioni di emergenza hanno reso indispensabile una politica nazionale ed europea sempre più attiva nel campo della difesa del territorio dal rischio idrogeologico e l'adozione di misure legislative sempre più chiare e specifiche.

## 1.1 IL CONTESTO LEGISLATIVO

Il territorio italiano è ad alto rischio geologico ed idraulico e i danni socio-economici che ne derivano sono rilevanti. In materia di difesa del suolo, le politiche nazionali intraprese derivano tutte da leggi di emergenza nate per affrontare le calamità che negli anni hanno colpito duramente il territorio italiano.

A livello europeo si è ritenuto necessario affrontare il problema mediante una protezione comune e transfrontaliera dal rischio alluvioni, perché “le alluvioni possono provocare vittime, l’evacuazione di persone e danni all’ambiente, compromettere gravemente lo sviluppo economico e mettere in pericolo le attività economiche della Comunità” (Direttiva 2007/60/CE).

L’Italia ha adeguato la propria normativa recependo le direttive comunitarie e facendo tesoro dell’esperienza maturata sia a livello normativo che nelle diverse situazioni di emergenza affrontate, condizionate dall’eterogeneità del territorio e dalla variabilità dei parametri che governano i processi naturali e riconoscendo il ruolo fondamentale della Protezione Civile in coordinazione con le regioni.

### 1.1.1 L’ENTITÀ DEL RISCHIO IN ITALIA

*“Il secondo debito immenso dell’Italia dopo quello pubblico è il dissesto idrogeologico”* (cit. Salvatore Puglisi, 2012). Queste sono le parole del professore Salvatore Puglisi durante la relazione introduttiva al convegno “Previsione e Mitigazione dei Fenomeni di Dissesto Idrogeologico in Italia – Il Contributo del Settore delle Sistemazioni Idraulico-Forestali” svoltosi presso l’università di Palermo nel maggio 2012. L’intervento del Professore evidenzia l’aspetto economico, oltre che umano, del problema che sta assumendo dimensioni tali da non poter più essere trattato come un fenomeno risolvibile rispondendo solo alle singole emergenze.

“I recenti disastri avvenuti in Italia, dalla Liguria alla Sicilia, dalla Toscana alla Calabria, così come quelli passati, su tutti il Veneto, dimostrano, ancora una volta, la fragilità del territorio italiano, fortemente esposto al rischio di frane e alluvioni” (Camera dei Deputati, n. 1-00885).

Una panoramica del problema viene fornita dall’indagine realizzata da Legambiente con la collaborazione del dipartimento della Protezione Civile “Ecosistema a Rischio 2011” che si prefigge l’obiettivo di *“scattare una fotografia sempre più aggiornata e dettagliata delle fragilità idrogeologiche del territorio italiano”* mettendo in evidenza le attività delle amministrazioni comunali a tal proposito.

Il dossier accoglie ed elabora dati di carattere generale sul dissesto idrogeologico in Italia e allo stesso tempo monitora nel dettaglio le attività dei comuni nel cui territorio si trovino



aree ad elevato rischio idrogeologico individuate sulla base di diversi studi effettuati dal Ministero dell'Ambiente e dall'Unione delle Province Italiane (UPI).

Il monitoraggio viene svolto a livello di amministrazione comunale, in quanto le stesse hanno un ruolo determinante nella pianificazione urbanistica del territorio, ed i sindaci rappresentano la prima autorità di protezione civile. I comuni in cui sono presenti aree a rischio idrogeologico sono 6.633, l'82% del totale.

Questa indagine è stata svolta inviando dei questionari in quei comuni in cui sono presenti aree a potenziale rischio idrogeologico più elevato, per la precisione a 5.900 amministrazioni comunali delle quali solo 1.518 hanno risposto (il 26% dei comuni a rischio d'Italia) e di queste sono 1.316 quelle utilizzate nel dossier.

Secondo i dati, la superficie delle aree ad alta criticità idrogeologica copre il 9,8% della superficie dell'intero territorio nazionale, di cui il 4,1% a rischio alluvioni ed il 5,2% a rischio frana.

La percentuale dei comuni classificati a rischio per ogni regione restituisce una prima stima della fragilità: in Calabria, Molise, Basilicata, Umbria, Valle d'Aosta e in Provincia Autonoma di Trento il 100%, nelle Marche e in Liguria 99% e in Lazio e Toscana 98% dei comuni è classificato a rischio.

Una attenta valutazione del rischio idrogeologico è necessaria anche per cercare di affrontare eventi alluvionali eccezionali come quello che ha colpito una vasta area del Veneto nel 2010. Tale evento ha portato a numerose riflessioni a livello sociale e politico in quanto la regione presenta la percentuale di comuni a rischio più bassa, il 56%. Evidentemente questi comuni presentano, in una superficie minore, un'entità di rischio molto elevata.

L'indagine "Ecosistema a rischio 2011" esprime delle valutazioni sulla base di 1.316 amministrazioni comunali che gestiscono territori ad alto rischio idrogeologico. Le attività indagate riguardano la pianificazione edilizia, della quale è responsabile l'amministrazione comunale (Tabella 1).

Nell'85% dei comuni campione sono presenti abitazioni in aree a rischio idraulico e geologico (golenali, in prossimità degli alvei ed a rischio frana), e nel 31% dei casi in tali zone sono presenti addirittura interi quartieri. Il rischio di inquinamento di terreni e acque (per sversamento di prodotti industriali) in caso di calamità si presenta nel 56% dei comuni perché nelle aree a rischio sono presenti fabbricati industriali. Nel 20% dei casi sono state edificate strutture sensibili come scuole e ospedali, e nel 26% strutture ricettive turistiche o commerciali.

**Tabella 1:Urbanizzazione delle aree a rischio di frane e alluvioni nei comuni italiani (Dip. P.C., Legambiente, 2011)**

<b>Attività</b>	<b>Numero Comuni</b>	<b>Percentuale Comuni</b>
<i>Abitazioni in aree a rischio idrogeologico</i>	1.121	85%
<i>Quartieri in aree a rischio idrogeologico</i>	403	31%
<i>Industrie in aree a rischio idrogeologico</i>	743	56%
<i>Strutture sensibili in aree a rischio idrogeologico</i>	257	20%
<i>Strutture ricettive o commerciali in aree a rischio</i>	339	26%

La presenza dell'uomo in aree ad elevato pericolo idrogeologico è rilevante. L'uomo è per questo esposto al pericolo, che aumenta per cause sia naturali che antropiche. L'elevato rischio che deriva dalla naturale evoluzione geomorfologica del territorio è tale perché l'uomo si è reso sempre più vulnerabile, espandendo aree urbane ed infrastrutture, disboscando, modificando il naturale corso dei fiumi, cioè operando sul territorio senza una cultura di uso del suolo che abbia come primo obiettivo la sicurezza della collettività.

Se questa è l'entità del rischio, è necessario comprendere anche l'entità della spesa, non indifferente e non sempre razionalizzata, che questo rischio comporta alla comunità sia per la prevenzione che per le emergenze:

*"[...] le regioni che hanno pressoché la totalità dei comuni con aree a rischio idrogeologico sono la Calabria, l'Abruzzo, la Basilicata, la Campania, il Lazio, la Liguria, le Marche, il Molise, la Toscana, l'Umbria, la Valle d'Aosta e la Provincia autonoma di Trento. Queste regioni non rappresentano evidentemente tutte le aree a rischio idrogeologico, come dimostrano gli eventi anche recenti che hanno colpito la Lombardia, il Piemonte, il Veneto ed altre regioni. È tutto il nostro territorio che mostra la sua fragilità e che necessita di interventi di messa in sicurezza. A questo si aggiunge il crescente grado di rischio di erosione costiera, che interessa oltre 540 chilometri lineari dei litorali italiani in cui sono direttamente coinvolti beni esposti; sempre durante la medesima audizione, veniva sottolineato come «il **fabbisogno necessario** per la realizzazione degli interventi per la sistemazione complessiva delle situazioni di dissesto su tutto il territorio nazionale è stimato in circa 40 miliardi di euro. Di contro, per azioni di emergenze di protezione civile, indennizzi e opere a seguito di eventi calamitosi, nel solo bacino del fiume Po, dal 1994 al 2005, sono stati spesi oltre 12,5 miliardi di euro, dei quali oltre 5,5 miliardi di euro per far fronte alla sola alluvione del 2000. Inoltre, per gli interventi di gestione dell'emergenza della zona di Sarno è stato speso oltre mezzo miliardo di euro. In sintesi si stima che la spesa dello Stato per le attività di emergenza sia stata mediamente tra 2 e 3,5 miliardi di euro all'anno. La spesa per la prevenzione è stata in media di 250 milioni l'anno. **Per ogni***

***milione speso per prevenire, ne abbiamo spesi 10 per riparare i danni della mancata prevenzione»*** (Camera de Deputati, n. 1-00891).

Per poter avviare azioni di mitigazione del dissesto idrogeologico efficaci ed economicamente sostenibili è necessaria l'acquisizione da parte della politica, delle amministrazioni comunali e della popolazione della consapevolezza del rischio, che rende tutti responsabili delle azioni per la sua mitigazione (Giannella e Giuda, 2010).

### *1.1.2 IL VINCOLO IDROGEOLOGICO*

Guardando al passato è possibile recuperare le fila di una ricerca da parte dei legislatori italiani di predisporre una normativa in materia di difesa del suolo.

In un primo timido tentativo (Ferrucci, 2007) l'Italia aveva riconosciuto con la legge "Majorana - Catalbiano" del 1877, la necessità di porre un vincolo, in questo caso forestale, a terreni boscati o montani suscettibili a frane, all'erosione e al dilavamento che possono per questo portare danno alla popolazione o turbare il corso delle acque. Questo vincolo si esprimeva con l'obbligo di rimboschimento o di non disboscamento di tali aree.

Il vincolo idrogeologico vero e proprio arriva con la legge del 30 dicembre 1923 n. 3256. Questa legge è la legge Serpieri, che estende l'oggetto del vincolo a "terreni di qualsiasi natura e destinazione che per effetto di forme di utilizzazione contrastanti [...] possono, con danno pubblico, subire denudazioni, perdere la stabilità o turbare il regime delle acque". Inoltre distingue l'imposizione del vincolo idrogeologico in imposizione diretta del vincolo per prevenire i dissesti e in imposizione indiretta per includere i terreni in un piano di bonifica integrale o montana.

La legge Serpieri rimase attuale per quasi trent'anni, fino al 1952 quando venne revisionata per trasferire la competenza del patrimonio forestale dallo Stato alle regioni.

Nel 1989 il legislatore fissa l'ambizioso obiettivo di rivedere tutta la normativa in materia di difesa del suolo e nasce la legge del 18 maggio, la n. 183 "Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo".

Tappa storica che introduce la suddivisione del territorio secondo "bacini idrografici" delimitati secondo una linea spartiacque topologica e non politica. Viene richiesta l'elaborazione di un "Piano di Assetto Idrogeologico" (PAI), ossia uno studio in continuo aggiornamento delle problematiche e delle soluzioni a scala di bacino idrografico, riguardanti la difesa e la valorizzazione del suolo e la salvaguardia della qualità delle acque. Nonostante gli ottimi propositi la legge risultò troppo complessa sotto numerosi aspetti e talvolta contraddittoria, in un clima di scontento delle Regioni che si sentirono usurpate delle proprie

competenze in materia di difesa del suolo dalle Autorità di Bacino prontamente costituite. Si venne a creare un immobilismo generale incentivato dall'ostracismo delle Regioni.

Le Autorità di bacino riuscirono ad agire solo per casi di emergenza fino a che non furono apportate, sotto la spinta politica delle stesse, delle necessarie revisioni alla legge n. 183 del 1989.

Alle porte dell'anno 2000 sono gravi gli eventi di dissesto idrogeologico che colpiscono la penisola, con numerose vittime e danni economici.

Le rilevanti novità legislative di questo periodo derivano tutte dalla conversione di decreti legge nati per rimediare velocemente alle situazioni di emergenza che colpirono il Paese. Il primo, che riporta alla memoria la tragedia di Sarno e Quindici in Campania del 1998, era il DLgs 180 *“Misure urgenti per la prevenzione del rischio idrogeologico ed a favore delle zone colpite da disastri franosi nella Regione Campania”* poi convertito nella n. 267 dello stesso anno. Il secondo, in memoria del dam break del torrente Beltrame in Calabria nel 2000, diede vita alla legge di conversione n. 365 *“Interventi urgenti per le aree a rischio idrogeologico molto elevato ed in materia di protezione civile, nonché a favore delle zone della regione Calabria danneggiate dalle calamità idrogeologiche di settembre e ottobre 2000”*.

### *1.1.3 TESTO UNICO AMBIENTALE: DLGS DEL 3 APRILE 2006 N.152*

“Ad oggi le politiche relative alla difesa del suolo sono regolate, come , dal DLgs. 152/2006 “Norme in materia ambientale” e s.m.i. (c.d. Testo Unico dell'Ambiente) le cui disposizioni sono volte ad assicurare la tutela e il risanamento del suolo e del sottosuolo, il riassetto idrogeologico del territorio e la messa in sicurezza delle situazioni a rischio. Questo provvedimento trova le sue radici nella L 183/89 “Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo”, e successivamente nel DLgs. 180/98 (detto “Decreto Sarno”, convertito nella L. 267/98), emanato nel 1998 dopo la tragedia di Sarno (Campania)” (ISPRA, 2010).

Questo iter normativo, che nasce per rispondere alla direttiva comunitaria 2000/60/CE (della quale si parlerà in seguito), sistematizza e riorganizza la pianificazione di bacino che rappresenta uno strumento tecnico-normativo che fornisce gli indirizzi per le politiche di governo territoriale. Il Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) che ha origine dalla L 183/89, è uno strumento indubbiamente complesso che si concentra sulle impostazioni metodologiche relative alla definizione delle aree di pericolosità e di rischio, di tipo geomorfologico ed idraulico a scala di bacino idrografico.

I PAI, ormai disponibili per la quasi totalità del territorio nazionale, mostrano differenze relative sia alla specificità fisiografica dell'area di origine sia relative alle diverse metodologie di analisi utilizzate.

Le criticità valutate nei PAI, per le quali viene richiesta la produzione di una cartografia, sono quella geomorfologica e idraulica. Per la pericolosità geomorfologica è possibile ottenere una cartografia perlopiù omogenea e confrontabile, nonostante sia intrinseco avere un margine di soggettività di valutazione. È possibile invece riscontrare differenze nella determinazione del rischio a seconda del tipo di analisi scelta successivamente per l'applicazione dell'equazione che lo determina.

Per la determinazione del rischio idraulico sono numerosi i modelli idrologici ai quali è possibile fare riferimento, ma proprio questa grande disponibilità di modelli ne rende eterogenea e difficilmente confrontabile la cartografia della pericolosità idraulica che ne deriva.

Il DLgs 152/06 prevede anche la nuova ripartizione del territorio nazionale in "Distretti Idrografici" e la costituzione delle Autorità di Distretto Idrografico.

In attuazione della Direttiva 2000/60/CE le AdB nazionali hanno il compito di coordinare la redazione dei nuovi Piani di Gestione dei distretti idrografici in sostituzione alle Autorità di Distretto Idrografico finché queste non verranno formate. Tali piani sono essenzialmente piani di gestione delle acque da un punto di vista qualitativo, ricordiamo che il DLgs 152/06 "Norme in materia ambientale" apporta modifiche prevalentemente riconducibili al fronte amministrativo; la previgente disposizione di riferimento è il DLgs. 152/99 che si presenta formalmente come provvedimento che recepisce le Direttive comunitarie sul trattamento delle acque urbane e sull'inquinamento provocato da nitrati provenienti da fonti agricole.

#### *1.1.4 DIRETTIVA 2000/60/CE "LA DIRETTIVA QUADRO SULLE ACQUE"*

*"L'acqua non è un prodotto commerciale al pari degli altri, bensì un patrimonio che va protetto, difeso e trattato come tale"* (Direttiva 2000/60/CE).

La direttiva 2000/60/CE (Direttiva Quadro sulle Acque) istituisce un quadro per l'azione comunitaria in materia di acque. Ha introdotto un approccio innovativo nella legislazione europea in materia di acque tanto dal punto di vista ambientale, quanto amministrativo e gestionale.

La Direttiva descrive gli obiettivi (scopi) che si prefigge di realizzare, ossia di istituire un quadro per la protezione delle acque di transizione, costiere e sotterranee che:

- a) *“impedisca un ulteriore deterioramento, protegga e migliori lo stato degli ecosistemi acquatici e degli ecosistemi terrestri e delle zone umide direttamente dipendenti dagli ecosistemi acquatici sotto il profilo del fabbisogno idrico;*
- b) *agevoli un utilizzo idrico sostenibile fondato sulla protezione a lungo termine delle risorse idriche disponibili;*
- c) *miri alla protezione rafforzata e al miglioramento dell'ambiente acquatico, anche attraverso misure specifiche per la graduale riduzione degli scarichi, delle emissioni e delle perdite di sostanze prioritarie e l'arresto o la graduale eliminazione degli scarichi, delle emissioni e delle perdite di sostanze pericolose prioritarie;*
- d) *assicuri la graduale riduzione dell'inquinamento delle acque sotterranee e ne impedisca l'aumento;*
- e) *contribuisca a mitigare gli effetti delle inondazioni e della siccità.”*

La direttiva 2000/60/CE stabilisce che i singoli Stati Membri affrontino la tutela delle acque a livello di “bacino idrografico” e l'unità territoriale di riferimento per la gestione del bacino sia individuata nel “distretto idrografico”, area di terra e di mare, costituita da uno o più bacini idrografici limitrofi e dalle rispettive acque sotterranee e costiere.

In questo modo viene ad ampliarsi la protezione delle acque, sia superficiali che sotterranee, viene richiesto il raggiungimento di uno stato di “buono” per la qualità di tutte le acque entro il 31 dicembre 2015 procedendo attraverso un'azione che unisca limiti delle emissioni e standard di qualità così da riconoscere a tutti i servizi idrici il giusto prezzo che tenga conto del loro costo economico reale e allo stesso tempo rendere partecipi i cittadini delle scelte adottate in materia.

Questa direttiva, che “ [...] istituisce un quadro per l'azione comunitaria in materia di acque, introduce l'obbligo di predisporre piani di gestione dei bacini idrografici per tutti i distretti idrografici al fine di realizzare un buono stato ecologico e chimico delle acque che contribuirà a mitigare gli effetti delle alluvioni, **ma la riduzione del rischio di alluvioni non figura tra gli obiettivi principali di tale direttiva**, né questa tiene conto dei futuri mutamenti dei rischi di alluvioni derivanti dai cambiamenti climatici” (Direttiva 2007/60/CE).

### 1.1.5 DIRETTIVA 2007/60/CE “LA DIRETTIVA ALLUVIONI”

Un provvedimento normativo nato per la valutazione e la gestione del rischio da alluvione è la Direttiva comunitaria 2007/60/CE del 23 ottobre 2007.

La c.d. “Direttiva alluvioni” punta a ridurre i rischi di conseguenze negative derivanti dalle alluvioni soprattutto per la vita e la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale, l'attività

economica e le infrastrutture, fenomeni sempre più frequenti con il cambiamento del clima, mediante una protezione comune e transfrontaliera dal rischio alluvioni.

La direttiva prevede una strategia differenziata in tre tappe che comprende una valutazione preliminare del rischio di alluvione (entro il 2011), la redazione di mappe del rischio (entro il 2013) e la predisposizione di piani di gestione del rischio nelle aree minacciate a livello di distretto idrografico o unità di gestione (bacino idrografico, zona costiera; entro il 2015).

I piani di gestione dovranno riguardare soprattutto la prevenzione e la protezione contro il rischio di alluvioni. In questo contesto si dovranno ad esempio conservare o ripristinare le aree esondabili, evitando se possibile la costruzione di ulteriori opere di protezione ma la direttiva non prevede precise prescrizioni in merito ad interventi di sistemazione idraulica con l'utilizzo di infrastrutture artificiali (Alpmedia, 2007).

La direttiva prevede anche delle misure transitorie, ossia gli Stati membri possono decidere di non svolgere una delle tre tappe previste, per i bacini idrografici, i sottobacini o le zone costiere se hanno già effettuato una analoga attività (completa dei relativi elaborati) e purché questa risponda ai requisiti richiesti.

Sono previsti riesami ed aggiornamenti di ogni tappa, nel 2018 la valutazione preliminare del rischio, nel 2019 le mappe della pericolosità e nel 2021 i piani di gestione del rischio di alluvioni e successivamente ogni sei anni per ognuna. Viene richiesta anche una relazione sull'attuazione della direttiva entro il 22 dicembre 2018 e successivamente ogni sei anni, e nell'elaborare la relazione si dovrà tenere conto anche degli impatti dei cambiamenti climatici.

#### *1.1.6 IL RECEPIMENTO ITALIANO: DLGS DEL 23 FEBBRAIO 2010 N. 49*

Il Decreto Legislativo del 23 febbraio del 2010 n. 49 “ Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione del rischio alluvioni” traspone e adatta la Direttiva comunitaria sui tre punti:

- Il primo riguarda la definizione del fenomeno dal punto di vista fisico, inserendo quindi anche i flussi ad alta densità e la definizione di pericolo:

*“Art. 2: Definizioni:*

*1. Ai fini del presente decreto, oltre alle definizioni di fiume, di bacino idrografico, di sottobacino e di distretto idrografico [...] del decreto legislativo n. 152 del 2006 si applicano le seguenti definizioni:*

*a) alluvione: l'allagamento temporaneo, **anche con trasporto ovvero mobilitazione di sedimenti anche ad alta densità**, di aree che abitualmente non sono coperte d'acqua. Ciò include le inondazioni causate da laghi, fiumi, torrenti, eventualmente reti di drenaggio*

artificiale, ogni altro corpo idrico superficiale anche a regime temporaneo, naturale o artificiale, le inondazioni marine delle zone costiere ed esclude gli allagamenti non direttamente imputabili ad eventi meteorologici;

b) pericolosità da alluvione: **la probabilità di accadimento di un evento alluvionale in un intervallo temporale prefissato e in una certa area; [...]**”

Vengono così inseriti flussi ad elevata concentrazione volumetrica come le colate detritiche che si posizionano a metà fra le frane e i fenomeni alluvionali veri e propri fino ad oggi relegate in una sorta di “limbo”, e tutte le varianti del trasporto solido, trasporto di fondo, correnti iperconcentrate, colate sia granulari che fangose. Non solo, viene riconosciuta la causa antropica di numerosi smottamenti del terreno includendo gli impianti di drenaggio o i corpi idrici artificiali (come avvenne a Merano in Alto Adige un incidente che causò nove vittime fra i passeggeri di un treno nel 2010).

La definizione di pericolosità inserisce il concetto di tempo di ritorno (Tr), ossia l'inverso della frequenza, che individua la gravità di uno scenario d'evento in relazione ad un intervallo temporale che lo caratterizza statisticamente.

Il sistema di perimetrazione delle aree geografiche avverrà infatti secondo gli scenari di frequenza, Tr e probabilità richiesti nell'art 6 del decreto stesso:

*“Art. 6: Mappe della pericolosità e del rischio alluvioni:*

2. [...] evidenziando le aree in cui possono verificarsi fenomeni alluvionali con elevato volume di sedimenti trasportati e colate detritiche, la perimetrazione delle aree geografiche che potrebbero essere interessate da alluvioni secondo i seguenti scenari:

- a) alluvioni rare di estrema intensità: tempo di ritorno fino a 500 anni dall'evento (bassa probabilità),
- b) alluvioni poco frequenti: tempo di ritorno fra i 100 e 200 anni (media probabilità);
- c) alluvioni frequenti: tempo di ritorno fra i 20 e 50 anni (elevata probabilità).”

Ed indicando per ogni scenario almeno un elemento fra estensione dell'inondazione, altezza idrica o livello o caratteristiche del deflusso (velocità e portata).

- Il secondo riguarda l'aspetto delle competenze amministrative;

*“Art. 3: Competenze amministrative:*

1. Ferme restando le competenze del Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare, [...] provvedono, secondo quanto stabilito agli stessi articoli, **le autorità di bacino distrettuali di cui all'articolo 63 del decreto legislativo n. 152 del 2006**, alle quali, ai sensi dell'articolo 67 dello stesso decreto, compete l'adozione dei piani stralcio di distretto per l'assetto idrogeologico.



**2. Le regioni, in coordinamento tra loro e con il Dipartimento nazionale della Protezione Civile, provvedono, ai sensi della direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri in data 27 febbraio 2004[...], per il distretto idrografico di riferimento, alla predisposizione ed all'attuazione del sistema di allertamento nazionale, statale e regionale, per il rischio idraulico ai fini di protezione civile, [...].”**

Vengono ribadite le competenze delle Autorità di Distretto Idrografico, figure già istituite in Italia con il DLgs 152/2006, nella stesura dei Piani per l’assetto idrogeologico di distretto. Viene richiesta una linea di intervento specifica per le emergenze, che sia efficace e condivisa a tutti i livelli, statale e regionale, in coordinamento con il Dipartimento Nazionale della Protezione Civile.

- Il terzo conserva gli insegnamenti delle esperienze già maturate con il DLgs 183/89 e il DLgs 267/98:

*“Art. 6: Mappa della pericolosità e del rischio di alluvioni:*

*1. Le autorità di bacino distrettuali [...] del decreto legislativo n. 152 del 2006 predispongono, a livello di distretto idrografico [sempre del DLgs 152/2006] [...] mappe della pericolosità da alluvione e mappe del rischio di alluvioni [...], fatti salvi gli strumenti già predisposti nell'ambito della pianificazione di bacino in attuazione delle norme previgenti, nonché del decreto legislativo n. 152 del 2006.*

*5. Le mappe del rischio di alluvioni indicano le potenziali conseguenze negative derivanti dalle alluvioni, [...]e prevedono le 4 classi di rischio di cui al decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri in data 29 settembre 1998, [...].”*

Come discusso in precedenza, il DLgs 152 del 2006 è nato su sollecito da parte della Comunità Europea attraverso la direttiva 2000/60/CE e lo stesso vale per il DLgs n. 49 del 2010 che recepisce la Direttiva europea n. 60 del 2007.

Il DLgs 152 del 2006 ha rappresentato in Italia una tappa fondamentale che ha permesso di raccogliere e riorganizzare la normativa previgente in materia di difesa del suolo. Le radici del decreto 152/2006 sono, infatti, la 183/89 “Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo” che a suo tempo aveva rappresentato un primo tentativo necessario ma mal riuscito di riorganizzazione della normativa, e il “Decreto Sarno” convertito nella L. 267 del 1998 dopo la tragedia di Sarno in Campania.

## 1.2 IL RUOLO DEI MODELLI

Dalla Legge 183 del 1989 al DLgs n. 49 del 2010 lo strumento principe per la difesa a livello geomorfologico e idrologico del territorio e della rete idrografica sono i PAI (Piani di Assetto Idrogeologico), evolutisi in Piani stralcio di Distretto per l’assetto idrogeologico.

L'elaborazione di questi piani, che ad oggi vengono ancora comunemente chiamati PAI, è coordinata da un Decreto del Presidente del Consiglio dei ministri del 29 settembre del 1998. L'obiettivo è quello di indirizzare l'elaborazione di questi Piani attraverso l'applicazione di criteri e procedure comuni che li rendano omogenei, perciò confrontabili, per tutto il territorio nazionale.

Come visto nel precedente paragrafo dedicato al "Testo Unico dell'Ambiente", i PAI al 2011 sono redatti per quasi tutta la superficie nazionale ma sono eterogenei fra loro. I motivi di questa diversità sono dati dalle differenze geomorfologiche e litologiche proprie dei territori di ogni distretto che comportano spesso l'utilizzo di impostazioni metodologiche di valutazione delle aree pericolose differenti fra loro.

Spesso la validità delle previsioni dei PAI è stata accertata ex-post a seguito di eventi calamitosi (ISPRA, 2011).

Le criticità valutate sono la geomorfologica e l'idraulica. Per quanto riguarda la prima, si possono osservare differenze di valutazione, peraltro ineliminabili, della perimetrazione delle aree potenzialmente instabili rispetto alla propensione al dissesto delle stesse e differenze nella scelta della metodologia di determinazione del rischio. Mentre nel primo caso le differenze che si possono ottenere non influiscono in modo determinate sulla confrontabilità dei risultati, nel caso della determinazione del rischio la scelta di una metodologia rispetto ad una altra può influire in modo tale da non permettere un confronto diretto dei risultati ottenuti.

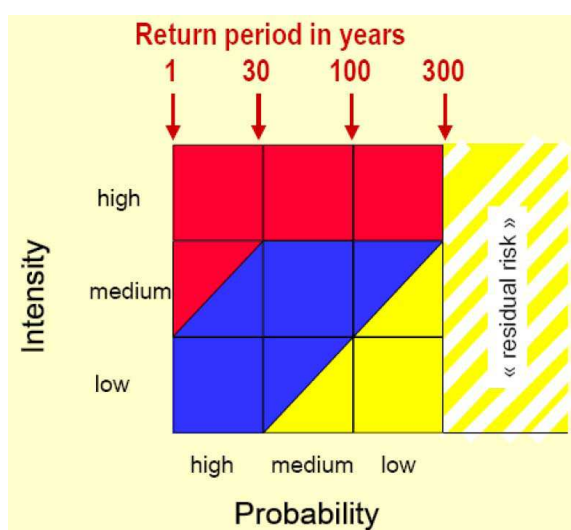
Questo vale anche per le criticità idrauliche, perché le Autorità di bacino scelgono il modello idraulico e/o idrologico da utilizzare in funzione delle caratteristiche del bacino di riferimento, fra una gamma di modelli proposti anche molto diversi fra loro. Questo significa che ciascun modello può rispondere in modo sensibilmente diverso, ossia restituire risultati diversi rispetto ad un altro, anche se applicato sullo stesso bacino. Non esiste il modello migliore in assoluto per tutte le situazioni che rende direttamente confrontabili i risultati ottenuti.

I modelli sono necessari per tracciare delle aree sulle mappe del rischio di alluvioni dei PAI. La pericolosità di una alluvione, come definita dal DLgs 49/2010 anche con trasporto di sedimenti ad elevata densità, viene simulata nei modelli attraverso la previsione di un comportamento dinamico e una distanza di arresto (runout distance) e di una larghezza di dispersione. Gli elementi di supporto perciò per la valutazione della pericolosità riguardo alle colate detritiche sono la stima dei volumi di detrito disponibili (assetto geomorfologico), della portata al picco, dell'altezza del fronte e della velocità del flusso (assetto idraulico).

La Provincia Autonoma di Bolzano, che sarà oggetto di questa tesi, ha ad esempio adottato una metodologia mista: utilizza una metodologia svizzera per l'individuazione delle zone di

pericolo applicandovi la normativa italiana. Vengono così sanate le lacune presenti in entrambi i sistemi, in quello italiano infatti si definiscono, con il sopracitato D.P.C.M. del 1998, le norme vincolistiche legate alle zone ma non si indica una metodologia univoca per la loro perimetrazione, e in quello svizzero si stabilisce una chiara metodologia di individuazione delle zone ma queste non entrano nei piani territoriali (Macconi, 2010).

Il sistema svizzero definisce diversi livelli di pericolo secondo la combinazione della probabilità che il fenomeno si verifichi (definita da un tempo di ritorno o frequenza di accadimento) e una intensità del fenomeno che generalmente è strettamente legata alla magnitudo dell'evento stesso (Figura 1, Barbolini, 2008).



**Figura 1: Sistema di valutazione utilizzato in Svizzera: rosso alto, blu:medio, giallo :basso, bianco:nessuno pericolo. Le tre diverse gradazioni di colore sono in funzione dell'intensità e della probabilità di un evento (Barbolini, 2008).**

L'intensità di un'alluvione viene espressa in funzione della velocità del flusso e/o della sua profondità. In alcuni casi la profondità del flusso è difficile da determinare, perciò può essere presa la profondità di deposito del debris flow. La tabella sottostante (Tabella 2) propone i valori critici che delimitano le classi di intensità proposti dal BUWAL nel 1997 (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft – Agenzia Svizzera per l'Ambiente, le Foreste e il Paesaggio).

**Tabella 2: Criteri di definizione delle classi di intensità per le alluvioni (da Barbolini, 2008).**

	<i>Low intensity</i>	<i>Medium intensity</i>	<i>High intensity</i>
<i>Debris flows</i>	$H_d < 0.4 \text{ m e}$ $V < 0.4 \text{ m/s}$	$H_d < 1 \text{ m e}$ $0.4 \text{ m/s} < V < 1.5 \text{ m/s}$	$H_d > 1 \text{ m e}$ $V > 1.5 \text{ m/s}$

Dove  $V$  = velocità media del flusso sulla verticale (flood o debris flow) e  $hd$  = spessore di deposito. L'intensità è definita attraverso l'influenza che le forze impattanti hanno sulla sicurezza della vita umana e delle strutture antropiche. Questo influisce direttamente sulle decisioni delle amministrazioni comunali in materia di pianificazione territoriale, come in Tabella 3: i colori rosso, blu e giallo individuano alto, medio e basso pericolo (hazard) e per ognuno un "dominio". Si passa infatti da un dominio in cui è proibita l'edificazione ad uno in cui essa non è impedita ma è regolata da appropriate misure restrittive e il dominio di allerta dove la comunità viene avvisata in caso di un possibile evento. Il tratteggio bianco e giallo, visibile anche in Figura 1, individua principalmente un pericolo residuo da "dominio di allerta" (giallo) per un evento di bassa probabilità ma di alta intensità. Il bianco invece individua zone in cui, a fronte delle informazioni correnti, non sono evidenti o riscontrabili pericoli.

**Tabella 3: Definizione delle zone di pericolo o dei gradi di pericolo, come applicati in Svizzera (Barbolini, 2008).**

<p><b>RED: high hazard</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• People are at risk of injury both inside and outside buildings.</li> <li>• A rapid destruction of buildings is possible.</li> </ul> <p>or:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Events occurring with a medium intensity, but with a high probability of occurrence. In this case, people are at risk outside buildings, or buildings can no longer house people.</li> </ul> <p>The red zone mainly designates a <b>prohibition domain</b> (area where development is prohibited).</p> <p><b>BLUE: moderate hazard</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• People are at risk of injury outside buildings. Risk is considerably lower inside buildings.</li> <li>• Damage to building structure should be expected, but not a rapid destruction, as long as the construction type has been adapted to the present conditions.</li> </ul> <p>The blue zone is mainly a <b>regulation domain</b>, in which severe damage can be reduced by means of appropriate protective measures (area with restrictive regulations).</p> <p><b>YELLOW: low hazard</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• People are at low risk of injury.</li> <li>• Slight damage to buildings is possible. Damage might occur inside the building but not at the structure.</li> </ul> <p>The yellow zone is mainly an <b>alerting domain</b> (area where people are notified at possible hazard).</p> <p><b>YELLOW-WHITE HATCHING: residual danger</b></p> <p>Low probability of a high intensity event that can be designated by yellow-white hatching. The yellow-white hatched zone is mainly an <b>alerting domain</b>, highlighting a residual danger.</p> <p><b>WHITE: According to currently available information no or negligible danger.</b></p>
---

### 1.3 LE COLATE DETRITICHE

Sono alluvioni tipiche nei torrenti montani e sono caratterizzate da forti e improvvise scariche di acqua mista a sedimento. A differenza di un trasporto di sedimento di cernita, dove avviene la selezione granulometrica, in questo caso vi è un trasporto di massa dove le parti solide fini e grossolane si muovono indistintamente. Il movimento è di origine gravitazionale, dato dall'accentuata acclività di questi torrenti generalmente chiusi in valli strette. Il loro moto si esaurisce allo sbocco nella conoide di deiezione, che nei territori alpini in genere si presenta antropizzata.

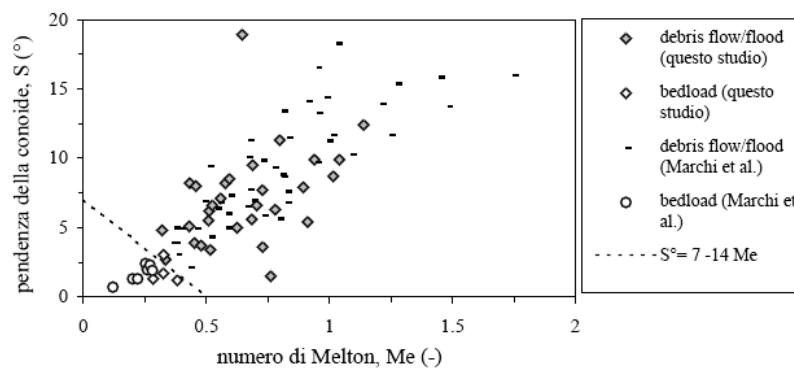
In molti studi di bacino, una prima distinzione fra colate e trasporto di sedimento fluviale può fornire una distinzione preliminare molto utile per la valutazione del pericolo.

Una previsione speditiva della forma di trasporto solido atteso può essere fatta attraverso il numero di Melton del bacino ( $Me$ ) e la pendenza della conoide ( $S$ ) (Figura 2) (D'Agostino, 1996).  $Me$  e  $S$  sono due indicatori morfologici che consentono di porre una linea di separazione tra le due categorie di trasporto. I bacini a rischio colata sono quelli caratterizzati da valori di  $Me$  ed  $S$  (in gradi) tali da soddisfare la disequazione:

$$S > 7 - 14 Me \quad (1)$$

Alcuni ricercatori hanno infatti evidenziato (Marchi *et al.*, 1993) che  $S$  risulta influenzata dalla tipologia dei processi deposizionali piuttosto che dalle caratteristiche litologiche del bacino.

Difficilmente questo metodo diagnostica un trasporto di fondo in luogo di un debris flow o di un debris flood (D'agostino, 1996).



**Figura 2: Previsione della forma di trasporto sulla base della pendenza  $S$  del cono di deiezione e del numero di Melton del bacino  $Me$  (D'Agostino, 1996).**

### 1.3.1 CHE COS'È UNA COLATA DETRITICA O DEBRIS FLOW

Le colate detritiche fanno parte dei fenomeni responsabili del modellamento dei versanti. Il loro ruolo si svolge nell'ambito dei processi di denudazione, che raccoglie tutti quei fenomeni che allontanano il materiale alterato e disgregato delle rocce denudando la quella sottostante. In questo modo provocano un abbassamento dei rilievi e un colmamento, accumulo di materiale, delle bassure.

Fra questi processi è possibile distinguere quelli che si sviluppano in modo estensivo, areale e quelli lineari, come l'azione dei corsi d'acqua nel loro letto. È possibile anche classificare i processi in gravitativi (o di massa), dove opera maggiormente la forza di gravità, o in cui operano agenti di trasporto come l'acqua (Castiglioni, 2004).

I debris flows sono fenomeni di trasporto di massa intermedi fra i fenomeni torrentizi e i fenomeni di dilavamento, in cui le frane nelle diverse manifestazioni sono l'elemento che fornisce il materiale trasportato. Alcuni autori considerano i debris flows come un tipo particolare di frane, "frane per fluidificazione" (Castiglioni, 2004).

Ciò che davvero distingue una colata da un trasporto di fondo o da una frana è la porzione di sedimento contenuta nel fluido. Le colate sono costituite da una miscela di acqua e materiale solido e scorrono con velocità che vanno da 1 m/s a 20 m/s (Major, 1996) e con velocità medie più ricorrenti intorno a 1-5 m/s. Il materiale solido viene mobilizzato dall'azione lubrificante dell'acqua e la velocità dipende dall'inclinazione del pendio, dalla forma del canale di scorrimento, dalle caratteristiche reologiche del flusso e dalla concentrazione solida volumetrica ( $C_{s-v}$ ).

La concentrazione solida volumetrica è la porzione di sedimento contenuta nel fluido. È il rapporto fra il volume di materiale solido trasportato ( $V_s$ ) e il volume solido totale della miscela ( $V_{tot}$ ):

$$C_{s-v} = \frac{V_s}{V_{tot}} = \frac{V_s}{V_s + V_l} \quad (2)$$

dove  $V_l$ : volume fase liquida.

Il complemento alla  $C_{s-v}$  è la concentrazione liquida volumetrica ( $C_{l-v}$ ):

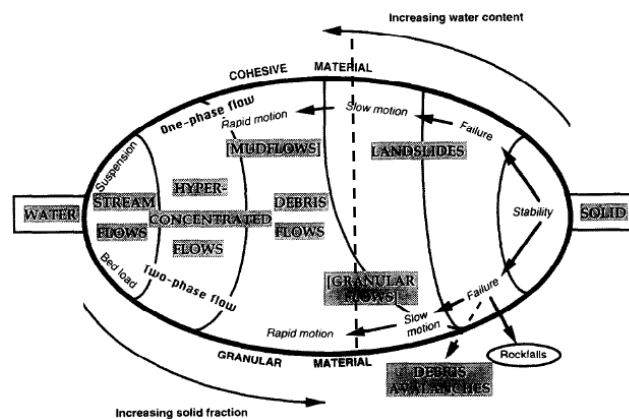
$$C_{l-v} = \frac{V_l}{V_{tot}} = \frac{V_l}{V_s + V_l} = 1 - C_{s-v} \quad (3)$$

In letteratura non è possibile individuare una definizione univoca di colata, ma in linea generica si può affermare che per flussi con concentrazione solida volumetrica ( $C_{s-v}$ ) inferiore al 15-20% si parla di trasporto di fondo, mentre con una  $C_{s-v}$  compresa fra il 20 e il 70% si

possono considerare colate. L'intervallo fra il 20 e il 40% di  $C_{s-v}$  rappresenta invece una fascia di transizione in cui è fondamentale il ruolo della granulometria, a seconda delle dimensioni del sedimento prevalente si ottiene un differente comportamento reologico, determinato dalla viscosità della miscela solido-liquida.

Con  $C_{s-v}$  inferiore al 20% si ha un tipo di fluido Newtoniano, dal comportamento ancora assimilabile a quello dell'acqua; fra il 20 e il 40%, a parità di  $C_{s-v}$  come evidenziato nel grafico (Figura 3) con un tratteggio, possiamo avere comportamenti reologici differenti, una colata lenta in caso di prevalenza di sedimenti fini e coesivi come limi e argille o una dinamica più rapida in caso di prevalenza di sedimento grossolano; con  $C_{s-v}$  maggiori del 40% ho una viscosità di diversi ordini di grandezza maggiore a quella dell'acqua e il comportamento reologico di una colata come discusso da Herschel e Bukley nel 1926.

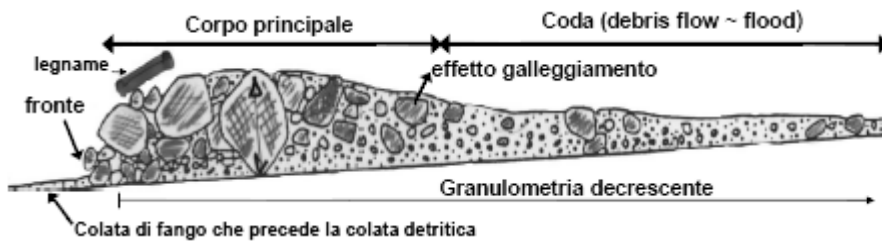
Fino ad un limite di  $C_{s-v}$  del 65% oltre il quale la velocità diminuisce indipendentemente dalle dimensioni del materiale coinvolto (D'Agostino e Cesca, 2009).



**Figura 3: Classificazione dei movimenti di massa di versante ripidi in funzione della frazione di materiale solido e tipo di materiale (coesivo/granulare) (Coussot, Meunier, 1996).**

Un modo efficace, seppur semplicistico, di approcciarsi alla comprensione di questo fenomeno è quello di figurarsi un ammasso di sedimento misto ad acqua che scorre lungo una valle ripida e stretta, in genere seguito da pulsazioni secondarie di minore intensità.

L'onda principale di una colata può essere schematizzata come in Figura 4. Si può riconoscere il fronte della colata che trasporta i massi di granulometria maggiore e il detrito legnoso. Può essere di forma rigonfia in caso di colate pietrose-granulari o a cuneo per colate fangose con detriti di piccole dimensioni. Il fronte può essere preceduto da un trasporto di fondo intenso o da una colata di fango e seguito da onde secondarie di minore intensità. La parte del corpo è una miscela di acqua e sedimento più liquida che contiene ancora componenti grossolane. Infine la coda che contiene le componenti più fini.



**Figura 4:schema onda principale debris flow.**

È possibile osservare diverse tipologie di colata e relative diverse classificazioni proposte in letteratura, quelle esistenti sono frequentemente basate sui processi, sulla morfologia, sulla geometria, sul tipo di movimento o sul tipo di materiale ed attività (Jakob, 2005).

Prima di entrare nel dettaglio della tipologia di una colata, è necessario fare una breve descrizione delle forze che si generano durante il loro moto.

La miscela di cui è costituita una colata detritica è composta da clasti di diverse dimensioni immersi in un fluido interstiziale (matrice viscosa) composto da materiale fine (argilla e limo) in sospensione in acqua.

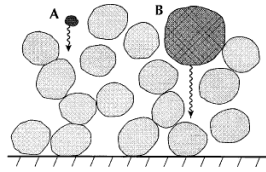
In questo modo se  $C_{s-v}$  è la concentrazione volumetrica dei solidi, la densità del miscuglio  $\rho_b$  sarà data da:

$$\rho_b = C_{s-v}\rho_s + (1 - C_{s-v})\rho_f \quad (4)$$

Dove  $\rho_s$  è la densità dei solidi ( $2600 \text{ kg/m}^3$ ) e  $\rho_f$  è la densità dell'acqua ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ).

Come premesso i debris flow sono fenomeni di massa gravitazionali perciò la forza motrice è la gravità, ovvero una pendenza minima oltre la quale viene garantito l'innesco e il moto per un determinato tipo di colata. Le forze che si generano durante il moto sono molteplici e di seguito se ne descriveranno brevemente alcune. Si generano degli sforzi di attrito sia con il fondo e le sponde in funzione della scabrezza delle superfici all'interno delle quali il flusso scorre. Gli sforzi sono dati dalla frizione fra i clasti presenti nella miscela perché tendono a muoversi con velocità diverse. Inoltre la resistenza che il fluido interstiziale oppone al moto (resistenza ad uno sforzo di taglio) rende necessario che avvenga il superamento di uno sforzo tangenziale di soglia perché la colata inizi a muoversi. Gli urti originano forze dispersive che tendono a spingere i massi di maggiori dimensioni verso la superficie e quelli di dimensioni minori vengono sollevati dalla spinta di galleggiamento del fluido interstiziale che ha una densità sensibilmente maggiore dell'acqua pulita (Figura 5, Iverson, 1997).





**Figura 5: Rappresentazione schematica che illustra la distinzione fra un piccolo grano che rimane sospeso esclusivamente grazie alle forze viscosive (grano A) e un grano di dimensioni maggiori che richiede l'interazione con gli altri grani per restare sospeso (grano B) (Iverson, 1997).**

Si riporta la classificazione proposta da Takahashi (1991) che distingue due grandi famiglie: le colate detritiche viscosive (del tipo macroviscoso) e le colate detritiche inerziali (del tipo detritica, fangosa, immatura ed ibrida).

*Colata macroviscosa:* sono costituite da materiale omogeneo, a grana fine prevalente, perlopiù limo e argilla, sabbia e ghiaia fine. A questo tipo di fluido possono essere applicate le equazioni per le correnti laminari di acqua chiara impostando un valore di viscosità adatto. Il regime è laminare monofase. In caso di matrice composta da sola acqua è necessaria una  $C_{s-v}$  di sedimento minima del 55% (ghiaia fine e sabbia) con matrice viscosa (argilla disciolta) è sufficiente una  $C_v$  del 27-30%. Il moto è comandato dalla viscosità del fluido interstiziale (matrice) e sono le colate più lente (1 m/s).

*Inerziale fangosa:* anche in questo caso matrice e materiale trasportato si confondono in una miscela omogenea di materiale a grana fine prevalente, dal regime turbolento monofase (corrente fangosa turbolenta). Mentre nella precedente la  $C_{s-v}$  è elevata e il fluido è molto viscoso, in questo caso la colata è più dilavata ed è in grado di raggiungere le velocità maggiori possibili per il fenomeno (15-20 m/s). I sedimenti delle dimensioni inferiori al centimetro sono mantenuti in agitazione e sospensione movimento dallo sforzo tangenziale turbolento del fluido interstiziale. La corrente evidenzia grossi vortici che indicano la presenza di turbolenza a larga scala.

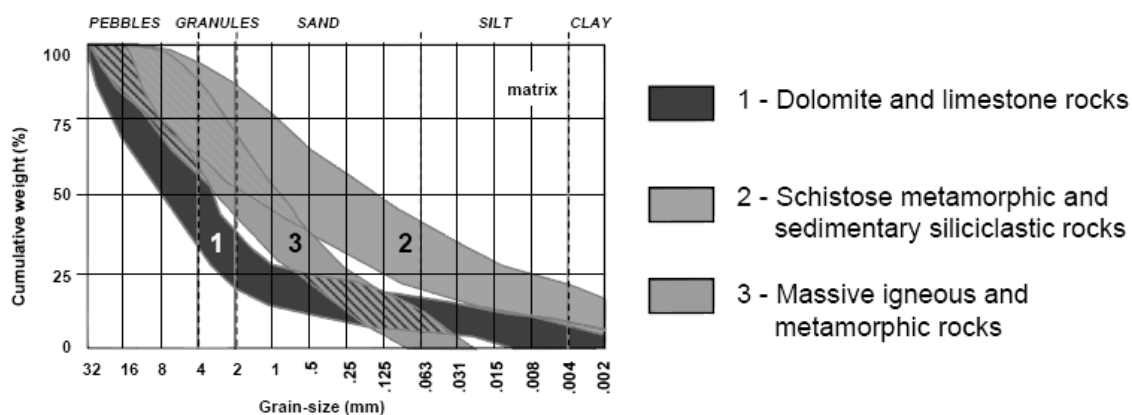
*Inerziale detritica:* vi è una buona distinzione tra il materiale trasportato (ghiaia grossa, massi) e la matrice (sabbie, ghiaie e terre a ghiaia fine). La corrente detritica è definita "matura" in quanto il sedimento è distribuito sull'intera profondità della corrente (monofase). Il regime è a limite superiore del laminare o debolmente turbolento. Le particelle di granulometria più fine restano sospese nell'acqua e ne seguono il movimento aumentando la densità del fluido interstiziale. Il moto è comandato dagli sforzi interni alla corrente, attriti e pressioni dispersive che sono in grado di spingere e mantenere sospesi verso la superficie libera anche materiale di grosse dimensioni e rendono la viscosità "apparente" molto elevata. La  $C_v$  minima è del 20%.

*Inerziale immatura*: il materiale trasportato è granulare con ciottoli di medie dimensioni e qualche masso, la matrice è di sabbie e terra a grana fine. A differenza della precedente il sedimento non è distribuito sull'intera profondità della corrente ma è bifase: il materiale trasportato è concentrato sullo strato inferiore della corrente ed è sovrastato da uno strato di acqua con materiale in sospensione. Il regime è turbolento e il moto viene governato anche qui dagli urti fra i granuli. Questo tipo di colata si sviluppa principalmente in tre casi e può mantenersi lungo tutto percorso. Il primo caso è in fase di formazione della colata stessa, il secondo è in zone di decelerazione quando le forze interne al fluido non sono più sufficienti a mantenere il sedimento distribuito in tutta la sua profondità e il terzo, quando la colata viene diluita da apporti di acqua ad esempio provenienti da immissioni di altri sottobacini.

*Inerziale ibrida*: il regime è turbolento monofase, bifase o addirittura trifase. Il materiale è eterogeneo, sia quello trasportato con piccoli massi e materiale fangoso, sia la matrice con terre a grana fine e sabbie. Questo tipo di colata è ibrida fra la colata detritica e la fangosa. La normale corrente detritica matura o immatura occupa lo strato inferiore del flusso, lo stato superiore da una corrente fangosa turbolenta.

La geologia può essere utile a comprendere la tipologia di colata attesa. Le analisi granulometriche condotte sui depositi di numerose colate detritiche nelle Alpi italiane svolte da Moscariello nel 2002 hanno evidenziato che a seconda del tipo di geologia è possibile prevedere il tipo di colata (Figura 6).

Le colate sono processi gravitativi comuni nelle regioni alpine e spesso sono caratterizzate dalla rapida deposizione di grosse quantità di materiale. La valutazione del pericolo in queste aree dipende dalla corretta identificazione del processo sedimentario dominante (Moscariello *et al.*, 2002).



**Figura 6: Geologia e granulometria dei depositi di colata (Moscariello *et al.*, 2002).**

Lo studio ha individuato tre gruppi principali di conoidi alluvionali, caratterizzati da differenti processi sedimentari dominati che sono stati distinti sulle basi delle caratteristiche litologiche del bacino idrografico.

In presenza di rocce ignee e metamorfiche massicce si sviluppano in genere colate con bassissimo contenuto di limo e argilla, di tipo granulare e non coesive. Rocce metamorfiche scistose e sedimentarie generano maggiormente colate fangose con una certa componente detritica. Rocce dolomitiche e calcaree sviluppano colate dal comportamento variabile a seconda della  $C_{s-v}$ : colate caratterizzate da granulometria perlopiù ghiaiosa e sabbiosa con concentrazione volumetrica dei sedimenti elevata tendono a comportarsi come colate macroviscose, viceversa come colate fangose.

Sia questi studi che quelli condotti da D'Agostino e Cesca (2009) hanno evidenziato che la frazione di materiale fine, limo e argilla, influenza in modo determinante la mobilità del flusso e di conseguenza copre un ruolo chiave nel controllo dei principali processi sedimentari.

Un altro tipo di classificazione per i debris flows è stato proposto da Jakob (2005). È costituita da dieci classi di magnitudo basate sul volume, portata al picco e area inondata dalla colata (Tabella 4). Viene fatta anche una distinzione fra le colate granulari poco mobili e le più veloci colate laviche o colate di fango.

La classificazione della grandezza per la caratterizzazione di questo fenomeno è raramente usata, perché fornisce scarse informazioni rispetto ad altre, spesso più importanti, caratteristiche morfologiche o del processo di smottamento. L'obiettivo dello studio di Jakob del 2005 è quello di offrire una classificazione che incorpora caratteristiche dimensionali differenti ( $V$  è il volume totale,  $Q_b$  e  $Q_v$  sono le portate di picco di debris flow granulari e vulcanici e  $B_b$  e  $B_v$  le rispettive aree inondate), che potrebbero essere utilizzate in studi regionali sul pericolo lungo i corridoi infrastrutturali (strade, ferrovie, condutture, etc.). Il volume stimato per ogni classe rispecchia il volume totale trasportato oltre un punto di interesse (comunemente l'apice del conoide). La portata al picco è considerata sempre vicino all'apice del conoide e l'area inondata fa riferimento alla conoide. Le classi 6 e 10 si riferiscono a colate detritiche costituite da sedimenti di origine piroclastica (lahar) dove l'intera piana alluvionale o promontorio montuoso viene inondato. La descrizione delle conseguenze potenziali è basata su un esame approfondito della letteratura disponibile (Jakob, 2005).

**Tabella 4: Classificazione della magnitudo delle colate (Jakob, 2005).**

Size classification for debris flows

Size class	$V$ , range (m <sup>3</sup> )	$Q_b$ , range (m <sup>3</sup> /s)	$Q_v$ , range (m <sup>3</sup> /s)	$B_b$ (m <sup>2</sup> )	$B_v$ (m <sup>2</sup> )	Potential consequences
1	<10 <sup>2</sup>	<5	<1	<4×10 <sup>2</sup>	<4×10 <sup>3</sup>	Very localized damage, known to have killed forestry workers in small gullies, damage small buildings
2	10 <sup>2</sup> –10 <sup>3</sup>	5–30	1–3	4×10 <sup>2</sup> –2×10 <sup>3</sup>	4×10 <sup>3</sup> –2×10 <sup>4</sup>	Could bury cars, destroy a small wooden building, break trees, block culverts, derail trains
3	10 <sup>3</sup> –10 <sup>4</sup>	30–200	3–30	2×10 <sup>3</sup> –9×10 <sup>3</sup>	2×10 <sup>4</sup> –9×10 <sup>4</sup>	Could destroy larger buildings, damage concrete bridge piers, block or damage highways and pipelines
4	10 <sup>4</sup> –10 <sup>5</sup>	200–1500	30–300	9×10 <sup>3</sup> –4×10 <sup>4</sup>	9×10 <sup>4</sup> –4×10 <sup>5</sup>	Could destroy parts of villages, destroy sections of infrastructure corridors, bridges, could block creeks
5	10 <sup>5</sup> –10 <sup>6</sup>	1500–12,000	300–3×10 <sup>3</sup>	4×10 <sup>4</sup> –2×10 <sup>5</sup>	4×10 <sup>5</sup> –2×10 <sup>6</sup>	Could destroy parts of towns, destroy forests of 2 km <sup>2</sup> in area, block creeks and small rivers
6	10 <sup>5</sup> –10 <sup>6</sup>	N/A	3×10 <sup>3</sup> –3×10 <sup>4</sup>	>2×10 <sup>5</sup>	2×10 <sup>6</sup> –3×10 <sup>7</sup>	Could destroy towns, obliterate valleys or fans up to several tens of km <sup>2</sup> in size, dam rivers
7	10 <sup>6</sup> –10 <sup>7</sup>	N/A	3×10 <sup>4</sup> –3×10 <sup>5</sup>	N/A	3×10 <sup>7</sup> –3×10 <sup>8</sup>	Could destroy parts of cities, obliterate valleys or fans up to several tens of km <sup>2</sup> in size, dam large rivers
8	10 <sup>7</sup> –10 <sup>8</sup>	N/A	3×10 <sup>5</sup> –3×10 <sup>6</sup>	N/A	3×10 <sup>8</sup> –3×10 <sup>9</sup>	Could destroy cities, inundate large valleys up to 100 km <sup>2</sup> in size, dam large rivers
9	10 <sup>8</sup> –10 <sup>9</sup>	N/A	3×10 <sup>6</sup> –3×10 <sup>7</sup>	N/A	3×10 <sup>9</sup> –3×10 <sup>10</sup>	Vast and complete destruction over hundreds of km <sup>2</sup>
10	>10 <sup>9</sup>	N/A	3×10 <sup>7</sup> –3×10 <sup>8</sup>	N/A	>3×10 <sup>10</sup>	Vast and complete destruction over hundreds of km <sup>2</sup>

$V$  is the total volume,  $Q_b$  and  $Q_v$  are the peak discharge for bouldery and volcanic debris flows, respectively,  $B_b$  and  $B_v$  are the area inundated by bouldery and volcanic debris flows. N/A signifies that bouldery debris flows of this magnitude have not been observed.

Se sono disponibili informazioni sugli eventi storici di colata avvenuti in una determinata area, queste rendono possibile la determinazione di un pattern di deposizione caratteristico fra la frequenza di un debris flow e il volume dello stesso per un particolare bacino (Zimmermann *et al.*, 1997). Attualmente non vi sono dei metodi rigorosi che consentono la determinazione esatta della probabilità di accadimento di una colata, essi sono basati su misurazioni delle caratteristiche fisiche del bacino idrografico o su analisi statistiche.

### 1.3.2 IDENTIFICAZIONE DEL PERICOLO DA DEBRIS FLOW

I requisiti di base richiesti perché si verifichi un evento di debris flow sono pendenza accentuata, sufficiente volume di materiale detritico relativamente facile da mobilitare e sufficiente acqua perché si inneschi il flusso. La probabilità che si verifichi un debris flow può essere stimata attraverso la valutazione geomorfologica del canale e della conoide del torrente in esame (Aulitzky, 1980).

Le unità morfologiche in cui si può suddividere un bacino da colata detritica sono le stesse in cui si possono suddividere i fenomeni gravitativi, ogni unità è sede di un processo della colata. Si distinguono tre zone principali, le zone di innesco, propagazione e deposito, che rispettivamente corrispondono al bacino di formazione (testata spesso con frane), al canale collettore e al cono di deiezione (conoide).

Esistono dei parametri morfometrici tipici che aiutano a individuare un bacino con propensione a colate.

Secondo lo studio di Marchi e D'Agostino (2004) su eventi storici questi fenomeni si verificano quasi esclusivamente in piccoli bacini con superfici inferiori ai 15 km<sup>2</sup>. La maggioranza di essi, il 75% nel caso di studio, già in bacini con superfici entro i 5 km<sup>2</sup> (D'Agostino, Marchi, 2000). La probabilità che un evento di colata si verifichi anche in bacini di estensione sensibilmente maggiore non è da escludere, con eventi di colata di elevata pericolosità che si originano da un collasso generale di tutti i sottobacini che costituiscono il bacino principale (come testimonia l'alluvione in Valle D'Aosta del 15 ottobre 2000).

La lunghezza del collettore principale, che a suo modo rispecchia la superficie del bacino, resta nella maggior parte dei casi contenuta entro gli 8 km, con un buona percentuale degli eventi per bacini con collettore di lunghezza inferiore ai 4 km. La propensione all'innescò di colate è verificabile già per pendenza media del collettore principale del 20%, con una progressiva riduzione per pendenze superiori al 50% che inibiscono l'accumulo di detrito.

Ogni zona morfologica è in realtà contraddistinta da una pendenza tipica. Questa pendenza influisce sul processo dominante per il quale le tre unità morfologiche si distinguono (Pasuto, Tecca, 2000). La zona di innesco del collettore principale ha una pendenza critica per l'innescò di debris flows compresa fra gli 11° e i 35°, la colata tende ancora a propagarsi fino a 10° di pendenza e si arresta per gradienti fra i 4°-6° in funzione della reologia e del grado di confinamento del flusso e per pendenze inferiori a 3° non si hanno depositi perché la colata si ferma (Pasuto, Tecca, 2000). La pendenza della conoide risulta influenzata dalla tipologia dei processi deposizionali piuttosto che dalle caratteristiche litologiche del bacino (Marchi *et al.*, 1993).

Non sono molto differenti da quelli sopracitati i gradienti che caratterizzano il comportamento della colata secondo Van Dine (1996); per questo autore si ha formazione e movimento con pendenze superiori a 15°, rallentamento-movimento fra i 10-15°, rallentamento del fronte con possibile arresto fra i 10 e i 3° e oltre questa soglia la deposizione.

Ma considerando la larga variabilità della miscela di un debris flow in composizione del materiale e contenuto d'acqua, questo intervallo può variare considerevolmente (Rickenmann, 2005).

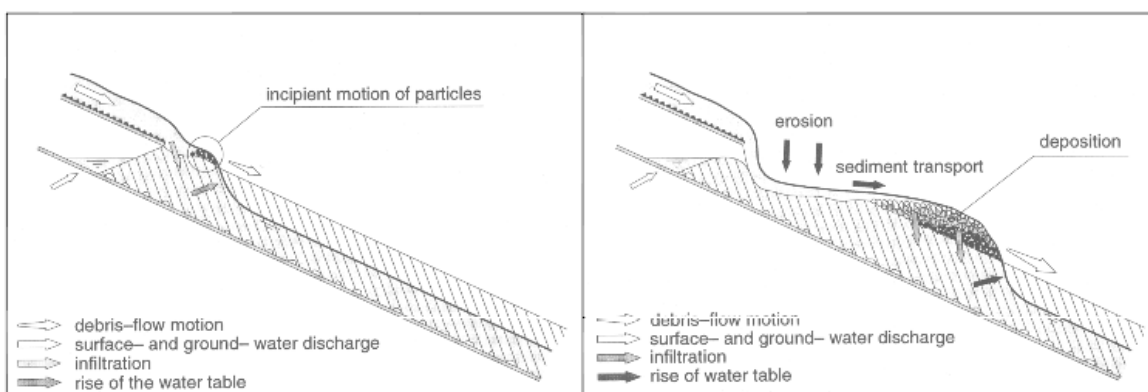
La zona di innesco, a quota maggiore e più acclive, si distingue generalmente per le frane superficiali in materiale colluviale o le falde detritiche presenti.

Nel caso un debris flow si origini da frane superficiali in materiale colluviale si osserva la concentrazione dei deflussi nelle incisioni presenti nel corpo di frana. Queste zone di convergenza dei deflussi rappresentano la microtopografia che condiziona la modalità di movimento delle acque durante le precipitazioni. L'acqua si infiltra rapidamente negli strati più superficiali del suolo ma non viene smaltita altrettanto velocemente da quelli più

profondi. La falda si alza sempre di più all'aumentare della portante pluviometrica contribuendo a destabilizzare il terreno. Si verificano così dei debris flows di versante dal volume contenuto che possono esaurirsi al primo cambio di pendenza o caricarsi ulteriormente di acqua e sedimento raggiungendo valle.

In occasione di eventi piovosi intensi possono innescarsi colate nelle parti superiori delle falde detritiche presenti al piede delle pareti rocciose. Questo tipo di innesco su falda detritica è tipico delle Alpi, nelle Dolomiti. Avviene una rapida concentrazione dei deflussi liquidi nei canali che solcano le pareti rocciose, con contributi unitari altissimi perché impermeabili. Ha così origine una corrente idrica a getto che impatta sul materiale sciolto della falda (innesco per effetto idrante). Si osserva sia l'erosione localizzata del pendio (scavo del canale), sia la destabilizzazione di una fetta di versante a causa dell'innalzamento della falda per gli apporti d'acqua provenienti dalla gola rocciosa e dalla precipitazione stessa (Tognacca, Bezzola, 1997). Questi ghiaioni, falde detritiche, sono ad elevata infiltrabilità e sono costituiti da materiale sciolto. La pendenza del versante rispecchia l'angolo limite di equilibrio del pendio stesso, che a sua volta rispecchia l'angolo di attrito statico del sedimento, la sollecitazione di taglio necessaria ad innescare il processo di scorrimento relativo fra due superfici.

La portata innescante il debris flow, uscente dalla gola rocciosa, si alimenta del materiale detritico destabilizzato del pendio e dell'ulteriore portata liquida infiltratasi nel pendio stesso derivata dalla precipitazione (Figura 7).



**Figura 7: Innesco di un debris flow per effetto idrante (Tognacca, Bezzola, 1997).**

Nella zona di propagazione vediamo la colata in movimento con la tipica struttura di fronte, corpo e coda descritta precedentemente. Rosgen (1994) distingue quarantun tipi morfologici di collettori suddividendoli secondo 8 categorie principali (A-G). Le variabili che guidano la suddivisione sono: il rapporto fra la larghezza e la profondità media del flusso, la

granulometria dominante, il rapporto di sinuosità, il grado di confinamento del flusso e la pendenza (Figura 8). I corsi d'acqua soggetti a colata sono individuati dalla classe Aa+.

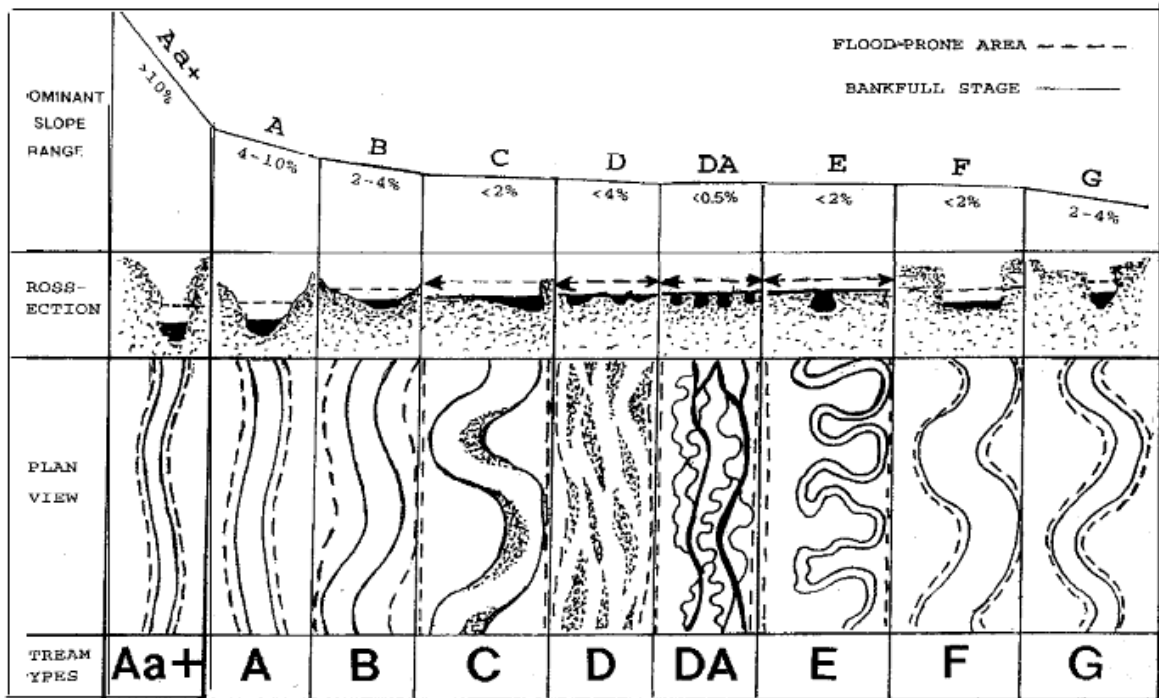
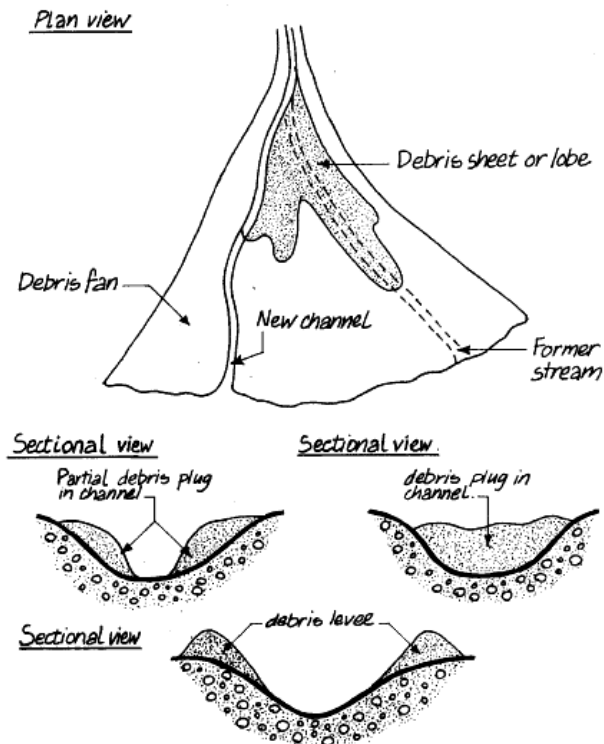


Figura 8: Guida illustrativa che mostra la configurazione delle sezioni trasversali, longitudinali e planimetriche dei principali tipi di fiumi (Rosgen, 1994).

Elementi che indicano il passaggio di una colata sono l'intenso scavo del canale da parte del flusso, lo sradicamento delle piante lungo la traiettoria di passaggio, scortecciamento delle piante ancora in piedi. L'onda di un debris flow di versante è più erosiva al crescere della pendenza del canale.

Altri elementi che indicano il passaggio di una colata sono evidenziati in Figura 9 e sono dati dagli argini laterali che si vengono a formare quando il flusso supera la quota della sponda, oppure dallo sbandamento in estradosso del flusso in prossimità di una curva (cordoni o debris levee) che si distinguono per la tipica inversione granulometrica, o per pendenza insufficiente allo scorrimento con rapido deposito del materiale (debris plug).

La zona di deposito, solitamente sulle conoidi alluvionali, è contraddistinta dalla presenza di depositi di forma lobata, lobi terminali (debris lobe o sheet), di granulometria fortemente eterogenea in funzione della litologia del bacino.



**Figura 9: Forme deposizionali di debris flows canalizzati (Van Dine, 1996).**

La deposizione e la distanza di arresto di un debris flow sono governati da molto fattori, in particolar modo dalla riduzione della pendenza e da una mancanza del confinamento del flusso (Rickenmann, 2005). I depositi sono formati da successive stratificazioni di detrito di eventi successivi. Queste stratificazioni possono dare informazioni sul tipo di evento. In caso di trasporto di fondo è evidente la deposizione del sedimento a strati con selezione granulometrica (cernita), in caso di colata il deposito si presenta caotico, senza stratificazioni e con massi in superficie.

Il riconoscimento del pericolo da colata è il primo importante passo che può essere basato su elementi diversi come le evidenze geomorfologiche e topografiche sopracitate, incluso l'aspetto del cono di deiezione, l'analisi di fotogrammi aerei o delle immagini satellitari, il recupero delle informazioni su eventi storici (Jakob, 2005).

Le informazioni che possono essere ricavate da questi studi possono aiutare a comprendere il comportamento del bacino nel passato e perimetrare le aree storicamente minacciate dal fenomeno torrentizio.



### 1.3.3 GENESI DI UN DEBRIS FLOW

Perché abbia luogo l'innescò di una colata detritica è necessario che si verifichino contemporaneamente due condizioni oltre la predisposizione topografica dettata dalla pendenza: il raggiungimento di una soglia critica di precipitazione e uno stato di ricarica di sedimento mobilizzabile sufficiente (Bovis e Jakob, 1999). Anche se la maggior parte dei debris flows sono innescati da precipitazioni brevi ed intense, sono riconoscibili altre importanti apporti di portata liquida. La prima è rappresentata dalla combinazione fra precipitazioni liquide e scioglimento nivale (Hungry *et al.*, 1984), quest'ultimo copre un ruolo importante soprattutto durante la primavera-estate o il ghiaccio e la neve che si sciolgono durante le eruzioni vulcaniche. Notevoli sono i danni arrecati da debris flows originati dal collasso di invasi, come i laghi glaciali, a causa della degradazione del permafrost e della fusione glaciale. Una raccolta di 17 recenti eventi di innescò di colate detritiche nelle aree di deglaciazione in relazione ai cambiamenti climatici è disponibile in uno studio di Chiarle *et al.* (2007), in un'area che include Italia, Francia e Svizzera.

È possibile operare una classificazione in base alla modalità di innescò. I meccanismi principali sono tre: mobilizzazione di una frana innescata da uno scroscio, collasso di una frana di grande scala che ostruisce temporaneamente l'alveo, una piena improvvisa che erode le sponde e il letto dell'alveo. Le prime due modalità sono di tipo "trigger", la colata si origina tempestivamente, mentre l'ultima è di tipo continuo, perché il debris flow si sviluppa un po' alla volta reclutando sedimento lungo il percorso (da appunti di lezione Prof. D'agostino, AA 2010 - 2011).

*Mobilizzazione di una frana innescata da uno scroscio:* la maggior parte dei casi di colata è legata a questa modalità; sono possibili anche più franamenti combinati in una zona fortemente instabile. È materiale destabilizzato contenente acqua che si muove su una pendenza elevata trasformandosi in debris flow. Non necessariamente una frana di versante, ortogonale al canale, ma spesso anche in asse al canale stesso, che lo fa retrogradare innescandosi.

*Collasso di una frana di grande scala che ostruisce temporaneamente l'alveo:* in questo caso il materiale proveniente da una frana, generalmente ortogonale al canale, crea uno sbarramento in alveo nel quale si accumula acqua e sedimento fino al collasso. Lo sbarramento temporaneo può essere anche generato da una diga in materiale vegetale (log dam) che induce al deposito di sedimento localizzato. Il materiale può cominciare a muoversi per effetto del peso proprio o perché la diga viene rotta dalla pressione dell'acqua ed erosa al piede (innescò con erosione e collasso). Questa modalità permette il verificarsi di un debris flow anche in un bacino non topograficamente predisposto all'innescò di colate.

*Una piena improvvisa che erode le sponde e il letto dell'alveo:* questo, al contrario dei precedenti, è un fenomeno di tipo continuo. La colata inizialmente è di tipo immaturo, in riferimento alla classificazione proposta da Takahashi (1991), e si accresce lungo il percorso. Questo tipo di innesco si ottiene con l'interazione fra la componente topografica pendenza e l'alimentazione del flusso da parte di alveo e sponde. Non sono necessarie sorgenti di sedimento localizzate ma la sorgente è distribuita lungo tutto il canale e la forza erosiva del flusso è garantita dall'elevata pendenza. La corrente si trasforma progressivamente in un debris flow.

In letteratura sono a disposizione delle soglie empiriche di precipitazione per l'innesco di debris flows che considerano intensità e durata di pioggia, ma sono applicabili solo nella zona di provenienza del dataset o in aree molto simili per uso del suolo, geologia, stato di manutenzione del corso d'acqua, etc.

Sidle *et al.* (1985) afferma che frane di detrito, valanghe e colate sono i tipi più comuni di movimenti di massa in versanti acclivi con pendenza maggiore di 25°.

La mobilitazione del materiale detritico durante un evento di debris flow è legato a due fattori principali: l'insorgere di trasporto di sedimento da parte del deflusso superficiale e l'instabilità dei versanti dovuta all'incremento della pressione interstiziale dell'acqua nel terreno. Questi movimenti avvengono infatti, con una umidità del terreno antecedente l'intesa precipitazione (o apporto d'acqua) molto elevata.

Sidle *et al.* (1985) valuta che la stabilità dei versanti dipende da processi idrologici quali precipitazione, tasso di infiltrazione ed evapotraspirazione. Il deflusso superficiale tende ad essere minimo in aree vegetate e non disturbate. In queste situazioni la portata principale si infiltra nel sottosuolo e la parte eccedente viene spinta dalla gravità negli strati più profondi del suolo, ad aggiungersi o a formare acqua sotterranea di falda. In questi strati profondi del suolo la resistenza al taglio decresce diminuendo la stabilità dei versanti. L'attività di traspirazione delle piante, soprattutto arboree, diminuisce l'umidità del terreno e le radici svolgono un ruolo di trattenuta meccanica. Se ne deduce che l'incremento della pressione dell'acqua nei pori del terreno favorisce i franamenti superficiali, ma la rimozione della vegetazione diminuisce la perdita d'acqua per traspirazione e viene a mancare l'azione meccanica di stabilizzazione svolta dalle radici, con il conseguente incremento della frequenza di crolli e scivolamenti.

Questa soglia critica di precipitazione si basa su condizioni locali di saturazione del suolo e individua una soglia critica di innesco di debris flow per precipitazioni di lunga durata. La tipologia di soglia individuata da Sidle *et al.* (1995) è quella per la quale si può attendere l'evento dissestato di grosse dimensioni, con la destabilizzazione di superficie del bacino considerevole (evento Valle D'Aosta nel 2000).

Nello studio di Caine del 1980 si analizza un altro tipo di fenomeno soglia che è l'innescamento di frana dato da precipitazioni brevi ed intense senza raggiungere la saturazione del suolo. Anch'egli ammette la difficoltà di definire con precisione gli effetti della piovosità nell'indurre fenomeni di dissesto di versante perché la relazione è indiretta ed influenzata da numerosi fattori che caratterizzano il mantello detritico. I risultati che ottiene derivano dalla raccolta di dati di intensità e durata di precipitazione associati ad un collasso di versante. La "soglia di rottura di Caine" o "Failure Threshold" è basata su franamenti che sono avvenuti con l'input di pioggia minimo sufficiente a farli innescare e che sono condizioni generalmente al di sotto della soglia di saturazione del suolo, perciò generalmente inferiori a quelle della soglia di Sidle *et al.* (1995).

Nel suo studio, Caine (1980) suggerisce che la relazione fra intensità e durata della precipitazione può essere utilizzata per ottenere un intervallo di accadimento di franamenti superficiali e debris flow approssimativo, che può essere utilizzato in situazioni in cui sia necessario un ragionevole margine di sicurezza, per esempio in quelle aree dove dei dissesti di versante sono già attesi. Una revisione di 124 soglie di precipitazione per l'innescamento di franamenti superficiali per l'area del CADSES (Central European Adriatic Danubian South-Eastern Space) presenti in letteratura è stata proposta da Guzzetti *et al.* (2006).

#### 1.4 LE OPERE DI SISTEMAZIONE IDRAULICO FORESTALE E IL CONTROLLO DELLE COLATE DETRITICHE

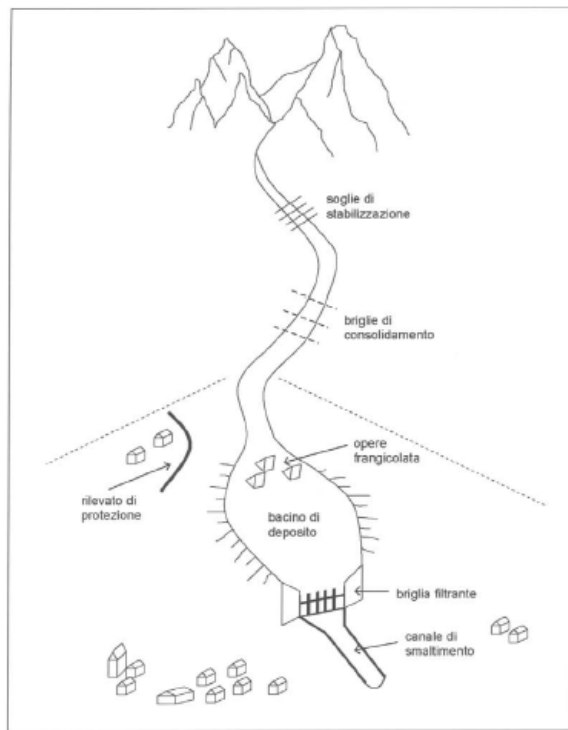
Ci si riferisce alle sistemazioni idraulico forestali nel contesto delle colate detritiche riguardo ad interventi strutturali utili a mitigare il pericolo da colata e salvaguardare la popolazione, le abitazioni e le infrastrutture poste a valle.

Questi interventi si possono distinguere a seconda della zona in cui vengono realizzati e della loro funzione.

Nella zona di innescamento possono essere presenti delle opere trasversali che mirano a stabilizzare il canale. Nella zona di propagazione opere in grado di limitare il processo di aratura del fondo o che riducono il carico energetico della colata trattenendo i massi di dimensioni maggiori (Figura 10).

Nella zona di deposito è possibile creare dei bacini di deposito chiusi da una briglia di trattenuta e a valle di questa canalizzazioni per lo smaltimento efficiente dei flussi. Sono possibili anche opere di protezione accessorie, di tipo passivo e locale nell'ipotesi che si verifichi un fenomeno avulsivo in conoide.

Ognuna di queste opere è efficiente se progettata con degli obiettivi di funzionamento definiti in modo chiaro. Le conoscenze nel campo della dinamica del trasporto di sedimento e d'alveo hanno contribuito a migliorare la progettazione di queste opere.

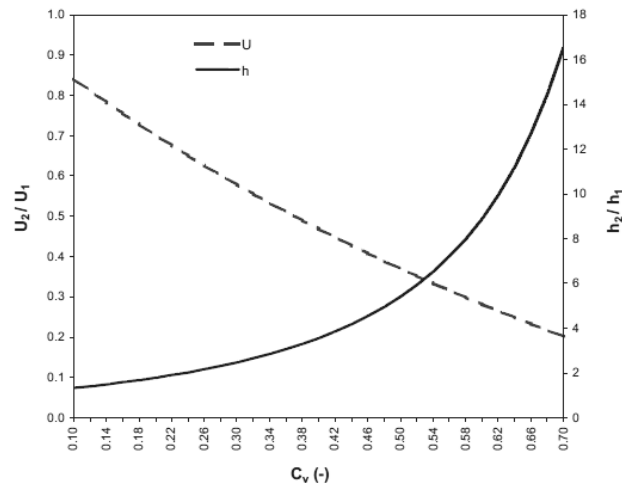


**Figura 10: Schema dei principali interventi strutturali per la difesa dalle colate detritiche (D'Agostino, 2008).**

Le sistemazioni idraulico-forestali per il controllo dei sedimenti hanno molteplici obiettivi, in considerazione soprattutto della crescente urbanizzazione delle conoidi alpine. Queste aree richiedono misure di mitigazione del fenomeno molto efficienti, in funzione della natura impulsiva e di rapida evoluzione delle colate, caratterizzate da brevi tempi di allarme.

Escludendo la finalità aggiuntive che è possibile raggiungere con gli interventi di ingegneria naturalistica, le opere tradizionali permettono la limitazione dei processi di erosione idrica che avvengono nel reticolo idrografico e nei versanti e la conservazione del suolo con il controllo dei dissesti e delle aree in frana (D'agostino, 2006). In particolare le opere di idraulica torrentizia regolano le alluvioni solide dei torrenti, consentendo una maggiore sicurezza delle sezioni idrauliche critiche, dove la portata di piena rischia di non essere contenuta, con la conseguente minaccia di avulsione e sovralluvionamento delle aree circostanti. Esiste una profonda differenza fra il transito di una corrente liquida e una corrente carica di materiale solido. Molto efficace per la descrizione di questa differenza è l'approccio semplificato proposto da Valentini nel 1912 (vedi D'Agostino, 2006) che combinando diverse equazioni fornisce una variazione sensibile dei rapporti fra velocità e

altezze di flusso passando da un trasporto solido di fondo ( $C_{s-v} < 0.2$ ), ad una corrente iperconcentrata ( $C_{s-v} = 0.2-0.35$ ) e ad un debris flow ( $C_{s-v} = 0.35-0.70$ ). All'aumentare della  $C_{s-v}$ , soprattutto per  $C_{s-v} > 0.5$ , si osserva un incremento della profondità della corrente quasi di un ordine di grandezza (Figura 11, D'Agostino, 2006).



**Figura 11: Andamento dei rapporti fra velocità U (U2: acqua e sedimento, U1: acqua chiara) e profondità del flusso h (h2: acqua e sedimento, h1: acqua chiara) in funzione della concentrazione volumetrica ( $C_v$ ) (D'Agostino, 2006).**

La scelta della portata di progetto  $Q_d$  trattando un fenomeno complesso come le colate detritiche non è facile. Molto dipende dallo stato di ricarica di sedimento del bacino come discusso nello studio di Bovis e Jakob (1999) e dal superamento di una soglia critica di precipitazione.

Ad ogni modo un ruolo di primo piano è svolto dal riconoscimento della tipologia di colata attesa, ossia della forma di trasporto dominante (in riferimento a Takahashi, 1991; Moscariello *et al.*, 2002), in ragione della quale sarà necessario realizzare l'opera di protezione adatta.

## 1.5 OBIETTIVI

Questo studio è inserito all'interno di un progetto finanziato a livello europeo per la protezione dal rischio idrogeologico, il progetto MONITOR II, acronimo di "Practical Use of MONITORing in Natural Disaster Management".

I modelli matematici bidimensionali di simulazione messi a confronto, dei quali si valuteranno vantaggi e svantaggi, hanno perciò goduto di una calibrazione e di perfezionamenti dei dati di input frutto di ricerche approfondite effettuate in campo.

Nella prima parte del caso di studio verrà trattata la stima geomorfica effettuata nel bacino del rio Gatria. Gli obiettivi di questa stima sono:

- la catalogazione delle aree sorgenti di sedimento e la valutazione del volume di sedimento mobilizzabile;
- il recupero delle informazioni relative ad un evento di colata del 2010 e la successiva valutazione di una priorità di contributo solido da parte dei sottobacini.

La seconda parte di questa tesi si occupa dell'implementazione della back analysis dell'evento di colata tramite due differenti modelli di simulazione, FLO-2D e RAMMS. Gli obiettivi sono quello di confrontare gli aspetti complessivi di utilizzo dei due programmi che includono:

- gli aspetti di predisposizione e di adattamento dei parametri di input preliminari all'avvio della simulazione, con particolare attenzione al dato di topografico e alle differenti esigenze nei confronti dei parametri reologici che governano i modelli;
- le differenze e le difficoltà di calibrazione dei due modelli focalizzando l'attenzione sulle caratteristiche distintive della calibrazione di RAMMS;
- la valutazione dei risultati finali attraverso il confronto planimetrico fra l'area simulata e l'area di deposito reale.

## CASO DI STUDIO

### 2.1 IL PROGETTO EUROPEO MONITOR II

Nel contesto del programma europeo South East Europe è stato finanziato per il triennio 2009 - 2012 il progetto MONITOR II, acronimo di "Practical Use of MONITORing in Natural Disaster Management". Il progetto comprende 12 partners ed i paesi coinvolti sono Austria, Bulgaria, Grecia, Italia, Romania, Serbia e Slovenia e ha l'obiettivo di migliorare la prevenzione dei rischi ambientali nell'area del Sud-Est Europa (SEE).

Il progetto MONITOR II è sostenuto per mezzo del Fondo Europeo di Sviluppo Regionale (IT: FESER, ING: European Regional Development Fund, ERDF) con uno stanziamento di € 2.004.300,00 e ha l'obiettivo di coordinare l'elaborazione di mappe di pericolosità e piani di emergenza a livello transnazionale. I paesi dello "Spazio Alpino" stanno sviluppando misure volte a ridurre i fattori di rischio per prevenire le catastrofi naturali rafforzando la preparazione e la sensibilizzazione del pubblico attraverso la comunicazione e l'informazione, l'elaborazione dei piani di uso del suolo e la creazione di sistemi di allerta efficienti.

L'ambiziosa struttura di diffusione strategica e comunicazione offerta dal progetto MONITOR II aiuta a raggiungere il primo obiettivo di rafforzamento della preparazione per la prevenzione dei rischi naturali attraverso i media, materiale informativo multilingue, lo sviluppo di un sito web per la pubblicazione dei risultati del progetto, conferenze e seminari.

I piani di emergenza e le mappe di pericolosità a livello transnazionale hanno sempre sofferto della mancanza di procedure standardizzate. Il secondo obiettivo del progetto è perciò quello di sviluppare una metodologia condivisa con lo sviluppo di linee guida per la comunicazione di informazioni complesse, come le previsioni e gli avvisi per consentire una cooperazione efficace in tempo reale al di là dei confini nazionali. A causa della mancanza di un sistema comune di allarme rapido nei paesi del Sud-Est Europa (SEE) è stato sviluppato il sistema "Continuous Situation Awareness" (CSA). Il progetto MONITOR II si presenta perciò come una piattaforma per il pubblico, i politici, i servizi di emergenza e gli esperti per discutere delle diverse esigenze in materia di sviluppo di un sistema user-friendly CSA valutato sul campo. In sintesi il progetto MONITOR II ha l'obiettivo di armonizzare e rendere fruibili carte del pericolo e piani di emergenza a livello transnazionale. Il sistema CSA permette la comunicazione in tutte le fasi di gestione delle catastrofi al fine di migliorare la sicurezza in situazione di calamità naturale e di fornire un futuro sicuro per gli abitanti dei paesi dell'Europa sudorientale.

## 2.2 VAL VENOSTA - RIO GADRIA E RIO STRIMO -

Fra i partners del progetto MONITOR II vi è anche l'Italia con due progetti, uno sviluppato con il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Modena e Reggio Emilia e il secondo, con il Dipartimento della Protezione Civile e il Servizio Geologico della Provincia Autonoma di Bolzano-Alto Adige.

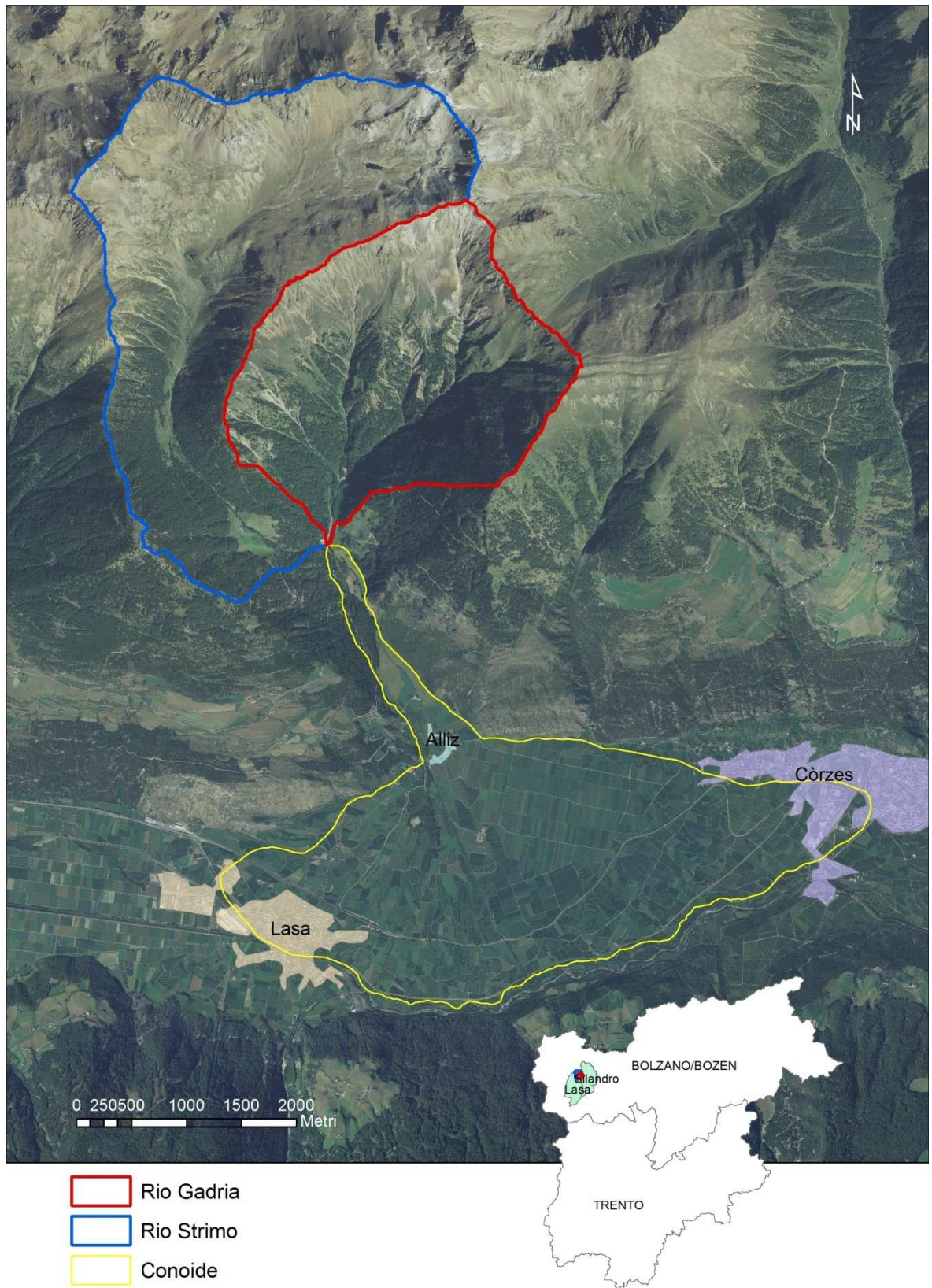
La Provincia Autonoma di Bolzano studia tre bacini di montani:

- Hahnebaum (Val Passiria)
- Trafoi (Val Venosta)
- Gadria (Val Venosta)

Il bacino del torrente Gadria sarà l'oggetto principale di questa tesi, per essere successivamente affiancato dall'adiacente rio Strimo nella back-analysis dell'evento di colata del 12 luglio 2010 con la calibrazione dei modelli matematici bidimensionali FLO-2D e RAMMS.

Il bacino del torrente Gadria e del torrente Strimo si affiancano a cavallo di due comuni della provincia autonoma di Bolzano, Silandro e Lasa (Figura 12), e sono entrambi immissari del fiume Adige. Sono situati nella parte centrale della val Venosta, valle che vanta il più denso gruppo di conoidi con superficie superiore a 3 km<sup>2</sup> (Jarman, 2011) all'interno delle Alpi italiane centro-orientali.





**Figura 12: Panoramica da ortofoto sui bacini idrografici del torrente Gatria e del rio Strimo, la conoide ospita gli abitati di Allitz, Lasa e Corces.**

Il rio Gatria (Gadriabach) e il rio Strimo (Strimmbach) alla loro confluenza originano il torrente Allitz (Allitzerbach). Il torrente Allitz scorre sul grande conoide che collega il bacino di studio con il fiume Adige. Di seguito sono riportati i principali parametri morfologici che caratterizzano i bacini del rio Gatria e del rio Strimo (Tabella 5).

Il bacino del rio Strimo ha una superficie di 8,7 km<sup>2</sup> che si sviluppa in lunghezza adagiandosi su tutto il fianco occidentale del rio Gatria, di superficie inferiore, 6,0 km<sup>2</sup> circa. I due bacini confluiscono per dare origine al torrente di Allitz, a 1393 m s.l.m. Si sviluppano con un rilievo ( $\Delta H$ ) di 1804 m s.l.m. per il rio Strimo e 1551 m s.l.m. per il Gatria con rispettivamente quote medie di circa 2464 m s.l.m. e 2134 m s.l.m. le curve ipsografiche di Figura 13 forniscono la distribuzione delle superfici nelle diverse fasce altimetriche.

È possibile descrivere quantitativamente l'evoluzione del paesaggio utilizzando la curva ipsografica adimensionale (è comodo anche un confronto visivo con il supporto della bisettrice). In caso di curva di forma convessa il paesaggio è giovane e in fase di erosione, se lineare un paesaggio maturo e in equilibrio, se concava un paesaggio senescente.

Utilizzando la curva ipsografica adimensionale è possibile confrontare l'evoluzione di bacini differenti. In Figura 14 sono riportati in ascissa il rapporto  $A_i/A$  e in ordinata  $h_i/h_{max}$  dove  $h_i$  è la quota media di ogni fascia altimetrica;  $h_{max}$  rappresenta la quota massima del bacino;  $A_i$  è l'area di ogni fascia altimetrica;  $A$  rappresenta la superficie totale del bacino. Se l'area a sottesa dalla curva ipsografica è maggiore di 0.6 il bacino è in stadio giovanile, se compresa fra 0.4 e 0.6 in stadio maturo e se inferiore a 0.4 in stadio senile (Strahler, 1957).

I bacini Strimo e Gatria hanno rispettivamente valore 0.59 e 0.45, la bisettrice 0.5.

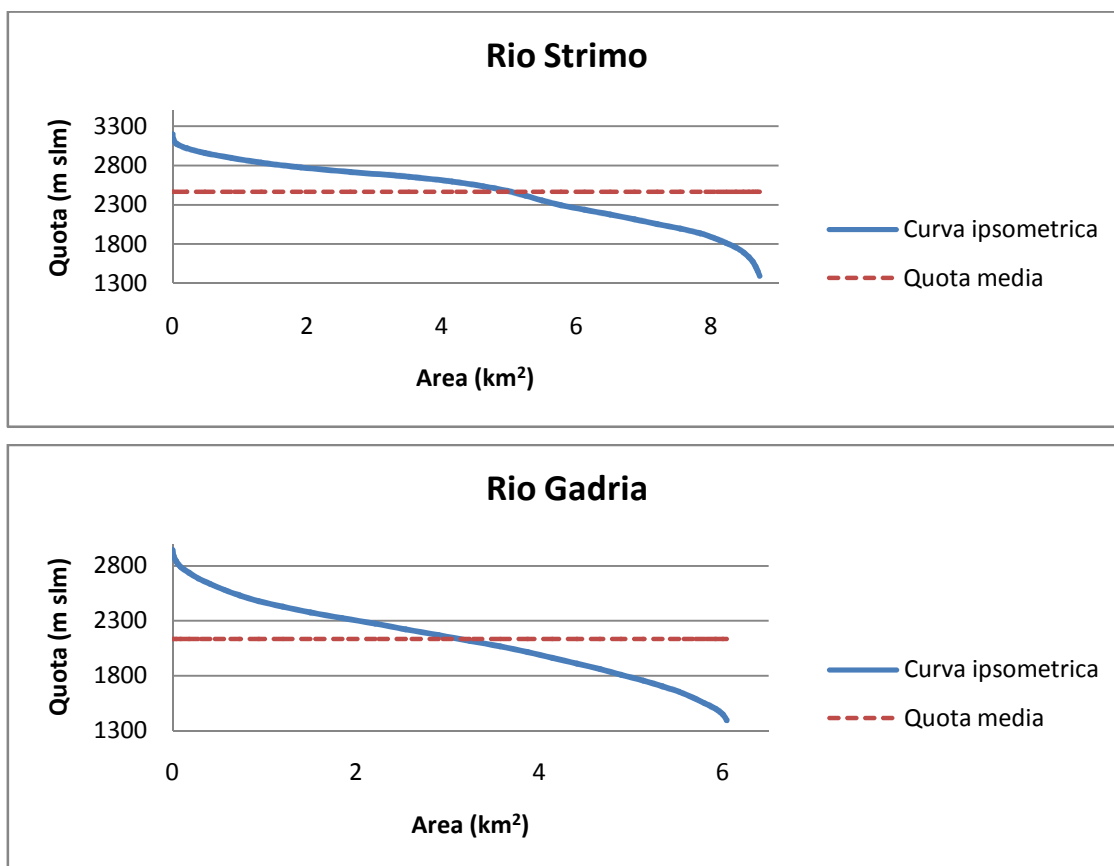
Il coefficiente di Gravelius invece offre una valutazione quantitativa della forma del bacino: il perimetro del bacino viene rapportato a quello di un cerchio di superficie pari a quella del bacino stesso. È un coefficiente di circolarità, tanto più il valore ottenuto si avvicina a 1 tanto più la forma del bacino si avvicina al cerchio. Come osservato in precedenza, lo sviluppo del bacino del rio Strimo è di forma allungata, con coefficiente di Gravelius pari a 2, ed è disposto lungo tutto il fianco destro del torrente Gatria, quest'ultimo di forma più tendente al circolare, con coefficiente di Gravelius pari a 1.5.

Il parametro di forma utilizzato per definire la propensione dei bacini ad eventi di debris flow o debris flood è il numero di Melton con  $Me > 0.5$  (D'Agostino, 1996). Entrambi i bacini superano questo valore con  $Me = 0.61$  per lo Strimo e  $Me = 0.63$  per il Gatria.

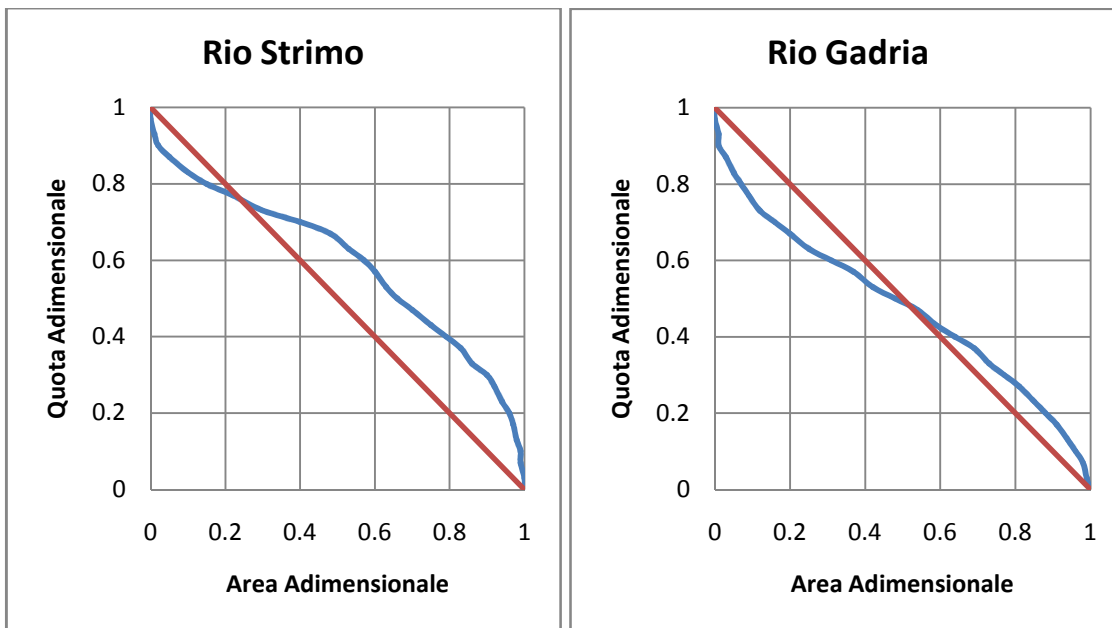
La pendenza media di entrambi i bacini è elevata, in particolar modo per il Gatria, (32° e 38.6°), lo stesso vale per la pendenza media del collettore principale con 11.8° per lo Strimo e 21.8° per il Gatria con una lunghezza maggiore per il collettore del rio Strimo (5956 m contro 3506 m; Tabella 5).

**Tabella 5: Tabella riassuntiva dei parametri morfometrici.**

		<b>Rio Strimo</b>	<b>Rio Gadria</b>
Area planimetrica [km <sup>2</sup> ]	A	8.7	6.0
Area effettiva bacino [km <sup>2</sup> ]	A <sub>e</sub>	10.6	7.8
Perimetro bacino [m]	P	20720	13315
Quota minima [m s.l.m.]	h <sub>0</sub>	1393.6	1393.6
Quota media [m s.l.m.]	h <sub>m</sub>	2464.4	2134.8
Quota massima [m s.l.m.]	h <sub>max</sub>	3197.5	2944.7
Rilievo bacino [m]	ΔH	1803.9	1551.1
Pendenza media [%]	i <sub>m</sub>	62.94 (32°)	79.81 (38.6°)
Lunghezza del collettore principale [m]	L	5956.1	3506.7
Pendenza media del collettore principale [%]	i <sub>cm</sub>	0.21 (11.8°)	0.40 (21.8°)
Numero di Melton	Me	0.61	0.63
Coeff.di forma di Gavelius	F	2.0	1.5
Integrale ipsometrico	a	0.59	0.45



**Figura 13: Curve ipsometriche e relativa quota media. In alto il rio Strimo, in basso il rio Gadria.**



**Figura 14: Curve ipsografiche adimensionali con bisettrice di riferimento. A destra il rio Strimo e a sinistra il Rio Gatria.**

La conoide di deiezione comune ai due bacini idrografici è originato dalla concavità identificabile attraverso carte topografiche, rilievi LiDAR o immagini satellitari ovvero il sistema bacino Gatria-Strimm-Allitz. La conoide di Allitz/Lasa è uno dei più grandi conoidi simmetrici delle Alpi e devia il percorso del fiume Adige alla base del versante opposto.

Secondo lo studio effettuato da Jarman *et al.* nel 2011 il sistema classico per identificare un cono di deiezione è la relazione allometrica fra l'area drenata sottesa all'apice e l'area della conoide. È una analisi geomorfologica e statistica che distingue conoidi "allometrici" ed "anomali". I franamenti massivi gravitazionali catastrofici sono tipici dei casi "anomali". I casi anomali comprendono "outsize fans" e "megafans". Secondo i dati riportati in Tabella 6 il cono di deiezione di Allitz/Lasa è classificato come "magafan".

**Tabella 6: Dati morfometrici del conoide Allitz/Lasa (da Jarman *et al.*, 2011).**

<b>CONOIDE ALLITZ/LASA</b>	
Area del bacino idrografico, $A_c$ ( $km^2$ )	18.6
Area conoide, $A_f$ ( $km^2$ )	10.6
Pendenza del conoide $G_f$ (%)	13
Dilivello apice-piede $H$ (m)	300
Larghezza di dispersione $W$ (m)	5000
Volume approssimativo conoide $V$ ( $Mm^3$ )	916
Rapporto $A_f/A_c$	0.57
Rapporto $V/A_c$ ( $Mm^3 / km^3$ )	49

La conoide di Allitz/Lasa rappresenta insieme al conoide dell'Ilgraben e del Malser Haide uno dei rari coni di deiezione con superficie che supera i 10  $km^2$ . Uno dei principali obiettivi dello studio di Jarman *et al.* (2011) è dimostrare che conoidi di grandi dimensioni in valli glaciali non sono convenzionalmente conoidi alluvionali o da debris flow ma possono avere origine da franamenti gravitativi catastrofici, ossia che i megafan (come quello di Allitz/Lasa) siano il prodotto di uno o più eventi di elevata magnitudo e bassa frequenza. A maggior ragione se si può dimostrare con una investigazione sedimentologica e geotecnica la costituzione non stratificata del sedimento. Lo spessore del piede del megafan di Allitz/Lasa è 40 m ed è un massiccio di diamict (sedimento terrigeno non assortito, ad esempio sabbia o particelle più grandi in sospensione in una matrice fangosa) non stratificato, con blocchi di dimensioni metriche (Jarman *et al.*, 2011).

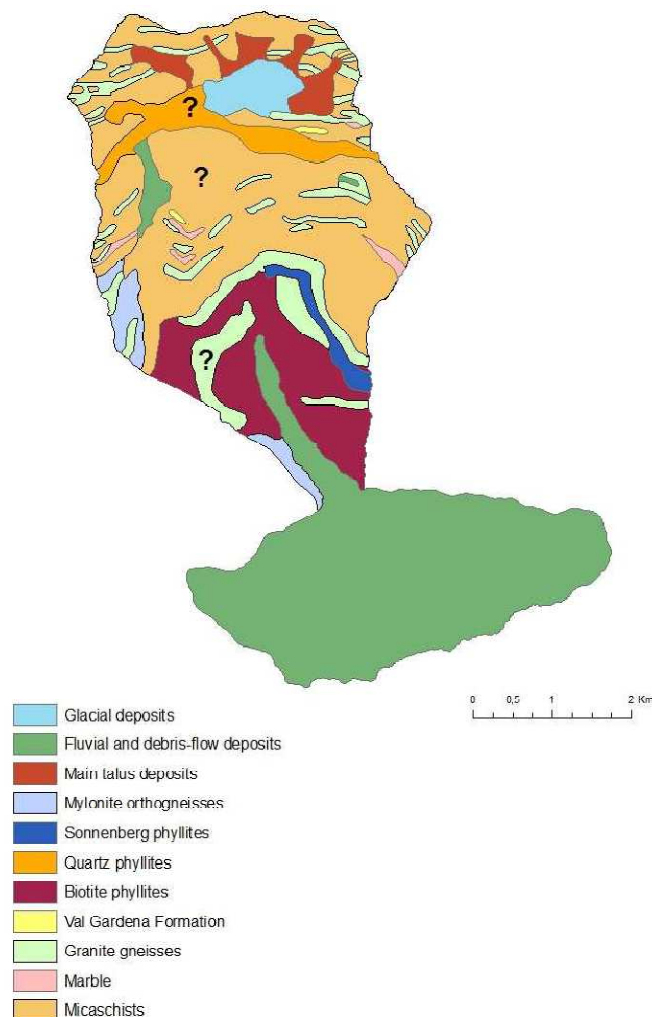
La parte centrale della Val Venosta è situata all'interno dell'arco Austroalpino e le analisi eseguite nel contesto del progetto MONITOR II evidenziano la dominante geologia metamorfica, che è composta prevalentemente da scisti e gneiss, con anfiboli, orthogneiss e marmo. Inoltre, nei massicci dell'Otztal e Campo sono presenti dei pattern strutturali che controllano l'organizzazione della rete di drenaggio e influenzano la resistenza della roccia. Questi pattern sono costituiti da fratture che insieme alla litologia influenzano la tipologia di dissesto: gli effetti sono visibili negli ammassi rocciosi forti come l'orthogneiss che manifestano caduta massi e attività di frana mentre su rocce più morbide come filladi e paragneiss sono presenti profonde deformazioni gravitazionali di versante. Proprio quest'ultime rocce morbide caratterizzano il sistema bacino idrografico Gadria-Strimm-Allitz (Figura 15).

Anche in questo caso, come nello studio di Jarman del 2011 le evidenze geomorfologiche che caratterizzano il sistema sono state riconosciute attraverso l'interpretazione di rilievi LiDAR, foto aeree e lavoro di campo.

I processi attivi sono periglaciali, fluviali e soprattutto colluviali.

Nella parte di testata del bacino Strimo predominano i processi periglaciali, mentre il trasporto sia di fondo che di massa predomina sui collettori principali di tutti e due i torrenti (Gadria e Strimo). I processi colluviali di versante si esplicano attraverso frane di detrito superficiale e valanghe di detrito che possono trasformarsi in debris flow.

In particolar modo il Gadria è un torrente alpino con una rilevante alimentazione solida e frequenza dei fenomeni connessi. Il torrente è di interesse scientifico a causa della sua alta incidenza di fenomeni di debris flow (solitamente almeno due importanti eventi all'anno) e può quindi essere utilizzato come sito sperimentale per sistemi real-time di monitoraggio e connessi sistemi di allerta come quelli previsti nell'ambito del progetto europeo MONITOR II.



**Figura 15: Mappa geologica a larga scala del sistema bacino Strimo, Gadria e Allitz basata sull'interpretazione di foto aeree e rilievi LiDAR ad alta risoluzione. I punti di domanda indicano aree di elevata incertezza che richiedono indagini di campo.**

### 2.2.1 MISURE DI MITIGAZIONE

Il rio Gatria è il bacino che offre la frequenza di eventi maggiore. In questo bacino e nella confluenza fra i due bacini sono stati numerosi i provvedimenti adottati per la mitigazione del fenomeno. I centri abitati a rischio nella conoide sono tre, Lasa, Corces e Allitz, ma quest'ultimo è considerato il comune più a rischio per la vicinanza al collettore principale e l'inclinazione del terreno.

I primi scritti che documentano eventi di debris flows nel rio Gatria risalgono alla fine del 15° secolo ma l'analisi storico documentale dello sviluppo delle opere idrauliche condotta da Reich (2011) evidenzia la mancata attuazione di misure strutturali di protezione fino al 19° secolo.

Prima della costruzione delle prime opere, l'unico provvedimento che veniva preso era quello di sgombero del materiale mobilizzato dal torrente.

I primi provvedimenti strutturali riguardarono la parte superiore del bacino, con il consolidamento del reticolo minore e la stabilizzazione estensiva di frane superficiali e rimboschimenti, consolidamenti che vennero nel tempo estesi a tutto il bacino. Punto focale della prevenzione era comunque la manutenzione costante del collettore principale del bacino del Gatria e del canale di smaltimento fino allo sbocco nel fiume Adige.

Gli interventi più importanti vennero eseguiti alla confluenza fra i due bacini con un sistema di mitigazione costituito da briglia e bacino di deposito. Il sistema prevede un volume massimo di invaso di materiale di 35000 m<sup>3</sup> in un bacino largo circa 60 metri e lungo (fino alla prima briglia di consolidamento) 170 m in cui confluiscono entrambi i bacini. La briglia è di tipo filtrante con gaveta di sicurezza ed, ali comprese, è alta 9,5 metri con una gaveta profonda 1,5 m e larga 11 m. L'apertura verticale (fessura di forma trapezia) è alta 8 m, larga 4 m nella parte alta a stringere verso il basso (2 m). Il filtro è composto da setti orizzontali e il sedimento e il detrito legnoso tendono ad intasarlo spesso. La manutenzione dell'intero sistema di mitigazione con lo sgombero della piazza di deposito e del canale di smaltimento è indispensabile ogni anno con dei costi altissimi. La media di volume rimosso è di 30000 m<sup>3</sup> ogni 24 mesi (Lucarelli *et al.*, 2009) e si stima che in caso di evento medio e briglia inefficiente i danni potrebbero essere ingenti. La sistemazione del rio Gatria, è sesta nella lista prioritaria di interventi lungo l'Adige a causa della notevole quantità di sedimento movimentabile e difficilmente valutabile (Lucarelli *et al.*, 2009).

## 2.3 DOCUMENTAZIONE EVENTI

La provincia autonoma di Bolzano ha adottato un sistema informativo territoriale integrato gestito dalla “Ripartizione 30-Opere idrauliche” per la documentazione dei fenomeni torrentizi e fluviali (colate detritiche, alluvioni, fenomeni erosivi), chiamato ED30. È un archivio informatico in cui confluiscono le informazioni post-evento raccolte dai tecnici rivelatori della provincia con metodologie di raccolta (anche di documentazione multimediale come foto e video), archiviazione e mappatura che sono il risultato della valutazione di altre metodologie utilizzate a livello europeo. In questo modo la provincia ha adottato un sistema informativo dei pericoli naturali realizzato ad hoc, aggiornato ed efficiente. Esso è utilizzato per l’analisi del rischio in previsione di una pianificazione del territorio più prudente, per la gestione di eventi futuri sulla base delle conoscenze di quelli passati e più in generale per la comprensione delle dinamiche che caratterizzano gli ambienti montani alpini. Questi dati offrono un’ampia casistica su cui tarare i modelli di simulazione, strumenti capaci di descrivere scenari utili ad una corretta modulazione degli interventi (Provincia di Bolzano, 2012).

Ogni anno viene prodotto un Report ED30 con i principali dati e statistiche sugli eventi avvenuti nell’anno precedente. Questi report sono liberamente scaricabili e consultabili direttamente dal sito della provincia.

### 2.3.1 RELAZIONE RIASSUNTIVA EVENTI 2010

Il Report ED30 del 2010 fornisce una panoramica semplice e completa degli eventi accorsi durante l’anno precedente e un confronto con le statistiche degli eventi passati.

L’anno 2010 ha mostrato un’attività idrogeologica ridotta rispetto all’anno precedente: il numero di eventi registrati è stato comunque ragguardevole, ma la magnitudo media è inferiore e soprattutto sono mancati quegli eventi estesi che hanno caratterizzato il 2009.

Il termine “eventi” si riferisce all’insieme dei processi alluvionali e di franamento all’interno dei quali, secondo una classificazione stilata dalla provincia stessa, è possibile distinguere: colate detritiche, alluvioni torrentizie, alluvioni fluviali, alluvioni urbane, frane e crolli. La distribuzione degli eventi in Alto Adige del 2010 riflette la stagionalità tipica degli stessi nella regione, concentrata nel periodo estivo, tra giugno e settembre. In primavera ed in autunno le precipitazioni intense sono spesso associate ad un abbassamento del limite della neve ed in questi casi è più probabile che si verificano eventi franosi di versante piuttosto che eventi idraulici. Un caso particolare è rappresentato dall’evento meteorico del 12 luglio, che si è sviluppato secondo una direttrice NO – SE colpendo prima la zona di Curon Venosta per poi spostarsi verso Silandro mentre le direttrici più comuni sono SO – NE (Macconi *et al.*, 2010). Nella notte del 12 luglio 2010 si sono verificati due distinti fenomeni di colata di detrito a



monte dell'abitato di Allitz, rispettivamente nel bacino del rio Gatria e in quello del rio Strimo. Gli eventi sono stati contemporanei e scatenati da un violento temporale che ha investito le porzioni sommitali dei bacini, causando l'innesco delle numerose aree sorgenti di sedimento presenti. Un'analisi pluviometrica degli eventi con conseguente modellazione idrologica a scala di sottobacino risulta estremamente difficoltosa a causa della localizzazione sfavorevole della stazione meteorologica più vicina e della qualità dei dati da radar. L'evento si è caratterizzato come un temporale estivo causato da una cella convettiva di dimensioni estremamente ridotte concentrata sui bacini dei torrenti Gatria e Strimo, senza causare eventi in bacini limitrofi. La stazione di Silandro è posta a quota 698 m, ed ha registrato una precipitazione cumulata di 11 mm. Il radar meteorologico del monte Macaion nella zona di studio ha visibilità a quota 3100 metri e durante gli eventi ha registrato una precipitazione cumulata di 5.3 mm per entrambi i bacini, con un picco di intensità di 24 mm/h per il Rio Strimo e di 34 mm/h per il torrente Gatria. La durata dell'evento è stata rispettivamente per i due bacini di 30 e 40 minuti, con un ritardo del Gatria rispetto allo Strimo di 10-15 minuti. La forte incertezza e sottostima di questi dati pluviometrici non permette una modellazione idrologica adeguata dell'evento.

ED30: evento del 12 luglio 2010 rio Strimo:

Sul rio Strimo (Tabella 7), a causa dell'evento meteorico del 12/07/2010, si è assistito ad un brusco innalzamento della portata liquida a monte di Malga del Pastore (2.057 m s.l.m.). Da qui si è innescata una colata detritica alimentata dal contributo solido di alcuni impluvi laterali e ad un fenomeno di dam break dovuto all'ostruzione e scalzamento di due passerelle all'altezza di Maso Strimm (Figura 16).

La colata è proseguita verso valle erodendo l'alveo in più punti, dando vita ad allargamenti ed approfondimenti e si è infine riversata nel bacino di deposito alla confluenza con il rio Gatria, contribuendo all'occlusione del filtro della briglia con ingente quantità legname e al riempimento del bacino con circa 15.000 m<sup>3</sup> di sedimento (Figura 17).

I tecnici hanno ipotizzato che ad una prima colata ricca in ghiaia, ne sia succeduta un'altra molto più fangosa con massi ciclopici. La seconda è riconducibile con certezza all'innesco durante la fase di scarico della colata precedente di una frana in destra orografica a circa 200 m a monte dalla confluenza. La sovrapposizione dei due eventi è stata verificata dai tecnici durante i lavori di sgombero condotti nelle settimane successive.

Oltre ai depositi presso la sezione di chiusura si sono verificati altri depositi lungo il tratto superiore e medio del corso d'acqua per un totale stimato in circa 10.000 m<sup>3</sup> per un totale di 25.000 m<sup>3</sup> di sedimento mobilizzato.

Nei pressi di Maso Strimm, si sono verificati gravi danni a sette opere di consolidamento in massi risalenti ai primi anni '50. La strada forestale che porta a Malga del Pastore è stata seriamente danneggiata nel tratto terminale dal fenomeno. L'accesso alla Malga e l'opera di presa alla confluenza con il rio Gadria sono stati ripristinati con Progetto di pronto Intervento (P.I.).

ED30: evento del 12 luglio 2010 rio Gadria:

Il rio Gadria (Tabella 7) ha generato un fenomeno di trasporto di massa che ha mobilizzato circa 20.000 m<sup>3</sup>, che si sono depositati presso il bacino di deposito alla confluenza con il rio Strimo. Alcune colate laterali a quota 1.480 m s.l.m. circa hanno interrotto la Strada Forestale "Gadria" e depositato circa 1.000 m<sup>3</sup>, per un totale di 21000 m<sup>3</sup>. Non si distinguono particolari danni ai manufatti. Il materiale coinvolto, come spesso è accaduto in occasione di passati eventi, è di granulometria sabbioso-ghiaiosa. Si è trattato di una colata relativamente fluida con rara presenza di massi di grosse dimensioni perlopiù incontrati lungo il tragitto. La stima del deposito totale presso la briglia filtrante risulta difficile vista la concomitante colata sul rio Strimo che ha contribuito all'occlusione del filtro con legname (Figura 18, Figura 19).

**Tabella 7: Tabella riassuntiva eventi rio Gadria e rio Strimo (Macconi *et al.*, 2010).**

<i>Data</i>	<i>Tipo evento</i>	<i>Comuni</i>	<i>Corso d'acqua</i>	<i>Danni</i>	<i>Volume totale</i>	<i>Costi di P.I.</i>
12/07/2010	Colata detritica	Lasa	Rio Strimo	Opere; Strade	25.000 m <sup>3</sup>	€10.000
12/07/2010	Colata detritica	Lasa; Silandro	Rio Gadria	Opere; Strade	21000 m <sup>3</sup>	€244.000

Nella seconda parte di questo studio si terrà conto perciò della stima di un volume totale accumulato nella piazza di deposito alla confluenza fra i due bacini di circa 35000 m<sup>3</sup> così ripartiti: 20000 m<sup>3</sup> per il Rio Gadria più 15000m<sup>3</sup> per il Rio Strimo. Da notare come lungo il corso del Rio Gadria si siano verificate colate laterali che hanno contribuito ad alimentare il trasporto solido ed hanno depositato circa 1000m<sup>3</sup> nei tratti di confluenza e nel rio Strimo oltre ai depositi presso la sezione di chiusura si sono verificati altri depositi lungo il tratto superiore e medio del corso d'acqua per un totale stimato in circa 10.000 m<sup>3</sup>.



**Figura 16: Danni alla strada di accesso a Malga Pastore.**



**Figura 17: Immissione ad elevata pendenza del rio Strimo nell'opera di trattenuta. Una porzione di lariceto è stato stroncato e sono visibili gli scortecciamenti agli alberi limitrofi.**



**Figura 18: Briglia filtrante vista da monte in corrispondenza dell'immissione del rio Gabria. Il materiale vegetale è proveniente dal lariceto del rio Strimo.**



**Figura 19: Briglia filtrante vista da valle. Il deposito di materiale è esiguo e interno al canale di smaltimento.**

### 2.3.2 IL SISTEMA DI MONITORAGGIO - PROGETTO MONITOR II

Nell'ambito del progetto europeo MONITOR II le Ripartizioni provinciali Opere idrauliche e Protezione civile in collaborazione con la Libera Università Bolzano e CNR-IRPI di Padova hanno progettato ed installato un sistema di monitoraggio in tempo reale di colate detritiche sui rivi Gadria e Strimo, al confine tra i comuni di Lasa e Silandro (Macconi *et al.*, 2012).

Il sistema è stato allacciato alla rete elettrica ed è dotato di diversi strumenti, tra cui 3 videocamere ad alta risoluzione con sistema di illuminazione notturno, 5 geofoni, 5 idrometri radar, 4 pluviometri, un server per l'acquisizione dei dati e un sistema di trasmissione via radio/internet.

In aprile 2011 il sito di monitoraggio di colata detritica sui bacini Gadria e Strimo è entrato in funzione e sono stati registrati 2 eventi che, seppur di lieve entità, hanno permesso di testare la strumentazione e le videocamere e di definire in maniera ottimale la posizione di alcune stazioni. Nell'evento sul rio Gadria è stato possibile riconoscere 3 pulsazioni distinte e caratterizzate da reologie diverse. I video registrati permettono di comprendere inoltre la dinamica dell'evento ed il comportamento delle opere.

Il sistema è nato con l'intento di rispondere a diverse finalità: la miglior comprensione dei processi fisici, la sperimentazione di nuove strategie sistematorie più sostenibili e lo sviluppo di sistemi di allertamento che riducano il rischio residuo. I dati misurati vengono inoltre utilizzati a scopo di ricerca e sono una fonte di dati continua ed in tempo reale che raramente è possibile realizzare in ambiente per la grande mole di investimento di denaro e persone che un monitoraggio di questa entità richiede.



## I PARTE: VALUTAZIONE DELLE AREE SORGENTI DI SEDIMENTO

L'innescò di un debris flow si verifica quando si combinano oltre una soglia critica tre variabili: sedimento mobilizzabile, versanti acclivi e la disponibilità d'acqua. Le prime due variabili definiscono la suscettibilità di un bacino ad eventi di debris flows, la disponibilità d'acqua invece è la condizione necessaria per innescò.

La magnitudo di un evento è il volume totale di materiale detritico fine e grossolano che può essere trasportato al cono di deiezione nel corso di un singolo evento, indipendentemente dal numero di sorgenti. È necessario non solo per determinare lo spazio necessario per l'immagazzinamento nei bacini di deposito, ma è anche un indice assoluto per la severità dell'evento, che può essere usato per definire altri parametri di progettazione delle opere di difesa (Hungri *et al.*, 1984).

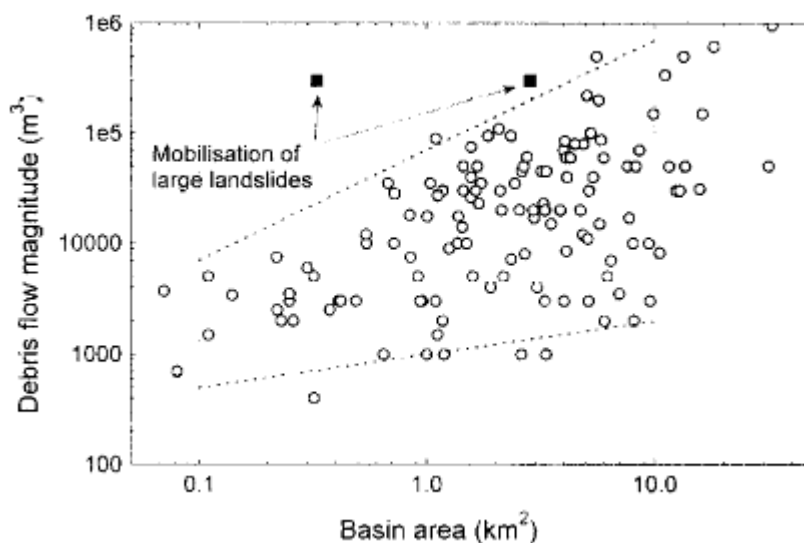
In prima approssimazione la magnitudo di un evento può essere confrontata con dimensione dell'area drenata: il rapporto fra una determinata magnitudo d'evento e l'area di drenaggio del torrente stesso è chiamato "area debris yield rate" ( $\text{m}^3/\text{km}^2$ ). Questo rapporto è simile per bacini con dimensioni differenti ma caratteristiche topografiche, geologiche, climatiche ed idrologiche simili (Hungri *et al.*, 1984).

In Figura 20 è rappresentato lo scatterplot della magnitudo di un debris flow rispetto all'area drenata di un bacino. Questo confronto, con l'individuazione di una linea di involucro superiore e una inferiore, è stato condotto da D'Agostino e Marchi nel 2000 sulla base di dati di eventi verificatisi nelle Alpi italiane orientali. Gli autori individuano un limite superiore che corrisponde approssimativamente a un valore unitario di  $70000 \text{ m}^3/\text{km}^2$  che esprime un valore massimo che può essere atteso nella regione considerata in occasione di un evento meteorico intenso dove vi sia un'abbondante disponibilità di sedimento.

Una particolare attenzione è stata riservata anche a debris flows di magnitudo minore, in quanto non fanno eccezione per pericolosità quando investono linee ferroviarie o stradali. La linea di involucro inferiore è definita da valori di volume minimo osservato che si aggirano spesso attorno ai  $300\text{-}1000 \text{ m}^3$ , l'involucro inferiore è espresso dalla relazione:

$$M = 1000 A^{0.3} \tag{5}$$

Questo volume rappresenta il livello minimo di percezione del pericolo da parte della popolazione e non un limite fisico di dimensione della magnitudo di un debris flow, che può essere anche molto minore.



**Figura 20: Scatterplot della magnitudo di un debris flow rispetto all'area drenata (D'Agostino, Marchi, 2000).**

### 3.1 STIMA DELLA MAGNITUDO

La valutazione del volume complessivo di sedimento mobilizzabile in occasione di un evento idrologico estremo gioca un ruolo fondamentale nella progettazione degli interventi di sistemazione idraulica e nella stima del grado di rischio delle aree soggette ad esondazioni (D'Agostino, 1996), ma il pericolo da debris flow dipende anche dalla tipologia del torrente, ossia dal ruolo che le condizioni di disponibilità di sedimento coprono nel predire l'attività idrologica del torrente (Bovis e Jakob, 1999).

Il pericolo da debris flow non è sempre manifesto, vi sono casi in cui a causa dell'assenza di un deflusso d'acqua costante o di una frequenza del fenomeno molto ridotta, viene a mancare la consapevolezza del pericolo, così come per altri motivi viene a mancare la memoria storica. I dati storici ricoprono un ruolo importante nella validazione di metodi di stima della magnitudo, sia per quelli che forniscono un dato più grezzo ma immediato come i metodi empirici, sia per i metodi geomorfologici o per quelli di analisi della relazione fra magnitudo e frequenza, questi ultimi particolarmente indicati per bacini maggiormente attivi.

I dati storici rappresentano la più attendibile fonte di informazione riguardo agli eventi in un bacino se vengono analizzati, raccolti, elaborati e analizzati con sistematicità e metodo.

Le metodologie di tipo empirico o basate su rilievi condotti in campo sono ancora oggi quelle più utilizzate.

Una formula empirica viene realizzata per una determinata area geografica con l'utilizzo dei dati storici di trasporto solido estremo. Qualora la mole dei dati risulti omogenea per qualità



di rilevamento e consistente per numerosità del campione, vengono ricercate delle correlazioni di tipo empirico fra il volume  $G_s$  ed alcuni elementari parametri morfologici del bacino e del torrente (Kronfellner-Kraus, 1985; Rickenmann e Zimmermann, 1993; Takey, 1984). Ad ogni modo queste relazioni possono fornire solamente un valore massimo o medio della magnitudo potenziale di un evento in quanto la loro variabilità per una dato torrente è molto ampia.

La variabile morfologica che ricorre più frequentemente nelle formule di tipo empirico è la superficie del bacino. Takei (1984), per i debris flow verificatisi in Giappone nel periodo 1972-77 (552 dati), ottiene la relazione:

$$G_s = 13600 A^{0.61} \quad (6)$$

Con  $G_s$  che indica il volume complessivo del trasporto solido di un evento estremo ( $m^3$ ), ed  $A$  che indica la superficie del bacino idrografico ( $km^2$ ).

D'Agostino nel 1996 ha proposto un'equazione semi empirica per la stima della magnitudo di debris flow in Trentino Orientale. La relazione è basata sulla raccolta di dati su eventi di colata fra 62 bacini. L'equazione propone una magnitudo ( $G_s$ ) ( $m^3$ ) utilizzando variabili indipendenti come l'area del bacino ( $A$ ) ( $km^2$ ) e la pendenza media del collettore principale ( $S$ ) ( $m/m$ ) e l'indice geologico (I.G.) (o G.I. Geological Index). L'indice geologico è definito dai tipi litologici che caratterizzano il bacino. Ad ogni classe litologica viene assegnato un punteggio ( $P$ ) come mostrato in Tabella 8 dopo le successive modifiche apportate nel 2001.

**Tabella 8: Classi litologiche e relativi punteggi per la determinazione dell'indice geologico I.G. (D'Agostino, Marchi, 2003).**

<i>Classe litologica</i>	<i>Punteggio (P)</i>
Copertura morenica, alluvionale e di falda	5
Rocce metamorfiche: filladi, gneiss, ecc...	4
Rocce "terrigene": marne, strati del Werfen, ecc...	3
Rocce laviche degradate, tufi basaltici, brecce	2
Rocce calcaree	1
Rocce porfiriche, granitiche, dioritiche	0 (0.5)
Roccia fortemente erosa e fratturata di litologia mista	3-5

Una volta determinata la presenza percentuale di ogni classe rispetto al totale del bacino la si moltiplica per il punteggio di riferimento. La percentuale di copertura espressa con un valore che va da 0 a 1 rappresenta il peso di ogni classe, perciò:

$$I.G. = \sum_i^n f_i P_i \quad (7)$$

La magnitudo di evento viene espressa da D'Agostino e Marchi (2003) come:

$$G_s = 45000 A^{0.9} S^{1.5} G.I. \quad (8)$$

Di notevole interesse è il contributo di Kronfellner-Kraus (1985) che, selezionando gli eventi estremi da un campione di 1420 dati relativi al territorio austriaco, ha estratto la relazione:

$$G_s = k A^i \quad (9)$$

con gli stessi simboli ed unità di misura già introdotti nelle equazioni precedenti e con  $i$  che indica la pendenza media dell'asta torrentizia (%) e il fattore di torrenzialità ( $k$ ) determinato da due parametri regionali e dipendente dall'area morfologico-climatica alla quale il bacino appartiene.

Rickenmann e Zimmermann (1993), analizzando un'ottantina di debris flow verificatisi in Svizzera nell'estate dello stesso anno, hanno proposto una relazione di proporzionalità inversa fra il volume solido per lunghezza unitaria "attiva" ( $G_s / L$ ) e la pendenza media del cono di deiezione ( $S$ ). In particolare, considerando l'involuppo degli eventi di maggior intensità, hanno ottenuto:

$$(G_s / L) = 110 - 250 S \quad (10)$$

con  $G_s / L$  espresso in  $m^3 m^{-1}$  ed  $S$  in %.

### 3.2 STIMA DEL VOLUME DI SEDIMENTO DISPONIBILE

Le formule empiriche portano ad una stima della magnitudo di evento estremo, ma non tengono conto della disponibilità di sedimento e della sua distribuzione. I metodi di stima geomorfica sono caratterizzati da una valutazione attraverso un'indagine di campo delle volumetrie di sedimento disponibile. Si effettua un bilancio in campo dei sedimenti disponibili in un bacino idrografico, valutandone lo stato di ricarica (Bovis e Jakob, 1999) e valutando fra le aree sorgenti quelle idraulicamente connesse alla rete idrografica principale. Un metodo concettualmente molto semplice per la determinazione del volume di sedimento di un evento eccezionale prevede un bilancio del trasporto solido per mezzo di una ricognizione del torrente (Scheuringer, 1988 in D'Agostino, 1996). Si suddivide l'asta in tratti caratterizzati da un valore medio uniforme di volume solido asportabile per lunghezza unitaria per poi determinare il volume complessivo del sedimento potenzialmente convogliabile sulla conoide (D'Agostino, 1996).

Un approccio analogo viene suggerito da Hungr *et al.* (1984) i quali, per un debris flow caratterizzato da una erodibilità uniforme sulla lunghezza (L) del torrente, propongono di determinare la magnitudo ( $G_s$ ) attraverso la relazione:

$$G_s = L B E \quad (12)$$

dove B è la larghezza dell'alveo ed E la profondità media di erosione (ovviamente coincidente in fase previsionale con lo spessore medio dei detriti asportabili). Hungr *et al.* propongono anche cinque classi di apporto detritico unitario atteso per tratti di canale omogenei in funzione della pendenza e del materiale che compone l'alveo, e delle condizioni di stabilità ed erodibilità delle sponde

Un approccio concettualmente molto simile a quello proposto da Hungr *et al.* (1984) è quello proposto da Spreafico *et al.* nel 1999 per i bacini torrentizi della Svizzera, con una minuzia più marcata nel dettaglio di analisi, che somma il contributo areale d'alveo a quello dell'area localizzata in dissesto. Questa procedura propone un rilevamento del volume separatamente per il letto del torrente ( $V_{alveo}$ ) e per le due sponde ( $V_{sponda}$ ) e a parte avviene anche la determinazione di aree sorgenti di sedimento localizzate ( $V_p$ ) che vengono assimilate ad una forma geometrica semplice:

$$V_{alveo} = k * L * B * d \quad (13)$$

$$V_{sponda} = k * L * h * d \quad (14)$$

$$V_p = k \cdot (L \cdot h / 2) \cdot d \quad (15)$$

L che indica la lunghezza del tratto d'alveo omogeneo in metri, b la larghezza dell'alveo (m), h l'altezza erodibile sulla sponda (m) e d la profondità media di erosione (m). La valutazione della connessione e della profondità della frana vanno valutate in campo. Gli scivolamenti profondi sono difficili da prevedere, si trattano infatti frane superficiali, con una profondità massima di 2 metri, più frequentemente compresa fra i 0.5 e i 1 metri. Possono fare eccezione aree instabili generalmente localizzate che sono in grado superare i 2 metri di profondità.

Il fattore di riduzione (k) invece rappresenta un coefficiente di riduzione che va stimato secondo delle indicazioni appositamente tabellate e in media presenta valori compresi fra 0.5 e 0.8.

D'Agostino e Marchi (2003) propongono un metodo di stima geomorfica del volume di sedimento disponibile in un torrente delle Alpi orientali, il torrente Rudan, semplificando lo schema generale del sopracitato metodo di Spreafico *et al.* (1999), trascurando il coefficiente di riduzione k.

Gli autori affermano che una possibile riduzione della disponibilità di sedimento è tenuta in considerazione nel rilievo di campo, quando si imposta la forma geometrica dell'area della sorgente di sedimento e nella stima della profondità di erosione. Solitamente un sopralluogo delle aree sorgenti, adiacenti la rete idrografica o direttamente connesse ad essa, può permettere di recuperare tutte le informazioni richieste per una stima dei volumi mobilizzabili, evitando osservazioni troppo complesse che vengono difficilmente effettuate in terreni impervi. È stato predisposto un semplice modulo per prendere nota dei parametri topografici e provvedere ad una descrizione sintetica delle sorgenti di sedimento indagate in campo, da adoperare sia per le aree sorgenti di sedimento di versante che per l'alveo. Tutte le osservazioni possono essere effettuate utilizzando strumenti molto semplici, come nastri, aste graduate, etc. ma in caso di sorgenti di sedimento situate in versanti privi di un accesso sicuro la stima può essere effettuata visivamente.

L'intrinseca complessità dei fenomeni erosivi nei versanti e in alveo rende difficile basare su un singolo riferimento il valore del sedimento mobilizzabile. Questo interessa in modo particolare la stima della profondità di erosione. Nello studio del torrente Rudan i due autori hanno preso in considerazione un doppio scenario: il *volume erodibile*, in riferimento a eventi severi ma non estremi in cui la profondità di erosione viene stimata valutando le fratture visibili del terreno in sorgenti attive di sedimento e il *sedimento disponibile in caso di evento catastrofico*, che rappresenta una stima approssimata del volume di detrito mobilizzabile in occasione di un evento di debris flow di elevata intensità.

D'Agostino e Marchi valorizzano la flessibilità che caratterizza i metodi di campo geomorfici che consentono una stima della magnitudo del debris flow in accordo con le condizioni locali invece di fare affidamento su calibrazioni di parametri predittivi regionali come fanno le formulazioni empiriche.

Il sopralluogo delle sorgenti di sedimento lungo le ramificazioni della rete idrografica consente di inventariare anche la distribuzione spaziale della disponibilità di sedimento che, assieme al volume, può influenzare la scelta delle misure di controllo del fenomeno ad esempio la scelta fra diversi siti per la costruzione di una briglia di tipo aperto con funzione di trattenuta.

Il limite principale delle tecniche di campo è la loro soggettività, che può influenzare in particolar modo la valutazione della profondità di erosione.

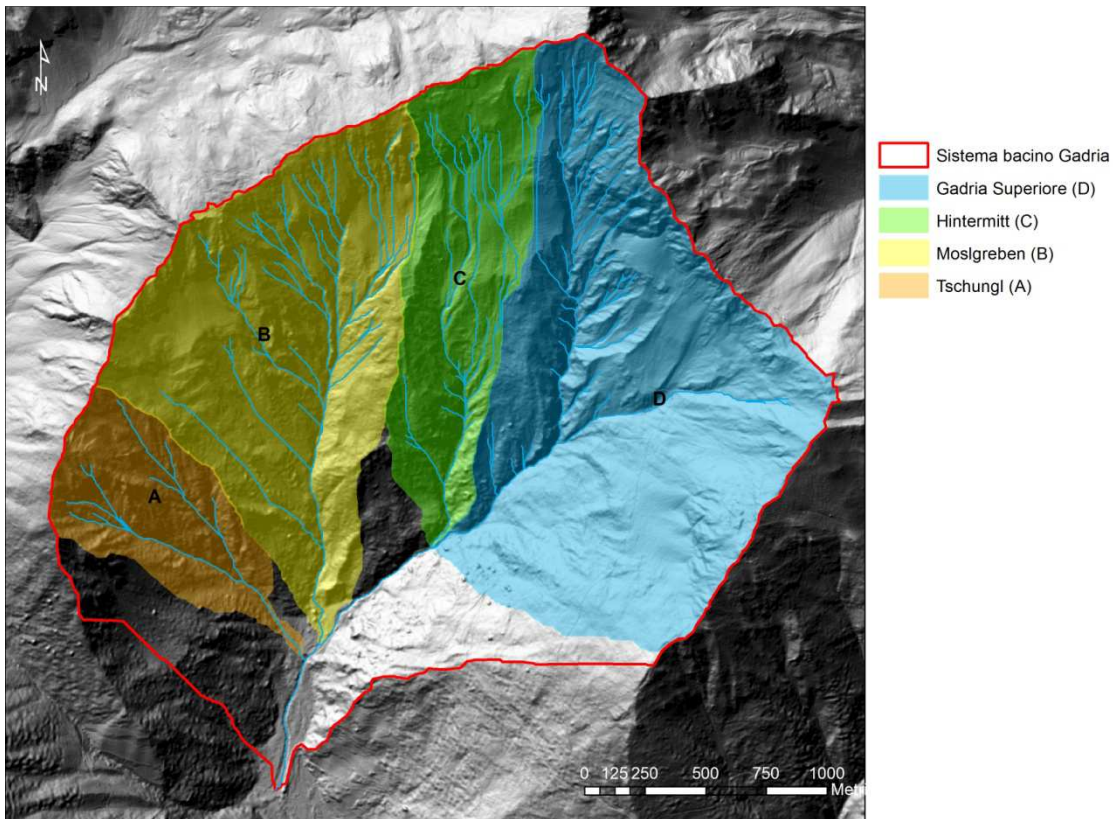
### 3.3 ANALISI PREPARATORIE PER LA STIMA DEI VOLUMI

La valutazione del sedimento disponibile è stata effettuata attraverso un sopralluogo del bacino del Gatria e delle analisi implementate in ambiente GIS. Il bacino del Gatria si presenta composto da quattro sottobacini secondari, ripartizione che è stata sfruttata per strutturare al meglio l'indagine di campo e le analisi successive e per evidenziare quali sono le aree maggiormente attive del bacino.

#### 3.3.1 I SOTTOBACINI DEL GADRIA

Il bacino del Gatria è una componente del sistema bacino idrografico Gatria-Strimm-Allitz. Per analizzare e comprendere i fenomeni gravitativi che interessano il bacino al suo interno sono stati riconosciuti e delimitati 4 sottobacini, che sono chiamati bacino superiore del Gatria (D), Hintermitt (C), Moslgreben (B), and Tschunglgreben (A, Figura 21).

I quattro sottobacini sono stati individuati attraverso l'analisi in ambiente GIS di DTM LiDAR a maglie di 2,5 metri e un'indagine di campo. Quest'ultima è stata necessaria per verificare la corretta direzione di deflusso del reticolo sintetico quando questa non era univocamente interpretabile, in particolar modo allo spartiacque fra il sottobacino Gatria (D) e Hintermitt (C).



**Figura 21: Sottobacini del Gadria.**

Prendendo in considerazione i valori medi dei parametri morfometrici dei sottobacini si osserva come rispetto a quelli del bacino di origine (Tabella 9) questi siano spiccatamente più accentuati, in particolar modo per la pendenza del collettore principale e per l'accentuarsi del valore del numero di Melton che individua la propensione del bacino all'insnesco di colate.

Le prime registrazioni di fenomeni di debris flow in questo bacino risalgono al 1494 e i danni nei centri abitati della conoide (Lasa e Allitz) sono rilevanti, ma si osservano sistemazioni idrauliche lungo il collettore principale e i tributari risalenti solo al 19°secolo (Reich, 2011). Le colate detritiche sono il fenomeno prevalente e più frequente di attività del bacino (1-2 eventi di colata all'anno) e sono rilevanti i costi di manutenzione del sistema di mitigazione realizzato in apice al conoide composto dalla briglia filtrante e bacino di deposito che permettono un volume di invaso massimo di circa 35000 m<sup>3</sup> di sedimento.

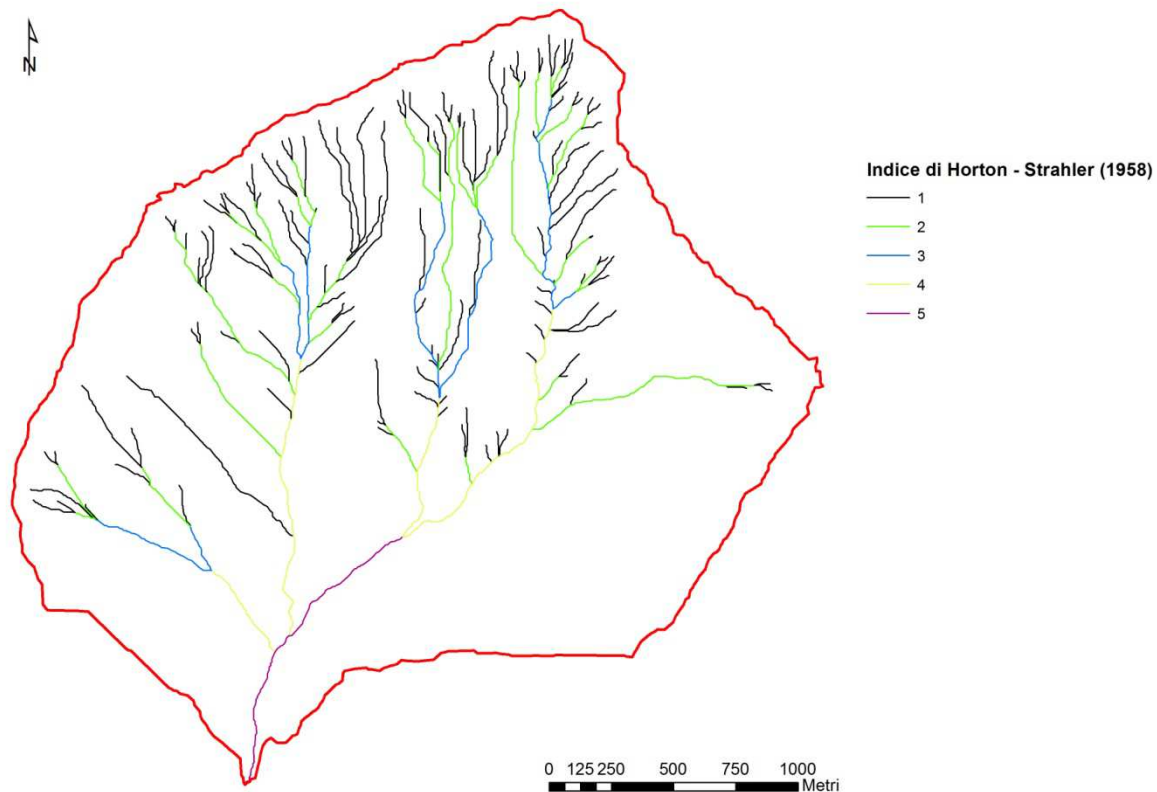
### 3.3.2 IL RETICOLO IDROGRAFICO DEL RIO GADRIA

Una volta individuati i quattro sottobacini è stato estratto il reticolo idrografico sintetico ricorrendo ad una doppia soglia di superficie contribuyente (area threshold), in modo da avere la migliore corrispondenza possibile con il reticolo osservato in campo. Fino a 2000 metri di quota si è mantenuta una soglia di 2 ha in modo da determinare il reticolo di ordine maggiore. Al di sopra dei 1750 m s.l.m. si è poi passati ad una soglia di 0,2 ha necessaria a raggiungere le aree sorgenti sommitali, di primo ordine. La sovrapposizione tra le soglie fra 1750 e 2000 m s.l.m. è stata mantenuta per assicurare la continuità del reticolo. Il reticolo così ottenuto è stato poi corretto manualmente sulla base dei rilievi di campo e le ortofoto eliminando le ridondanze.

L'organizzazione della rete idrografica e quindi il suo grado di gerarchizzazione possono essere espressi mediante parametri quantitativi (Figura 22).

**Tabella 9: Parametri morfometrici dei sottobacini del sistema idrografico Gadria a confronto.**

		<i>Tschunglgreben</i>	<i>Moslgreben</i>	<i>Hintermitt</i>	<i>Gadria</i>	<i>Sistema</i>
		<i>(A)</i>	<i>(B)</i>	<i>(C)</i>	<i>(D)</i>	<i>Gadria</i>
<i>Area planimetrica [km<sup>2</sup>]</i>	A	0.5	1.56	0.81	2.23	6.04
<i>Quota massima [m s.l.m.]</i>	h <sub>max</sub>	2433	2790	2906	2944	2944
<i>Quota minima [m s.l.m.]</i>	h <sub>0</sub>	1479	1495	1627	1623	1393
<i>Quota media [m s.l.m.]</i>	h <sub>m</sub>	2004	2206	2277	2233	2134
<i>Pendenza media [m/m]</i>	i <sub>m</sub>	0.87	0.79	0.73	0.76	0.79
<i>Lunghezza della rete idrografica [m]</i>	L <sub>tot</sub>	3.57	13.87	9.94	11.70	43.09
<i>Lunghezza del collettore principale [km]</i>	L	1.37	2.15	1.98	2.34	3.50
<i>Pendenza media del collettore principale [m/m]</i>	i <sub>cm</sub>	0.63	0.55	0.55	0.49	0.40
<i>Numero di Melton</i>	Me	1.35	1.04	1.42	0.88	0.63
<i>Coeff. di forma di Gravelius</i>	F	1.37	1.32	1.53	1.31	1.5



**Figura 22: Reticolo idrografico sintetico del bacino del Gatria classificato secondo l'indice di Horton Strahler (1958).**

L'ordine delle varie aste che compongono il reticolo fluviale di un bacino si può determinare per mezzo delle regole proposte nel metodo di Horton-Strahler (1958, Tabella 10). Per ogni bacino idrografico esiste una relazione fra il numero dei rami aventi un certo ordine e l'ordine stesso chiamato rapporto di biforcazione ( $R_b$ ): in genere il valore del primo diminuisce all'aumentare del secondo (Tabella 11). L'ordine di Horton Strahler dell'intero sistema Gatria è pari a 5, mentre il rapporto di biforcazione si attesta perlopiù attorno a valori medi (3-5). Per questo indice ( $R_b$ ) valori superiori a 5 rappresentano bacini quasi certamente controllati dalla tettonica.



**Tabella 10: Classificazione del reticolo per sottobacini e relative lunghezze dei segmenti (m).**

<b>Ordine H-S</b>	<b>Tschungl (A)</b>	<b>Moslgreben (B)</b>	<b>Hintermitt (C)</b>	<b>Gadria (D)</b>	<b>Sistema Gadria</b>
1	1730	8603	4920	5798	21057
2	6745	3081	2665	3789	10017
3	733	988	1720	1053	4495
4	438	1203	633	1254	3530
5	0.00	0.00	0.00	0.00	1310
<b>Totale</b>	3575	13875	9938	10550	40410

**Tabella 11: Gerarchizzazione del reticolo idrografico e rapporto di biforcazione Rb dell'intero sistema bacino Gadria.**

<b>Ordine H.-S.</b>	<b>N°</b>	<b>Lunghezza del reticolo [ m ]</b>	<b>Rb</b>
1	131	21057	4,37
2	30	10017	3,75
3	8	4495	2,00
4	4	3529	4,00
5	1	1311	-
<b>Lunghezza tot</b>	40410	<b>Rb medio</b>	3,53

### 3.4 METODO DI STIMA GEOMORFICO IN QUESTO CASO DI STUDIO

Le stime geomorfiche sono state effettuate adottando il metodo di Spreafico *et al.* (1999) e le modifiche proposte da D'Agostino e Marchi (2003) e implementando in questa applicazione una procedura GIS per aumentarne la precisione.

Seguendo le modifiche di D'Agostino e Marchi (2003) le aree sorgenti sono state identificate separatamente dalla stima geomorfica degli alvei (lineare), distinguendo fra la previsione di volumi probabili e massimi potenziali ed incoraggiando precise indagini sul campo al fine di contabilizzare tutte le aree che contribuiscono a fornire sedimento.

Per l'intero sistema bacino Gadria-Strimo-Allitz e relativa conoide sono a disposizione DTM (Digital Terrain Model) e DSM (Digital Surface Model) derivati da rilievo LiDAR (Light Detection and Ranging) da aeromobile effettuato nel periodo 2004-2006 con risoluzione di cella di 2.5 metri. La mappatura delle aree e del reticolo è stata perciò realizzata sulla base sia del sopralluogo con rilievo diretto sia con l'ausilio di mappe della scabrezza alla scala di interesse (da 3x3 a 7x7 celle di maglia 2.5 m), analizzando la differenza DSM-DTM e sulla base delle ortofoto più recenti messe a disposizione (del 2006).

### 3.4.1 STIMA DEL VOLUME DI SEDIMENTO IN CANALE

La stima geomorfica del volume di sedimenti disponibili nel reticolo idrografico è stata effettuata in modo estensivo sui collettori in 3 diverse uscite di campo, pedonando fin dove possibile tutti i segmenti di primo ordine. Per i canali in cui le condizioni di sicurezza non permettevano un sopralluogo diretto la valutazione è stata fatta più vicina possibile al torrente. Data l'estensione del reticolo non è stato possibile analizzare ogni singolo segmento, ma i rilievi di campo ed i sopralluoghi hanno comunque permesso di assegnare un valore approssimativo a ciascun tratto (Figura 23). Solo la stima del sedimento mobilizzabile lungo la rete idrografica dell'intero sistema Gatria, ammonta a 434400 m<sup>3</sup> con un volume unitario per lunghezza di collettore di 11 m<sup>3</sup>/m (Tabella 12). Il sottobacino D è quello che offre il contributo maggiore con un volume di 137700 m<sup>3</sup> e il sottobacino A il contributo minore con 32900 m<sup>3</sup> (Figura 24). Valutando invece la disponibilità di sedimento rispetto alla lunghezza della rete idrografico, il sottobacino C offre un contributo unitario maggiore rispetto a tutti gli altri con 13 m<sup>3</sup>/m di sedimento mobilizzabile per unità di lunghezza di collettore e il sottobacino B quello minore con 8.5 m<sup>3</sup>/m.

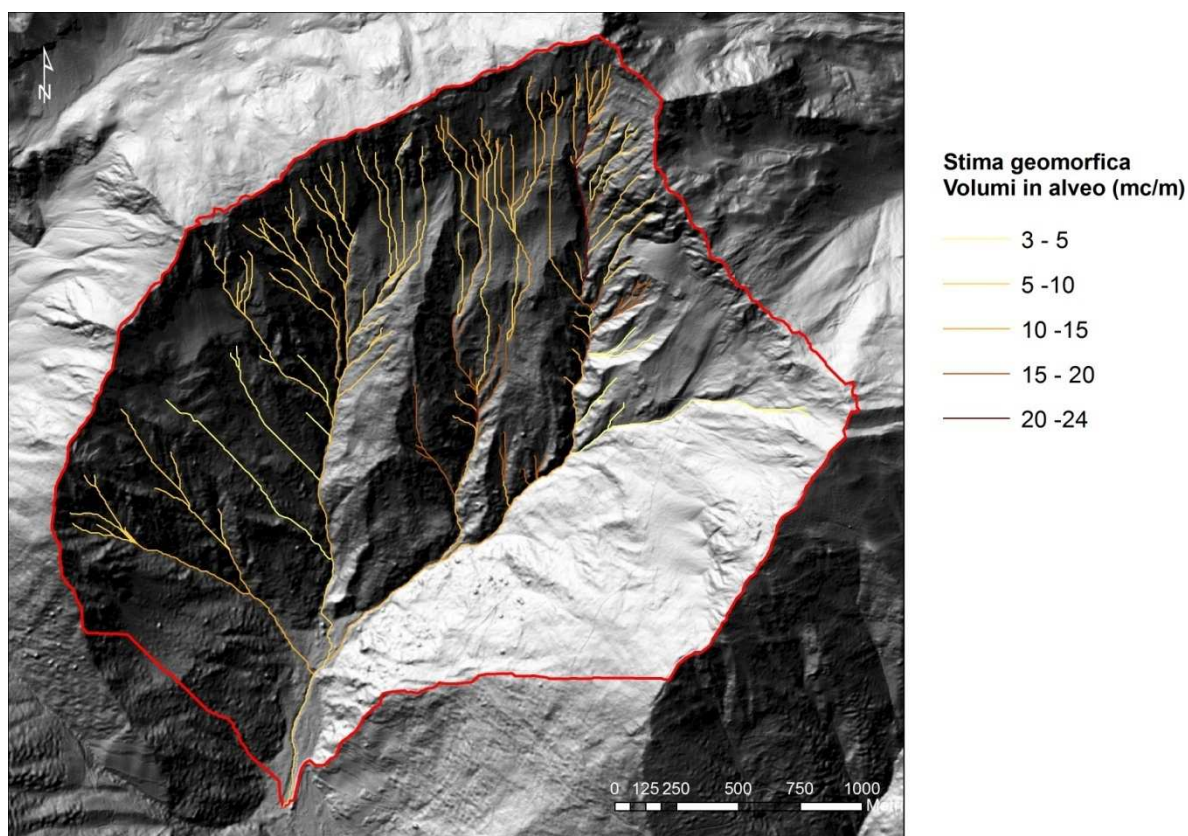
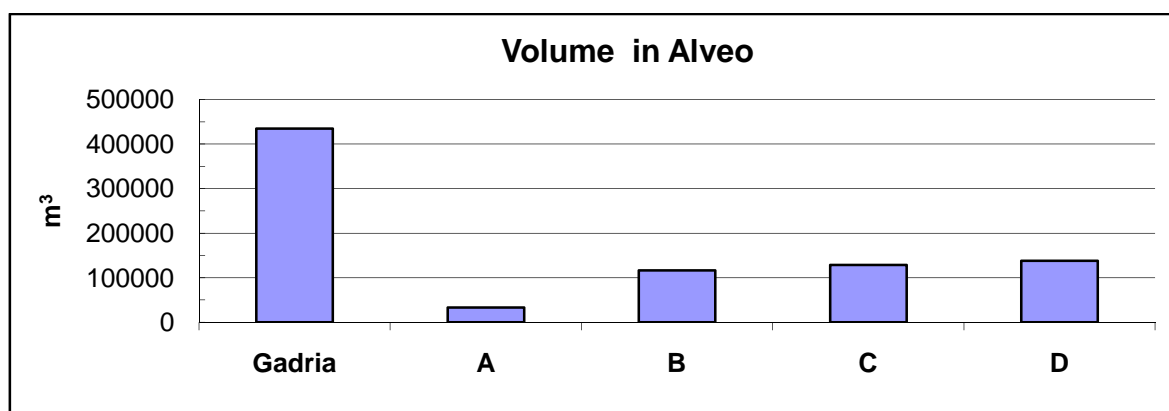


Figura 23: Stima geomorfica dei sedimenti in alveo.

**Tabella 12: Stima geomorfica dei volumi di sedimento (m<sup>3</sup>) secondo l'ordine dell'asta torrentizia e il sottobacino di appartenenza, in basso il volume unitario per unità di lunghezza della parte di rete idrografica appartenete a ciascun sottobacino.**

<b>Ordine asta torrentizia</b>	<b>Tschungl (A)</b>	<b>Moslgreben (B)</b>	<b>Hintermitt (C)</b>	<b>Gadria (D)</b>	<b>Sistema Gadria</b>
1	12100	64700	65700	63400	207000
2	6700	25400	26100	35300	95900
3	8800	13500	27300	21100	70700
4	5300	13100	9500	17900	45800
5	0	0	0	0	14900
<b>Totale [m<sup>3</sup>]</b>	<b>32900</b>	<b>116700</b>	<b>128600</b>	<b>137700</b>	<b>434400</b>
<b>Lunghezza della rete idrografica [km]</b>	3.57	13.87	9.94	11.89	40.41
<b>Channel debris yield rate medio [m<sup>3</sup>/m]</b>	9	8.5	13	11.6	10.7



**Figura 24: Stima dei volumi di sedimento relativi al reticolo dell'intero bacino e ai rami di ogni sottobacino.**

### 3.4.2 ATTIVITÀ DI CAMPO: CENSIMENTO AREE SORGENTI DI SEDIMENTO:

Il rilievo di campo è stato effettuato nell'Agosto del 2010 ed ha permesso di effettuare una prima classificazione delle aree sorgenti di sedimento ai fini della riproduzione modellistica che interesserà la seconda parte di questa tesi.

Gli eventi di colata osservati possiedono una natura mista granulare e fangosa che trova corrispondenza nelle caratteristiche delle aree sorgenti osservate. In base al tipo di materiale

ed alle azioni destabilizzanti agenti sulle aree in dissesto è stata teorizzata una suddivisione in tre classi:

- *Aree sorgenti di versante vallivo*: (od aree sorgenti di collettore) corrispondono alle aree poste alle quote minori, in genere direttamente connesse ai collettori che ne scalzano il piede e sono la principale causa di instabilità. Sono caratterizzate da materiale fine, all'apparenza di origine terrigena o comunque organo minerale (Figura 25). Probabilmente vengono mobilizzate per scalzamento al piede causato da colate granulari provenienti dalla parte alta del bacino, forniscono matrice fine, manifestano la capacità di percorrere anche lunghi tratti a bassa pendenza. In questa categoria ricadono 60 aree sorgenti.
- *Aree sorgenti di terrazzo glaciale*: sono le aree sorgenti mediane, solitamente sopra il limite del bosco e destabilizzate per effetto combinato di piping (collasso per sifonamento), dilavamento del flusso e retrocessione dell'orlo del terrazzo destabilizzato dal brusco cambio di pendenza. Sono caratterizzati da una matrice fine, probabilmente di origine minerale per degradazione, ma con presenza considerevole di materiale anche grossolano (ghiaie, Figura 26). La loro pericolosità risiede in parte nella profondità potenziale di erosione, in parte nel collassamento di interi conci del bordo dei terrazzi anche per spessori superiori ai 10 metri. In questa categoria ricadono 62 aree.
- *Aree sorgenti di cresta sommitale*: sono le aree della parte più alta del bacino, originate da degradazione e crollo della roccia metamorfica della cresta sommitale. Si configurano come ghiaioni con granulometria che comprende ghiaie e massi e con ridotta presenza di matrice fine. La profondità di erosione è molto variabile a seconda della zona del bacino. Si ipotizza che gli eventi più pericolosi e con maggiore magnitudo abbiano origine in queste aree, in particolare da quelle del sottobacino D, e che poi l'eventuale colata vada a caricarsi nelle aree sorgenti poste a quote inferiori (Figura 27). Questa categoria comprende le restanti 93 aree sorgenti.

A questa classificazione si aggiunge una prima valutazione della profondità di erosione d'alveo e del volume delle aree sorgenti localizzate secondo il metodo di Spreafico et al (1999) e le modifiche proposte da D'Agostino e Marchi (2003). Questa valutazione verrà perfezionata in rilievi di campo effettuati successivamente, in particolar modo per le aree sorgenti situate nella parte sommitale del bacino, di non facile accesso.

Ogni analisi effettuata come l'individuazione dei bacini idrografici, la definizione del reticolo idrografico sintetico o la perimetrazione delle aree sorgenti di sedimento nasce dalla continua interposizione reciproca tra analisi in ambiente GIS e uscite di campo.



**Figura 25: Collettore del sottobacino C, una delle aree sorgenti maggiormente sviluppate.**



**Figura 26: Sottobacino D, area sorgente di terrazzo glaciale.**

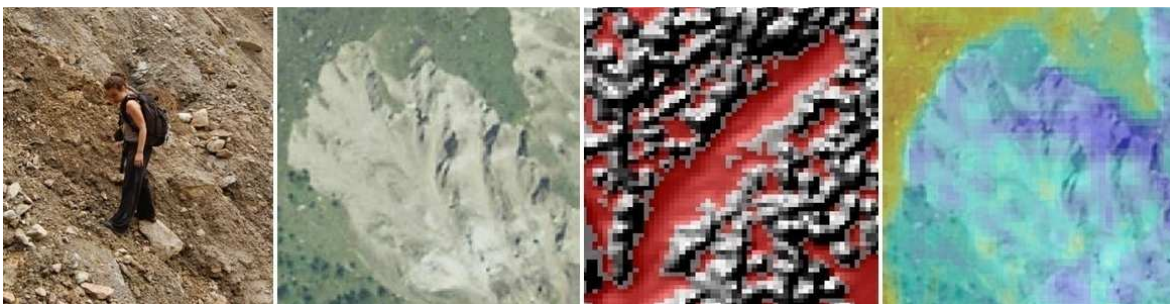


**Figura 27: Sottobacino D, aree di cresta sommitale.**

### *3.4.3 STIMA DEL VOLUME DELLE SORGENTI DI SEDIMENTO LOCALIZZATE*

Il volume delle aree sorgenti di sedimento di versante è stato prevalentemente stimato incrociando stime di campo e elaborazione dei dati LiDAR. L'indagine di campo ha permesso di ottenere un inventario di ogni area sorgente e una stima dell'erosione potenziale effettuata tramite l'osservazione delle forme erosive presenti nelle aree sorgenti.

La precisa estensione delle aree sorgenti in ambiente GIS è stata attribuita disegnando mappe sulla base delle informazioni raccolte durante i rilievi di campo e tre differenti analisi GIS (Figura 28).



**Figura 28 In ordine: Sopralluogo in campo; Analisi GIS: ortofoto; differenza fra DSM e DTM; indice di rugosità.**

Sono state incrociate le informazioni derivanti dal censimento in campo delle aree sorgenti, dall'interpretazione delle foto aeree del 2006, dall'utilizzo della differenza fra DSM e DTM e da mappe di rugosità delle superfici. La differenza tra DSM e DTM, è uno strumento molto importante per la definizione delle aree in zone in ombra nelle ortofoto e poste a basse altitudini, dove la vegetazione arbustiva ed arborea identifica solitamente le zone stabili (Nishiguchi *et al.*, 2011).

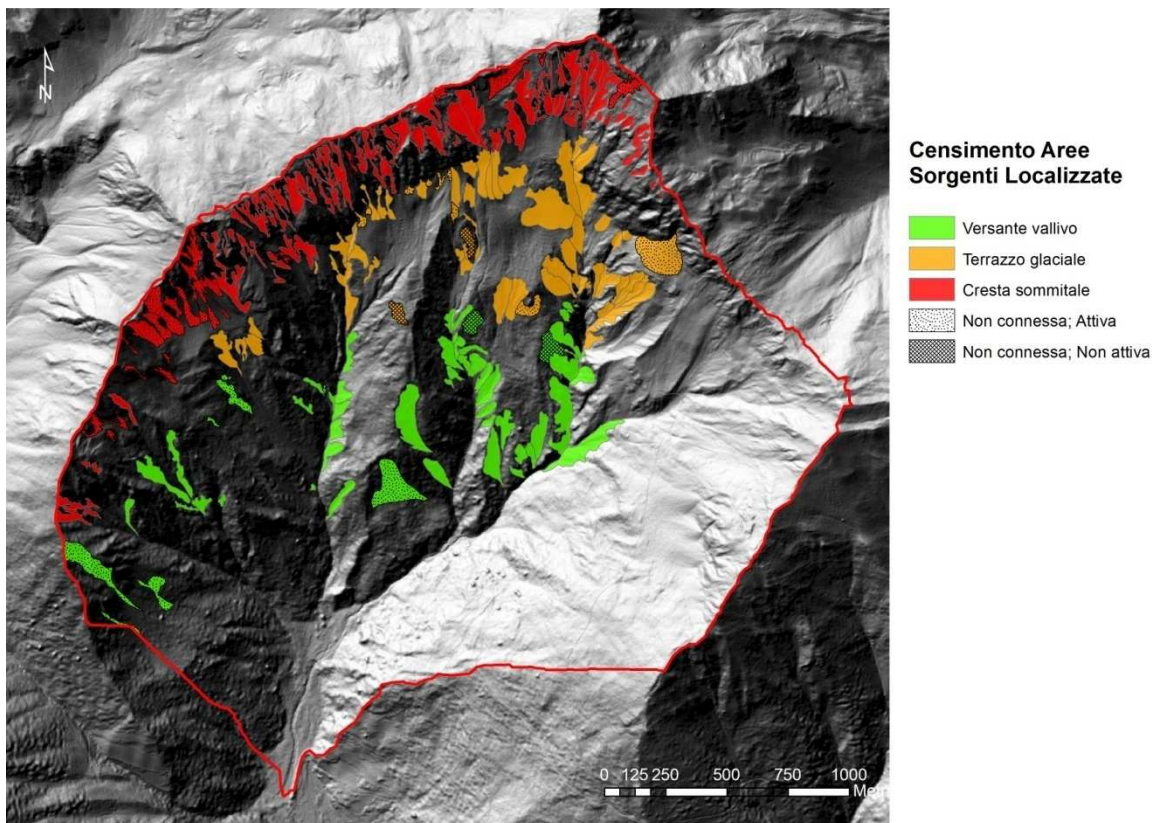
L'indice di rugosità di superficie (roughness index;  $\sigma$ ) è un valido strumento per investigare e classificare le unità morfologiche (Cavalli *et al.*, 2008), e si basa sulla deviazione standard di ogni cella dalla media delle celle di un kernel che può essere scelto di dimensioni variabili:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}{n}} \quad (16)$$

Dove  $n$  rappresenta il numero totale delle celle da processare all'interno del kernel scelto,  $x_i$  il valore della cella in esame al suo interno e  $x_m$  la media dei valori delle celle del kernel.

Tarolli *et al.* (2012) mostrano come la dimensione più corretta del kernel sia quella che si pone alle stesse dimensioni della forma (feature) da studiare. In questo studio sono stati valutati kernel da 3, 5 e 7 celle ed è stato scelto per l'analisi quello intermedio (5 celle), in quanto più adatto a rappresentare le aree sorgenti individuate.

Tutti gli stati informativi sopra descritti sono stati utilizzati a seconda delle necessità richieste dalle zone investigate con l'utilizzo di sovrapposizioni, riclassificazioni e trasparenze fino al raggiungimento del risultato finale come mostrato in Figura 29.



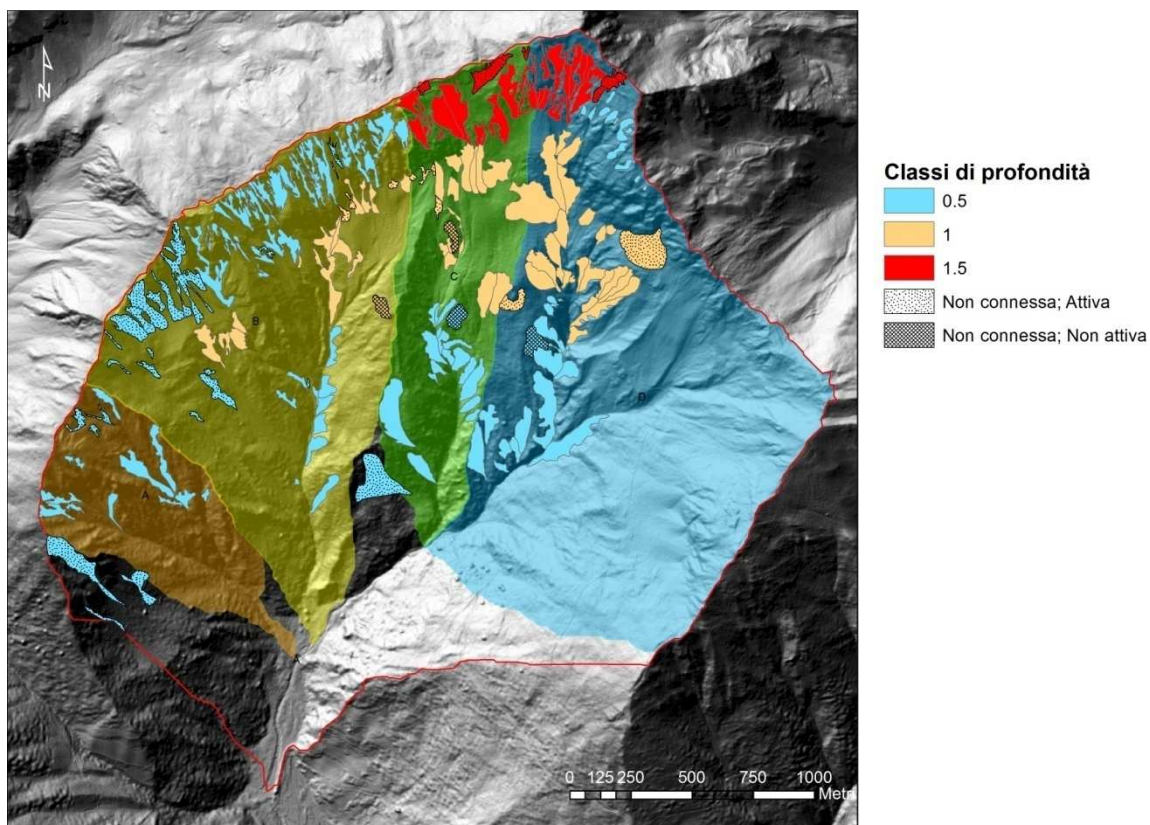
**Figura 29: Perimetrazione delle aree sorgenti localizzate, distinguendo fra vallive, terrazzo glaciale e cresta sommitale. Sono inoltre evidenziate le aree attive non connesse e quelle non attive e non connesse, come evinto dai sapralluoghi effettuati in campo.**

I rilievi di campo hanno permesso anche un stima approssimativa della profondità di erosione potenziale nelle aree sorgenti. E' stata scelta quale grandezza significativa la profondità dei solchi di erosione all'interno delle aree stesse. Nell'impossibilità di svolgere questa indagine in tutte le aree, sia per motivi di tempo che di sicurezza dei rilevatori, si sono considerati valori medi per gruppi di aree omogenee (Figura 30). Nello specifico:

- alle aree considerate vallive è stata assegnata una profondità media di erosione potenziale di 0.5 metri, così come alle aree di cresta sommitale dei sottobacini A e B e a quelle di cresta sommitale del versante sinistro del sottobacino D;
- alle aree considerate di terrazzo glaciale è stata assegnata una profondità media di erosione potenziale di 1 metro;
- alle aree considerate di cresta sommitale della parte centrale del bacino è stata assegnata una profondità media di erosione potenziale di 1.5 metri.

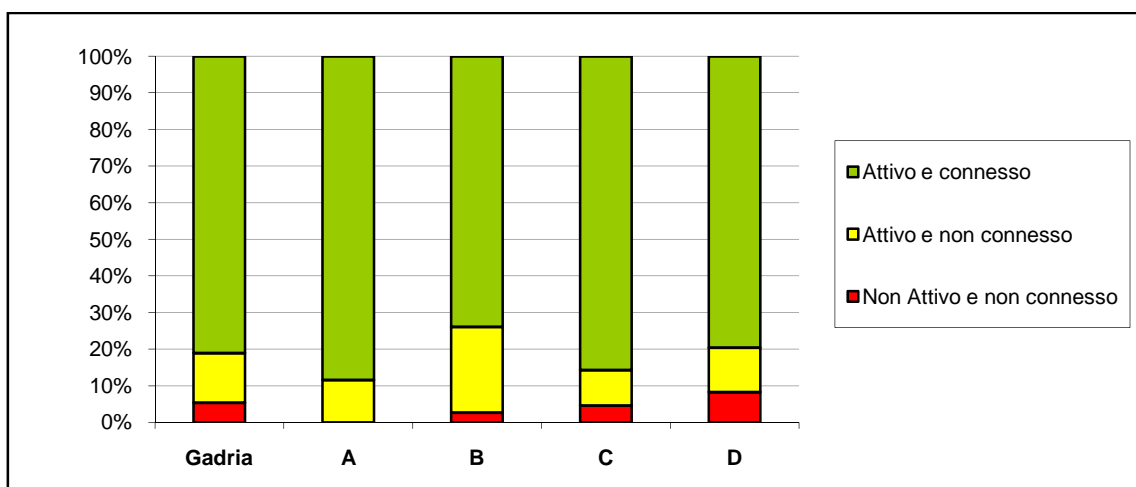
I volumi sono stati classificati secondo il tipo di attività, come frane attive o non attive e secondo la loro connessione al reticolo idrografico, come connesse o non connesse. Il volume totale comprende perciò sia le aree attive e connesse che le aree attive non connesse, quelle non attive e non connesse (Figura 31).





**Figura 30: Classi di profondità attribuite alle aree sorgenti di versate. Le aree più profondamente incise si trovano nella parte più a nord del bacino, evidenziate in rosso e sono interne ai sottobacini C e D.**

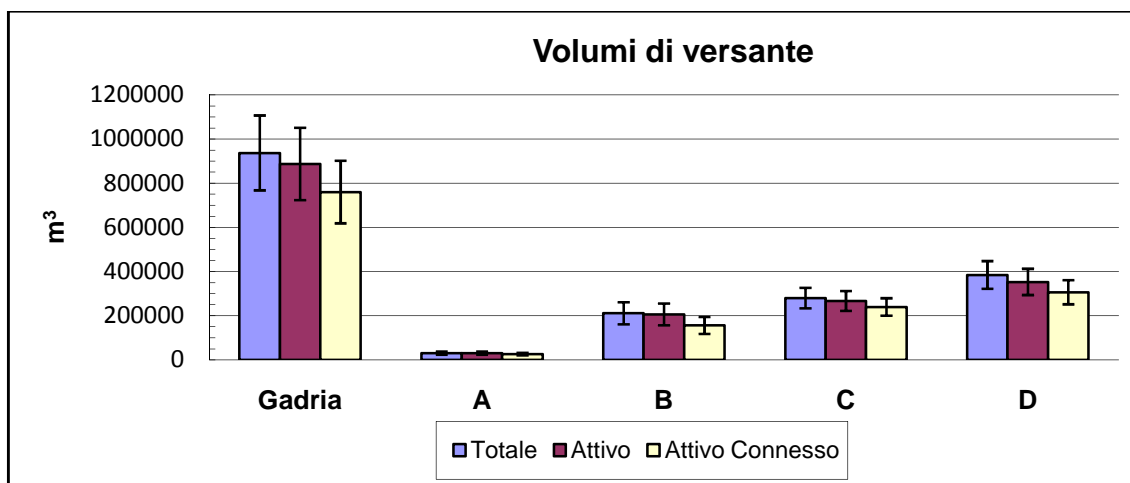
L'estensione inclinata delle aree sorgenti è stata calcolata utilizzando la pendenza media locale desunta con il DTM Lidar con maglia di 2,5 m. Su questa base dati è stato calcolato un errore oggettivo di stima dei volumi considerando come fonte di errore un'imprecisione del contorno pari a +/- una cella lungo il perimetro dell'area mappata (Tabella 13, Figura 32).



**Figura 31: Contributo delle tre tipologie di aree sorgenti di sedimento di versante individuate e sul totale del campione.**

**Tabella 13: Stima dei volume di versante e dell'errore relativo per ogni sottobacino e per il sistema Gatria nel suo complesso.**

<b>Volumi [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Tschungl (A)</b>	<b>Moslgreben (B)</b>	<b>Hintermitt (C)</b>	<b>Gatria (D)</b>	<b>Sistema Gatria</b>
<b>Totale</b>	30100	211200	279700	384500	936600
<i>Errore volume totale</i>	6900	50120	46360	62690	169500
<b>Attivo</b>	30100	205600	266760	352850	886300
<i>Errore volume attivo</i>	6930	49400	44670	59380	163700
<b>Attivo connesso</b>	26600	156100	239700	305980	759400
<i>Errore volume attivo e connesso</i>	5690	38520	39200	54680	141470



**Figura 32: Rappresentazione grafica dei volumi Totale, Attivo, Attivo e Connesso con il relativo errore calcolato.**

#### 3.4.4 STIMA DEL VOLUME DELLE SORGENTI DI SEDIMENTO TOTALI

Le aree sorgenti di sedimento totali sono il risultato della somma delle aree di versante e di alveo. È possibile giungere a due risultati, il primo dato dalla somma del sedimento totale del bacino, perciò anche delle aree di frana non attive o non connesse con i volumi d'alveo e il secondo è invece dato dalla somma dei volumi delle sole aree attive e connesse con il volume disponibile in alveo (Tabella 14).

Il bacino del Gadria si configura, sia per l'elevatissima numerosità di aree sorgenti censite che per l'elevato apporto di sedimento un bacino classificabile come "transport limited" (Jakob, 2005), oppure ad alimentazione solida illimitata. Il limite nell'innescare debris flows è dato dalla soglia di precipitazione, non dallo stato di ricarica in sedimento del bacino. L'analisi idrologica e di magnitudo-frequenza per questo bacino, complessa per la scarsa qualità dei dati pluviometrici a disposizione, non è tra gli obiettivi di questa tesi.

Di seguito sono proposti i risultati di alcune delle formule empiriche per la stima di un volume di sedimento mobilizzabile in caso di evento eccezionale discusse in precedenza (Tabella 15). La formula proposta da D'Agostino e Marchi nel 2003, equazione (8), è stata applicata con un indice geologico pari a 5 come concesso per roccia molto erosa e fratturata di litologia mista e restituisce una stima di 258600 m<sup>3</sup> in caso di evento. L'applicazione della dell'equazione di Kronfellner - Kraus (1984) stima 353700 m<sup>3</sup> di e sedimento e il limite si alza a 422800 m<sup>3</sup> di volume in caso di evento catastrofico con l'utilizzo della formula di D'Agostino e Marchi (2001). Queste ultime due formule restituiscono i valori maggiori ma rispetto al volume totale di aree sorgenti di sedimento attive e connesse (1193800 m<sup>3</sup>) è evidente che anche in caso di evento di grosse dimensioni questa quantità non verrà ad esaurirsi. In caso di evento catastrofico si potranno perciò, secondo le formule empiriche, mobilizzare fra i 250000 m<sup>3</sup> e i 400000 m<sup>3</sup> di sedimento ma resterà sempre sedimento a sufficienza per l'innescare di debris flow nel caso di un nuovo evento meteorico che lo consente.

**Tabella 14: Stime geomorfiche in metri cubi per le aree sorgenti di versante, totali e attive-connesse e con relativo errore e i volumi in alveo. Totale geomorfico in m<sup>3</sup> per due diverse sommatorie al volume d'alveo, la prima con il volume totale di versante, la seconda con il volume attivo e connesso.**

	<b>Volumi di versante [m<sup>3</sup>]</b>				<b>Volumi</b>	<b>Volumi Versante +</b>	
					<b>alveo [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Alveo [m<sup>3</sup>]</b>	
	<i>Errore</i>	<i>Attivo</i>	<i>Errore</i>	<i>Attivo</i>		<i>Totale</i>	<i>+ Att. e Conn.</i>
	<i>Totale</i>	<i>Totale</i>	<i>Connesso</i>	<i>Connesso</i>		<i>Alveo</i>	<i>+ Alveo</i>
<b>Gadria</b>	936600	169500	759500	141500	434400	1371000	1193800
<b>A</b>	30100	6900	26600	5700	32900	63000	59500
<b>B</b>	21120	50100	156100	38500	116700	328000	272900
<b>C</b>	279700	46400	239693	39200	128600	408300	368300
<b>D</b>	384500	62700	306000	54700	137700	522300	443700

**Tabella 15: Valori di stima di evento estremo con formule empiriche di differenti autori e l'equazione di riferimento (n). I dati sono in metri cubi. I.G. :indice geologico utilizzato nella formula. I valori della stima geomorfica sono quelli di volume d'alveo più sorgenti di versante attive e connesse.**

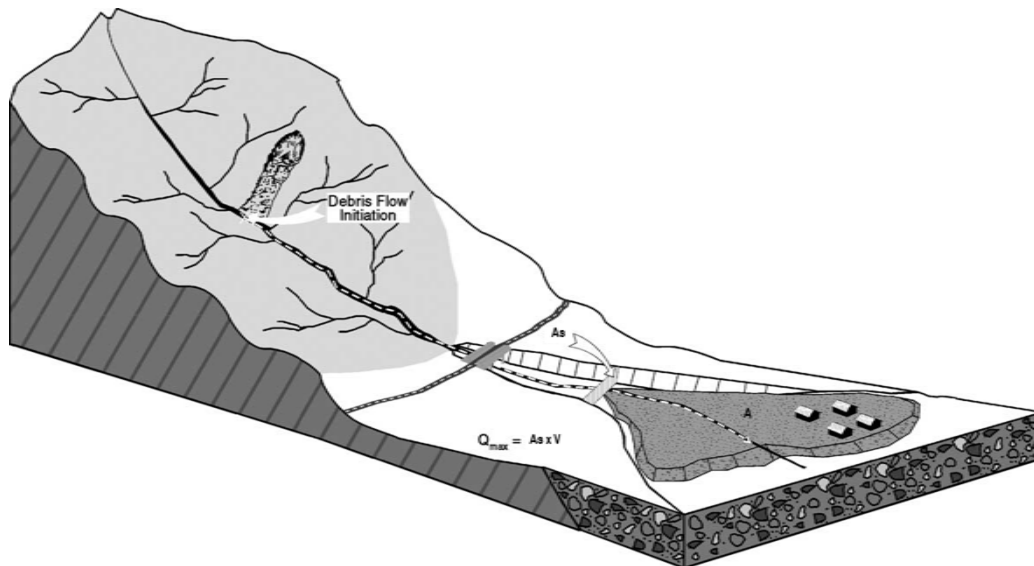
<b>Volumi [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Sistema</b>	<b>Tschungl</b>	<b>Moslgreben</b>	<b>Hintermitt</b>	<b>Gadria</b>
	<b>Gadria</b>	<b>(A)</b>	<b>(B)</b>	<b>(C)</b>	<b>(D)</b>
<b>Stima geomorfica</b>	1193800	59500	272900	368300	443700
<b>Formule empiriche</b>					
<i>Marchi e D'Agostino 2003</i> <i>(I.G.=5) (8)</i>	258600	60400	129200	76700	161600
<i>Kronfellner - Kraus (1984) (11)</i>	353700	54800	140300	77200	186000
<i>Inviluppo superiore Marchi e</i> <i>D'Agostino 2001</i>	422800	35100	108900	56500	156500

## II PARTE: VALUTAZIONE DELLE PROBLEMATICHE CONNESSE ALL'UTILIZZO DI MODELLI 2D

L'utilizzo del solo volume di evento per la descrizione della magnitudo di un debris flow è insufficiente per permettere l'applicazione di modelli bidimensionali ad idrogramma completo. Per questi studi è importante determinare anche la portata al picco ( $Q_p$ ), e l'area che può verosimilmente venire inondata dalla colata (Jakob, 2005) che può essere riassunta/schematizzata dalla larghezza di dispersione e dalla distanza di arresto (runout distance). Il volume del debris flow influenza sia la distanza di arresto che la larghezza di dispersione e spesso è un parametro che viene richiesto nei modelli idrologici esistenti (Hung, 1995). La Figura 33 rappresenta uno schema concettuale utile a comprendere anche le modalità di implementazione dei modelli di propagazione. È presente una zona di innesco di versante, un canale di propagazione del flusso, una sezione critica e l'area di deposito. L'avulsione dal canale di scorrimento della colata avviene quando la sezione del collettore ( $A_s$ ) è ridotta rispetto alle necessità della portata in transito, quando la pendenza è troppo ridotta e nel caso in cui la sopraelevazione in curva superi il colmo arginale del canale. Il volume di un debris flow è inteso solitamente come il volume totale di sedimento trasportato e/o depositato oltre un punto di interesse (tipicamente oltre l'apice del cono di deiezione del torrente stesso). Nel caso di studio in questione all'apice della conoide, dove confluiscono entrambi i bacini (Strimo e Gadria), sono presenti un bacino di deposito e una briglia filtrante. I volumi depositati vengono registrati nei report ED30 della provincia.

Anche la portata di deflusso è richiesta come parametro di input per modelli che richiedono un idrogramma come variabile di input (O'Brien, 2001). Lungo l'asta principale del torrente Strimo e lungo i collettori secondari e principale del Gadria sono stati effettuati numerosi rilievi topografici, sia del profilo longitudinale che trasversale per descrivere indirettamente i valori di portata al colmo transitati.

In letteratura sono a disposizione numerose formule empiriche per la determinazione della portata. Queste formule offrono un range di possibilità minima e massima di portata al picco, perché estratte sulla base di eventi di colata dalle caratteristiche reologiche molto diverse da colate detritiche granulari a colate prettamente fangose.



**Figura 33: Schema concettuale della dinamica di alluvionamento di un'area di conoide (da Jakob, 2005).**

#### 4.1 LA MODELLAZIONE

Vi sono numerosi metodi che permettono la di stimare la distanza di arresto e di descrivere il comportamento di un flusso. Il questo caso di studio c'è la necessita di gestire inneschi multipli, perché verrà preso in considerazione il volume risultante dall'evento che ha interessato entrambi i bacini il 12 luglio 2010.

Le relazioni empiriche sono spesso utilizzate per la stima della distanza di arresto massima e si basano sulla relazione fra questa e l'angolo di deposito raggiunto, il volume del debris-gramma, il dislivello etc. Ma è importante che queste formule si basino su una raccolta di dati consistente per riflettere in modo adeguato le caratteristiche della regione dove i dati sono stati raccolti (D'Agostino e Marchi, 2003). Il maggiore vantaggio offerto da queste formule è la semplicità di applicazione, ma è un vantaggio che va ben ponderato valutando al meglio l'origine della formula e confrontando il dato ottenuto con altri tipi di stima.

I modelli idraulici rappresentano uno strumento fisico-matematico di fondamentale importanza per la definizione delle modalità di propagazione delle onde di piena all'interno degli alvei fluviali e degli effetti delle esondazioni sul territorio. Fra le tipologie più diffuse possono essere distinti i modelli mono e bi-dimensionali.

I modelli idraulici monodimensionali sono largamente diffusi nelle pratiche applicazioni di propagazione delle onde di piena in alvei di semplice conformazione e particolarmente negli alvei di tipo confinato. Questi modelli vanno a verificare che la portata di input transiti o meno all'interno delle sezioni successive con cui il canale è stato discretizzato.

I modelli idraulici bidimensionali rispondono efficacemente al problema della propagazione di onde di piena su piana alluvionale in alvei complessi caratterizzati da notevoli variazioni topografiche. Sono naturalmente più articolati di quelli monodimensionali in quanto richiedono maggiori informazioni di tipo topografico, idraulico e geomorfologico del territorio e un maggior investimento in risorse hardware e software, ma, se correttamente utilizzati, rispondono in modo più coerente con la realtà fisica. Questi modelli sono utili per la predisposizione dei piani di assetto idrogeologico del territorio (PAI) in quanto consentono di delimitare con precisione le aree esposte al pericolo di alluvione per eventi di piena eccezionali.

Un buon risultato può essere ottenuto con i modelli numerici bidimensionali dopo aver scelto i necessari parametri chiave richiesti in funzione della tipologia del flusso e delle sue interazioni con il terreno. In alcuni modelli la scelta del tipo di modellazione e dei relativi parametri chiave può risultare molto ampia e talvolta soggettiva.

In questa tesi verranno confrontati i risultati di due modelli bidimensionali di utilizzo diffuso fra chi si occupa di dissesto idrogeologico e ne verrà valutata analiticamente l'efficienza.

La modellazione matematica della back analysis dell'evento reale di colata oggetto di studio è stata condotta utilizzando due diversi modelli numerici bidimensionali (FLO-2D e RAMMS) che sono basati su schemi fisici diversi. L'evento considerato è quello del 12 luglio 2010, in cui vengono ad innescarsi debris flow in entrambi i bacini con un intervallo (time-lag) di 10 minuti fra il bacino dello Strimo e quello del Gadria (vedi 2.3.1). La mobilitazione è di circa 35000 m<sup>3</sup> di sedimento totale che giunge e colmare il bacino di deposito posizionato dove i due torrenti si congiungono. Il contributo in volume di ogni bacino alla piazza di deposito è, secondo i dati dei report ED30, di 15000 m<sup>3</sup> di sedimento e detrito legnoso (che ostruisce il filtro della briglia) per lo Strimo ai quali si aggiungono i 20000 m<sup>3</sup> provenienti dal Gadria.

#### *4.1.1 FLO-2D*

Il modello *FLO-2D* (O'Brien *et al.*, 1993) è un modello idraulico bidimensionale che impostando un idrogramma di piena restituisce un'area di inondazione, una velocità e uno spessore di flusso d'acqua e/o dei detriti per ogni cella della topografia assegnatagli.

Il modello *FLO-2D* permette l'inserimento dei parametri chiave attraverso la compilazione interfacce user friendly o di file di testo che originano dei file ".DAT" (file testo modificabili anche direttamente dall'utente attraverso un semplice editor di testo) e l'utilizzo di "sottoprogrammi" accessibili dal menu principale.

Gli elementi fondamentali della "floodplain" o piana di inondazione sono attribuiti utilizzando il sottoprogramma Grid Developer System (GDS). Con questo programma viene preparato il

“grid system” in cui vengono inserite la quota e la scabrezza ( $n$  di Manning) delle celle che compongono la floodplain. Questi dati vengono memorizzati all’interno del file FPLAIN.DAT. Un numero progressivo identifica ogni cella e le coordinate spaziali di ciascun elemento della griglia sono contenute all’interno del file CADPTS.DAT.

Inoltre vanno impostati in input i file:

CONT.DAT: rappresenta il file di controllo di tutto il processo di simulazione. Il processo fisico che si intende simulare, la presenza o l’assenza di elementi come la geometria del canale, le strade, gli argini e gli edifici, la durata della simulazione e gli intervalli al termine dei quali registrare un output vanno indicate all’interno di questo file.

TOLER.DAT: viene stabilito se la simulazione deve avvenire utilizzando l’equazione d’onda diffusiva oppure l’onda dinamica completa (O’Brien, 2003). Con questo file si stabilisce anche il parametro chiamato *surface detention* (è il tirante oltre il quale la cella inizia a trasferire la massa alle otto celle adiacenti).

INFLOW.DAT: è la scheda nella quale viene introdotto l’idrogramma della portata liquida, suddiviso per il numero di celle di ingresso, nel caso siano più di una.

OUTFLOW.DAT: è la scheda nella quale vengono indicati i numeri delle celle della griglia di calcolo dalle quali può fuoriuscire il flusso.

SED.DAT: è la scheda nella quale vengono impostati i parametri reologici che descrivono il comportamento della colata detritica. Si possono ricavare da indagini di laboratorio o da valori tabellari

È possibile inserire elementi come case o altre ostruzioni del flusso attraverso il fattore di riduzione dell’area (ARF, Area Reduction Factor) e il fattore di riduzione delle larghezze (WRF, Width Reduction Factor) che sono coefficienti che modificano la capacità di invaso delle singole celle, oppure la presenza di strade che interferiscono con il flusso (STREET.DAT), argini (LEVEE.DAT), canalizzazioni (CHAN.DAT), sezioni trasversali etc. e altri fenomeni fisici come infiltrazione ed evapotraspirazione.

FLO-2D utilizza un modello per predire gli sforzi viscosi in funzione della concentrazione del sedimento. Al variare della concentrazione di sedimento, per un dato elemento della griglia, vengono simulati effetti di diluizione, cessazione della colata di fango e l’eventuale rimobilizzazione del deposito. Le colate sono dominate da sollecitazioni viscosi e dispersive e manifestano comportamento reologico differente rispetto a flussi con semplice trasporto di sedimento al fondo e sospensione (che vengono considerati fluidi Newtoniani).

La propagazione e il comportamento reologico dalla colata vengono trattati come un continuum di acqua e sedimento mescolati con caratteristiche omogenee (modello monofasico). I debris flows richiedono l’interazione di processi complessi tra fluido e sedimento perché le parti che lo compongono interagiscono con urti e frizioni, mentre la



coesione dei sedimenti fini controlla il comportamento non Newtoniano della matrice del fluido. Questa coesione richiede il superamento di uno sforzo di taglio minimo, lo sforzo  $\tau_y$ , che deve essere superato per avviare la deformazione del fluido. Combinando le componenti di sforzo tangenziale e viscosità, viene stabilito, per le colate di tipo detritico il noto modello plastico di Bingham. Lo sforzo tangenziale in flussi come colate detritiche o colate di fango può essere calcolato in funzione del gradiente di velocità. La viscosità e lo sforzo prodotto vengono rappresentati in funzione della concentrazione di sedimento  $C_{s-v}$ .

L'equazione costitutiva adottata nel modello è quella del modello reologico quadratico (O'Brien *et al.*, 1993) da cui si ricava la seguente equazione per il calcolo della pendenza di dissipazione energetica:

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m h_f} + \frac{K \mu_N}{8 \gamma_m} \frac{u}{h_f^2} + \frac{n_{td}^2 u^2}{h_f^{4/3}} \quad (17)$$

dove  $\tau_y$  è lo sforzo tangenziale richiesto per la sua deformazione iniziale ('yield stress'),  $\gamma_m$  è il peso specifico della colata detritica,  $h_f$  è l'altezza del flusso,  $K$  è il parametro di resistenza per flussi laminari,  $\mu_N$  è la viscosità newtoniana apparente,  $u$  è la velocità del flusso ed  $n_{td}$  è il coefficiente di scabrezza turbolento dispersiva.  $\mu_N$  e  $\tau_y$  sono calcolati in funzione della concentrazione volumetrica ( $C_{s-v}$ , O'Brien and Julien, 1988) tramite le due relazioni:

$$\tau_y = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \quad (18)$$

$$\mu_N = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \quad (19)$$

dove  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  sono parametri di calibrazione desumibili da test di laboratorio. I parametri di input principali sono quindi il debris-gramma, la concentrazione volumetrica della colata detritica e, con i quattro coefficienti delle eq. (18) e (19), lo 'yields stress' e la viscosità.

Tali parametri vanno inseriti in FLO-2D nel file SED.DAT dopo averlo attivato spuntando la voce Mud/Debris nel CONT.DAT. La concentrazione volumetrica del sedimento, invece, viene assegnata agli idrogrammi entranti (uno per cella in caso di inneschi multipli) nel file INFLOW.DAT.

La variazione di volume della colata per ogni elemento della griglia e per ogni intervallo temporale di calcolo viene calcolata rispettando le leggi di conservazione della massa e della quantità di moto. Alla fine della simulazione il programma riporta la quantità di acqua e di

sedimento rimossa dall'area in esame (outflow) e la quantità e la localizzazione dell'acqua e del sedimento rimasto sul conoide o nel canale (storage).

#### 4.1.2 RAMMS

Il modello RAMMS (Rapid Mass MovementS) è un software sviluppato dall'Istituto Federale per lo Studio della Neve e delle Valanghe (SLF) di Davos (Svizzera) basato su una serie di esperimenti estensivi con flussi di neve e sull'osservazione a scala reale di valanghe nel sito sperimentale in Vallee de la Sionne in Svizzera (Christen *et al.*, 2010). Inizialmente il programma era stato sviluppato per la simulazione delle sole valanghe. Successivi studi, esperimenti di campo ed osservazioni hanno permesso di adattare RAMMS anche alla simulazione di debris flow e rock avalanche. L'utilizzo di RAMMS riguardo la simulazione di debris flow al momento è stato sottoposto a verifiche in vari studi (D'Agostino e Cesca, 2006; McArdell *et al.*, 2007; Christen *et al.*, 2012). Per la modellazione di colate detritiche, RAMMS utilizza un approccio monofasico basato sul modello di Voellmy (1955). Questo è un modello continuo, idraulicamente basato, che divide la resistenza al flusso della massa in movimento in un coefficiente di attrito cinematico di tipo Coulombiano ( $\mu$ ) e uno di tipo turbolento ( $\xi$ ,  $m/s^2$ ) che varia in base al quadrato della velocità della massa. Il flusso perciò si muove come una massa ('plug') con velocità costante lungo la profondità ( $h$ ); in cui la pendenza di dissipazione energetica ( $S_f$ ) viene calcolata mediante la formula:

$$S_f = \mu \cos \varphi + \frac{u^2}{\xi h} \quad (20)$$

dove  $\varphi$  è l'angolo di attrito del materiale e la resistenza al moto viene determinata dall'attrito cinematico di tipo Coulombiano che considera le dissipazioni tra plug e fondo del canale e da un attrito di tipo turbolento dipendente dalla velocità del flusso che considera le dissipazioni dovute alle collisioni tra particelle all'interno del flusso. I parametri di input principali sono quindi il debris-gramma (portata totale,  $Q_d$ ), la velocità del fronte nel punto in cui viene fatta partire la simulazione e i parametri di resistenza  $\mu$  e  $\xi$ .

Anche questo programma richiede l'informazione topografica dell'area relativa all'evento da simulare: un modello digitale delle quote (DEM, Digital Elevation Model) in formato ASCII. Sulla base del DEM il programma costruisce una griglia di calcolo alla quale è possibile sovrapporre gli eventuali strati informativi GIS come ortofoto e shapefile. Il dominio di calcolo rappresenta l'area massima che si presume possa venir inondata e viene delimitata nella griglia di calcolo da parte dell'operatore con un poligono. Gli inneschi possono essere

inseriti nel dominio di calcolo in modo simile. In caso di innesco singolo è possibile utilizzare un “block release” (blocco di distacco), attribuendo una profondità di distacco (release height,  $d_0$  in metri) ad una determinata superficie. Il modello calcola automaticamente il volume complessivo della colata “release volume” in  $m^3$  che deve coincidere con quello che si intende simulare. Si può provvedere anche ad un innesco tramite debrisgramma ( $Q_d = f(t)$ ). Gli inneschi multipli sono attribuibili solo attraverso i “block release” e non è possibile attribuirgli un *time-lag*, in quanto questi muovono tutti nel medesimo istante. Poi è necessario inserire la durata massima della simulazione (calculation time, in secondi) che può essere stimata in base al percorso che la colata detritica deve compiere e alla velocità media del flusso e l’intervallo di calcolo (dump interval, s). Vengono richiesti anche la densità  $\rho_m$  ( $kg/m^3$ ) e il coefficiente di spinta attiva-passiva  $\lambda$  (descritta nel paragrafo 4.2.2).

Il criterio di arresto di RAMMS è basato sul “momentum” (quantità di moto), che è il prodotto della massa per la velocità di un oggetto. Per ogni intervallo di calcolo la somma dei momenti di tutte le celle del grid viene confrontata con la somma della quantità di moto massima tra tutti i time step calcolandone il rapporto percentuale. Se questa percentuale è minore della soglia definita dall’utente (momentum threshold, %) il programma si interrompe e il flusso viene considerato ferm (arresto completato). Valori di soglia ragionevoli sono compresi fra l’1% e il 10%.

A simulazione conclusa il modello fornisce, per ogni cella, i parametri di output relativi alla dinamica del fenomeno:

- altezza del flusso massima e finale (m);
- velocità del flusso massima e finale (m/s);
- pressione massima e finale esercitata dalla massa in movimento (kPa);
- distribuzione spaziale dei due parametri d’attrito ( $\mu$  e  $\xi$ )

e di conseguenza il limite dei depositi della colata detritica presenti al termine della simulazione. I risultati sono esportabili come immagini o animazioni in formato GIF oppure come shapefile o raster.

## 4.2 PROCEDURA PER LA DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI INPUT

I parametri di input variano a seconda del modello che si intende utilizzare.

La calibrazione del modello di FLO-2D richiede parametri di input più complessi che sono stati forniti dal lavoro di analisi della reologia delle colate del Gatria (Bergamo, 2011). La calibrazione di RAMMS è stata effettuata basandosi su valori tabellari forniti dagli autori e, soprattutto, valutando la risposta delle simulazioni alla variazione dei parametri di input stessi.

#### 4.2.1 PARAMETRI DI INPUT FLO-2D

Durante la prima stagione di rilievo sono stati effettuati diversi campionamenti di materiale utilizzabile per la determinazione della reologia del materiale del bacino ai fini della modellazione.

Le variabili reologiche fondamentali di FLO-2D sono i valori di  $\alpha_1$  e  $\beta_1$  relativi alla viscosità  $\mu_N$  e i parametri  $\alpha_2$  e  $\beta_2$  che regolano lo sforzo tangenziale della colata  $\tau_y$ . Queste variabili sono state fornite dal lavoro di tesi di Bergamo (2011). La calibrazione di questi parametri reologici è stata effettuata attraverso prove di laboratorio con un viscosimetro (Brookfield DV-III Ultra). Il materiale solido utilizzato per creare le miscele da analizzare con il reometro è stato essiccato in stufa a 100°C per 24 ore e successivamente setacciato a 2 mm. Il materiale consiste in un campione di sedimento prelevato principalmente in corrispondenza di un cordone laterale depositatosi in destra idrografica tra le ultime due briglie localizzate immediatamente a monte della piazza di deposito della briglia filtrante posta alla confluenza con il torrente Strimm. Il parametro di resistenza  $K$  scelto per la modellazione è quello di base, pari a 24 (fluidi laminari che si muovono su sezioni rettangolari in canali larghi e lisci). Il parametro denominato surface detention per le simulazioni effettuate è stato posto pari a 0,2 m. (Tabella 16).

**Tabella 16: Valori dei parametri reologici calcolati relativi alla miscela testata con viscosimetro (Bergamo, 2011).**

$\alpha_1$	$\beta_1$	$\alpha_2$	$\beta_2$	$K$	Surface detention [m]
0.000193	25.68	0.0000697	26.791	24	0.2

Con altri campioni setacciati a 19 mm si sono determinate densità e porosità. La densità reale prende in considerazione solo il volume della frazione solida senza contare gli spazi vuoti presenti tra i grani. Questa densità è stata calcolata ponendo una quantità pesata di materiale all'interno di un cilindro graduato con un volume noto di acqua. Il liquido nel cilindro graduato viene quindi spostato di un volume pari a quello del volume del sedimento immesso.

La densità apparente considera, invece, il volume occupato dal materiale solido compresi gli spazi vuoti costituiti dai pori presenti tra i grani (Tabella 17). Questo parametro è stato quindi calcolato come rapporto tra il volume apparente, misurato immettendo il campione in un cilindro graduato, e la sua massa reale, misurata attraverso una bilancia di precisione.

**Tabella 17: Valori della densità reale e apparente del sedimento campione (Bergamo, 2011).**

<i>Densità reale [g/cm<sup>3</sup>]</i>	<i>Densità apparente [g/cm<sup>3</sup>]</i>	<i>Porosità</i>	<i>Peso specifico [N/m<sup>3</sup>]</i>
2.530	1.40	0.44	24800

FLO-2D permette di inserire un solo shape della scabrezza attraverso il GDS. La scabrezza è stata definita con l'*n* di Manning differenziando le varie zone che compongono l'intero sistema bacino idrografico Gadria-Strimo (Tabella 18). Per i collettori principali di entrambi i bacini e secondari del Gadria (quelli principali dei sottobacini) è stata utilizzata la formula di Limerinos (1970), che restituisce la scabrezza attraverso il raggio idraulico (R) estratto dalle sezioni e il diametro  $d_{84}$  dei rilievi granulometrici realizzati nell'ambito del progetto MONITOR II.

$$n = \frac{0.113 R^{1/6}}{1.16 + 2 \log(R/d_{84})} \quad (21)$$

Per il canale di smaltimento oltre la briglia è stata utilizzata la media fra i valori precedenti. Per il resto della superficie dei bacini, tutte le altre zone esterne ai collettori, la scabrezza è stata assegnata sulla base della descrizione dell'uso del suolo riportata nelle carte CORINE Land Cover (Tabella 19).

**Tabella 18: Scabrezza attribuita alle diverse parti che costituiscono il bacino.**

<i>N di Manning [s/m<sup>1/3</sup>]</i>	<i>Collettore principale</i>	<i>Collettore secondario</i>
<b><i>Gadria</i></b>	0.042	0.044
<b><i>Strimo</i></b>	0.048	0.048
<b><i>Canale di smaltimento</i></b>	0.045	
<b><i>Piazza di deposito</i></b>	0.042	
<b><i>Tutte le altre zone</i></b>	CORINE Land Cover	

**Tabella 19: Tabella di riferimento per i valori di scabrezza assegnati alla voce "altre zone".**

<b>Codice</b>	<b>Descrizione</b>	<b>n Manning</b>	<b>Ks</b>
<b>CORINE</b>		<b>[s/m<sup>1/3</sup>]</b>	<b>[m<sup>1/3</sup>/s]</b>
112	Tessuto urbano discontinuo	0.04	28.57
121	Aree industriali o commerciali	0.04	28.57
211	Seminativi in aree non irrigue	0.04	25.00
222	Frutteti e frutti minori	0.04	25.00
231	Prati stabili	0.04	25.00
242	Sistemi colturali e particellari complessi	0.04	25.00
243	Aree prevalentemente occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali	0.04	25.00
312	Boschi di conifere	0.10	10.00
321	Aree a pascolo naturale e praterie d'alta quota	0.08	12.50
322	Brughiere e cespuglieti	0.10	10.00
324	Aree a vegetazione boschiva e arbustiva in evoluzione	0.10	10.00
332	Rocce nude	0.06	18.18
333	Aree con vegetazione rada	0.06	18.18

#### 4.2.2 PARAMETRI DI INPUT RAMMS

Per la definizione dei parametri reologici in RAMMS è stato adottato un metodo più semplice e speditivo. È possibile utilizzare il coefficiente di spinta attiva  $\lambda_a$  per fluidi dilatanti o quello di spinta passiva per zone in compressione ( $\lambda_p$ ). Questo coefficiente viene calcolato, come suggerito nel manuale, usando la teoria di spinta di Rankine:

$$\lambda_a = \tan^2(45 - (\phi/2)) \quad (22)$$

$$\lambda_p = \tan^2(45 + (\phi/2)) \quad (23)$$

dove  $\phi$  è l'angolo di attrito interno desunto da prove di laboratorio (Tabella 20). In RAMMS non viene specificato direttamente un angolo di attrito interno, piuttosto viene chiesto il coefficiente  $\lambda_p$  meglio conosciuto come Lambda- $\lambda$ . In questo modo il coefficiente di spinta attivo è definito dal suo inverso,  $\lambda_a = 1 / \lambda_p$ .

I coefficienti di spinta passivi sono utilizzati per tenere conto dell'energia interna di dissipazione, in modo particolare durante l'interazione del flusso con un ostacolo. L'uso di  $\lambda$  può influenzare positivamente il risultato delle simulazioni: con coefficienti di spinta passiva alti si ottiene una maggiore espansione longitudinale del debris flow in particolare nelle zone

di dispersione del flusso, ossia una distanza di arresto del flusso maggiore. Questi coefficienti possono causare instabilità numeriche. Se vengono utilizzati valori di  $\lambda_p$  molto maggiori di 1 sono possibili risultati fisici a volte non corretti, specialmente in pendenza elevata, tali da far svuotare completamente la cella di calcolo della massa.

A seguito di questi effetti di dispersione del flusso è necessaria la calibrazione di differenti parametri Voellmy,  $\mu$  e  $\xi$ , per uno stesso evento al variare di  $\lambda_p$ .

Come prima approssimazione è possibile definire il coefficiente di attrito cinematico di tipo Coulombiano ( $\mu$ ) come la tangente di  $\alpha$ , dove  $\alpha$  è la pendenza della zona di deposizione della colata. Normalmente questo valore è compreso fra 0.05 e 0.4, valori maggiori difficilmente restituiscono simulazioni affidabili.

**Tabella 20: Angoli di riferimento per la calibrazione del modello, in gradi e in percentuale.**

<i>Angolo di attrito interno del materiale <math>\phi</math></i>	<i>Pendenza conoide <math>\alpha</math>, da Jarman et al. (2011)</i>
39° (80%)	7.4° (13%)

Il coefficiente di attrito turbolento ( $\xi$ ,  $m/s^2$ ) è di difficile calibrazione. Per questo motivo, nel manuale d'uso del programma ne viene suggerita la calibrazione partendo da valori tabellari, con un valore iniziale di  $\xi = 200 m/s^2$ .

$\xi$  rappresenta il comportamento del flusso: per valori minori di 200 viene simulato un flusso granulare, per valori maggiori un debris flow fangoso. I valori riportati in (Tabella 21) sono valori suggeriti, non fissati come limite minimo e/o massimo.

**Tabella 21: Valori del coefficiente di attrito turbolento  $\xi$  suggeriti nel User Manual RAMMS.**

<i>Coefficiente di attrito turbolento <math>\xi [m/s^2]</math></i>	
<i>Flusso granulare dominato dalla frazione solida</i>	<i>Flusso fangoso dominato dalla componente liquida</i>
100-200	200-1000

I valori di calibrazione finale comuni a tutte le simulazioni del modello sono il risultato della valutazione della risposta alla variazione dei parametri di input delle simulazioni stesse (Tabella 22):

**Tabella 22: Parametri di input RAMMS.**

<b>Parametri</b>	<b>Valori</b>
<i>Calculation time [s]</i>	1500
<i>Dump interval [s]</i>	5.00
<i>Momentum Threshold [%]</i>	10
$\rho_m$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1586
$\lambda$	1.6
$\mu$	0.130
$\xi$ [m/s <sup>2</sup> ]	2500

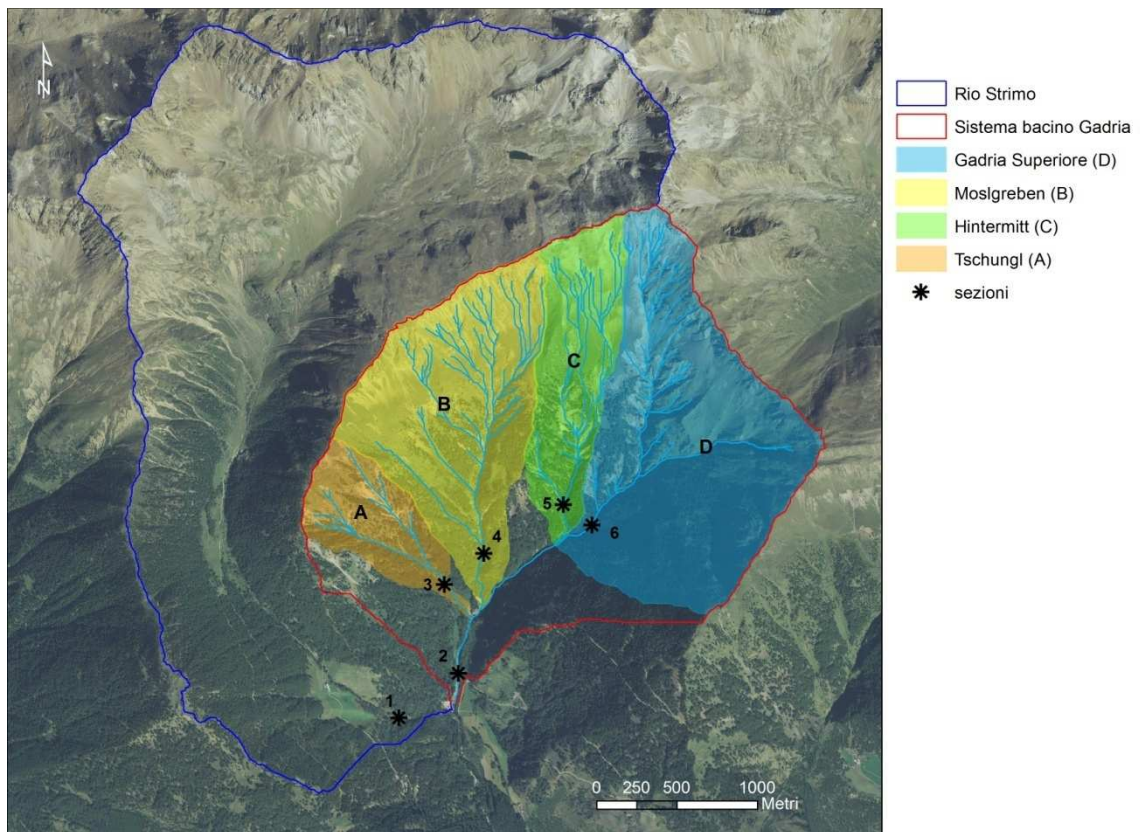
#### 4.2.3 DEBRIS-GRAMMI E ZONE DI INNESCO

Il sedimentogramma di input (sia per FLO-2D che per RAMMS) è stato ricavato partendo dal volume solido depositato e rilevato in campo dopo l'evento. Si è ipotizzato che il volume solido sia pari al volume depositato dalla colata all'interno del bacino di deposito e pari a 35000 m<sup>3</sup>. Questa decisione è stata presa in funzione della dinamica stessa dell'evento, che si è composto di una prima colata proveniente dal rio Strimo che ha ostruito la briglia (anche con del detrito legnoso) e da una successiva colata del rio Gadria che ha colmato il bacino di deposito. Si presuppone, sulla base dei dati di precipitazione, un ritardo di 10 minuti tra colata del rio Strimo e quella del Gadria. Nel canale di smaltimento nella zona adiacente al piede della briglia verso valle i depositi erano limitati ad una piccola area.

La posizione osservata in campo degli inneschi lungo le aste torrentizie è stata definita grazie ai sopralluoghi e ai report del progetto MONITOR II. Sono stati perciò definiti 6 possibili punti di innesco: uno per il rio Strimo, Uno per il Gadria e uno per ogni sottobacino (Figura 34). Per le modellazioni si è deciso di confrontare diverse soluzioni che semplificano o meno gli inneschi che si sono osservati sul campo. Si sono quindi scelti tre scenari di simulazione, due a 2 inneschi, con l'innesco da parte del rio Strimo e quello del rio Gadria, e una a 5 inneschi che considera l'apporto dei vari sottobacini del Gadria:

- simulazione 1: innesco nel rio Strimo e sul sottobacino D nel rio Gadria (il sottobacino che si è dimostrato più attivo nel corso dell'evento);
- simulazione 2: innesco nel rio Strimo e sul collettore principale del rio Gadria con il volume totale dei quattro sottobacini;
- simulazione 3: innesco nel rio Strimo e nei 4 sottobacini in cui è suddiviso il Gadria (un innesco posizionato su ognuno dei collettori secondari appena a monte della confluenza con il canale principale).





**Figura 34: Punti di innesco: 1- rio Strimo, 2 - rio Gatria, 3 - sottobacino A, 4 - sttobacino B, 5 - sottobacino C, 6 - sottobacino D.**

La scelta di effettuare anche una valutazione del risultato restituito dai modelli con l'utilizzo del volume del sottobacino D è suggerito da una ipotesi, probabile ma non certa, che il sottobacino D, fra tutti i sottobacini del Gatria, sia quello che ha contribuito con l'apporto volumetrico e il picco di piena maggiore. Questa ipotesi nasce sia dai rilievi di campo e dall'analisi dei rilievi topografici delle sezioni (Tabella 23). La sezione del sottobacino D è molto più larga rispetto a tutte le altre sezioni. Questo potrebbe derivare dall'intenso flusso erosivo che la ha attraversata. Come osservato dagli studi di Tognacca et al. (2000) sulla portata unitaria, ogni volta che si innesca una colata la sezione entro la quale scorre si allarga ad ogni nuovo evento.

**Tabella 23: Area media relativa alle sezioni trasversali dei tratti esaminati in corrispondenza dei punti di innesco scelti.**

<i>Sezioni</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>Gatria</i>	<i>Strimo</i>
<i>Area [m<sup>2</sup>]</i>	4.6	12	14	37	9	25

Per comporre lo schema di innesco (distribuzione degli debris-grammi) per FLO-2D è stato sufficiente definire il numero progressivo delle celle destinate a generare il flusso (inflow),

perché il programma permette la simulazione di inneschi multipli e contemporanei. Per RAMMS, invece, è stato necessario simulare inneschi singoli e sovrapporre simulazioni successive (i depositi della prima simulazione sono stati aggiunti tramite GIS al modello digitale del terreno della simulazione successiva). In caso di innesco singolo è possibile utilizzare sia un volume (block release) o un debrisgramma ( $Q_d$ ) triangolare. Gli inneschi multipli sono attribuibili solo attraverso i block release e non è possibile attribuirgli un time-lag, in quanto questi muovono tutti nel medesimo istante.

I rilievi delle sezioni trasversali sono stati utili per la definizione delle portate da assegnare ai punti di innesco. I rilievi effettuati con una stazione totale (Total Station), sono stati eseguiti per un tratto del collettore principale sia del Gadria che dello Strimo e per un breve tratto di ogni collettore dei sottobacini del Gadria. L'area di queste sezioni, insieme alla formula per la velocità del flusso del modello Newtoniano viscoso e le relazioni fra i volumi e le portate al picco a disposizione in letteratura, hanno permesso la costruzione degli idrogrammi di piena necessari alla modellazione degli eventi.

I volumi sono stati distribuiti secondo la Tabella 24, ipotizzando che i sottobacini avessero contribuito volumetricamente in modo proporzionale al loro grado di attività verificato in campo, ponendo come fattore di peso l'area delle sezioni trasversali stesse.

Sono stati costruiti tanti idrogrammi quante sono le sezioni valutate (uno per il sistema Gadria, uno per ogni sottobacino e uno per il rio Strimo), una serie per ogni programma. Una serie di sedimentogrammi è stata costruita per RAMMS con una struttura più semplice, triangolare a tre record, con la portata di picco totale  $Q_d$  posta a 60 secondi (Tabella 25). La serie per il Gadria è stata costruita priva di time-lag perché con RAMMS non è possibile impostare l'innesco multiplo. Per questo motivo ogni simulazione finale effettuata con RAMMS in realtà è la sovrapposizione di due simulazioni differenti. La strategia utilizzata per ottenere il riempimento della piazza di deposito è stata quella di avviare e calibrare una prima serie di simulazioni solo con il rio Strimo, estrarre il DTM risultante con la piazza di deposito parzialmente colmata di sedimento e caricare il nuovo DTM per le successive simulazioni del rio Gadria. Il risultato finale è dato dalla volumetria depositata da due simulazioni differenti. Poi è stata costruita una serie di idrogrammi per FLO-2D, di struttura più articolata, con time-lag di 10' per il Gadria rispetto allo Strimo e passo temporale di 30 secondi fra un record e il successivo.

In FLO-2D la portata di input è la portata liquida  $Q_l$  al picco a 60" per lo Strimo e a 11' per il Gadria. Si sono volute inoltre testare concentrazioni volumetriche di sedimento differenti,  $C_{s-v}$  0.5, 0.55 e 0.60 assunte costanti nel tempo infatti, variando la  $C_{s-v}$  è possibile ottenere la conseguente variazione dell'area di inondazione della colata, delle massime altezze e velocità

del flusso. Per fare questo è stato necessario costruire tanti idrogrammi quanti sono i tipi di simulazione, una serie per ogni concentrazione volumetrica (Tabella 26).

**Tabella 24: Volume e portata totale al picco di origine di tutti gli idrogrammi.**

<i>Sezioni</i>	<i>Sott. A</i>	<i>Sott. B</i>	<i>Sotto. C</i>	<i>Sott. D</i>	<i>Sistema Gabria</i>	<i>Rio Strimo</i>
<i>Volume totale m<sup>3</sup></i>	1290	4550	5440	18350	30100	12700
<i>Portata di picco Q<sub>d</sub></i>	5.4	14.6	16.8	43.9	44	32.6

**Tabella 25: Idrogrammi costruiti per il programma di simulazione RAMMS, in cui il tempo (t) è in secondi e la portata è la portata totale del debris flow in metri cubi.**

<i>RAMMS</i>					
<i>Sottobacino D</i>		<i>Gabria</i>		<i>Strimo</i>	
<i>t [s]</i>	<i>Q<sub>d</sub> [m<sup>3</sup>/s]</i>	<i>t [s]</i>	<i>Q<sub>d</sub>[m<sup>3</sup>/s]</i>	<i>t [s]</i>	<i>Q<sub>d</sub>[m<sup>3</sup>/s]</i>
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
60.0	43.9	60.0	64.9	60.0	32.6
840	0.0	900	0.0	780	0.0

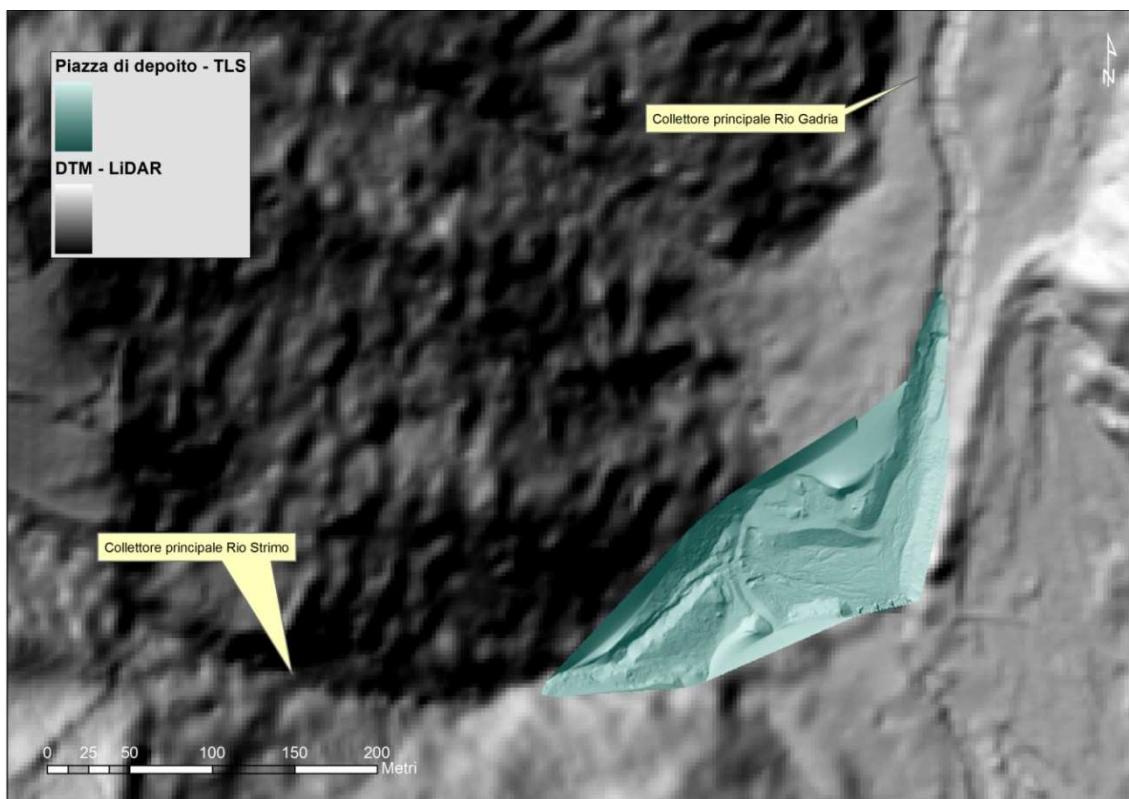
**Tabella 26: Idrogrammi per le diverse concentrazioni volumetriche per la sezione di deflusso del sottobacino A. Il tempo è in ore, il time-lag di 10 minuti (0.167 h) e il picco a 11 minuti, (0.183 h).**

<i>FLO-2D sottobacino A</i>											
<i>Cv 05 time-lag 10'</i>				<i>Cv 0.55 Time-lag 10'</i>				<i>Cv 0.6 Time-lag 10'</i>			
	<i>ore</i>	<i>Q<sub>i</sub> [m<sup>3</sup>/s]</i>			<i>ore</i>	<i>Q<sub>i</sub> [m<sup>3</sup>/s]</i>			<i>ore</i>	<i>Q<sub>i</sub> [m<sup>3</sup>/s]</i>	
H	0.000	0.00	0.50	H	0.000	0.00	0.55	H	0.000	0.00	0.60
H	0.008	0.00	0.50	H	0.008	0.00	0.55	H	0.008	0.00	0.60
H	0.017	0.00	0.50	H	0.017	0.00	0.55	H	0.017	0.00	0.60
H	0.025	0.00	0.50	H	0.025	0.00	0.55	H	0.025	0.00	0.60
H	0.033	0.00	0.50	H	0.033	0.00	0.55	H	0.033	0.00	0.60
H	0.042	0.00	0.50	H	0.042	0.00	0.55	H	0.042	0.00	0.60
H	0.050	0.00	0.50	H	0.050	0.00	0.55	H	0.050	0.00	0.60
H	0.058	0.00	0.50	H	0.058	0.00	0.55	H	0.058	0.00	0.60
H	0.067	0.00	0.50	H	0.067	0.00	0.55	H	0.067	0.00	0.60
H	0.075	0.00	0.50	H	0.075	0.00	0.55	H	0.075	0.00	0.60
H	0.083	0.00	0.50	H	0.083	0.00	0.55	H	0.083	0.00	0.60
H	0.092	0.00	0.50	H	0.092	0.00	0.55	H	0.092	0.00	0.60
H	0.100	0.00	0.50	H	0.100	0.00	0.55	H	0.100	0.00	0.60
H	0.108	0.00	0.50	H	0.108	0.00	0.55	H	0.108	0.00	0.60
H	0.117	0.00	0.50	H	0.117	0.00	0.55	H	0.117	0.00	0.60
H	0.125	0.00	0.50	H	0.125	0.00	0.55	H	0.125	0.00	0.60
H	0.133	0.00	0.50	H	0.133	0.00	0.55	H	0.133	0.00	0.60
H	0.142	0.00	0.50	H	0.142	0.00	0.55	H	0.142	0.00	0.60
H	0.150	0.00	0.50	H	0.150	0.00	0.55	H	0.150	0.00	0.60
H	0.158	0.00	0.50	H	0.158	0.00	0.55	H	0.158	0.00	0.60
H	0.167	0.00	0.50	H	0.167	0.00	0.55	H	0.167	0.00	0.60
H	0.175	1.35	0.50	H	0.175	1.21	0.55	H	0.175	1.08	0.60
H	0.183	<b>2.70</b>	0.50	H	0.183	<b>2.43</b>	0.55	H	0.183	<b>2.16</b>	0.60
H	0.192	2.51	0.50	H	0.192	2.26	0.55	H	0.192	2.01	0.60
H	0.200	2.31	0.50	H	0.200	2.08	0.55	H	0.200	1.85	0.60
H	0.208	2.12	0.50	H	0.208	1.91	0.55	H	0.208	1.70	0.60
H	0.217	1.93	0.50	H	0.217	1.74	0.55	H	0.217	1.54	0.60
H	0.225	1.74	0.50	H	0.225	1.56	0.55	H	0.225	1.39	0.60
H	0.233	1.54	0.50	H	0.233	1.39	0.55	H	0.233	1.23	0.60
H	0.242	1.35	0.50	H	0.242	1.21	0.55	H	0.242	1.08	0.60
H	0.250	1.16	0.50	H	0.250	1.04	0.55	H	0.250	0.93	0.60
H	0.258	0.96	0.50	H	0.258	0.87	0.55	H	0.258	0.77	0.60
H	0.267	0.77	0.50	H	0.267	0.69	0.55	H	0.267	0.62	0.60
H	0.275	0.58	0.50	H	0.275	0.52	0.55	H	0.275	0.46	0.60
H	0.283	0.39	0.50	H	0.283	0.35	0.55	H	0.283	0.31	0.60
H	0.292	0.19	0.50	H	0.292	0.17	0.55	H	0.292	0.15	0.60
H	0.300	0.00	0.50	H	0.300	0.00	0.55	H	0.300	0.00	0.60

#### 4.2.4 IMPLEMENTAZIONE DELLA PIAZZA DI DEPOSITO

La topografia della piazza di deposito è stata perfezionata sostituendo, in questa porzione di floodplain, il DEM LiDAR con celle di lato 2.5 m della Provincia di Bolzano con il DEM con maglia 0.5 m derivato dal rilievo della piazza di deposito con TLS (Terrestrial Laser Scanning). Il rilievo è stato eseguito a piazza di deposito totalmente sgombra da sedimenti nel giugno 2011 con la collaborazione del CIRGEO (Centro Interdipartimentale di Ricerca in Cartografia Fotogrammetria Telerilevamento e S.I.T, Università di Padova). La differenza di risoluzione è evidente nella Figura 35.

Il dem finale è stato dunque ricampionato a 2.5 m in modo da avere una griglia uniforme e un numero di celle tale da avere un buon compromesso tra tempi di simulazione accettabili e buona descrizione della topografia del bacino.



**Figura 35: Sovrapposizione fra i rilievo TLS della piazza di deposito e il DTM LiDAR della superficie dei bacini.**

#### 4.2.5 SIMULAZIONI PRELIMINARI E RISOLUZIONE DEI PROBLEMI

Simulazioni preliminari ci hanno permesso di individuare errori e problemi riguardo la base topografica utilizzata per le simulazioni con RAMMS e FLO-2D.

Il primo problema è emerso dal fatto che le altezze del flusso simulate all'interno della piazza di deposito non raggiungevano le altezze reali della briglia.

Le quote della gaveta e delle ali della briglia nel DEM risultavano più basse del reale, questo era dovuto al metodo di ricampionamento che crea celle di 2.5m di lato con valore pari alla

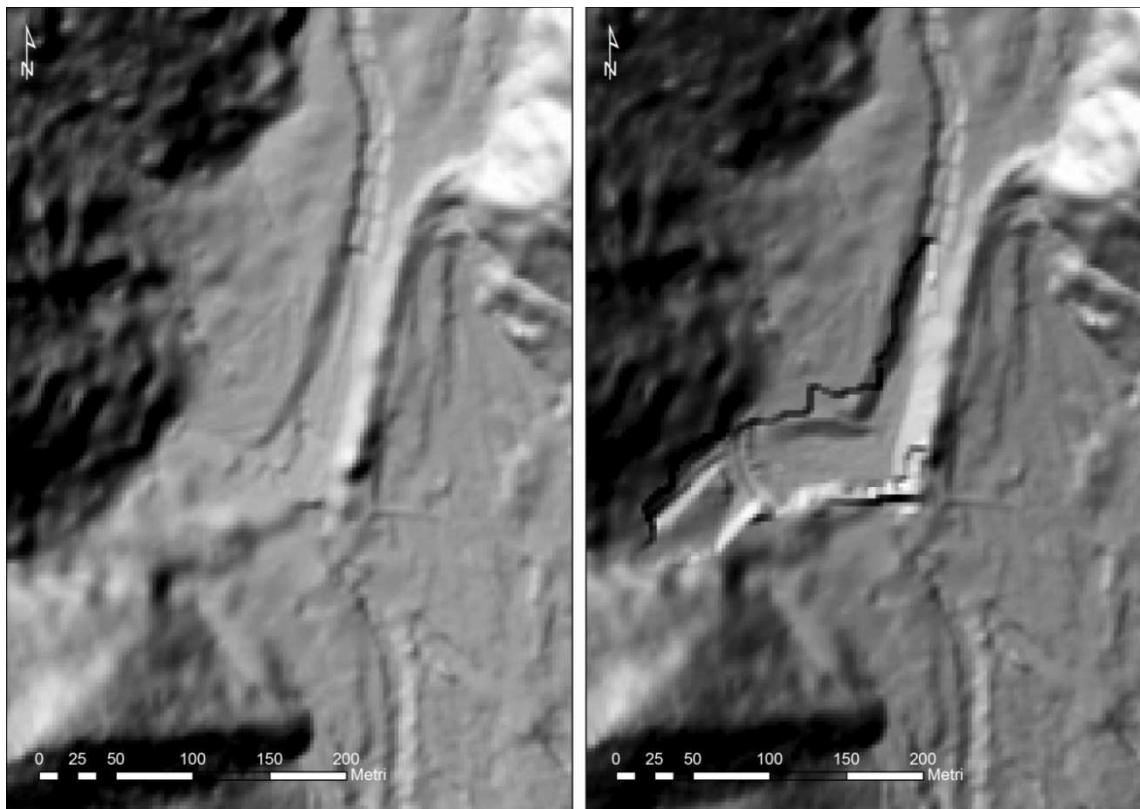
media delle celle di lato 0.5 m sottostanti. Questo metodo, che può andare molto bene per il ricampionamento della piazza di deposito (che presenta valori di quota simili per superfici più ampie che superano la dimensione di una singola cella), non è adeguato alla riproduzione della briglia filtrante che in seguito a questo procedimento risulta topograficamente distorta perché la sua quota viene mediata con le quote molto più basse del terreno circostante (la cella del DTM è infatti larga 2.5 m, mentre lo spessore della briglia è molto minore).

Le quote della briglia sono state perciò corrette manualmente facendo attenzione alla posizione della gaveta e all'ammorsamento alle sponde in sinistra idrografica.

Un secondo problema è emerso dalle simulazioni con RAMMS in cui il flusso simulato non veniva influenzato dall'ostacolo della briglia.

Questo problema è risultato essere dovuto al fatto che il flusso in RAMMS non risente di ostacoli se questi hanno una dimensione inferiore ad una fila di celle. Questo problema è stato quindi risolto simulando la briglia con più file di celle fino ad ottenere il numero di celle minimo sufficiente perché il programma riconoscesse la presenza dell'ostacolo. Sono state fatte più prove, con 5 file di celle, 3 file di celle ed infine 2 file di celle.

L'ultima soluzione (Figura 36), con 2 file di celle è risultata la soluzione ideale per le successive simulazioni.

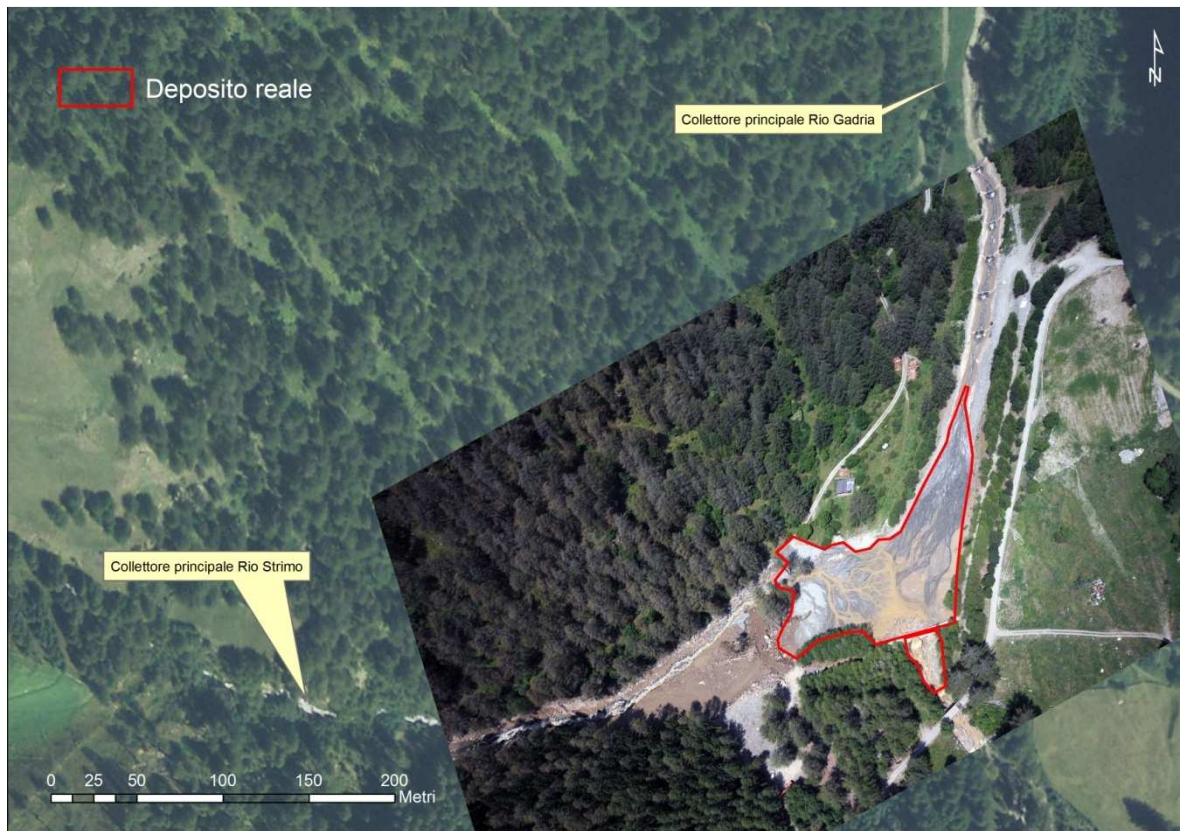


**Figura 36: Area di confluenza fra i due torrenti in cui è presente l'opera di trattenuta. A destra: DTM LiDAR originale. A sinistra: DTM LiDAR finale.**

### 4.3 VALUTAZIONE DEI RISULTATI

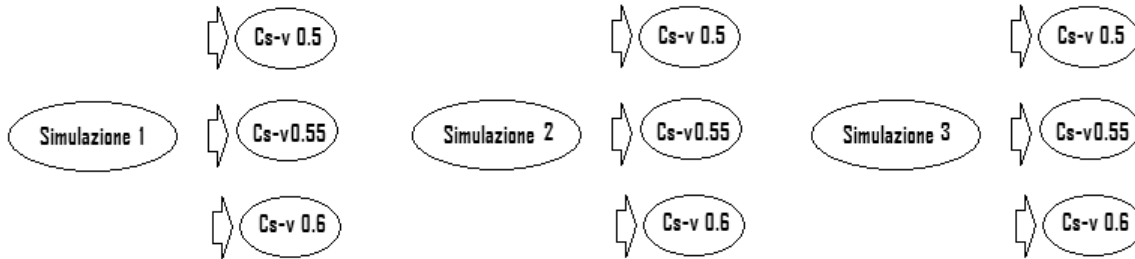
I risultati delle modellazioni sono stati valutati sulla base di un confronto tra l'area osservata del deposito reale e quella simulata dal modello (Figura 37).

L'area di deposito reale è stata delimitata georeferenziando la foto aerea della piazza di deposito post evento resa disponibile dal report ED30 del 2010. I depositi evidenziati sono limitati alla piazza di deposito e ad una porzione d'area oltre la briglia. Non è stato possibile, infatti, delimitare da immagini aeree i depositi di materiale lungo il canale di smaltimento che attraversa la conoide perché coperto da vegetazione fitta; secondo i rilievi di campo comunque, l'interessamento del canale durante l'evento è stato irrilevante. Il risultato finale della back analysis doveva restituire un volume di sedimento depositato tale da colmare il bacino di deposito e restare contenuto entro la briglia. In sostanza la perimetrazione del deposito è data dalla presenza delle strutture e dalle loro dimensioni.

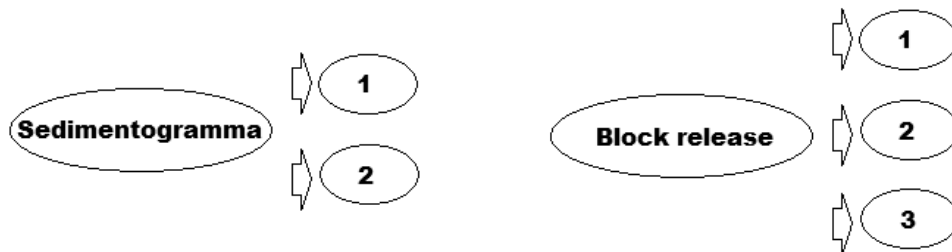


**Figura 37: Immagine georiferita del sedimento depositato nel piazzale e sua perimetrazione.**

Le simulazioni sono numerose e così distinte (Figura 38; Figura 39): per FLO-2D sono tre simulazioni per ogni  $C_{s-v}$ , per un totale di 9 simulazioni finali; per RAMMS sono 2 simulazioni con sedimentogramma e 3 con block release, per un totale di 5 simulazioni finali.



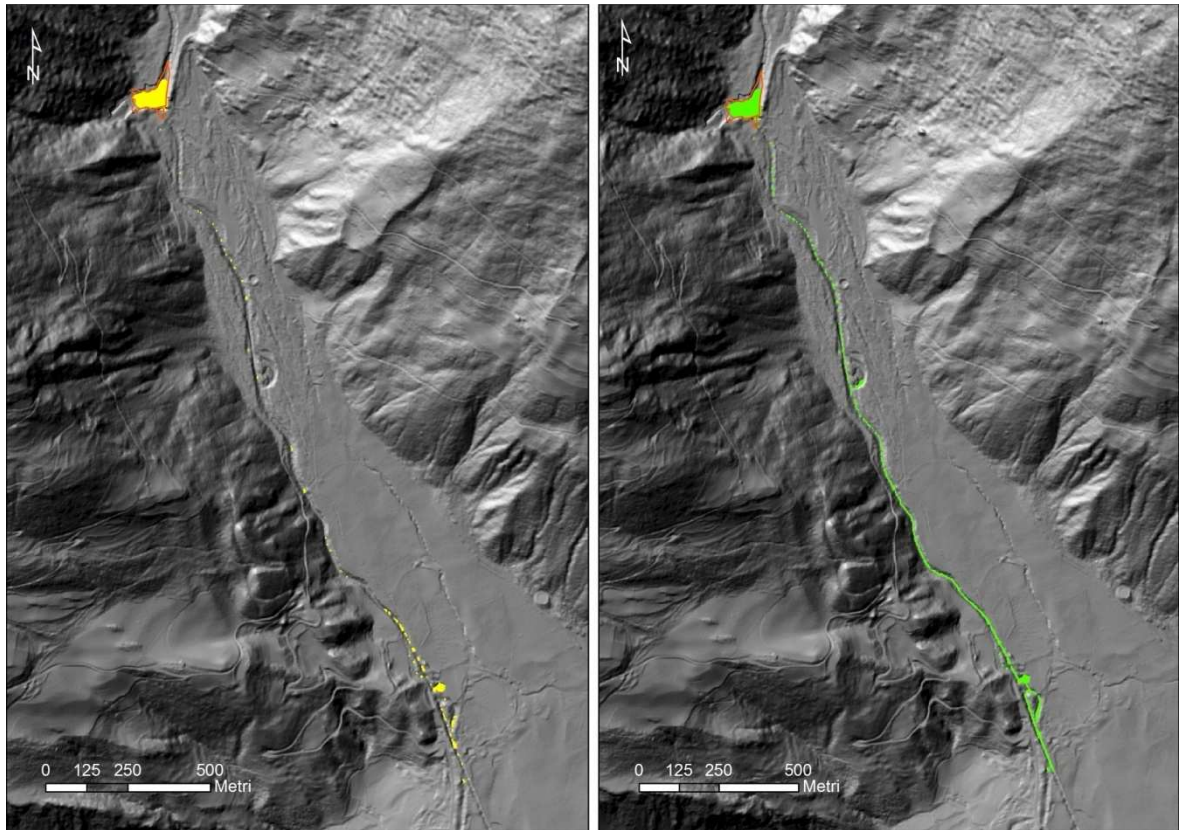
**Figura 38: Schema concettuale delle simulazioni con FLO-2D. Simulazione 1: innesco del solo sottobacino D; simulazione 2: innesco totale del Gatria; simulazione 3: un innesco per ogni sottobacino.**



**Figura 39: Schema concettuale delle simulazioni con RAMMS. Sedimentogramma 1, innesco del solo sottobacino D; 2, innesco totale del Gatria. Block release 1, innesco del sottobacino D; 2, innesco totale del Gatria; 3, un innesco per ogni sottobacino.**

Le planimetrie delle simulazioni di FLO-2D più che per numerosità di inneschi, variano in funzione della  $C_{s-v}$ . A concentrazioni volumetriche maggiori il flusso tende a depositare maggior sedimento a valle (Figura 40). Confrontando fra loro le simulazioni, queste si somigliano planimetricamente a parità di  $C_{s-v}$ . È risultato perciò superfluo rappresentare tutte le 9 simulazioni. Inoltre la differenza è più evidente nel confronto fra le simulazioni con  $C_{s-v}$  0.50 e 0.60.





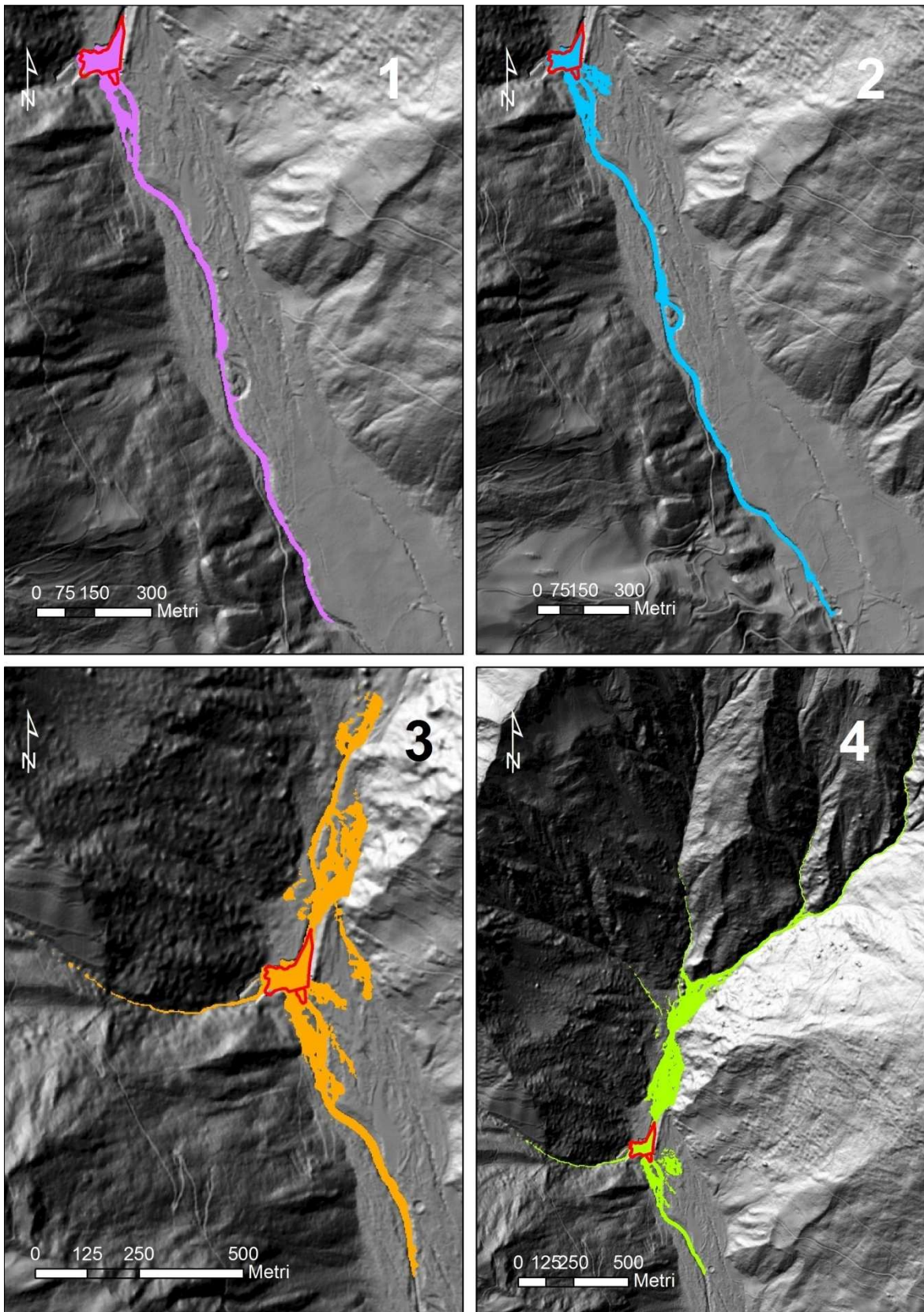
**Figura 40: FLO-2D, simulazione con 2 inneschi, rio Strimo più il volume totale del Gaderia. A destra in giallo la planimetria con  $C_{s-v} = 0.50$  e a sinistra in verde la planimetria con  $C_{s-v} = 0.60$ .**

Le simulazioni finali di RAMMS sono 5 e sono il risultato di un lungo lavoro di calibrazione per la definizione dei valori parametri di input che fornissero il risultato più aderente alle realtà possibile. In particolare è stato necessario valutare come diminuire gli effetti di spill over, ossia traboccamenti del flusso irreali, all'arrivo in briglia.

Le simulazioni finali sono 5, due con 2 inneschi da sedimentogramma e 3 con innesco da block release. Di queste ultime vengono riportati in Figura 41 gli esempi più interessanti, in quanto la simulazione con block release fornisce risultati non efficaci per la zonizzazione di un flusso canalizzato.

Simulazioni con block release tendono a disperdere il flusso in modo disordinato non solo internamente ai canali principali ma anche nei versanti. In questo tipo di simulazione il modello risponde meglio con il rilascio di piccoli volumi piuttosto che di volumi maggiori. A grandi volumi la dispersione del flusso aumenta considerevolmente in tutte le direzioni, faticando nel seguire il canale di smaltimento oltre la briglia.

Le simulazioni RAMMS con sedimentogramma sono simili alle simulazioni di FLO-2D. Il flusso si concentra nel bacino di deposito e poi defluisce dalla gaveta seguendo il tragitto del canale di smaltimento. Mantenendo il volume del solo sottobacino D il flusso resta contenuto, mentre aumentando il volume a quello totale del Gaderia aumenta sia la lunghezza in senso longitudinale dei depositi che la loro dispersione laterale.



**Figura 41: RAMMS. Sedimentogramma: 1) simulazione con volume del sottobacino D; 2) simulazione con volume totale Gabria. Block release: 3) simulazione con volume totale Gabria; 4) simulazione con un volume per ogni sottobacino (A, B, C, D).**

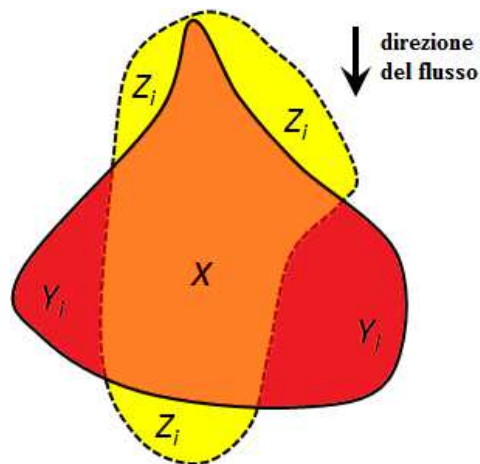
Il confronto è stato realizzato sulla base di due indici. Il primo indice ( $\varepsilon$ ) misura l'accuratezza positiva della simulazione tramite il rapporto tra l'intersezione tra area reale ( $X$ ) e area simulata ( $X+Z$ ) e l'area reale (Scheidl e Rickenmann, 2010, Figura 42):

$$\varepsilon = \frac{X}{X + Z} \quad (24)$$

dove  $Z$  è l'area reale non simulata (somma delle aree  $Z_i$ ). Mentre, con il secondo indice (introdotto *ad hoc* in questo studio) viene misurata l'efficienza del modello valutando quanto il flusso modellato vada a coprire aree che nella realtà non sono state interessate dalla colata. Questo indice di eccedenza ( $\psi$ ) viene calcolato come il complemento all'unità del rapporto tra l'area simulata in eccesso e l'area simulata totale:

$$\psi = 1 - \frac{Y}{X + Y} \quad (25)$$

dove  $Y$  è l'area simulata non compresa nell'area reale (somma delle aree  $Y_i$ ). Si sono scelti questi indici in quanto entrambi variano tra 0 e 1 e permettono di giudicare i risultati della modellazione secondo le due possibili modalità di errore.



**Figura 42: Rappresentazione schematica del confronto tra area di deposito reale (linea tratteggiata) e simulata (linea continua, da Scheidl e Rickenmann, 2010).**

Le simulazioni ritenute accettabili sono quelle che presentano una somma dei due indici maggiore di 1.33. Questo criterio considera attendibili le simulazioni che presentano un errore medio tra area non simulata e area simulata in eccesso inferiore o al massimo uguale al 33.3%.

I confronti fra l'area reale e simulata per ogni modello è stato riportato nella Tabella 27 e Tabella 28. L'indice calcolato per le simulazioni con FLO-2D diminuisce vistosamente all'aumentare della concentrazione volumetrica. L'area simulata tende ad allungarsi e ad allargarsi verso valle (in realtà verso le celle di output poste in fondo all'area di dominio di calcolo) all'aumentare della  $C_{s-v}$  e questo provoca un aumento dell'area simulata.

Gli indici calcolati per le aree simulate con RAMMS non raggiungono mai il valore minimo sufficiente per considerare accettabile la simulazione. La difficoltà maggiore è stata riscontrata nel calibrare i parametri di attrito a causa di numerosi eventi di dispersione incontrollata (spill over) che si generavano durante la simulazione (molto dopo il passaggio del picco di portata) e che facevano traboccare il flusso oltre la briglia. Questa dispersione è evidenziata dagli indici di eccedenza, bassissimi (Tabella 28), che dimostrano l'esubero di superficie simulata rispetto a quella reale.

Con entrambi i programmi di simulazione l'innescò del solo sottobacino D offre risultati migliori rispetto a tutti gli altri tipi di simulazione.

**Tabella 27: FLO-2D: Indici. Tre simulazioni per ogni concentrazione volumetrica. 1) simulazione con solo il sottobacino D; 2) simulazione con il volume totale del Gadria; 3) simulazione con un idrogramma per sottobacino A, B, C, D.**

<i>FLO-2D</i>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<i>C<sub>s-v</sub> 0.50</i>	$\varepsilon$	0.65	0.65	0.65
	$\psi$	0.74	0.73	0.71
	$\varepsilon + \psi$	1.40	1.39	1.37
<i>C<sub>s-v</sub> 0.55</i>	$\varepsilon$	0.66	0.67	0.66
	$\psi$	0.96	0.71	0.69
	$\varepsilon + \psi$	<b>1.62</b>	1.38	1.35
<i>C<sub>s-v</sub> 0.60</i>	$\varepsilon$	0.67	0.67	0.67
	$\psi$	0.46	0.44	0.40
	$\varepsilon + \psi$	1.12	1.11	1.06

**Tabella 28: RAMMS: Indici. 1) simulazione con volume del sottobacino D; 2) simulazione con volume totale Gadria; 3) simulazione con un volume per ogni sottobacino (A, B, C, D).**

<i>RAMMS</i>	<i>Sedimentogramma</i>		<i>Block release</i>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
$\varepsilon$	0.90	0.92	0.94	0.97	0.94
$\psi$	0.18	0.12	0.17	0.11	0.06
$\varepsilon + \psi$	1.09	1.04	1.11	1.08	1.00

## 4.5 OSSERVAZIONI E DISCUSSIONE

Il confronto dei risultati delle modellazioni attraverso l'analisi di performance effettuata ha permesso di identificare alcuni importanti punti di forza dei due modelli e le relative debolezze.

FLO-2D si dimostra un programma affidabile ma che necessita di parametri di calibrazione particolari e numerosi, con tempi di simulazione molto lunghi. RAMMS invece è un programma molto più snello e veloce, che necessita di pochi parametri di semplice acquisizione, ma richiede numerose simulazioni per giungere alla calibrazione migliore. I risultati finali sono simili a FLO-2D ma non di pari qualità.

FLO-2D nella maggior parte dei casi analizzati fornisce risultati realistici e vicini alle relative osservazioni di campo e da immagini aeree. È in grado di offrire simulazioni affidabili già alla prima simulazione con dati di reologia ricavati in laboratorio. Questo rappresenta sicuramente un punto di forza, anche se è necessario tempo e strumentazione adeguata per ottenere i parametri reologici. Inoltre gli idrogrammi di cui necessita sono più complessi rispetto a quelli richiesti da RAMMS. Infatti per poter essere letti dal programma devono essere impostati con una struttura e una simbologia definita se inseriti direttamente nel file di testo INFLOW.DAT, mentre l'inserimento manuale da interfaccia diventa eccessivamente impegnativo in caso di idrogrammi con un numero elevato di record. Ogni volta che si intende cambiare la concentrazione volumetrica di sedimento è necessario ricalcolare la portata liquida dell'idrogramma che permette di avere il volume totale desiderato. Altro svantaggio è dato dai tempi di calcolo della singola simulazione, molto lunghi e che necessitano di un processore potente.

RAMMS permette un numero notevole di simulazioni in breve tempo. Una simulazione, salvo poche eccezioni, non supera l'ora di durata. Questo è a favore della calibrazione che beneficia dell'elevato numero di simulazioni che si possono effettuare in tempi brevi. Ciò nonostante la calibrazione risulta più difficile rispetto a FLO-2D, soprattutto per il parametro  $\xi$  che interessa il tipo di flusso. RAMMS infatti, offre buoni risultati per colate composte da materiale granulare o prevalentemente granulare che si arrestano su conoidi con pendenza decisamente più bassa del canale (Bettella *et al* 2012). Il modello non risponde in maniera adeguata al caso di colate viscoso che si arrestano in zone dove la pendenza tra canale di propagazione e area di arresto non è accentuata. In questi casi la mobilità del flusso simulato da RAMMS risulta molto sovrastimate. Sorgono frequentemente problemi di stabilità di calcolo che producono traboccamenti (spill over) del flusso soprattutto in prossimità di curve che rendono complicata l'interpretazione della simulazione. Queste zone di "esplosione" (outbreak) necessitano di essere analizzate con cura per individuare il reale punto debole

della simulazione. In questo caso di studio questo tipo di fenomeno si è verificato frequentemente per valori troppo alti di  $\xi$  e tendeva ad essere esasperato dall'utilizzo di una  $\lambda_p = 1$ .

Le modellazioni hanno permesso di valutare i settaggi del parametro che governa l'arresto del flusso e della simulazione. La presenza di opere determina importanti conseguenze sulla scelta della percentuale di quantità di moto da selezionare per l'arresto della colata. In presenza di un bacino di deposito il fronte della colata viene arrestato molto rapidamente. Se la coda della colata simulata non ha una quantità di moto maggiore della soglia scelta, l'arresto della simulazione fa sì che il volume si fermi in modo non realistico prima di arrivare in piazza di deposito, causando una sottostima del riempimento della stessa e quindi della pericolosità dell'evento. In questi casi una simulazione di prova in cui si abbia cura di analizzare le velocità finali di flusso diventa necessaria per settare al meglio il parametro di arresto.

Il programma RAMMS permette anche l'attribuzione di un valore di altezza minima per la propagazione del flusso che è stato mantenuto invariato. L'impostazione di valori diversi da quelli di default ( $H_{\text{cutoff}} = 0.001 \text{ m}$ ) portano all'arresto in fase di avvio della simulazione con l'utilizzo di debris-gramma.

La presenza della briglia ha influenzato la calibrazione del parametro Lambda che controlla l'interazione del flusso con gli ostacoli: passando da un valore pari a 1 (che tende a rendere più veloci le simulazioni) a 1.6 si ottiene la stabilizzazione numerica della simulazione.

La valutazione dei coefficienti di attrito è stata la più impegnativa. È stato valutato un valore di  $\mu$  minore rispetto a quello ricavato dalla formula in quanto valori maggiori di 0.4 difficilmente restituiscono simulazioni affidabili.  $\xi$  di partenza è stato scelto pari a 1000, il limite massimo suggerito per flussi fangosi. Ritenedo di aver reso troppo fluido il flusso questo coefficiente è stato diminuito al valore minimo per le colate di tipo granulare e la resistenza al moto abbassata a 0.13. Una selezione dei principali passi di calibrazione è stata riportata in Tabella 29, per evidenziare i passaggi che hanno determinato in modo rilevante la calibrazione più adeguata. La tabella è strutturata in modo che nel passaggio da una simulazione all'altra siano evidenziati solo i cambiamenti effettuati. I valori dei parametri che per una data simulazione restano invariati rispetto alla precedente sono stati sostituiti dal segno "-".

**Tabella 29: Step principali di calibrazione del modello RAMMS.**

<i>N° Simulazione</i>	<i>Calculation time [s]</i>	<i>Dump interval [s]</i>	<i>Momentum Threshold [%]</i>	$\rho_m$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$	<i>Ordine</i>	$\mu$	$\xi$ [m/s <sup>2</sup> ]
1	5000	5	5	1568	1	1	0.2	1000
2	1500	-	10	-	-	-	0.13	500
3	-	-	-	-	-	-	-	100
4	-	-	-	-	-	-	-	5000
5	-	-	-	-	-	2	0.3	-
6	-	-	-	-	-	-	0.2	-
7	-	-	-	-	-	-	0.13	2500
8	-	-	-	-	-	-	-	3500
9	-	-	-	-	1.6	1	-	2500

Un altro limite di RAMMS è l'impossibilità di utilizzare inneschi multipli con l'utilizzo del sedimentogramma. D'altro canto la semplicità di costruzione del sedimentogramma richiesto da RAMMS permette la variazione dei tempi e della portata al colmo in modo comodo e immediato. La variazione della concentrazione avviene infatti attribuendo un valore di densità a parte, non incluso nel sedimentogramma, e neppure nelle equazioni che governano la dissipazione energetica del flusso.

Per quanto riguarda la qualità della modellazione dell'opera idraulica di trattenuta, è stato necessario intervenire sul DTM assegnando valori di quota e spessori diversi in corrispondenza delle celle nella piana di calcolo corrispondenti alla quota del coronamento delle briglie di trattenuta. Mentre per FLO-2D il problema era limitato alle quote, per RAMMS è stato necessario aumentare lo spessore minimo dell'ostacolo lineare a 2 celle.

In RAMMS, come già osservato precedentemente appare evidente l'erronea utilizzazione dei block release nella simulazione di un flusso canalizzato; in questi casi si ottiene una visibile dispersione del flusso che non si verifica nella realtà. L'interazione di questo tipo di simulazione con la briglia riduce inoltre sensibilmente il flusso passante a valle.

A fronte della frequente dispersione del flusso con basse profondità di deposito per entrambe le tipologie di simulazione RAMMS, potrebbe essere valutato in futuro un confronto planimetrico considerando solo le superfici al di sopra di una soglia di profondità di deposito.





## CONCLUSIONI

Alla gestione del rischio idrogeologico concorrono molti soggetti a livelli diversi. In ambito normativo sia italiano che europeo gli sforzi si sono concentrati nella ricerca di offrire strumenti normativi in grado di rispondere in modo adeguato alle diverse esigenze.

L'interscambio di informazioni, come dati, metodi e strumenti gioca un ruolo chiave in prospettiva del raggiungimento dell'obiettivo comune di mitigazione del rischio idrogeologico.

Questo studio si svolge nel contesto del programma europeo South East Europe, nel quale è stato finanziato il progetto MONITOR II (Practical Use of MONITORing in Natural Disaster Management) che ha l'obiettivo di coordinare l'elaborazione di mappe della pericolosità e piani di emergenza a livello transnazionale.

Questo studio tratta l'analisi dell'evento di colata avvenuto il 20 luglio 2010 nei bacini idrografici dei torrenti Strimo e Gadria (incluso del progetto MONITOR II) con l'utilizzo comparato di due modelli matematici bidimensionali (FLO-2D e RAMMS) ed è suddiviso in due parti.

La prima parte affronta la stima geomorfica del volume di sedimento disponibile nel bacino del Gadria secondo la metodologia proposta da D'Agostino e Marchi nel 2003 ed effettuando la catalogazione delle aree sorgenti secondo una classificazione definita in campo e l'uso di strumenti implementati in ambito G.I.S.

Da questa stima è risultato che il bacino del Gadria è un bacino ad alimentazione solida illimitata (Jakob, 2005), con volume di sedimento disponibile per essere mobilizzato pari a 1193800 m<sup>3</sup>. I suoi quattro sottobacini contribuiscono in modo diverso all'apporto di detrito in caso di evento, infatti l'attività franosa è più intensa nel sottobacino superiore del Gadria.

La seconda parte dello studio si occupa dell'implementazione della back analysis dell'evento di colata avvenuto il 20 luglio 2010 anche sulla base delle informazioni raccolte attraverso stima geomorfica e dei sopralluoghi in campo.

L'obiettivo è quello di confrontare gli aspetti complessivi di utilizzo dei due programmi, aspetti che includono la predisposizione di tutti i dati di input, la calibrazione dei modelli e la valutazione dei risultati finali attraverso l'utilizzo di un confronto planimetrico fra l'area simulata e l'area di deposito reale.

Si osservano i risultati finali dei modelli anche sulla base di tre tipologie differenti di simulazioni che variano a seconda degli inneschi scelti e del volume simulato. Gli indici di qualità utilizzati nel confronto planimetrico fra aree inondate simulate ed aree reali sono

positivi per i risultati ottenuti con FLO-2D a  $C_{s-v}$  0.5 e 0.55. RAMMS invece ottiene tutti risultati poco soddisfacenti.

Gli aspetti salienti della predisposizione dei parametri di input riguardano il DEM di origine del dominio di calcolo, in particolar modo la rappresentazione altimetrica dell'opera di trattenuta. Una topografia accurata è essenziale per una buona rappresentazione dei pattern di deposizione in entrambi i modelli, soprattutto quando è presente un bacino di deposito. Per questo motivo è stato modificato il DEM originale inserendovi il rilievo TLS del bacino di deposito completamente sgombro. L'operazione richiede attenzione ai dettagli plano-altimetrici del DEM finale, che presenta valori di quota mediati in funzione della risoluzione (dimensione) della cella scelta per il dominio di calcolo delle simulazioni.

Nella modellazione numerica le variabili che possono condizionare la mobilità di un debris flow sono numerose e talvolta incerte; inoltre le procedure di calibrazione dei modelli sono molto diverse fra loro.

FLO-2D si configura come un modello che necessita di tempi di simulazione piuttosto lunghi inoltre i parametri reologici ricavati attraverso l'ausilio del reometro Brookfield DV-III Ultra sono da considerarsi affidabili come dati di input per le modellazioni con FLO-2D a patto che anche tutti gli altri parametri di input, e soprattutto le informazioni riguardanti la scabrezza, si possano calibrare con una sufficiente accuratezza (Bergamo, 2011).

RAMMS è computazionalmente molto più rapido e permette il confronto fra modellazioni con parametri diversi in tempi di verifica accettabili. RAMMS comunque, non ha restituito output finali di simulazione di qualità sufficiente.

RAMMS si dimostra un programma ambizioso dalle ottime potenzialità: associa infatti a semplici parametri di input la rapidità computazionale. La calibrazione stessa è impostata sulla possibilità di sfruttare la velocità di simulazione per avviare tante simulazioni in successione quante ne servono per giungere al risultato finale richiesto partendo da valori di input di massima.

In ragione dei risultati ottenuti nel riprodurre l'evento reale di colata detritica nei torrenti Gatria e Strimo sono emerse sia una certa discrezionalità nell'utilizzo di parametri di taratura di FLO-2D e di RAMMS sia un ampio campo di variabilità delle aree inondate. Ciò suggerisce che, seppur molto utili, questi strumenti non possono essere i soli strumenti tramite i quali costruire una mappatura delle zone esposte al pericolo.

## RINGRAZIAMENTI

A questo punto è doverosa da parte mia una piccola non spiegazione: il tempo che è stato impiegato fino ad oggi non è servito solo per il lavoro di tesi.

Ringrazio di cuore il dott. Roberto Rossi, il dott. Alberto De Luca e il dott. Enrico Pozza per aver reso così piacevole e fruttuosa la mia permanenza al dipartimento TeSAF. A loro va il merito di avermi sostenuta e consigliata sia nelle questioni che riguardavano la tesi, che in quelle di formazione extra universitaria, che nelle mie insaziabili curiosità su manuali d'uso, file .txt (AdB-ToolBox), programmazione, etc.

Ringrazio il dott. Marco Cavalli perché non ha mancato di darmi ottimi suggerimenti nemmeno da "ex" correlatore quando mi hanno contattata per avere il "know-how" rispetto alla mia tesi triennale e ringrazio il dott. Francesco Comiti e il dott. Luca Mao per i consigli che mi hanno guidata nella scelta di questa avventura di tesi magistrale.

Ricordo con piacere i rilievi topografici effettuati con il dott. Andrea Dell'Agnese al quale mando un carissimo saluto.

Ricordo con meno piacere lo studio di geologia che mi ha impegnata durante l'estate (ma "fa curriculum") e mi ha dato modo di avere contatti con figure professionali di alto livello esterne allo studio.

Ringrazio tutti i miei più cari amici e il prof. Stefano Dorigo perché non avete ancora smesso di sopportarmi. Da oggi potrete cominciare a ringraziarmi voi per aver finalmente messo la parola

FINE



## BIBLIOGRAFIA

- Alpmmedia, Schaan, F.L., 2007. Il Parlamento europeo approva la nuova direttiva alluvioni. CIPRA, 10/ maggio 2007. Disponibile su: <<http://www.cipra.org/it/alpmmedia/notizie-it/2594/>>
- Aulitzky, H., 1980. Preliminary two-fold classification of torrents. Proc. Int. Symp. Interpraevent, Bad Ischl, Austria. Bd. 4, pp. 285–310.
- Barbolini, M., 2008. Hazard mapping of extremely rapid mass movements in Europe. State of the art methods in practice. Irasmos, sixth framework programme, WSL.
- Bergamo, L., 2011. Caratterizzazione delle colate detritiche nel bacino del torrente Gadria (Silandro, Bolzano). Tesi magistrale, Dipartimento TeSAF, Università degli Studi di Padova.
- Bettella, F., Bertoldi, G., Ferrato, C., D'Agostino, V., Pozza, E., 2012 (in stampa). Modellazioni bidimensionali comparate sulla propagazione di debris flow: analisi di performance su alcuni eventi reali. Quaderni di Idronomia Montana 30.
- Bovis, M.J., and Jakob, M. (1999). The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity. Earth Surf. Process. Landforms 24, pp. 1039-1054.
- Caine N. 1980. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. Geografiska Annaler 62A: 23–27.
- Camera dei deputati, mozioni concernenti gli interventi per la difesa del suolo n. 1-00885. Mosella, D.R., *et al.* del 27/02/2012. Seduta n. 593. Disponibile su: <<http://documenti.camera.it/leg16/odg/assemblea/xhtml/2012/02/28/20120228.html>>
- Camera dei deputati, mozioni concernenti gli interventi per la difesa del suolo n. 1-00891. Piffari, S.M., *et al.* del 27/02/2012. Seduta n. 593. Disponibile su: <<http://documenti.camera.it/leg16/odg/assemblea/xhtml/2012/02/28/20120228.html>>
- Castiglioni, G., B., 1986. Geomorfologia. 2° ed. Torino: UTET.
- Cavalli M, Tarolli P, Marchi L, Dalla Fontana G. 2008. The effectiveness of airborne LiDARS data in the recognition of channel-bed morphology. Catena 75: 249-260. DOI:10.1016/j.catena.2007.11.001
- Chiarle, M., Iannotti, S., Mortara, G., Deline, P., 2007. Recent debris flow occurrences associated with glaciers in the Alps. Rivista Global and Planetary Change 56, 123–136. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.07.003.
- Christen M., Bühler Y., Bartelt P., Leine R., Glover J., Schweizer A., Graf C., McArdell B.W., Gerber W., Deubelbeiss Y., Feistl T., Volkwein A., 2012. Integral hazard

- management using a unified software environment, Proceedings of 12<sup>th</sup> Congress Interprevent 2012, Grenoble, Francia, 77-86.
- Christen, M., Kowalski, J., Bartelt, P., 2010. RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain, *Cold Regions Science and Technology*, 63, 1-14.
  - Coussot P, Meunier M. 1996. Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Review* 40: 209–227.
  - D’Agostino V, Marchi L. 2003. Geomorphological estimation of debris flow volumes in alpine basins. In *Debris flow Hazard Mitigation: Mechanism, Prediction and assessment*, Rickenmann D, Chen H. Millpress: Rotterdam; 1096-1106.
  - D’Agostino V., Cesca M., 2009 Reologia e distanza di arresto dei debris flow: sperimentazioni su modello fisico a piccola scala, IX Convegno Nazionale dell’Associazione Italiana di Ingegneria Agraria, Ischia Porto, 12-16 Settembre 2009.
  - D’Agostino, V., 1996. Analisi quantitativa e qualitativa del trasporto solido torrentizio nei bacini montani del Trentino Orientale, In *Scritti dedicati a Giovanni Tournon*. Associazione Italiana di Ingegneria Agraria – Associazione Idrotecnica Italiana: Novara, 111-123
  - D’Agostino, V., 2008. “Dimensionamento delle opere di protezione dalle colate detritiche”, in: *Sistemazione dei bacini montani e difesa del suolo*, prima ed., a cura di V. Ferro, collana Politecnica n.9, cap.22, pp. 605-623, Nuova Bios, Castrolibero (CS) (ISBN-10: 978-88-6093-042-2)
  - D’Agostino, V., Cesca, M., 2009. Reologia e distanza di arresto dei debris flow: sperimentazioni su modello fisico a piccola scala. IX Convegno Nazionale dell’Associazione Italiana di Ingegneria Agraria, Ischia Porto, 12-16 Settembre 2009.
  - D’Agostino, V., Marchi, L., 2003. Geomorphological estimation of debris flow volumes in alpine basins. In: Rickenmann & Chen (eds.), *Debris flow Hazard Mitigation: Mechanism, Prediction and assessment*, Millpress, Rotterdam, 1096-1106.
  - D’Agostino V., 2006. Le opere di idraulica torrentizia per il controllo dei sedimenti. *Quaderni di Idronomia Montana*, 26, *Le sistemazioni idraulico-forestali per la difesa del territorio*, Saint Vincent (AO), 27 Ottobre 2006, Nuova Bios, Castrolibero (CS), pp. 231-250 (ISBN/ISSN-10:88-6093-009-X)
  - Dipartimento della Protezione Civile e Legambiente, 2011. Dossier “Ecosistema a Rischio 2011”, monitoraggio sulle attività delle amministrazioni comunali per la mitigazione del rischio idrogeologico. Indagine legata a “Operazione Fiumi 2011” campagna nazionale di monitoraggio, prevenzione e informazione sulla mitigazione del rischio idrogeologico.

- Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio n. 2000/60/CE del 23 ottobre 2000 che istituisce un quadro per l'azione comunitaria in materia di acque.
- Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio n. 2007/60/CE del 23 ottobre 2007 relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni.
- Dlgs. 23 febbraio 2010, n. 49. Attuazione della direttiva 2007/60/CE.
- Ferro V. (2002). La sistemazione dei bacini idrografici. McGraw - Hill Editore (Ed. II), Milano. (ISBN 88-386-0895-4).
- Ferrucci, N., 2007. Lezioni di diritto Forestale ed Ambientale. 1° ed. Padova: Cleup. Pp 109-176.
- Giannella, G., Guida T., 2010. Forum degli Ordini Regionali e del Consiglio Nazionale dei Geologi. Roma: 16 giugno 2010. Disponibile su: <[http://www.geologilazio.it/public/file/Forum/Guida\\_Giannella.pdf](http://www.geologilazio.it/public/file/Forum/Guida_Giannella.pdf)>
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., Stark, P. C., 2006. Rainfall Thresholds for the Initiation of Landslides in Central and Southern Europe. Pp 48.
- Herschel, W.H., and Bulkley, E.R. 1926. Measurement of consistency as applied to rubber-benzene solutions. Am. Soc. Test. Proc. 26, pp. 621-633.
- Hungr, O., Morgan, G. C., e Kellerhals, R., 1984. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. Canadian Geotechnical Journal, 21, pp. 663-667.
- Introduzione alla geomorfologia, Università degli studi di Genova, Facoltà d architettura. Disponibile su: [http://www.arch.unige.it/sla/geositi/lab\\_dispense/09.htm](http://www.arch.unige.it/sla/geositi/lab_dispense/09.htm)
- ISPRA, 2010, Annuario dei Dati Ambientali. 9° ed.
- ISPRA, 2011, Annuario dei Dati Ambientali. 10° ed.
- Iverson, R. M., 1997. The physics of debris flows. Reviews of Geophysics, 35. Pp 245-296.
- Jakob, M., 2005. Debris-flow hazard analysis. In: Jakob, M., Hungr, O. (Eds.), Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Springer, Berlin, pp. 411-443.
- Jarman, D., Agliardi, F., & Crosta, G., 2011. Megafans and outsize fans from catastrophic rock slope failures in alpine glacial troughs: Malser Haide and the Venosta cluster, Italy. In M. Jaboyedoff (a cura di), Slope Tectonics (pp. 253-277). London : Geological Society, London.
- Kronfellner-Kraus G. , 1984. Extreme Feststofffrachten und Grabenbildungen von Wildbächen, International Symposium Interpraevent, Villach, Austria, Band 2, 109-118.

- Kronfellner-Kraus G., 1985. Quantitative estimation of torrent erosion, International Symposium on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention, Tsukuba, Japan, 3-5 September, 107-110.
- L. 30 dicembre 1923, n. 3256. Legge Serpieri.
- Lucarelli, C., Paternolli, M., Eschgfäller, M., 2009. Etschdialog Oberer Vinschgau - Flussgebietsplan Oberer Vinschgau - Teilmodul Wassergefahren - Technischer Bericht, Version 2, 41-174.
- Macconi, P., 2010. Conferenza internazionale "Water in the Alps". Trento : 29 settembre 2010.
- Macconi, P., Formaggioni, o., Sperling, M., 2011. ED30, Report 2010. Bolzano. Disponibile su: [http://www.provinz.bz.it/opere-idrauliche/download/Report\\_Eventi\\_2010\\_IT.pdf](http://www.provinz.bz.it/opere-idrauliche/download/Report_Eventi_2010_IT.pdf)
- Major, J.J., 1996. Experimental Studies of Deposition of Debris Flows: Process, Characteristics of Deposits, and Effects of Pore-Fluid Pressure. Ph.d., Washington.
- Marchi, L., D'Agostino, V., 2004. Estimation of debris-flow magnitude in the Eastern Italian Alps. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 29. Pp 207-220 (ISSN: 0197-9337).
- Marchi, L., Pasuto, A., Tecca, P.R., 1993. Flow processes on alluvial fans in the Eastern Italian Alps. *Z. Geomorph. N. F.*, 37. Pp 447-458.
- McArdell B.W., Cesca M., Huggel C., Scheuner T., Graf C., Christen M., 2007. Numerical modeling of debris flow runout in the Swiss Alps, *Geological Society of America Abstracts with Programs* 39, 438.
- Moscariello, A., Marchi, L., Maraga, F., and Mortara, G., 2002. Alluvial fans in the Italian Alps: sedimentary facies and processes. In: Martini, P., Baker, V.R., and Garzon, G. (eds.). *Flood & Megaflood Processes and Deposits-Recent and Ancient Examples*. Blackwell Science, Oxford (UK). Pp 141-166
- Nishiguchi Y., Uchida T., Tamura K., Satofuka Y., 2011. prediction of run out process for a debris flow triggered by a deep rapid landslide. 5<sup>th</sup> International Conference on Debris Flow Hazards Mitigation: Mechanism, Prediction and Assessment. Padua, Italy, *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*: 477 - 485. DOI: 10.4408/IJEGE.
- O'Brien, J. S., Julien, P.Y., 1988. Laboratory analysis of mudflow properties, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 114 (8), 877-887.
- O'Brien, J.S., 2001. FLO-2D Users Manual. Nutrioso Arizona. 83 pp.
- O'Brien, J.S., Julien, P.J., 1993. Fullerton W.T., Two-dimensional water flow and mudflow simulation, *Journal of Hydraulic Engineering*, 119, 244 - 261.



- Pasuto, A., Tecca, P.R., 2000. Debris Flow. In: Marchetti, M. (ed.), Geomorfologia fluviale. Pitagora Editrice, Bologna. Pp 107-123.
- Provincia di Bolzano, 2012. Ripatizione 30-Opere Idrrauliche, tema: Bacini Montani. Disponibile su: <http://www.provinz.bz.it/opere-idrauliche/temi/bacini-montani.asp>
- Puglisi, S., 2012. Convegno “Previsione e Mitigazione dei Fenomeni di Dissesto Idrogeologico in Italia – Il Contributo del Settore delle Sistemazioni Idraulico - Forestali”. Università degli studi di Palermo, 10 e 11 maggio 2012.
- Reich H. (2011). Analisi della pericolosità del bacino del Rio Gatria attraverso indagini storico documentali. Tesi magistrale, Dipartimento TeSAF, Università degli Studi di Padova.
- Report ED30 Gatria. Documentazione eventi.
- Report ED30 Strimm. Documentazione eventi.
- Rickenmann D., Zimmermann M. (1993) The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis, *Geomorphology*, 8, 175-189.
- Rickenmann, D., 2005. Runout prediction methods. In: M. Jakob & O. Hungr (eds), *Debris-Fow Hazards and Related Phenomena*. Praxis-Springer, pp. 263-282.
- Scheidl C., Rickenmann D., 2010. Empirical prediction of debris-fl ow mobility and deposition on fans. *Earth Surf. Process. Landforms* 35, 157–173.
- Sidle, R. C., Pearce, A. J., O'Loughlin, C. L., 1985. Hillslope stability and land use. *Water resurce monograph*, American geophysical union, 11. Washington D.C.
- Spreafico M, Lehmann C. 1999. Feststoffverlagerung in steilen fließgewässern. *Arbeitsgruppe fur operationelle Hydrologie. Mittellung n° 5*. Landeshydrologie und geologie service. Bern, CH.
- Strahler, A. N.,1958. Dimensional analysis applied to fluvially eroded landforms. *Geological Society of America Bulletin*, 69, 1958, pp. 279-300.
- Strahler, A.N., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *American Geophysical Union Transactions*. 38: 913-920.
- Takahashi, T., 1991. *Debris flow*. Rotterdam, Balkema.
- Takey A., 1984. Interdependence of sediment budget between individual torrents and a riversystem, *International Symposium Interpreavent, Villach, Austria, Band 2*, 35-48.
- Tarolli P., Sofia G., Dalla Fontana G. 2012. Geomorphic features extraction from high-resolution topography: landslide crowns and bank erosion. *Natural Hazards* 61: 65-83. DOI:10.1007/s11069-010-9695-2.
- Tognacca, C. and Bezzola, G. R. and Minor, H. E., 2000. Threshold criterion for debris-flow initiation due to channel-bed failure. *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Debris Flow*,

- Hazards and Mitigation, Taipei/Taiwan (Wieczorek, G. F., ed.). A. A. Balkema, Rotterdam, p. 89-97.
- Tognacca, C. and Bezzola, G. R., 1997. Debris flow initiation by channel bed failure, in: Debris flow hazard mitigation: mechanics, prediction and assessment. Chen, C.-I., ASCE. Pp 45-53.
  - VanDine, D.F. 1996. Debris flow control structures for forest engineering. Ministry of Forests Research Program, Working Paper 22/1996. Government of the Province of British Columbia, Vancouver.
  - VOELLMY, A., 1955. Ueber die Zerstoerungskraft von Lawinen Schweizerische Bauzeitung. English version "On the destructive force of avalanches" translated by Tate R.E. (1964), ed. US Department of Agriculture Forest Service.
  - Zimmermann, M., Mani, P., Romang, H. 1997. Magnitude-frequency aspects of Alpine debris flows. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 90(3), 415-420.

## SITOGRAFIA

- Alpmedia, Schaan, F.L., 2007. Il Parlamento europeo approva la nuova direttiva alluvioni. CIPRA, 10/ maggio 2007. Disponibile su: <http://www.cipra.org/it/alpmedia/notizie-it/2594>
- Camera dei deputati, mozioni concernenti gli interventi per la difesa del suolo n. 1-00885. Mosella, D.R., *et al.* del 27/02/2012. Seduta n. 593. Disponibile su: <http://documenti.camera.it/leg16/odg/assemblea/xhtml/2012/02/28/20120228.html>
- Camera dei deputati, mozioni concernenti gli interventi per la difesa del suolo n. 1-00891. Piffari, S.M., *et al.* del 27/02/2012. Seduta n. 593. Disponibile su: <http://documenti.camera.it/leg16/odg/assemblea/xhtml/2012/02/28/20120228.html>
- Giannella, G., Guida T., 2010. Forum degli Ordini Regionali e del Consiglio Nazionale dei Geologi. Roma: 16 giugno 2010. Disponibile su: [http://www.geologilazio.it/public/file/Forum/Guida\\_Giannella.pdf](http://www.geologilazio.it/public/file/Forum/Guida_Giannella.pdf)
- Introduzione alla geomorfologia, Università degli studi di Genova, Facoltà d architettura. Disponibile su: [http://www.arch.unige.it/sla/geositi/lab\\_dispense/09.htm](http://www.arch.unige.it/sla/geositi/lab_dispense/09.htm)
- Macconi, P., Formaggioni, o., Sperling, M., 2011. ED30, Report 2010. Bolzano. Disponibile su: [http://www.provinz.bz.it/opere-idrauliche/download/Report\\_Eventi\\_2010\\_IT.pdf](http://www.provinz.bz.it/opere-idrauliche/download/Report_Eventi_2010_IT.pdf)
- Provincia di Bolzano, 2012. Ripatizione 30-Opere Idrarauliche, tema: Bacini Montani. Disponibile su: <http://www.provinz.bz.it/opere-idrauliche/temi/bacini-montani.asp>