

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Civile



**Politecnico  
di Torino**

**Colate detritiche in Valsesia:  
back analysis, simulazione  
e studio delle condizioni di innesco**

a.a 2021/2022

Relatori:

Prof.ssa Monica Barbero

Prof.ssa Marta Castelli

Dott. Giovanni Cavagnino

Candidato:

Lorenzo Viale

Sessione di Laurea Luglio 2022



## Sommario

Introduzione .....	XIII
Cap. 1 – instabilità dei pendii .....	1
1.1 Instabilità dei pendii.....	1
1.2 Stato di attività.....	2
1.3 Volume .....	3
1.4 Velocità .....	4
1.5 Classificazione dei movimenti di versante .....	4
1.5.1 TIPOLOGIE DI MOVIMENTO .....	5
1.5.2 FRANE DA CROLLO (“FALLS”).....	7
1.5.3 FRANE DA RIBALTAMENTO (“TOPPLES”).....	8
1.5.4 SCIVOLAMENTI (“SLIDES”).....	9
1.5.5 FRANE PER ESPANSIONE LATERALE (“LATERAL SPREADS”).....	12
1.5.6 FRANE PER COLATA (“FLOWS”).....	12
1.6 Colate detritiche .....	15
1.7 Caratteristiche del flusso.....	18
1.8 Previsione dell’evoluzione (“runout”) .....	23
1.8.1 MODELLI EMPIRICI .....	23
1.8.2 MODELLI ANALITICI .....	25
1.8.3 MODELLI NUMERICI.....	27
1.8.4 MODELLO ATTRITIVO .....	29
1.8.5 MODELLO DI NEWTON E MODELLO ALLA BINGHAM .....	30
1.8.6 MODELLO COULOMB-VISCOSO.....	30
1.8.7 MODELLO TURBOLENTO.....	31
1.8.8 MODELLO DI VOELLMY.....	31
Cap. 2 – ramms .....	33
2.1 RAMMS .....	33
2.2 Impostare una simulazione .....	35
2.2.1 DIGITAL ELEVATION MODEL (DEM).....	35
2.2.2 CREAZIONE DEL PROGETTO.....	35
2.2.3 MODELLO REOLOGICO .....	37
2.2.4 EROSIONE .....	38
2.3 Svolgimento di una simulazione.....	39

2.3.1	AREA DI RILASCIO .....	40
2.3.2	IDROGRAMMA DI INGRESSO .....	41
2.3.3	DOMINIO DI CALCOLO .....	43
2.3.4	AREA E PARAMETRI DI EROSIONE .....	45
2.4	Risultati.....	46
2.4.1	VISUALIZZAZIONE E ANALISI DEI RISULTATI .....	48
2.5	Meccanismo di arresto.....	50
Cap. 3 – caso studio.....		51
3.1	Inquadramento Geografico .....	52
3.1.1	TOPOGRAFIA ED OROGRAFIA .....	53
3.2	Inquadramento geologico .....	53
3.2.1	GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA DEL QUATERNARIO.....	54
	(STRATI SUPERFICIALI).....	54
3.2.2	ACCUMULI GRAVITATIVI.....	55
3.2.3	DEPOSITI ALLUVIONALI.....	55
3.2.4	DEPOSITI GLACIALI (MORENE) .....	56
3.3	Geomorfologia e dinamica dei versanti.....	57
3.4	Evento del 2-3 Ottobre 2020.....	59
3.4.1	ANALISI METEOROLOGICA E IDROLOGICA.....	59
3.4.2	EFFETTI AL SUOLO .....	63
Cap. 4 – Back analysis e simulazione dell’evento.....		67
4.1	Modellazione del fenomeno .....	67
4.2	Parametri di controllo.....	72
4.3	Simulazioni iniziali e calibrazione parametri reologici .....	75
4.4	Calibrazione dei parametri erosivi .....	78
4.5	Dati output ricavati dal software.....	83
4.6	Verifica a traslazione degli impalcati dei ponti.....	86
4.6.1	PONTE 1.....	87
4.6.2	PONTE 2 .....	89
4.6.3	PONTE 3 .....	90
4.7	Analisi dell’ostruzione della sezione di deflusso.....	92
4.7.1	DEFLUSSO DELLE ACQUE IN CORRISPONDENZA DI UN RESTRINGIMENTO DELLA SEZIONE .....	93
4.7.2	DINAMICA DELLA CORRENTE IN PRESENZA DI UN RESTRINGIMENTO .....	93
4.8	Stima del rialzo idraulico tramite metodi empirici.....	95

4.8.1 FORMULA DI D'AUBUISSON (1852) .....	95
4.8.2 FORMULA DI NAGLER (1918) .....	96
4.8.3 FORMULA DI REHBOCK .....	96
4.8.4 FORMULA DI YARNELL (1934).....	97
4.8.5 FORMULA DI YARNELL CORRETTA (2001).....	97
4.8.6 FORMULA DI AL-NASSRI (1994).....	98
4.9 Stima del rialzo idraulico presso il Ponte 1 .....	98
4.9.1 FORMULA DI D'AUBUISSON .....	98
4.9.2 FORMULA DI NAGLER.....	99
4.9.3 FORMULA DI REHBOCK .....	99
4.9.4 FORMULA DI YARNELL E VARIANTE CORRETTA.....	100
4.9.5 FORMULA DI AL-NASSRI .....	100
4.10 Rialzo idraulico per i ponti 2 e 3.....	102
Cap. 5 – Ulteriori scenari .....	105
5.1 Impostazione delle simulazioni.....	105
5.2 Area vasca .....	107
5.3 Area destra orografica .....	113
5.4 Area sinistra orografica.....	119
5.5 Area pineta .....	125
5.6 Considerazioni finali sulle simulazioni.....	131
Cap. 6 – condizioni di innesco e carta della pericolosità per instabilità dei versanti .....	133
6.1 Modello di calcolo.....	134
6.1.1 MODELLO DI MONTGOMERY & DIETRICH (1994).....	135
6.2 Modellazione GIS.....	138
6.2.1 PARAMETRI GEOTECNICI .....	138
6.2.2 PARAMETRI TOPOGRAFICI.....	141
6.2.2.1 CALCOLO DI PENDENZE E IMMERSIONE .....	142
6.2.3 PARAMETRI IDROLOGICI.....	144
6.3 Risultati dell'analisi.....	148
6.3.1 VERIFICA DELLE CONDIZIONI DI ASSOLUTA STABILITÀ E INSTABILITÀ.....	149
6.3.2 CALCOLO DELLA PIOGGIA CRITICA $Q_{CR}$ .....	150
6.3.3 CALCOLO DEL FATTORE DI SICUREZZA .....	152
6.3.4 CARTA DELLA PERICOLOSITÀ PER INSTABILITÀ DEI VERSANTI .....	155
Conclusioni .....	159

Bibliografia.....	163
Ringraziamenti.....	165
Allegati.....	167

## Indice delle figure

<i>Figura 1 : Sezioni soggette a crollo per ribaltamento con diversi stati di attività:</i>	2
<i>Figura 2 : Rappresentazione schematica dello stato di attività in funzione del tempo (Cruden &amp; Varnes, 1996).</i>	3
<i>Figura 3 : Scala di velocità di eventi franosi. (Cruden &amp; Varnes, 1996).</i>	4
<i>Figura 4 : Tipologie di movimento secondo la classificazione di (Varnes, 1978).</i>	5
<i>Figura 5 : Parti principali del corpo di frana</i>	6
<i>Figura 6 : Schema di una frana rotazionale (Cruden &amp; Varnes, 1996).</i>	6
<i>Figura 7 : Esempio di crollo di un blocco.</i>	8
<i>Figura 8 : Esempio di frana da ribaltamento.</i>	9
<i>Figura 9 : Tipologie di scivolamento.</i>	9
<i>Figura 10 : Scivolamento rotazionale presso Oso slide, Stillaguamish River, Washington. (www.nbcnews.com).</i>	10
<i>Figura 11 : Scivolamento traslativo nelle Langhe (www.regione.piemonte.it).</i>	11
<i>Figura 12 : Frattura di trazione</i>	11
<i>Figura 13 : Danno per espansione laterale risultato del terremoto di Loma Prieta,</i>	12
<i>Figura 14 : Rock avalanche, Val Pola, 28 Luglio 1987 (Pirulli,2021).</i>	14
<i>Figura 15 : Mud flow di Las Colinas, Santa Tecla</i>	15
<i>Figura 16 : Mud flow causato dal terremoto di El Salvador, Las Colinas, Santa Tecla (El Salvador, 13 January 2001) - (www.temblor.net).</i>	15
<i>Figura 17 : Schema del percorso di un debris flow.</i>	17
<i>Figura 18 : Tipici valori di pendenza e distinzione delle varie zone secondo Van Dine (Van Dine, 1996).</i>	18
<i>Figura 19 : Rappresentazione schematica di un debris flow (Pierson e Costa, 1987) a sx</i>	19
<i>Figura 20 : Schema rappresentante la differenza tra una particella di piccole dimensioni che rimane sospesa esclusivamente per effetto della viscosità e può essere considerata parte del fluido (A) e un granulo di grandi dimensioni che necessita invece dell'interazione con altre particelle (B), (Iverson, 1997).</i>	20
<i>Figura 21 : rappresentazione grafica delle velocità relative di una particella m2 durante un ciclo di moto in direzione verticale (Iverson, 1997).</i>	20
<i>Figura 22 : Tipologie di depositi (Van Dine, 1996).</i>	22
<i>Figura 23 : Valori tipici dei parametri di base di un debris flow (Iverson, 1997).</i>	22
<i>Figura 24 : Esempio di linea di massima pendenza per fenomeno di caduta massi (Pirulli, 2021).</i>	24
<i>Figura 25 : Caratteristiche geometriche di un dissesto (Pirulli, 2021).</i>	24
<i>Figura 26 : Esempio di relazione lineare tra parametri geometrici (Pirulli, 2021).</i>	25
<i>Figura 27 : Contributi energetici e schema geometrico del modello analitico</i>	27

<i>Figura 28 : Trasformazione da una massa di materiale eterogeneo a un continuo equivalente monofasico (Pirulli, 2021).</i>	28
<i>Figura 29 : Modelli reologici di Newton e di Bingham (Pirulli,2021).</i>	30
<i>Figura 30 : Estensione dell'area di interesse e coordinate di riferimento (RAMMS::DEBRISFLOW manual).</i>	36
<i>Figura 31 : Relazione tra sforzo normale N e taglio S (RAMMS::DEBRISFLOW manual).</i>	38
<i>Figura 32 : Tracciamento di una nuova area di rilascio (RAMMS::DEBRISFLOW manual).</i>	40
<i>Figura 33 : Esempio i idrogramma a 3 punti (RAMMS::DEBRISFLOW manual).</i>	41
<i>Figura 34 : Idrogramma a 4 punti per l'evento del 2 Agosto 2005, Illgraben, Valais Svizzera (RAMMS::DEBRISFLOW manual).</i>	42
<i>Figura 35 : Confronto tra due idrogrammi a 3 e 4 punti con stesso volume totale (RAMMS::DEBRISFLOW manual).</i>	42
<i>Figura 36 : Definizione dell'idrogramma a 3 punti con la relazione di Rickenmann.</i>	42
<i>Figura 37 : Angolo della direzione di direzione di distacco rispetto all'asse x (RAMMS::DEBRISFLOW manual).</i>	43
<i>Figura 38 : Esempio di dominio di calcolo (RAMMS::DEBRISFLOW manual).</i>	44
<i>Figura 39 : Avviso di errore per fuoriuscita del flusso dal dominio (RAMMS::DEBRISFLOW manual).</i>	44
<i>Figura 40 : Scheda relativa a area e parametri di erosione (RAMMS::DEBRISFLOW manual).</i>	45
<i>Figura 41 : Esempio di output logfile</i>	47
<i>Figura 42 : Visualizzazione dei risultati su modello topografico dei valori rispettivamente di altezza massima, velocità e pressione (RAMMS::DEBRISFLOW manual).</i>	48
<i>Figura 43 : Comando Line profile in direzione trasversale (RAMMS dbf manual).</i>	49
<i>Figura 44 : Comando Line profile in direzione longitudinale (RAMMS dbf manual).</i>	49
<i>Figura 45 : Time plot (RAMMS dbf manual).</i>	49
<i>Figura 46 : Posizionamento geografico del comune di Varallo (<a href="https://it.wikipedia.org/wiki/Varallo">https://it.wikipedia.org/wiki/Varallo</a>).</i>	52
<i>Figura 47 : Estratto della Carta Geologica d'Italia 1:100000, Foglio 30, dell'Istituto geografico militare.</i>	54
<i>Figura 48 : 00:00 UTC del 2 Ottobre 2020: Immagine dal satellite Meteosat che evidenzia la tipologia di masse d'aria sull'Europa (a sx); Pressione al livello del mare; (Rapporto evento 2-3 Ottobre ARPA).</i>	59
<i>Figura 49 : Rappresentazione spaziale delle precipitazioni giornaliere del 2 Ottobre 2020 (a) e della pioggia totale cumulata dal 1 al 4 Ottobre 2020 (b); (Rapporto evento 2-3 Ottobre 2020 ARPA Piemonte).</i>	61
<i>Figura 50 : Precipitazioni orarie (blu) e cumulate (verde) tra il 2 e il 3 Ottobre 2020 per la stazione di Sambughetto; (Rapporto evento 2-3 Ottobre ARPA).</i>	62

<i>Figura 51 : Idrogramma del fiume Sesia presso Borgosesia (VC); (Rapporto evento 2-3 Ottobre ARPA).</i>	62
<i>Figura 52 : Sottoescavazione della strada di accesso a Camasco per erosione da parte del torrente Nono; (Rapporto evento 2-3 Ottobre ARPA).</i>	64
<i>Figura 54 : Danni alle infrastrutture e alla rete elettrica nella frazione di Corte; (www.cittadinovara.com).</i>	64
<i>Figura 53 : Uno dei due ponti carrabili crollati e successivamente asportati per effetto della pressione dell'ondata di piena; (www.cittadinovara.com).</i>	64
<i>Figura 55 : Ulteriore vista sull'abitato di Corte, visibile l'entità dell'erosione spondale e dell'alveo, oltre ai danni alle infrastrutture e materiale ligneo trasportato dalla piena. (www.cittadinovara.com).</i>	65
<i>Figura 56 : Immagine a monte del coronamento dell'area di distacco con i primi interventi di stabilizzazione realizzati; sullo sfondo la frazione di Corte colpita dall'area di piena.</i>	68
<i>Figura 57 : Misurazione manuale della scarpata laterale.</i>	68
<i>Figura 58 : Scarpata principale e intervento di stabilizzazione.</i>	69
<i>Figura 59 : Modello geometrico del volume instabilizzato.</i>	69
<i>Figura 60 : Dettaglio dell'area di distacco presso il Colle del Ranghetto, 1272 m s.l.m.</i>	71
<i>Figura 61 : Zona di innesco (rosso) e di propagazione (giallo) fino alla zona ipotizzata di arresto a valle della frazione di Camasco.</i>	73
<i>Figura 62 : Individuazione dei ponti asportati e della zona di arresto, oltre che della zona di distacco.</i>	74
<i>Figura 63 : Output logfile e rappresentazione delle massime altezze del flusso lungo il percorso – Prova 1.</i>	75
<i>Figura 64 : Output logfile e rappresentazione delle massime altezze del flusso lungo il percorso – Prova 2.</i>	76
<i>Figura 65: Output logfile e rappresentazione delle massime altezze del flusso lungo il percorso – Prova 4.</i>	77
<i>Figura 66 : Modello di input con dominio di erosione (tratteggiato in rosso).</i>	78
<i>Figura 67: Output logfile e rappresentazione delle massime altezze del flusso lungo il percorso con erosione – Prova 5.</i>	80
<i>Figura 68 : Modello di input con dominio di erosione (tratteggiato in rosso) tracciato tramite QGIS.</i>	81
<i>Figura 69 : Output logfile e rappresentazione delle massime altezze del flusso lungo il percorso con erosione – Prova 11.</i>	81
<i>Figura 70 : Output logfile – Prova 12.</i>	82
<i>Figura 71 : Output logfile di Prova 14 (a sinistra) e Prova 17 (a destra).</i>	83

<i>Figura 72 : Profili di massima altezza per le sezioni trasversali all'alveo in corrispondenza dei ponti: a) Ponte 1, b) Ponte 2 e c) Ponte 3. _____</i>	<i>84</i>
<i>Figura 73 : Profili di pressione in corrispondenza delle sezioni dei ponti. _____</i>	<i>85</i>
<i>Figura 74 : Schema statico semplificato dei ponti in esame e delle pressioni agenti. _</i>	<i>86</i>
<i>Figura 75 : Immagini del Ponte 1 antecedenti al crollo (Google Earth). _____</i>	<i>88</i>
<i>Figura 76 : Immagini del Ponte 2 antecedenti al crollo (Google Earth). _____</i>	<i>89</i>
<i>Figura 77 : Immagini del Ponte 3 antecedenti al crollo (Google Earth). _____</i>	<i>90</i>
<i>Figura 78 : Immagine del Ponte 3 successiva all'evento (www.cittadinovara.com). ___</i>	<i>91</i>
<i>Figura 79 : Schema di un restringimento per contrazione (M. Fugazza, 2004/05). _____</i>	<i>94</i>
<i>Figura 80 : Metodo di Nagler, valori del coefficiente <math>C_R</math> in funzione del rapporto di contrazione <math>r</math> (Fugazza, 2004/2005). _____</i>	<i>96</i>
<i>Figura 81 : Tabella dei coefficienti di forma sperimentali da adottare in funzione della tipologia di pila in alveo (Fugazza, 2004/2005). _____</i>	<i>96</i>
<i>Figura 82 : Metodo di Yarnell corretto, tabella dei coefficienti di forma <math>K_y</math> (Fugazza, 2004/2005). _____</i>	<i>97</i>
<i>Figura 83 : Potenziali aree di distacco considerate. _____</i>	<i>106</i>
<i>Figura 84 : Dominio di erosione Area vasca. _____</i>	<i>107</i>
<i>Figura 85 : Velocità massima – Area Vasca 1,2 m. _____</i>	<i>108</i>
<i>Figura 86 : Pressione massima – Area Vasca 1,2 m. _____</i>	<i>108</i>
<i>Figura 87 : Altezza massima – Area Vasca 1,2 m. _____</i>	<i>109</i>
<i>Figura 88 : Velocità massima – Area Vasca 2,1 m. _____</i>	<i>109</i>
<i>Figura 89 : Pressione massima – Area Vasca 2,1 m. _____</i>	<i>110</i>
<i>Figura 90 : Altezza massima – Area Vasca 2,1 m. _____</i>	<i>110</i>
<i>Figura 91 : Velocità massima – Area Vasca 3 m. _____</i>	<i>111</i>
<i>Figura 92 : Pressione massima – Area Vasca 3 m. _____</i>	<i>111</i>
<i>Figura 93 : Altezza massima – Area Vasca 3 m. _____</i>	<i>112</i>
<i>Figura 94 : Deposizione – Area Vasca 3 m. _____</i>	<i>112</i>
<i>Figura 95 : Dominio di erosione Area destra orografica. _____</i>	<i>113</i>
<i>Figura 96 : Velocità massima – Area dx orog. 1,2 m. _____</i>	<i>114</i>
<i>Figura 97 : Pressione massima – Area dx orog. 1,2 m. _____</i>	<i>114</i>
<i>Figura 98 : Altezza massima – Area dx orog. 1,2 m. _____</i>	<i>115</i>
<i>Figura 99 : Velocità massima – Area dx orog. 2,1 m. _____</i>	<i>115</i>
<i>Figura 100 : Pressione massima – Area dx orog. 2,1 m. _____</i>	<i>116</i>
<i>Figura 101 : Altezza massima – Area dx orog. 2,1 m. _____</i>	<i>116</i>
<i>Figura 102 : Velocità massima – Area dx orog. 3 m. _____</i>	<i>117</i>
<i>Figura 103 : Pressione massima – Area dx orog. 3 m. _____</i>	<i>117</i>
<i>Figura 104 : Altezza massima – Area dx orog. 3 m. _____</i>	<i>118</i>
<i>Figura 105 : Deposizione – Area dx orog. 3 m. _____</i>	<i>118</i>

<i>Figura 106 : Dominio di erosione Area sinistra orografica.</i>	119
<i>Figura 107 : Velocità massima - Area sx orog. 1.2 m.</i>	120
<i>Figura 108 : Pressione massima - Area sx orog. 1.2 m.</i>	120
<i>Figura 109 : Altezza massima - Area sx orog. 1.2 m.</i>	121
<i>Figura 110 : Velocità massima - Area sx orog. 2.1 m.</i>	121
<i>Figura 111 : Pressione massima - Area sx orog. 2.1 m.</i>	122
<i>Figura 112 : Altezza massima - Area sx orog. 2.1 m.</i>	122
<i>Figura 113 : Velocità massima - Area sx orog. 3 m.</i>	123
<i>Figura 114 : Pressione massima - Area sx orog. 3 m.</i>	123
<i>Figura 115 : Altezza massima - Area sx orog. 3 m.</i>	124
<i>Figura 116 : Deposizione - Area sx orog. 3 m.</i>	124
<i>Figura 117 : Dominio di erosione Area pineta.</i>	125
<i>Figura 118 : Velocità massima - Area pineta 1.2 m.</i>	126
<i>Figura 119 : Pressione massima - Area pineta 1.2 m.</i>	126
<i>Figura 120 : Altezza massima - Area pineta 1.2 m.</i>	127
<i>Figura 121 : Velocità massima - Area pineta 2.1 m.</i>	127
<i>Figura 122 : Pressione massima - Area pineta 2.1 m.</i>	128
<i>Figura 123 : Altezza massima - Area pineta 2.1 m.</i>	128
<i>Figura 124 : Velocità massima - Area pineta 3 m.</i>	129
<i>Figura 125 : Pressione massima - Area pineta 3 m.</i>	129
<i>Figura 126 : Altezza massima - Area pineta 3 m.</i>	130
<i>Figura 127 : Deposizione - Area pineta 3 m.</i>	130
<i>Figura 128 : Schema della condizione di pendio indefinito.</i>	135
<i>Figura 129 : Schema altezze del modello.</i>	136
<i>Figura 130 : Zona di prelievo del campione.</i>	138
<i>Figura 131 : Inviluppo di rottura per il campione sottoposto a prova di taglio diretto.</i>	139
<i>Figura 132 : Curva granulometrica del campione in esame.</i>	140
<i>Figura 133 : Carta del rilievo del bacino idrografico del torrente Nono e i suoi affluenti minori presso la frazione di Camasco.</i>	141
<i>Figura 134 : Schema di calcolo delle pendenze (<a href="https://www.nicoladeinnocentis.it/">https://www.nicoladeinnocentis.it/</a>).</i>	143
<i>Figura 135 : Schema per l'identificazione della direzione di deflusso (<a href="https://docs.qgis.org/">https://docs.qgis.org/</a>).</i>	145
<i>Figura 136 : Valori tipici del coefficiente di deflusso per diverse tipologie di superficie (Montin, 2012).</i>	147
<i>Figura 137 : Zone di assoluta stabilità e instabilità per il bacino di Camasco.</i>	150
<i>Figura 138 : Pioggia critica in assenza di coesione.</i>	151
<i>Figura 139 : Pioggia critica in presenza di coesione.</i>	151

<i>Figura 140 : Curve di possibilità pluviometrica per la stazione di Sambughetto (VB) con valori relativi all'evento del 2/3 Ottobre 2020, (Rapporto Arpa Piemonte evento del 2/3 Ottobre 2020).</i>	<i>152</i>
<i>Figura 141 : Fattore di sicurezza per <math>T_r=5</math> anni e <math>c'=0</math>.</i>	<i>153</i>
<i>Figura 142 : Fattore di sicurezza per <math>T_r=200</math> anni e <math>c'=0</math>.</i>	<i>154</i>
<i>Figura 143 : Fattore di sicurezza per <math>T_r=5</math> anni e <math>c'=29</math> kPa.</i>	<i>154</i>
<i>Figura 144 : Fattore di sicurezza per <math>T_r=200</math> anni e <math>c'=29</math>.</i>	<i>155</i>
<i>Figura 145 : Carta di pericolosità in assenza di coesione.</i>	<i>156</i>
<i>Figura 146 : Carta di pericolosità in presenza di coesione.</i>	<i>156</i>

## Indice delle tabelle

<i>Tabella 1 : Classificazione di Fell (Fell R., 1994).</i>	3
<i>Tabella 2 : Classificazione dei movimenti di (Varnes, 1978).</i>	5
<i>Tabella 3 : Elenco dei file e tipi di formato generati dal software (RAMMS::DEBRISFLOW manual).</i>	46
<i>Tabella 4 : Massimi di pioggia in mm per diverse durante e alcune stazioni significative;</i> -----	61
<i>Tabella 5 : Valori di pioggia cumulata giornaliera e totale dell'evento in mm per diverse durante e alcune stazioni significative; (Rapporto evento 2-3 Ottobre 2020 ARPA Piemonte).</i>	62
<i>Tabella 6 : Dati misurazione fronte di innesco.</i>	70
<i>Tabella 7 : Dati principali ottenuti mediante le misurazioni dei ponti.</i>	74
<i>Tabella 8 : Parametri reologici di tentativo - Prova 1.</i>	75
<i>Tabella 9 : Parametri reologici di tentativo - Prova 2.</i>	76
<i>Tabella 10 : Parametri reologici di tentativo - Prova 4.</i>	77
<i>Tabella 11 : Parametri erosivi di input.</i>	79
<i>Tabella 12 : Parametri erosivi di input - Prova 12.</i>	82
<i>Tabella 13 : Parametri reologici di input - Prova 14.</i>	83
<i>Tabella 14 : Parametri reologici di input - Prova 17.</i>	
<i>Tabella 15 : Altezze dei ponti ottenute mediante le misurazioni.</i>	83
<i>Tabella 16 : Altezze massime raggiunte dal flusso in corrispondenza dei ponti.</i>	84
<i>Tabella 17 : Pressioni massime raggiunte dal flusso in corrispondenza dei ponti.</i>	85
<i>Tabella 18 : Dati geometrici Ponte 1.</i>	87
<i>Tabella 19 : Dati geometrici Ponte 2.</i>	89
<i>Tabella 20 : Dati geometrici Ponte 3.</i>	90
<i>Tabella 21 : Formula di D'Aubuisson applicata al Ponte 1.</i>	98
<i>Tabella 22 : Formula di Nagler applicata al Ponte 1.</i>	99
<i>Tabella 23 : Formula di Rehbock applicata al Ponte 1.</i>	99
<i>Tabella 24 : Formule di Yarnell e variante corretta applicate al Ponte 1.</i>	100
<i>Tabella 25 : Formula di Al-Nassri applicata al Ponte 1.</i>	101
<i>Tabella 26 : Valori di altezza massima del flusso ricavati tramite RAMMS e altezze effettive dei ponti.</i>	101
<i>Tabella 27 : Altezze massime per diverso grado di ostruzione in corrispondenza del Ponte 1.</i>	102
<i>Tabella 28 : Altezze massime per diverso grado di ostruzione in corrispondenza del Ponte 2.</i>	102

<i>Tabella 29 : Altezze massime per diverso grado di ostruzione in corrispondenza del Ponte 3.</i>	103
<i>Tabella 30 : Parametri impiegati - Area vasca.</i>	107
<i>Tabella 31 : Parametri impiegati - Area destra orografica.</i>	113
<i>Tabella 32 : Parametri impiegati - Area sinistra orografica.</i>	119
<i>Tabella 33 : Parametri impiegati - Area pineta.</i>	125
<i>Tabella 34 : Dati prova di taglio e calcolo massa volumica.</i>	139
<i>Tabella 35 : Valori di angolo di attrito e coesione ricavati dalla prova di taglio.</i>	139
<i>Tabella 36 : Valori di copertura adottati.</i>	141
<i>Tabella 37 : Valori di precipitazione totale (<math>i_{tot}</math>) e pioggia netta (<math>i_n</math>) associati ai tempi di ritorno considerati.</i>	153

---

# INTRODUZIONE

---

Il presente lavoro di tesi è dedicato allo studio di un fenomeno di colata detritica, avvenuto a Camasco, frazione del comune di Varallo in provincia di Vercelli, nella notte tra il 2 e il 3 Ottobre 2020.

Le colate detritiche sono eventi che possono essere caratterizzati da un elevato potenziale distruttivo, specie se localizzate in corrispondenza di aree urbanizzate o infrastrutture, e tipicamente di natura imprevedibile; ciò le rende fenomeni a cui dedicare la dovuta attenzione in termini di rischio e dissesto idrogeologico.

A tal proposito, complici anche i cambiamenti climatici che sempre più spesso interessano il nostro Paese, negli ultimi anni si è registrato un progressivo aumento di interesse su questi temi, proprio per via delle perdite in termini economici e di vite umane che accompagnano tali fenomeni.

Le cause alla base dei dissesti, per citarne alcune, vanno ricercate nel massiccio sfruttamento del suolo, con un'antropizzazione spesso incontrollata, a cui si aggiungono l'incuria e l'abbandono dei boschi, dei terreni agricoli e il crescente verificarsi di eventi atmosferici eccezionali, come quello di Ottobre 2020, con tempo di ritorno stimato intorno ai 200 anni.

Nonostante ciò, le caratteristiche peculiari unite all'imprevedibilità di tali fenomeni rendono estremamente difficile l'attuazione di piani di monitoraggio e, allo stesso modo, per la mancanza e l'impossibilità di ottenere dati affidabili, lo studio e la modellazione di simili dissesti risultano altrettanto complicati.

Uno dei principali aspetti di questo lavoro, quindi, ha riguardato la definizione di un modello di propagazione della colata che possa essere utilizzato a scopi previsionali.

Tale modello è stato costruito e tarato mediante analisi a ritroso dell'evento dell'Ottobre 2020.

Tramite i rilievi svolti nei giorni immediatamente successivi alla colata, i sopralluoghi effettuati (in particolare volti all'identificazione del volume di distacco, zona di arresto e superficie di erosione, alla valutazione dei danni indotti e delle altezze raggiunte dal flusso), e le testimonianze raccolte, è stato possibile definire i parametri reologici della colata.

Le analisi di propagazione sono state condotte mediante l'utilizzo del software RAMMS::DEBRISFLOW, programma specializzato nella simulazione di movimenti rapidi del terreno in ambiente alpino, che ha restituito valori massimi di altezza, velocità e pressione raggiunti dal flusso durante la propagazione, utili per

l'eventuale progettazione di futuri interventi di mitigazione e di protezione delle opere a valle, così come di eventuali piani di protezione civile da mettere in atto.

A tale scopo, perciò, il modello validato mediante analisi a ritroso è stato utilizzato per simulare ulteriori scenari di collasso considerando differenti probabili zone di distacco adiacenti a quella oggetto di studio.

Si è quindi proceduto allo studio dell'innescò del fenomeno, lavorando in ambiente GIS. L'innescò è stato correlato alle precipitazioni, in particolare le quantità di pioggia netta infiltrata, alla loro intensità e probabilità temporale di occorrenza.

Attraverso l'applicazione del modello di Montgomery & Dietrich e il criterio dell'equilibrio limite, è stato possibile determinare la quantità di pioggia critica  $q_{cr}$  che conduce il pendio all'instabilità; in base a questo dato si è proceduto con la valutazione del fattore di sicurezza e alla realizzazione di una rappresentazione cartografica della pericolosità per instabilità dei versanti, previa definizione delle aree potenzialmente instabili associate ai vari scenari piovosi.

Dai risultati ottenuti si può osservare come il ripetersi di eventi simili a quanto accaduto rappresenti tutt'altro che una remota possibilità e che altri fenomeni di colata possano interessare in modo anche più violento le frazioni di Corte e Camasco; le carte di pericolosità e il calcolo dei fattori di sicurezza, inoltre, pongono in evidenza l'importanza e l'influenza del valore di coesione assunto nei confronti della pioggia critica e della stabilità dei pendii, così come assume un ruolo determinante il tempo di ritorno considerato per la determinazione delle intensità di precipitazione.

Gli esiti delle analisi svolte costituiscono, quindi, un valido elemento su cui basare ulteriori approfondimenti nello studio dei fenomeni di instabilità per il bacino in esame o la determinazione di soglie di allerta per la popolazione.

La tesi è dunque suddivisa nei seguenti capitoli:

- **Capitolo 1.** dedicato alla classificazione delle più frequenti tipologie di instabilità che possono interessare un versante naturale, con particolare riferimento alle colate detritiche, oggetto delle analisi svolte;
- **Capitolo 2.** relativo al software RAMMS::DEBRISFLOW utilizzato per l'analisi a ritroso con descrizione dei parametri e delle procedure necessarie allo svolgimento di una simulazione;
- **Capitolo 3.** basato sull'inquadramento geografico e geologico dell'area in esame e sulla descrizione dell'evento del 2-3 Ottobre 2020, con particolare riferimento all'analisi meteorologica e gli effetti riscontrati al suolo;
- **Capitolo 4.** dedicato allo svolgimento dell'analisi a ritroso per la ricostruzione dell'evento, con approfondimento sui parametri adottati e presentazione dei

risultati ottenuti dalle simulazioni. Il capitolo si conclude con la validazione del modello scelto tramite considerazioni riguardo la verifica a traslazione dei ponti distrutti e un'analisi sull'ostruzione della sezione di deflusso;

- **Capitolo 5:** incentrato sulla simulazione di ulteriori scenari di collasso per probabili zone di distacco adiacenti a quella oggetto della back analysis sulla base del modello precedentemente validato;
- **Capitolo 6:** relativo allo studio sulle condizioni di innesco attraverso l'applicazione del modello di Montgomery & Dietrich (1994) in ambiente GIS, alla caratterizzazione dei parametri geotecnici, topografici e idrologici per la sua implementazione e al calcolo della pioggia critica e dei fattori di sicurezza per diversi scenari di pioggia e coesione, con elaborazione finale della carta di pericolosità per instabilità dei versanti per il bacino di Camasco.



---

# CAP. 1 – INSTABILITÀ DEI PENDII

---

Come primo passo di quest'analisi, ci si è posti il problema di classificare il collasso oggetto di esame; la corretta identificazione del fenomeno, infatti, influisce in modo radicale nella scelta delle metodologie e degli approcci pratici più consoni ed appropriati per lo studio e lo svolgimento delle analisi successive di cui si potrà leggere nei prossimi capitoli.

Nei paragrafi seguenti, invece, viene riportata una panoramica delle possibili tipologie di collasso che più frequentemente si manifestano sui pendii naturali, utile a introdurre, comprendere e meglio contestualizzare il lavoro svolto.

## 1.1 Instabilità dei pendii

Un pendio viene definito instabile quando soggetto a un movimento di volume di terreno o di roccia che si verifica lungo un versante per via della semplice forza di gravità o al regime delle acque superficiali e sotterranee.

La complessa natura dei fenomeni di instabilità e delle molteplici discipline associate allo studio di tali eventi, tuttavia, rende difficile dare una definizione univoca di questi movimenti, comunemente detti *frane*, con questo termine, infatti, vengono generalmente indicati i movimenti di terreno, roccia e materiali organici lungo un pendio per effetto della forza di gravità, nonché la morfologia finale del versante in seguito a tali dissesti (Highland, L.M., and Bobrowsky, P., 2008).

Nell'affrontare problemi legati all'instabilità dei pendii si rende quindi indispensabile una più accurata classificazione che viene sinteticamente riproposta in questo capitolo, con particolare riferimento alle dispense delle lezioni del corso di "*Slope stability and landslide risk mitigation*" tenuto dalla Prof.ssa Pirulli (Pirulli, 2021) e al testo "*The Landslide Handbook - A Guide to Understanding Landslides*" (Highland, L.M., and Bobrowsky, P., 2008).

Come accennato in precedenza, numerose sono le tipologie di eventi che possono innescarsi, altrettanto nutrito è il numero di autori e dei relativi tentativi di classificazione, principalmente basati su volume, stato di attività, velocità, materiali coinvolti e cinematismo.

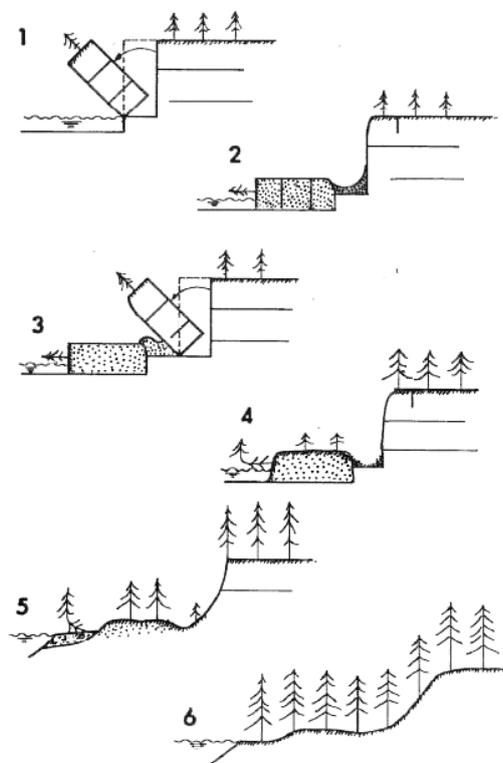
## 1.2 Stato di attività

Una prima distinzione può essere effettuata in base allo stato di attività della frana, osservando cioè all'andamento degli spostamenti nell'arco del tempo.

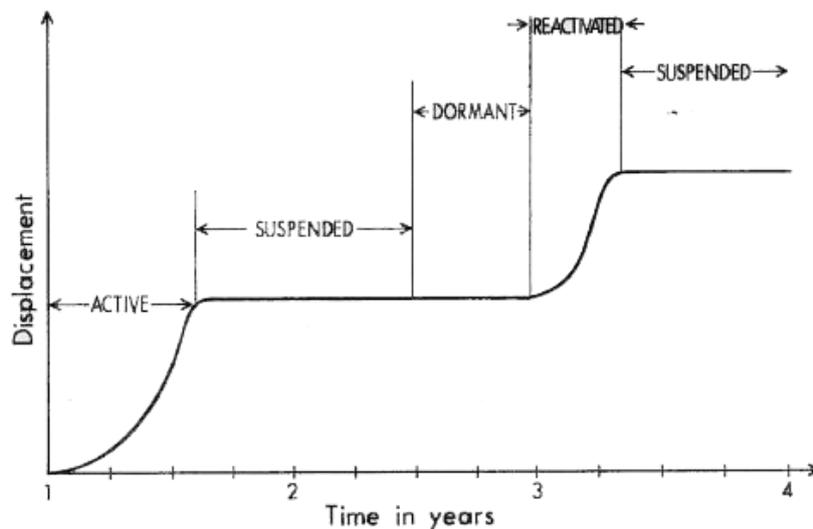
Si definiscono quindi:

- *frana attiva*: una frana attualmente in movimento;
- *frana riattivata*: una frana attiva dopo un periodo di inattività;
- *frana sospesa*: una frana in movimento nell'ultimo ciclo stagionale ma attualmente inattiva;
- *frana quiescente*: una frana al momento inattiva ma che potrebbe riattivarsi perché permangono le condizioni e le cause del movimento;
- *frana naturalmente stabilizzata*: una frana stabilizzata poiché sono venute meno le condizioni che ne determinavano l'instabilità;
- *frana artificialmente stabilizzata*: una frana stabilizzata per effetto di interventi di protezione;
- *frana relitta*: è una frana inattiva che si è sviluppata in condizioni climatiche e geomorfologiche diverse da quelle attuali.

Alcuni esempi sono riportati, nel caso di crollo per ribaltamento, in *Figura 1*, mentre una rappresentazione schematica dello stato di attività è riportata in *Figura 2*.



**Figura 1** : Sezioni soggette a crollo per ribaltamento con diversi stati di attività:  
1) Attiva; 2) Sospesa; 3) Riattivata; 4) Quiescente; 5) Naturalmente stabilizzata;  
6) Relitta. (Cruden & Varnes, 1996).



**Figura 2 :** Rappresentazione schematica dello stato di attività in funzione del tempo (Cruden & Varnes, 1996).

### 1.3 Volume

Un ulteriore criterio di suddivisione è, invece, quello proposto da (Fell R., 1994) e riportato in *Tabella 1*, basato sulla volumetria instabilizzata valutata sul volume della massa depositata; quest'ultimo è infatti diverso dal volume di innesco in quanto, a seguito del fenomeno di propagazione sul versante, intervengono sia un effetto di rigonfiamento per disarticolazione della massa, sia la raccolta di altro materiale anche per via della possibile erosione.

**Tabella 1:** Classificazione di Fell (Fell R., 1994).

Descrizione frana	Volume
<b>Estremamente grande</b>	$v > 5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
<b>Molto grande</b>	$v = (1 \div 5) \cdot 10^6 \text{ m}^3$
<b>Da media a grande</b>	$v = (2.5 \div 10) \cdot 10^5 \text{ m}^3$
<b>Media</b>	$v = (5 \div 25) \cdot 10^4 \text{ m}^3$
<b>Piccola</b>	$v = (5 \div 50) \cdot 10^3 \text{ m}^3$
<b>Molto piccola</b>	$v = (5 \div 50) \cdot 10^2 \text{ m}^3$
<b>Estremamente piccola</b>	$v < 5 \cdot 10^2 \text{ m}^3$

## 1.4 Velocità

Le possibili velocità a cui sono soggette le diverse tipologie di dissesto possono essere identificate a partire dalla tabella fornita in: "Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3 - Landslide types and processes." (Cruden & Varnes, 1996), riportata di seguito in *Figura 3*.

Velocity Class	Description	Velocity (mm/sec)	Typical Velocity	Probable Destructive Significance
7	Extremely Rapid	$5 \times 10^3$	5 m/sec	Catastrophe of major violence; buildings destroyed by impact of displaced material; many deaths; escape unlikely
6	Very Rapid	$5 \times 10^1$	3 m/min	Some lives lost; velocity too great to permit all persons to escape
5	Rapid	$5 \times 10^{-1}$	1.8 m/hr	Escape evacuation possible; structures, possessions, and equipment destroyed
4	Moderate	$5 \times 10^{-3}$	13 m/month	Some temporary and insensitive structures can be temporarily maintained
3	Slow	$5 \times 10^{-5}$	1.6 m/year	Remedial construction can be undertaken during movement; insensitive structures can be maintained with frequent maintenance work if total movement is not large during a particular acceleration phase
2	Very Slow	$5 \times 10^{-7}$	15 mm/year	Some permanent structures undamaged by movement
	Extremely SLOW			Imperceptible without instruments; construction <b>POSSIBLE WITH PRECAUTIONS</b>

**Figura 3:** Scala di velocità di eventi franosi. (Cruden & Varnes, 1996).

## 1.5 Classificazione dei movimenti di versante

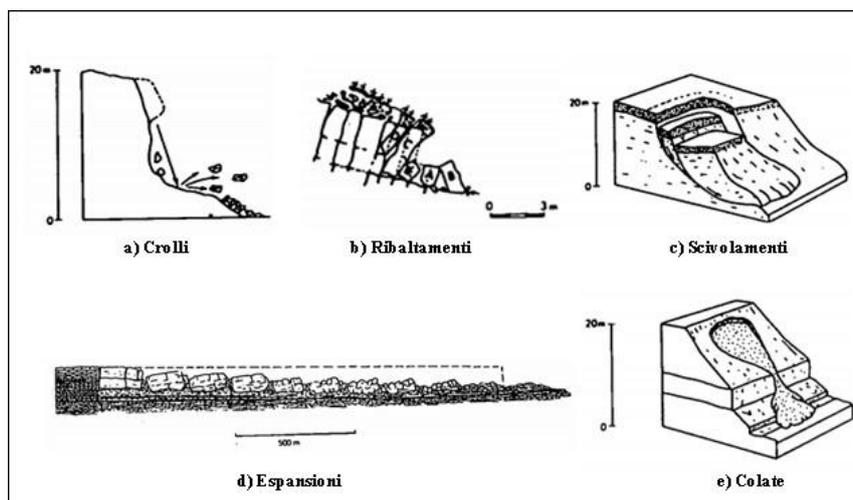
La descrizione tipologica si basa su una classificazione dei movimenti di versante, la più nota è quella che venne introdotta da Varnes (Varnes, 1978), dove il nome del singolo evento è dato dalla combinazione del tipo di movimento e del materiale coinvolto.

Tali fenomeni, pertanto, vengono distinti in base a:

- tipologia di movimento: crollo, ribaltamento, scivolamento, espansione, colata;
- tipologia di materiale: roccia, detrito (con prevalenza di componente a grana grossa, 20 ÷ 80% grana grossa con  $\phi > 2 \text{ mm}$ ), terreno (con prevalenza di componente a grana fine, > 80% grana grossa con  $\phi < 2 \text{ mm}$ ).

Bisogna inoltre specificare che non tutti i possibili accostamenti hanno la stessa probabilità di accadimento poiché, alcuni movimenti, sono prevalentemente legati a materiali rocciosi, altri invece sono caratteristici del terreno.

Le tipologie di movimento sopraesposte sono riportate in *Figura 4* mentre le possibili combinazioni sono riassunte nella *Tabella 2*.



**Figura 4:** Tipologie di movimento secondo la classificazione di (Varnes, 1978).

TIPO DI MOVIMENTO		TIPO DI MATERIALE		
		ROCCE	TERRENI GROSSOLANI	TERRENI FINI
CROLLI		Crolli di roccia	Crolli di detrito	Crolli di terra
RIBALTAMENTI		Ribalt. di roccia	Ribalt. di detrito	Ribalt. di terra
SCORRIMENTI	ROTAZIONALI	Scorr. rot. di roccia	Scorr. rot. di detrito	Scorr. rot. di terra
	TRASALATIVI	Scorr. trasl. di roccia	Scorr. trasl. di detrito	Scorr. trasl. di terra
ESPANDIMENTI LATERALI		Esp. lat. di roccia	Esp. lat. di detrito	Esp. lat. di terra
FLUSSI		Flussi di roccia	Flussi di detrito	Flussi di terra
F. COMPLESSE/ COMPOSITE		Combinazione di 2 o più tipi nello spazio e/o nel tempo		

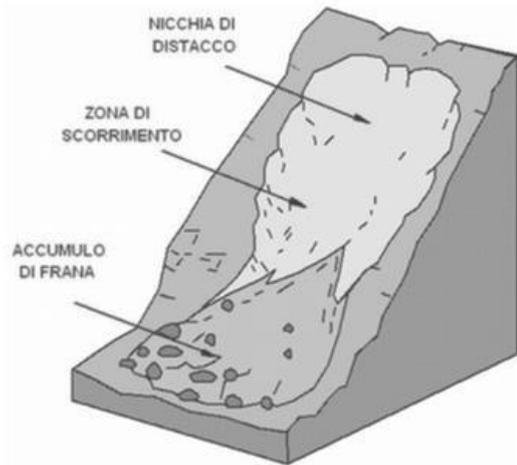
**Tabella 2:** Classificazione dei movimenti di (Varnes, 1978).

### 1.5.1 Tipologie di movimento

Prima di poter procedere nell'esaminare le diverse tipologie di movimento, è utile soffermarsi sulla definizione e sulla nomenclatura delle varie parti che compongono un corpo frana.

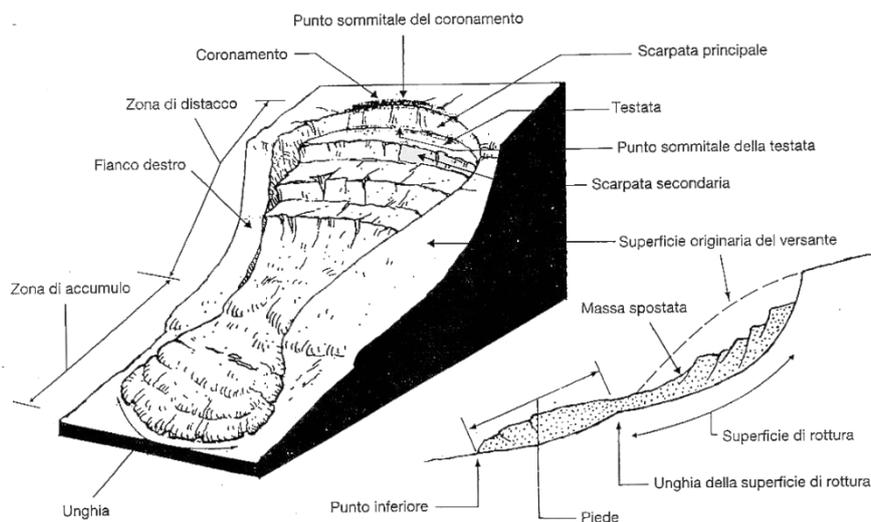
Sempre facendo riferimento a quanto proposto da Varnes nel 1978, come rappresentato in *Figura 5*, in una frana già avvenuta è possibile identificare una nicchia di distacco e una zona di accumulo, collegate tramite una zona detta di scorrimento o propagazione.

La **nicchia di distacco** o zona di innesco, caratterizzata tipicamente da elevate pendenze ( $>20^\circ$ ) e grande disponibilità di materiale, identifica la zona in cui si origina il fenomeno; la **zona di transito** o di propagazione, lunga e stretta con pendenze intermedie ( $10^\circ-15^\circ$ ), racchiude l'area interessata dal passaggio del materiale e, infine, la **zona di accumulo** o di deposito, caratterizzata da basse pendenze e forma lobata, che rappresenta la superficie in corrispondenza della quale avviene l'arresto del movimento e il conseguente accumulo del volume instabilizzato.



*Figura 5: Parti principali del corpo di frana (dal sito [www.protezionecivile.it](http://www.protezionecivile.it))*

Nell'ambito di ciascuna zona si possono poi individuare diversi elementi morfologici, come visibile nella *Figura 6*, sottostante.



*Figura 6: Schema di una frana rotazionale (Cruden & Varnes, 1996).*

Si riportano nei seguenti paragrafi le peculiarità associate alle principali combinazioni viste in precedenza relative alle diverse e più frequenti tipologie di cinematismo.

## 1.5.2 Frane da crollo (“Falls”)

Sono frane associate a all’instabilità di versanti in roccia o terreni cementati, con pendii estremamente ripidi o pareti subverticali, da cui avviene il distacco per gravità di una massa di materiale o blocchi che possono essere:

- singoli blocchi in roccia con volume  $< 1000 m^3$ ;
- crolli in massa, nel caso di distacchi di grosse dimensioni (volume  $> 1000 m^3$ ).

Il cinematismo che ne deriva prevede un ribaltamento o scivolamento iniziali, un volo e l’impatto contro il versante, seguiti poi da rimbalzi e/o rototraslazione; il fenomeno, inoltre, è caratterizzato da velocità decisamente elevate (150–200 km/h) motivo per cui è ad esso associata un elevato livello di pericolosità.

Nella modellazione del fenomeno è necessario definire la geometria del pendio, volume e forma del blocco, la sua litologia e la velocità all’istante iniziale, oltre che le caratteristiche del pendio e i parametri di interazione con il blocco che influiscono sulla quantità di energia dissipata; tutto ciò rende decisamente difficoltoso lo studio di questi eventi.

Cause predisponenti per il verificarsi del crollo sono la presenza di pareti in roccia denudate, prive cioè di copertura vegetale che può avere funzione stabilizzante, interessate da superfici di discontinuità che si sviluppano in risposta a tensioni dovute alla gravità, eventualmente con riempimenti argillosi di tipo rigonfiante, oppure lo scalzamento che si può manifestare alla base del pendio in seguito all’azione del moto ondoso o del vento dando origine a pareti strapiombanti.

Le cause scatenanti sono invece da ricercarsi nella pressione esercitata dall’acqua di infiltrazione sulle pareti delle fratture, nei cicli di gelo-disgelo che inducono stati tensionali, nell’azione degli apparati radicali degli alberi, nella variazione di stato tensionale indotto localmente da un sisma e, infine, nelle vibrazioni indotte dal transito di mezzi o da attività di natura antropica.

Il crollo si verifica una volta che, superato il punto di equilibrio, l'ammasso non è più in grado di autosostenersi; un esempio è riportato in *Figura 7*.



*Figura 7: Esempio di crollo di un blocco.*

### 1.5.3 Frane da ribaltamento (“Topples”)

Anche in questo caso il distacco interessa un singolo blocco a partire da una parete verticale, tuttavia, vengono distinti dal fenomeno dei crolli per via del meccanismo che li caratterizza.

I ribaltamenti avvengono quasi esclusivamente in roccia, in particolare quando le discontinuità sono disposte a reggipoggio con inclinazione prossima alla verticale. Questo particolare assetto geostrutturale determina la suddivisione dell'ammasso roccioso in blocchi snelli (aventi  $h > b$ ) nei quali la risultante della forza peso cade al di fuori della base di appoggio;

in generale, a seconda della geometria e dalle condizioni in situ, un blocco posto su un piano inclinato può essere interessato da due diversi meccanismi:

- ribaltamento attorno al punto di base;
- scorrimento lungo la base.

In entrambi i casi, il distacco di un singolo blocco può portare all'instabilizzazione di altri blocchi adiacenti, portando così ad un ribaltamento multiplo, con una serie di elementi che seguono lo stesso meccanismo.

Le cause alla base di questo fenomeno sono analoghe a quelle esposte in precedenza per le frane da crollo, tuttavia, il diverso orientamento delle discontinuità fa sì che avvenga prima il ribaltamento del distacco e non ci sia una fase di volo.

Un esempio è riportato nella *Figura 8* sottostante.



*Figura 8: Esempio di frana da ribaltamento.*

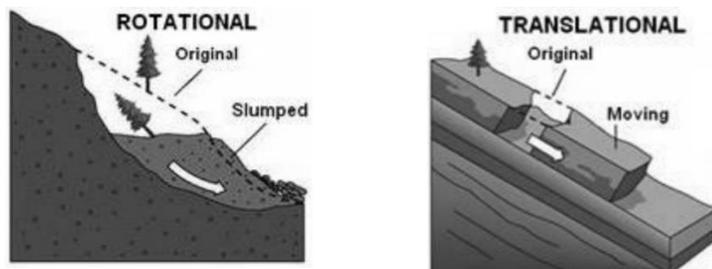
#### 1.5.4 Scivolamenti (“Slides”)

Questo tipo di frane è caratterizzato da uno scivolamento di materiale lungo una superficie ben definita che può essere piana o curva. Spesso si verificano in versanti costituiti da strati disposti a franappoggio, facenti parte di formazioni stratigrafiche eterogenee, che costituiscono una superficie di debolezza lungo la quale viene superata la resistenza al taglio.

Il movimento inizialmente non avviene coinvolgendo l'intera potenziale superficie di rottura ma il volume di materiale in movimento aumenta a partire da un'area di collasso localizzata.

La morfologia della superficie determina il tipo di movimento che può essere di traslazione (piana) o di rotazione (curva); come evidenziato dalla *Figura 9*, gli scivolamenti si dividono quindi in due categorie:

- Scivolamento rotazionale
- Scivolamento traslativo



*Figura 9: Tipologie di scivolamento.*

Lo **scivolamento rotazionale** (*Figura 10*) interessa tipicamente materiali a grana fine costituiti da un unico strato o più strati aventi caratteristiche simili.

Il fenomeno di rottura consiste in uno scorrimento di masse di terreno o roccia lungo una superficie di rottura curvilinea con concavità rivolta verso l'alto, con scarpate principali anche molto estese, ed è abitualmente caratterizzato da basse velocità.



*Figura 10 : Scivolamento rotazionale presso Oso slide, Stillaguamish River, Washington. (www.nbcnews.com).*

Lo *scivolamento traslativo* (*Figura 9a* destra), invece, interessa diversi materiali come roccia, terreno sciolto o detrito di versante; si genera lungo una superficie di debolezza formatasi per effetto di una eterogeneità nel terreno rappresentata ad esempio da una faglia, un giunto di fessurazione, un orizzonte debole, un limite tra roccia e detrito o tra strati con diversa composizione litologica.

Nel caso di versanti in roccia, la presenza di famiglie di discontinuità con diversa orientazione può dare origine a blocchi che, grazie a infiltrazioni d'acqua, radici o altro, superando la resistenza dei ponti di roccia residui, tendono a instabilizzarsi, generando così una superficie piana o a gradoni.

Non è sempre necessaria, però, la presenza di una superficie di debolezza dovuta a sistemi di discontinuità; come già scritto in precedenza può essere sufficiente anche solo uno strato avente scarse caratteristiche meccaniche.

Nel caso di pendii costituiti in prevalenza da terre, un esempio celebre può essere ritrovato nel caso delle Langhe, l'alternanza di arenarie e marne rappresenta una condizione favorevole per l'innescò del fenomeno.

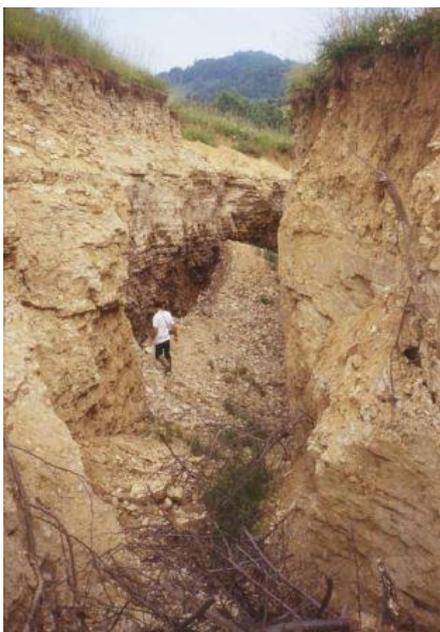
L'infiltrazione di acque meteoriche attraverso gli strati di arenarie, infatti, determina il rigonfiamento delle marne con la conseguente perdita di resistenza a scorrimento che, anche in caso di inclinazioni dell'ordine di  $10^\circ$ , può portare all'instabilizzazione (*Figura 11*).



**Figura 11:** Scivolamento traslativo nelle Langhe  
([www.regione.piemonte.it](http://www.regione.piemonte.it)).

Tipicamente questi eventi sono estremamente rapidi e coinvolgono la massa che durante lo scivolamento si mantiene intatta e tende a frammentarsi durante il movimento; nelle fasi iniziali, inoltre, essendo questo tipo di distacco frutto di un processo deformativo nel tempo, un importante segnale premonitore è dato dalla formazione di una frattura di trazione verticale aperta e profonda (*Figura 12*).

Anche nel caso degli scivolamenti, le principali cause collegate al fenomeno sono da ricercarsi tra eventi naturali come precipitazioni, sovraccarichi in sommità, azione sismica o scalzamento al piede o riconducibili ad attività antropiche come scavi e perdite di tubazioni.



**Figura 12:** Frattura di trazione  
nelle Langhe (Pirulli 2021).

### 1.5.5 Frane per espansione laterale (“lateral spreads”)

Fenomeno particolare in cui non vengono individuate superfici di scorrimento o zone di deformazione plastica ben definite; esse, infatti, si manifestano in presenza di un materiale rigido, ad esempio una massa rocciosa rigida e fratturata, adagiato su materiali caratterizzati da minore resistenza meccanica e maggiormente deformabili.

L’insorgere di deformazioni plastiche o di liquefazione nel terreno sottostante induce spostamenti differenziali nel materiale rigido soprastante che, per la maggior rigidità, risulterà via via più fessurato, seguendo così la geometria della base su cui appoggia, senza definire una vera e propria superficie di rottura; ne risulta un insieme di porzioni isolate distaccate dall’ammasso principale che subiscono movimenti differenziali prevalentemente in direzione orizzontale con velocità bassa o molto bassa.

Un esempio è riportato nella *Figura 13*.



**Figura 13:** *Danno per espansione laterale risultato del terremoto di Loma Prieta, California, USA, 1989n (Photograph by Steve Ellen, U.S. Geological Survey).*

### 1.5.6 Frane per colata (“flows”)

Le frane per colata sono caratterizzate tipicamente da dimensioni modeste ma rappresentano uno dei fenomeni di instabilità più rapido e imprevedibile tra tutti gli scenari visti finora.

Possono avvenire sia in ammassi rocciosi sia in terreno sciolto e originarsi a partire da una frana da scivolamento, soprattutto a causa di eventi piovosi molto intensi che ne provocano la saturazione e la conseguente movimentazione sotto forma di fluido viscoso.

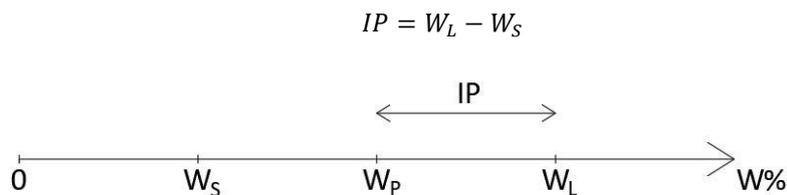
Coinvolgendo materiali a granulometria variabile presenti sul versante, non è dunque possibile identificare una nicchia di distacco; durante il moto, inoltre, il flusso tende a

incrementare il proprio volume raccogliendo e inglobando nuovo materiale tramite un processo di erosione e non è sempre libero di propagarsi in qualunque direzione.

A partire da pareti libere ed esposte in roccia, per effetto della stessa morfologia del versante, viene spesso convogliato, con continuo aumento di velocità e massa, in ripidi canali alla cui base si originano depositi tipici degli ambienti montani, detti *conoidi*.

Seguendo la classificazione proposta da Hungr (Hungr, 2021), in funzione del materiale, contenuto d'acqua, condizioni specifiche e velocità raggiunte si possono distinguere vari tipi di colata:

- *colata detritica ("debris flow")*: è costituita da materiale eterogeneo con diversa granulometria ma con componente grossolana prevalente e comportamento non coesivo, può raggiungere velocità elevate, anche oltre i 5-10 m/s;
- *colata di fango ("mud flow")*, è costituita da particelle di granulometria più fine con comportamento coesivo ma presenta la stessa dinamica dei debris flow; la distinzione tra i due fenomeni avviene in base alla tipologia di comportamento che è legato a un parametro, indice del comportamento plastico del terreno, detto indice di plasticità IP:



dove  $W_S$ ,  $W_P$  e  $W_L$  sono i limiti di Atterberg, cioè i valori limite del contenuto d'acqua ( $W$ ) per cui si verifica una transizione dello stato fisico del terreno. Valori tipici per *debris flow* corrispondono infatti a un  $IP < 5\%$  mentre per un *mud flow* si ha in genere  $IP > 5\%$ ;

- *colata di terra ("earth flow")*: è costituita da un ammasso di materiale fine grossolano che, saturo d'acqua, si muove come se fosse un corpo unico. Queste caratteristiche, a differenza delle colate di fango o detritiche, comportano basse velocità e limitate distanze di propagazione.

Visto il comportamento plastico e le basse velocità in gioco, queste caratteristiche si traducono in danni arrecati in modo preponderante agli edifici, mentre non si registrano perdite a livello di vite umane poiché si dispone del tempo necessario per procedere all'allontanamento o all'evacuazione.

Il fenomeno è distinto in funzione di un altro indice, detto indice di liquidità  $IL$ , definito come:

$$IL = \frac{W_n - W_P}{IP}$$

dove  $W_n$  è il contenuto di acqua naturale del terreno;

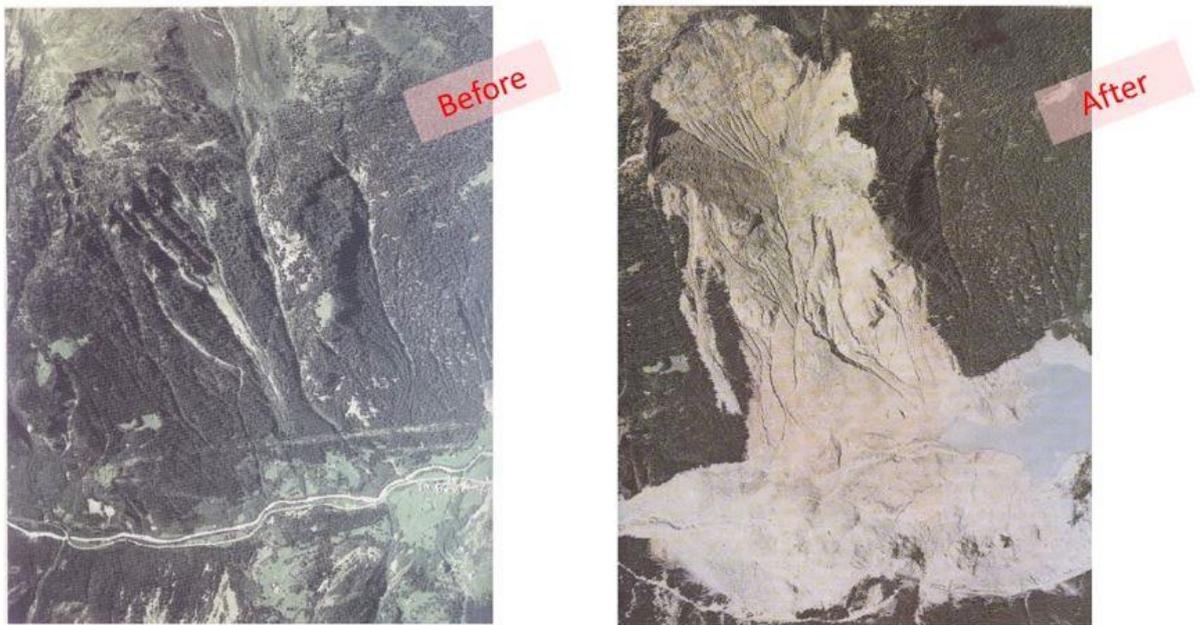
- se  $W_n \rightarrow W_L \Rightarrow IL > 0.5$  si parla *mud flow*,

- se invece  $W_n \rightarrow W_p \Rightarrow IL < 0.5$  e si parla *earth flow*.

Si parla poi di:

- *debris avalanche*: quando il fenomeno è caratterizzato da un flusso superficiale molto rapido di detrito saturo o parzialmente saturo che si propaga in versante aperto e non è quindi incanalato;
- *rock avalanche*: quando il fenomeno interessa materiale intatto durante la fase di innesco che si frattura successivamente durante la propagazione a causa di rotture di pendenza del versante, urti e così via.

Nelle figure seguenti, *Figura 14*, *Figura 15* e *Figura 16*, sono riportati alcuni esempi di frane per colata.



**Figura 14:** *Rock avalanche, Val Pola, 28 Luglio 1987 (Pirulli,2021).*



**Figura 15 :** Mud flow causato dal terremoto di El Salvador, Las Colinas, Santa Tecla (El Salvador, 13 January 2001) – (www.tumblr.net).



**Figura 16 :** Mud flow di Las Colinas, Santa Tecla (El Salvador, 13 January 2001) – (www.pinterest.it).

Ulteriori tipologie di dissesti e instabilità sono meno frequenti, ancor più sul territorio italiano, o di minor interesse per gli scopi del presente lavoro, tuttavia, vista l'eterogeneità e la numerosità degli eventi esposti, oltre che le disparate condizioni di stratigrafia, materiali e cause scatenanti che possono verificarsi, è bene specificare che non è sempre immediato ricondurre ciascun fenomeno a una precisa categoria.

Spesso, infatti, un evento potrebbe presentare le caratteristiche appartenenti a classi diverse o evolvere, nelle fasi successive all'innescò, secondo una tipologia differente rispetto al cinematisimo iniziale: in tutti questi casi, quando cioè non si può far riferimento ad una classe ben definita o gli eventi sono identificabili come unione in successione di classi diverse, si parla di *fenomeni complessi*.

A questo punto, fornito uno schema generale sulle tipologie principali dei fenomeni di instabilità, ci si è focalizzati sulla categoria dei *debris flow*, le cui caratteristiche sono approfondite nel paragrafo seguente, a cui è stato ricondotto il dissesto oggetto di analisi.

## 1.6 Colate detritiche

Esaminando i numerosi articoli presenti in letteratura, così come per le altre categorie di instabilità, si può notare come, nel tempo, si siano sviluppati disparati criteri e definizioni in merito a tale fenomeno, alcuni basati principalmente sulla tipologia di materiale coinvolto o sue proprietà, altri basati su parametri fisici come forze tangenziali agenti, velocità e così via.

Volendo dare una definizione più generale, facendo ancora una volta riferimento alla classificazione di Varnes, un *debris flow* può essere descritto come "una rapida o estremamente rapida ondata crescente di materiale detritico saturo all'interno di un ripido canale con un rilevante accrescimento della massa di acqua e materiale lungo il percorso" (Varnes, 2014).

Le colate detritiche, per via del loro volume, velocità e forze di impatto molto elevati, oltre che alla già menzionata imprevedibilità, sono perciò in grado di provocare danni ingenti a edifici e infrastrutture mettendo a rischio l'incolumità e la vita degli esseri umani, rappresentando quindi uno degli eventi franosi più pericolosi in ambiente montano.

Le tipiche zone di deposizione ai piedi dei canali, dette conoidi, grazie alla loro conformazione relativamente pianeggiante costituiscono infatti aree morfologicamente preferenziali e attrattive per lo sviluppo di attività legate all'economia, agricoltura o ad uso semplicemente abitativo, facendo aumentare in modo rilevante il rischio idrogeologico connesso a dissesti come le colate.

Come si può dedurre dalla definizione soprariportata gli elementi fondamentali affinché questo dissesto possa innescarsi sono la presenza di una rilevante quantità di detriti in precarie condizioni di instabilità, derivanti da fenomeni erosivi dei versanti o costituiti da materiale di deposizione derivante da un precedente evento franoso, e un consistente apporto idrico dovuto a piogge intense, scioglimento del manto nevoso o altri fattori ambientali.

A partire da una condizione di massa statica, l'innescamento avviene quindi grazie ad un ingente apporto di acqua per le ragioni già indicate, che, a seguito della saturazione del terreno e il conseguente incremento di pressioni interstiziali, causa la mobilitazione del materiale e la generazione del flusso.

Come si può leggere sulla pubblicazione di Pierson e Costa (Costa, 1987), ciascuna sostanza fisica soggetta a un carico applicato di entità sufficiente subirà delle deformazioni che, in caso siano di tipo irreversibile, vengono indicate come flusso.

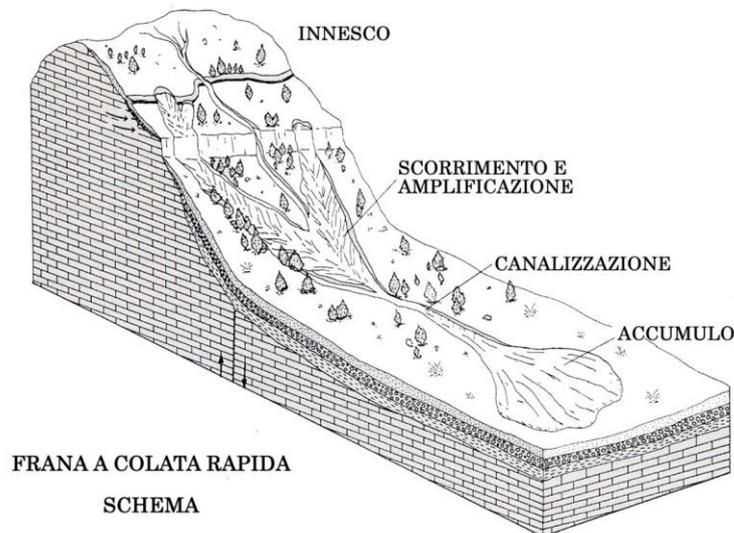
Analizzando quindi i processi macroscopici e idrologici che avvengono sulla superficie del terreno, il flusso può essere definito come una deformazione continua e irreversibile del materiale che avviene in risposta a un carico, nella maggior parte dei casi di interesse geotecnico costituito dalla forza di gravità, applicata sotto forma di sforzi di taglio.

L'aumento di pressione interstiziale causa, infatti, una riduzione delle tensioni efficaci e ciò comporta, a sua volta, una riduzione di resistenza al taglio che si traduce nella trasformazione della massa rigida in condizioni statiche iniziali in un fluido viscoso.

A questo punto, vinta la resistenza a taglio del terreno, il fluido procede verso valle con velocità che possono superare anche abbondantemente i 10 m/s accrescendo la sua massa grazie ai processi erosivi conseguenti al passaggio del flusso.

Il moto, come visto in precedenza, si svolge tipicamente all'interno di canali preesistenti lungo il versante e, al diminuire della pendenza, si conclude con una fase detta di deposizione che concorre alla formazione dei già citati conoidi e accumuli di

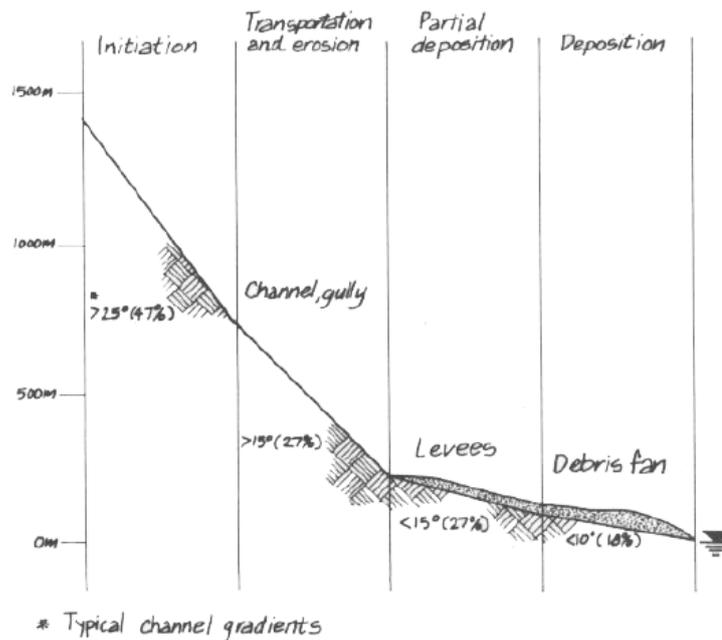
detriti di altezza variabile fino anche alla decina di metri; l'arresto del flusso è dovuto alla perdita di energia cinetica per via delle forze dissipative di tipo attritivo, turbolento e viscoso che verranno discusse nei paragrafi successivi.



*Figura 17: Schema del percorso di un debris flow.*

Il percorso interessato dal *debris flow*, mostrato schematicamente in *Figura 17* e *Figura 18*, può essere essenzialmente diviso in tre zone distinte (Van Dine, 1996):

- la *zona di innesco (triggering)*: caratterizzata da elevate pendenze ( $> 25^\circ$ ) con scarsa presenza o totale assenza di vegetazione e con prevalenza di fenomeni erosivi;
- la zona intermedia detta *zona di propagazione* o trasporto (*runout*): caratterizzata da pendenze superiori ai  $15^\circ$ , è la zona in cui avviene lo scorrimento della colata e dove erosione e deposizione sono all'incirca bilanciate. È generalmente costituita da un canale con presenza di vegetazione più o meno abbondante in funzione dello stato di attività del conoide ma tipicamente scarsa.
- *l'area di deposito*: è la zona più a valle in cui i processi di deposizione prevalgono su quelli erosivi. È caratterizzata da basse pendenze (dell'ordine dei  $3^\circ$ - $15^\circ$ ) con copertura vegetale alternata ad accumuli recenti.



**Figura 18:** Tipici valori di pendenza e distinzione delle varie zone secondo Van Dine (Van Dine, 1996).

## 1.7 Caratteristiche del flusso

Come accennato in precedenza, negli ultimi anni l'aumento di eventi piovosi eccezionali, strettamente legati ai cambiamenti climatici che stanno avendo un impatto sempre maggiore sulla vita di tutti i giorni, ha portato ad una crescente attenzione nei confronti dei dissesti di tipo idrogeologico proprio a causa dei danni che possono provocare.

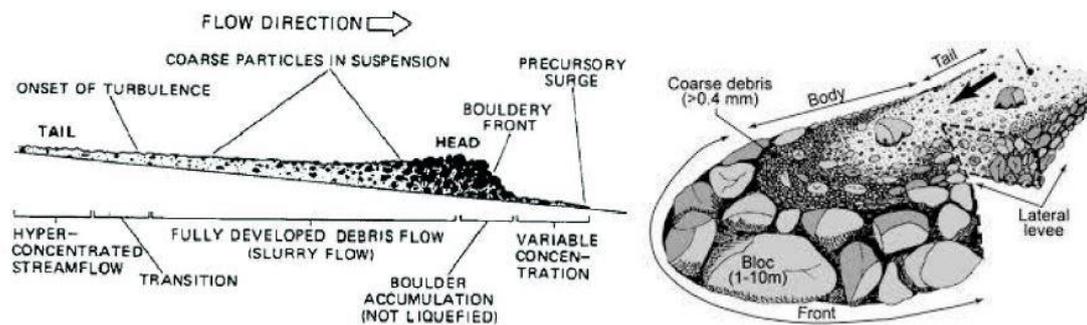
Grazie ai progressi tecnologici che hanno portato a grandi innovazioni in ogni campo, sono state via via sviluppate tecniche di misura e monitoraggio sempre più precise e accurate; nonostante ciò, la notevole entità delle colate detritiche, unita alla loro imprevedibilità, ha reso finora molto difficile disporre di dati dettagliati su questi fenomeni.

La conoscenza di questi ultimi, quindi, si è sempre basata principalmente e inevitabilmente su informazioni di tipo qualitativo raccolte sul campo o su assunzioni fatte a posteriori di un evento già verificatosi; tuttavia, grazie allo sviluppo di modelli sempre più precisi e alla possibilità di svolgere simulazioni anche di tipo numerico è possibile determinare i parametri fondamentali che rappresentano le caratteristiche del flusso.

Analizzando più accuratamente il flusso si osserva come questo sia, in realtà, costituito da una serie di ondate successive non uniformi, dovute al temporaneo

sbarramento dei detriti, per effetto dell'attrito lungo versante o alla morfologia, e al loro successivo sfondamento.

L'ondata di piena è solitamente anticipata da una miscela fluida detta "*precursory surge*" che precede il fronte vero e proprio; quest'ultimo è generalmente la parte più alta e trasporta i detriti più grandi che la colata incontra lungo il suo percorso, come massi ed alberi abbattuti. Successivamente la colata subisce una riduzione graduale fino a formare un flusso fangoso, più liquido e turbolento, con un'elevata concentrazione di sedimenti sospesi, ma senza massi (*Figura 19*).



**Figura 19:** Rappresentazione schematica di un debris flow (Pierson e Costa, 1987) a sx e (Bardou, 2003) a dx.

La sezione caratteristica di un *debris flow* in movimento, pertanto, può essere suddivisa in diverse zone:

- un fronte: parzialmente saturo, dove si concentrano i sedimenti con granulometria maggiore e legname, caratterizzato da altezze superiori rispetto alle zone successive;
- una zona centrale, detta corpo: più eterogenea a livello granulometrico, costituita dal fluido viscoso e da materiale grossolano (ghiaia, ciottoli, blocchi);
- una coda: zona più sottile in cui le concentrazioni solide sono notevolmente ridotte.

I detriti trasportati dal fronte d'onda, che per le loro notevoli dimensioni tenderebbero ad affondare, rimangono in realtà sospesi a causa di diversi meccanismi che caratterizzano il flusso.

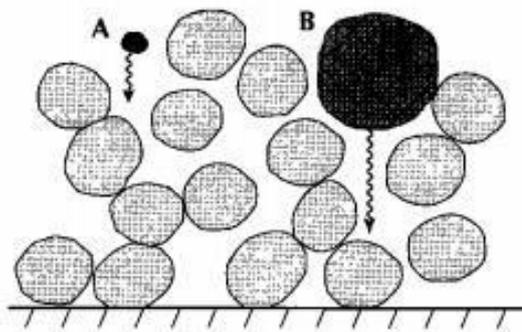
Uno dei contributi fondamentali si può ricondurre alla forza di galleggiamento, determinata dalla differenza di densità del solido immerso e quella del fluido, unita a un incremento di pressione interstiziale dovuto al parziale trasferimento del peso delle particelle solide al fluido; questo provoca, però, un'ulteriore riduzione della resistenza a taglio e di conseguenza un aumento della mobilità della colata.

Un ulteriore contributo, dimostrato sperimentalmente da Bagnold (1954), è relativo a un meccanismo attribuibile alla cosiddetta *dispersive force*; quest'ultima è il risultato degli impulsi legati alle interazioni che si verificano quando una grande quantità di detriti

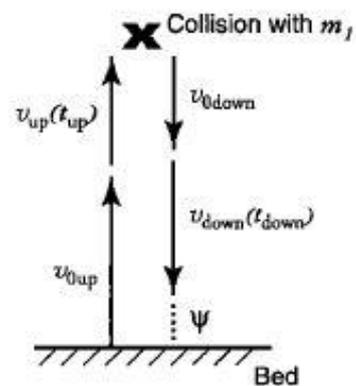
scarsamente ordinati viene investita da un flusso, le particelle più grandi tendono quindi a spostarsi verso la superficie libera a causa delle collisione a cui sono soggette. La *dispersive force* di una particella risulta proporzionale al quadrato del suo diametro, perciò essa agisce maggiormente sulle particelle più grandi, allontanandole così dal fondo del canale.

Un ultimo contributo è riconducibile ad un supporto strutturale dovuto allo scheletro solido formato dalle particelle a contatto con il letto del canale; considerando però la variazione della distribuzione granulometrica e la frazione solida per effetto dell'erosione del fondo, degli argini e alla deposizione laterale di materiale, questa intelaiatura contribuisce maggiormente alla sospensione dei massi in condizioni statiche, ovvero nei depositi di detriti, mentre in condizioni dinamiche tale effetto sarà minore e la sospensione viene garantita per lo più dalla dispersive force e dalla forza di galleggiamento.

Una rappresentazione schematica di quanto descritto è data nelle immagini seguenti, *Figura 20* e *Figura 21*.



**Figura 20:** Schema rappresentante la differenza tra una particella di piccole dimensioni che rimane sospesa esclusivamente per effetto della viscosità e può essere considerata parte del fluido (A) e un granulo di grandi dimensioni che necessita invece dell'interazione con altre particelle (B), (Iverson, 1997).



**Figura 21:** rappresentazione grafica delle velocità relative di una particella  $m_2$  durante un ciclo di moto in direzione verticale (Iverson, 1997).

Uno dei parametri fondamentali per determinare il comportamento reologico di una colata detritica è la densità; i *debris flow*, infatti, essendo composti da una miscela di acqua e detriti, possono essere considerati, ai fini delle analisi, come un fluido viscoso monofase con valori tipici di viscosità che variano da  $1$  a  $8 \cdot 10^3$  *Poise*, rispetto all'acqua a  $20$  °C che assume un valore di  $0.01$  *Poise*.

All'aumentare della concentrazione dei sedimenti corrisponde quindi una variazione delle proprietà del flusso, con una diminuzione della velocità di sedimentazione delle particelle e conseguente aumento della densità.

In una colata detritica la componente solida può costituire fino al 90% della massa totale, mentre l'acqua può essere presente in piccole percentuali: valori medi di densità ricadono, perciò, nell'intorno di **1.80 – 2.30 g/cm<sup>3</sup>**.

Questi parametri influiscono direttamente anche sulla velocità che il *debris flow* riesce a raggiungere.

Quest'ultima, infatti, risulta influenzata in particolar modo dalle caratteristiche dei detriti, dalla loro concentrazione e dalla loro dimensione oltre che dalle caratteristiche geometriche del canale, come forma, pendenza, larghezza e sinuosità; la presenza di argilla, inoltre, riduce notevolmente la permeabilità con un incremento della pressione interstiziale e di conseguenza della mobilità del flusso. I valori osservati e raccolti in letteratura indicano velocità che variano da 0.5 m/s a circa 20 m/s.

Un'alta concentrazione di sedimenti, infine, contribuisce all'aumento della resistenza totale al taglio del flusso con un incremento della componente coesiva, dovuto alle particelle di granulometria fine, e l'attrito interno legato alle componenti grossolane.

In corrispondenza di aree a bassa pendenza, con la riduzione delle forze taglienti superate, di conseguenza, dall'aumento della resistenza, si verifica l'arresto del fluido con i massi più grandi che vengono spostati verso i margini a formare uno sbarramento che impedisce e blocca il moto dei detriti più fini.

La deposizione e la diffusione laterale della colata comportano perciò una riduzione dello spessore del flusso fino ad un valore limite al di sotto del quale il moto tende inevitabilmente a fermarsi; l'arresto è inoltre favorito dalla diminuzione di acqua nei pori che causa un aumento dell'attrito interno tra le particelle.

Come riportato da (Van Dine, 1996), quando i detriti soggetti ad una colata canalizzata si arrestano, la zona di deposizione può assumere diverse forme a seconda della tipologia dei detriti e dalla presenza o meno di impedimenti di tipo naturale e/o artificiale; queste, come rappresentato in *Figura 22*, includono:

- strati sottili o lobi sulla superficie del conoide, solitamente caratterizzati da un certo numero di lingue aventi ciascuna un proprio fronte e spessori variabili tra 1 o 2 m.
- deposizione di detriti che tipicamente ostruiscono parzialmente o completamente il letto del canale; nel primo caso, di ostruzione parziale, sono solitamente depositati lungo le pareti, nel secondo, quando si ha cioè ostruzione totale, terminano anch'essi in un lobo o un fronte confinato. La formazione di una ostruzione del canale comporta tipicamente un brusco cambio di direzione del flusso.
- argini detritici lungo il canale con altezze anche di diversi metri; si trovano all'esterno di canali preesistenti e si estendono anche per decine di metri.

La formazione del conoide, somma delle successive deposizioni, avviene tipicamente su una superficie libera costituita da terreno; qualora il flusso sfociasse in un bacino più

ampio, un lago o in mare potrebbe, invece, essere depositato sott'acqua, generando un cosiddetto *subaqueous debris flow*.

A prescindere dalla forma dei depositi, questi sono tipicamente costituiti da materiale a grana grossa, da scarsamente a molto scarsamente stratificati e molto scarsamente ordinati.

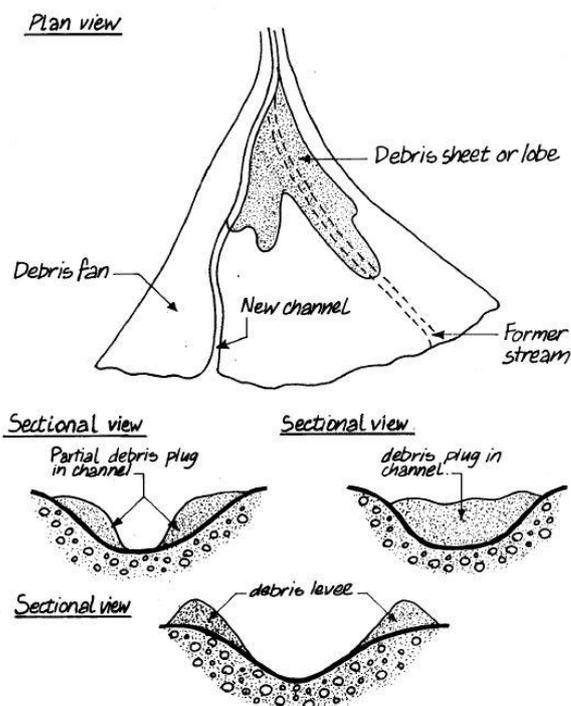


Figura 22: Tipologie di depositi (Van Dine, 1996).

Un riassunto dei valori assunti dalle proprietà caratteristiche di un *debris flow* è riportato in Figura 23.

Property and Unit	Symbol	Typical Values
<i>Solid Grain Properties</i>		
Mass density, kg/m <sup>3</sup>	$\rho_s$	2500–3000
Mean diameter, m	$\delta$	10 <sup>-5</sup> –10
Friction angle, deg	$\phi_g$	25–45
Restitution coefficient	$e$	0.1–0.5
<i>Pore Fluid Properties</i>		
Mass density, kg/m <sup>3</sup>	$\rho_f$	1000–1200
Viscosity, Pa s	$\mu$	0.001–0.1
<i>Mixture Properties</i>		
Solid volume fraction	$v_s$	0.4–0.8
Fluid volume fraction	$v_f$	0.2–0.6
Hydraulic permeability, m <sup>2</sup>	$k$	10 <sup>-13</sup> –10 <sup>-9</sup>
Hydraulic conductivity, m/s	$K$	10 <sup>-7</sup> –10 <sup>-2</sup>
Compressive stiffness, Pa	$E$	10 <sup>3</sup> –10 <sup>5</sup>
Friction angle, deg	$\phi$	25–45

Figura 23: Valori tipici dei parametri di base di un *debris flow* (Iverson, 1997).

## 1.8 Previsione dell'evoluzione ("runout")

Uno degli aspetti più rilevanti a livello ingegneristico nello studio dei fenomeni franosi è la cosiddetta previsione dell'evoluzione, ovvero la previsione dell'area colpita in seguito all'innescò di un fenomeno di instabilità in termini di distanza di propagazione o dei limiti di espansione del materiale coinvolto. Partendo da ipotesi o valori noti di volumetria e cinematico, obiettivo di questa analisi è il calcolo dell'area impattata dalla massa, le velocità e le altezze raggiunte dal materiale.

Questa fase risulta essere imprescindibile per qualsiasi tipo di valutazione e/o progettazione inerente a interventi di protezione attiva o passiva, nonché nella progettazione di eventuali sistemi di protezione civile per la salvaguardia della vita. In riferimento a quanto visto durante il corso di "Stabilità dei pendii" tenuto dalla prof.ssa Pirulli, lo svolgimento di questa analisi può svolgersi secondo diversi approcci o modelli proposti in letteratura, caratterizzati da complessità e grado di approssimazione diversi, di seguito elencati:

- approcci empirici;
- approcci analitici;
- approcci numerici.

Tra questi approcci, quelli empirici e analitici sono sicuramente i più semplici e risultano ormai superati in quanto analizzano una sola sezione tralasciando quindi la propagazione laterale ma permettono, ancora oggi, di ottenere una prima stima delle grandezze in gioco e di ricavare una soluzione approssimata del problema.

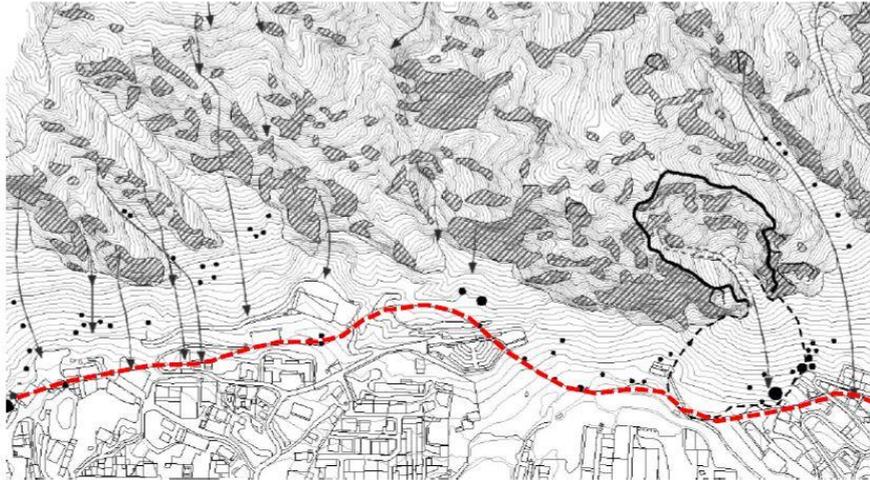
### 1.8.1 Modelli empirici

Tra i modelli empirici si possono distinguere due diverse metodologie: il metodo *geomorfologico* e quello *geometrico*.

Il primo consiste nell'analisi di una specifica zona mediante sopralluoghi e interpretazione di riprese aeree, cartografia tecnica e immagini satellitari, identificando così, a partire da dati relativi ad eventi già avvenuti, le zone di distacco, propagazione e deposito; queste informazioni consentono, a questo punto, di tracciare la linea di massima distanza. partendo quindi dall'ipotesi

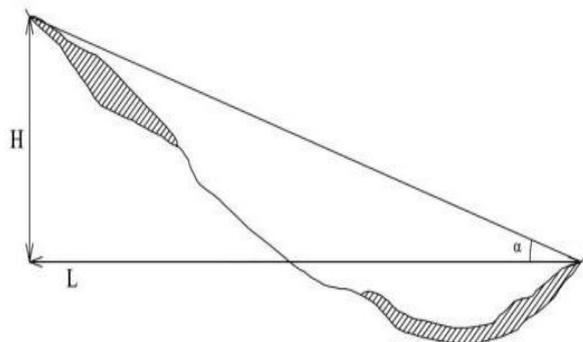
Il sistema appena descritto risulta rapido e di semplice applicazione; tuttavia, si basa sull'assunzione piuttosto forte secondo la quale la linea così ottenuta non possa essere superata da successivi eventi e cioè che l'evento più critico si sia già verificato; inoltre, il risultato così ottenuto è estremamente specifico e non generalizzabile a zone o eventi diversi.

Un esempio di quanto detto finora è riportato nella *Figura 24*.



**Figura 24:** Esempio di linea di massima pendenza per fenomeno di caduta massi (Pirulli, 2021).

Anche l'approccio geometrico, così come il precedente, è basato sullo studio di fenomeni già avvenuti; esso è infatti basato sulla costruzione di un database di eventi passati di cui è stato effettuato il rilievo e dei quali si conoscono i parametri principali come posizione, data, stima del volume coinvolto, zona di innesco, massima distanza percorsa dalla massa su un piano orizzontale (L) e distanza in direzione verticale (H), come da schema in *Figura 25*.

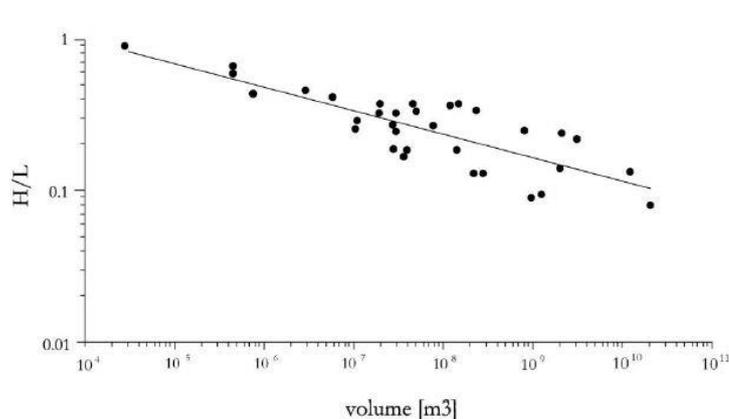


**Figura 25:** Caratteristiche geometriche di un dissesto (Pirulli, 2021).

L'angolo  $\alpha$  è detto "travel angle" e sarà quindi definito come il rapporto tra la massima altezza di caduta e la massima elongazione:

$$\alpha = \tan^{-1} H/L$$

Questo parametro è fondamentale al fine di utilizzare i dati a scopo previsionale: è possibile, infatti, rappresentando i dati geometrici in scala logaritmica, ricavare una legge di correlazione di tipo lineare, come dallo schema riportato in *Figura 26*:



$$\log \frac{H}{L} = a \cdot \log V + b$$

**Figura 26** : Esempio di relazione lineare tra parametri geometrici (Pirulli, 2021).

L'equazione così ottenuta sarà funzione dei casi considerati e rifletterà le loro caratteristiche, motivo per cui dev'essere utilizzata con cautela e solo per fenomeni simili a quelli impiegati per ricavare la legge che si intende applicare.

Alcune di queste formulazioni sono già presenti in letteratura e consentono di effettuare una stima della massima distanza di propagazione a partire da dati noti; i coefficienti differiscono proprio a causa dei diversi campioni di eventi di partenza.

A titolo esemplificativo si riportano le seguenti formulazioni:

- Corominas (1996), basata sullo studio di 71 casi avvenuti:

$$L = 1.03 \cdot V \cdot 0.105 \cdot H$$

- Rickenmann (1999) formulata sulla base di 106 casi:

$$L = 1.9 \cdot V \cdot 0.16 \cdot H^{0.83}$$

## 1.8.2 Modelli analitici

Gli approcci **analitici** consentono di ottenere un risultato finale mediante un processo ben definito e di calcolo matematico; uno dei metodi sicuramente più utilizzati è quello della cosiddetta *lumped mass*.

Questo modello, che idealizza il moto della massa come quello relativo al corrispondente baricentro, perdendo quindi l'informazione volumetrica, è basato su

un'analisi energetica al variare delle posizioni assunte dalla massa oggetto di studio a partire dalla zona d'innescio fino al raggiungimento dell'area di deposito.

Definito un piano di riferimento con quota nulla in corrispondenza del deposito, come mostrato in *Figura 27*, grazie alla fisica classica è possibile ricavare i contributi energetici associati alla massa.

Si avrà quindi che all'istante iniziale  $t = 0$ , prima del distacco, la massa posta ad altezza  $h$  sarà dotata di sola energia potenziale che definisce l'energia totale:

$$E_p = mgh;$$

Al procedere della massa lungo la superficie di ascissa curvilinea  $l$ , per ogni istante di tempo  $t$ , l'energia potenziale sarà data dal nuovo valore di quota raggiunto  $h'$ ; per effetto del movimento in atto, considerando la congiungente tra punto iniziale e punto finale, si avranno inoltre:

- un contributo legato all'*energia cinetica*:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot mv^2;$$

che rappresenta la distanza tra il profilo dell' $E_p$  e la congiungente;

- un contributo legato all'*energia dissipata* per effetto dell'attrito con la superficie che si oppone al moto, prodotto della forza di taglio per lo spostamento  $l$  dato dall'ascissa curvilinea:

$$E_{diss} = mg \cdot \cos \theta \tan \varphi_a \cdot l$$

con  $\theta$  angolo sull'orizzontale del tratto considerato e

$\varphi_a$  angolo di attrito apparente;

che rappresenta la distanza tra la congiungente e la linea di energia totale.

1.1 L'energia totale per ogni istante di tempo  $t$  è infine data da:

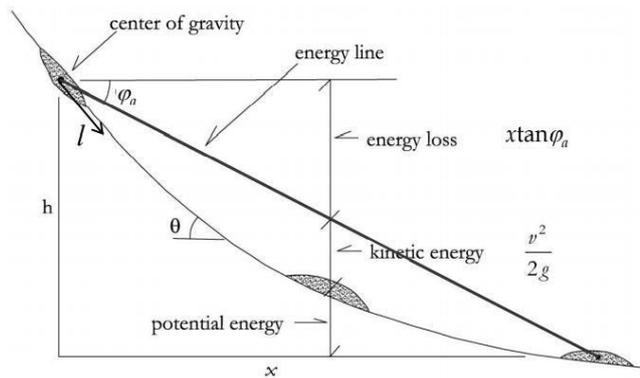
$$E_{tot} = E_p + E_c + E_{diss}$$

ed è nulla in corrispondenza del punto finale di deposizione.

L'angolo di attrito apparente,  $\varphi_a$ , è così definito poiché riferito a una massa in condizioni dinamiche, costituita non da un blocco rigido ma da acqua e particelle di diversi materiali e varia pezzatura, e differisce dall'angolo di attrito determinabile attraverso prove di laboratorio.

Questo valore pertanto risulta essere un parametro globale che tiene in conto l'eterogeneità della massa e fornisce una indicazione media sul comportamento del materiale; non può inoltre essere ricavato in laboratorio per l'impossibilità di ricostruire una massa identica a quella in situ per materiali ed effetto scala.

L'unico modo per determinare questo valore è fare riferimento a dati storici, calibrando i parametri tramite un'analisi a ritroso.



**Figura 27:** Contributi energetici e schema geometrico del modello analitico lumped mass (Pirulli, 2021).

Una volta definito  $\varphi_a$ , noto il baricentro al momento del distacco, è possibile tracciare la linea di energia e definire la massima distanza di propagazione dalla sua intersezione con la topografia del versante, determinando così la posizione del punto distale e l'elongazione.

Come il precedente, anche questo tipo di approccio presenta notevoli limitazioni poiché, oltre alla già menzionata perdita di informazioni riguardante la propagazione spaziale e la volumetria, si ignora il comportamento meccanico racchiuso nel parametro  $\varphi_a$ .

### 1.8.3 Modelli numerici

L'ultimo approccio analizzato è quello basato su **modelli numerici** e rappresenta la soluzione più recente, completa e affidabile per previsione dell'evoluzione.

Questa analisi prevede il ricorso a un modello, ovvero una rappresentazione della realtà attraverso ipotesi di base atte a fornirne una semplificazione; affinché il modello sia efficace esso "non deve essere perfetto e completo: deve soltanto essere adeguato allo scopo" (Jing, 2003).

La prima ipotesi di base riguarda la modellazione della massa eterogenea, che può essere schematizzata secondo due modelli differenti:

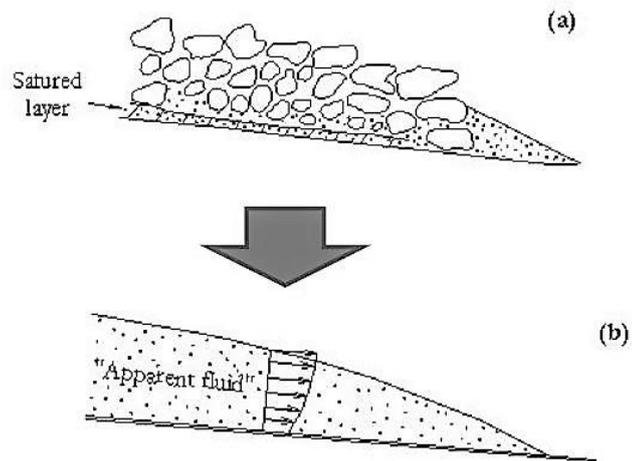
- modello discontinuo: prevede la modellazione delle singole particelle, definendone forma, dimensioni e proprietà e ne analizza le interazioni. Per far sì che tale modello risulti rappresentativo, deve essere soggetto a calibrazione;
- modello continuo equivalente: non presenta la necessità di definire le particelle e le interazioni tra di esse ma richiede la definizione delle caratteristiche del materiale.

Per via di questi aspetti, la modellazione tramite modelli discontinui è riservata quasi esclusivamente a scopi di ricerca.

Viste le semplificazioni e l'interesse rivolto principalmente al comportamento globale della massa (di cui si vogliono conoscere velocità, spessori, ecc.) e non a quello delle singole particelle, si è soliti impiegare il modello del continuo equivalente.

Quest'ultimo si presta bene alle suddette analisi e, inoltre, risulta essere più leggero in termini di tempo computazionale.

L'analisi del fenomeno di flusso, quindi, viene svolta tipicamente secondo un approccio del continuo equivalente di tipo monofasico: la massa eterogenea reale viene trattata come un unico mezzo continuo tramite parametri che comprendono anche l'effetto dell'acqua, con entrambe le fasi presenti in ogni punto, come rappresentato in *Figura 28*; questo consente l'impiego delle equazioni di equilibrio.



**Figura 28:** Trasformazione da una massa di materiale eterogeneo a un continuo equivalente monofasico (Pirulli, 2021).

Partendo dall'equazione di conservazione della massa e dall'equazione della conservazione della quantità di moto, sotto le seguenti ipotesi semplificative:

- massa incomprimibile cioè densità  $\rho = \text{costante}$ ;
- flusso allungato, ovvero spessore medio durante la fase dinamica ( $H$ ) molto minore rispetto alla lunghezza  $L$ :

$$\frac{H}{L} \ll 1$$

In questo ciò che avviene nello spessore diventa trascurabile, integrando sullo spessore e considerando costante pari al valore medio il profilo di velocità;

- assenza di componente normale della velocità rispetto al versante:

$$\hat{v} \cdot \hat{n} = 0$$

ciò significa che la massa non salta ma fluisce lungo la superficie;

Così facendo si arriva a scrivere un sistema di equazioni, riportato di seguito per completezza, che si riduce a tre equazioni: due equazioni conservazione della quantità di moto e una di bilancio di cui è omessa la dimostrazione.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dh}{dt} + \frac{d\hat{v}_x h}{dx} + \frac{d\hat{v}_y h}{dy} = 0 \\ \rho \cdot \left( \frac{d\hat{v}_x h}{dt} + \frac{d(\hat{v}_x^2 h)}{dx} + \frac{d(\hat{v}_x \hat{v}_y h)}{dy} \right) = -\frac{d(\hat{\sigma}_{xx} h)}{dx} + T_x + \rho g_x h \\ \rho \cdot \left( \frac{d\hat{v}_y h}{dt} + \frac{d(\hat{v}_x \hat{v}_y h)}{dx} + \frac{d(\hat{v}_y^2 h)}{dy} \right) = -\frac{d(\hat{\sigma}_{yy} h)}{dy} + T_y + \rho g_y h \end{array} \right.$$

in cui  $T_x$  e  $T_y$  rappresentano l'integrale delle tensioni sullo spessore.

Per poter risolvere il sistema è, perciò, necessario introdurre le equazioni costitutive, ossia le leggi reologiche che descrivono le proprietà fisiche dei fluidi.

Queste sono direttamente correlate alla dissipazione di energia che in generale è dovuta a:

- *attrito di base;*
- *impatto tra gli elementi;*
- *scorrimento tra le particelle.*

Tuttavia, in un continuo equivalente non si hanno particelle distinte per cui, l'unica dissipazione possibile è quella dovuta al contatto tra la massa del fluido e la superficie di scorrimento, mentre gli altri contributi sono considerati indirettamente come quota aggiuntiva.

I termini  $T_x$  e  $T_y$ , infine, possono essere rappresentati come:

$$T_i = -r \cdot \frac{v_i}{\|v\|} \quad i = x, y$$

con il segno ( $-$ ) ad indicare che la resistenza al moto ha segno opposto rispetto al vettore velocità mentre il modulo ( $r$ ) è definito in funzione del modello reologico che permette di stimare l'evoluzione del moto e il conseguente runout; in letteratura si possono trovare numerosi modelli, di cui si riportano di seguito soltanto i più famosi ed essenziali.

## 1.8.4 Modello attritivo

È il modello più semplice tra quelli proposti e assume che la dissipazione di energia avvenga solamente alla base a causa dell'attrito tra la superficie di scorrimento e la massa, assimilandola di fatto ad un corpo rigido che scorre sulla superficie.

La formulazione viene espressa tramite il *criterio di Coulomb* e risulta essere:

$$r = \sigma_n \tan \varphi_a = \rho g h \cos \theta \tan \varphi_a$$

dove  $\sigma_n$  identifica la componente normale alla base della forza peso mentre  $\varphi_a$  è l'angolo di attrito equivalente, valore medio che tiene implicitamente conto della natura bifasica del materiale e risulta quindi inferiore rispetto all'angolo di attrito statico.

## 1.8.5 Modello di Newton e modello alla Bingham

Sono entrambi modelli che tengono in considerazione l'effetto della viscosità.

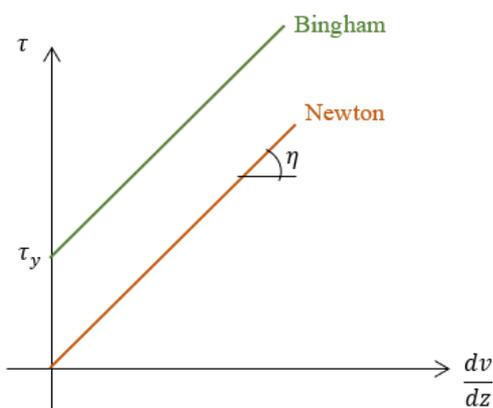
Il più semplice è il modello di Newton, che è un modello di flusso a viscosità costante, dove cioè la viscosità non varia al variare della velocità di deformazione.

La legge reologica può essere rappresentata in un piano  $\tau - \frac{dv}{dz}$ , come una retta la cui pendenza è la viscosità  $\eta$  ed è definita come:

$$r = \eta \cdot \frac{dv}{dz} \quad \text{Modello di Newton}$$

Il modello di Bingham, invece, differisce da quello precedente per la presenza di un valore di soglia,  $\tau_y$ , prima del quale, pur incrementando lo sforzo  $\tau$ , non si registra velocità di deformazione;  $\tau_y$  rappresenta la resistenza iniziale al moto oltre la quale la legge assume un andamento lineare.

Il modello, anch'esso riportato in *Figura 29*, risulta definito come:



$$r = \tau_y + \eta \cdot \frac{dv}{dz} \quad \text{Modello di Bingham}$$

**Figura 29:** Modelli reologici di Newton e di Bingham (Pirulli,2021).

## 1.8.6 Modello coulomb-viscoso

È dato dalla composizione del modello attritivo di Coulomb con il modello viscoso di Newton e considera la massa come un fluido nel quale le dissipazioni sono governate sia dagli sforzi d'attrito, rappresentati dal fattore  $\tan \varphi$ , sia dall'attrito viscoso dato da  $\eta_p$ .

$$r = \sigma_n \tan \varphi + \eta_p \cdot \frac{dv}{dz}$$

Con questo approccio, pur considerando un mezzo monofasico continuo, si tiene anche in conto dell'attrito interno delle particelle che viene sommato all'attrito di base.

### 1.8.7 Modello turbolento

È un modello di comportamento del flusso in cui la dissipazione avviene principalmente a causa delle turbolenze, ed è quindi legata all'impatto tra i blocchi e le particelle che compongono il materiale coinvolto.

Il contributo dei moti turbolenti all'interno del flusso è rappresentato da un unico parametro  $\xi$ , detto coefficiente di attrito turbolento, e proporzionale al quadrato della variazione di velocità.

$$r = \xi \cdot \left(\frac{dv}{dz}\right)^2$$

### 1.8.8 Modello di Voellmy

Si può a questo punto introdurre il modello attritivo in regime turbolento di Voellmy, in cui si uniscono il termine dissipativo dovuto alla componente attritiva di Coulomb e il termine legato alla componente turbolenta, risultando così definito:

$$r = \sigma_n \tan \varphi + \xi \cdot \left(\frac{dv}{dz}\right)^2$$

Questo genere di approccio viene adottato per quei fenomeni dove la dissipazione di energia è legata sia all'attrito lungo la superficie di scorrimento, sia alla componente turbolenta dovuta agli impatti e collisioni delle particelle interne al fluido, trascurando l'energia dissipata per viscosità.

Il modello di Voellmy verrà ripreso e approfondito successivamente, essendo alla base dello studio e della calibrazione tramite *back analysis* del fenomeno di colata detritica oggetto di studio, oltre che delle successive simulazioni.

Si osserva, infine, che la scelta del modello reologico influenza notevolmente i risultati ottenuti e può portare a configurazioni diverse in termini di propagazione della massa e di spessori del deposito.

A titolo generale di esempio, si può constatare come il modello attritivo fornisca spessori maggiori verso monte, con tendenza a diminuire verso valle mentre, per quanto riguarda il modello di Voellmy, la distribuzione risulta molto più uniforme; si potrebbe ottenere, quindi, una medesima area di impronta ma una diversa distribuzione di materiale.

Dall'osservazione del deposito, pertanto, si possono trarre utili informazioni per la scelta del modello reologico.



---

## CAP. 2 – RAMMS

---

Come detto nel capitolo precedente, esistono vari approcci per lo svolgimento dell'analisi previsionale, alcuni di più semplice impiego con forti ipotesi di base e di conseguenza più approssimati, altri invece, di validità generale e maggior completezza per la possibilità di ricavare informazioni anche riguardo l'evoluzione spaziale al di fuori di una specifica sezione.

Questo è il caso degli approcci di tipo numerico, più complessi dal punto di vista computazionale ma che, come nel presente lavoro e a partire da dati di input relativi alla topografia e al modello reologico di riferimento, consentono di effettuare analisi a ritroso per la calibrazione dei parametri reologici e la ricostruzione dell'evento, oltre che simulazioni di scenari diversi da quello effettivamente verificatosi.

La scelta è pertanto ricaduta su un approccio di tipo numerico e, in particolare, sull'utilizzo del software RAMMS descritto nei paragrafi seguenti.

### 2.1 RAMMS

Come si può leggere dal sito ufficiale, il software RAMMS (***R**Apid **M**ass **M**ovements **S**imulation*) è stato sviluppato da un gruppo di esperti presso il *WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF* per fornire agli ingegneri geotecnici e ai professionisti del settore uno strumento per analizzare problemi che non possono essere risolti tramite già esistenti modelli monodimensionali.

RAMMS consente infatti di svolgere previsioni accurate nello spazio tridimensionale di velocità, altezze del fluido, pressioni e distanza di propagazione di masse instabilizzate utili per la realizzazione di mappe di rischio o il progetto di interventi di protezione e mitigazione.

Il software è stato calibrato sulla base di misurazioni realizzate per prove a scala reale, svolte in Svizzera, ed è stato ormai impiegato per un ampio numero di casi studio che ne hanno confermato la validità nella soluzione di problemi pratici.

Il programma è suddiviso in tre moduli:

- RAMMS::AVALANCHE
- RAMMS::DEBRISFLOW
- RAMMS::ROCKFALL

I moduli RAMMS::AVALANCHE e RAMMS::DEBRISFLOW sono stati ideati per fenomeni caratterizzati da flussi contenenti particelle di detriti rocciosi o neve in movimento rapido; nel modulo dedicato alle valanghe il fluido interstiziale è costituito dall'aria mentre nel caso delle colate detritiche è costituito da fango.

Questi modelli sono utilizzati per calcolare l'evoluzione del cinematismo dal suo innesco fino alla fase di propagazione su una superficie tridimensionale e, sfruttando le equazioni viste nel precedente paragrafo integrate sullo spessore del flusso, valutare la componente di velocità parallela al pendio e le altezze del flusso. Queste informazioni sono sufficienti per la maggior parte delle applicazioni ingegneristiche, mentre le informazioni legate alle distribuzioni di velocità e di massa in direzione perpendicolare sono solitamente di scarso interesse.

Entrambi i modelli richiedono una buona rappresentazione digitale del terreno e la conoscenza delle condizioni iniziali, come la posizione e volume della massa instabile e i parametri del terreno.

Il modulo RAMMS::ROCKFALL è invece utilizzato per lo studio del moto del corpo rigido che identifica la caduta di un blocco; anche in questo caso il programma predice le traiettorie del blocco su una superficie tridimensionale, governate dall'interazione tra il blocco e il terreno.

La dinamica del blocco nello spazio è rappresentata tramite sei parametri, pari cioè ai gradi di libertà: tre velocità traslazionali e tre rotazionali, dai quali è possibile ricavare l'energia cinetica, l'altezza di volo e la massima distanza raggiunta.

RAMMS::ROCKFALL è decisamente diverso dai precedenti poiché, mentre questo si basa su un contatto rigido corpo-terreno e una descrizione del moto di tipo lagrangiano, utilizzata per scrivere equazioni di bilancio di forze su un corpo singolo, gli altri modelli adottano una descrizione di tipo euleriano, più utile per descrivere il campo di moto calcolando tutti i tipi di cinematismo associati a un corpo rigido, ovvero traslazione, rotolamento e eventuali rimbalzi.

Attualmente, inoltre, sono in via di sviluppo due nuovi moduli chiamati RAMMS::AVAL\_EXTENDED e RAMMS::DBF\_EXTENDED, non ancora disponibili.

A fronte dei modelli utilizzabili e del problema da analizzare, la scelta è ricaduta sul modulo RAMMS::DEBRISFLOW.

## 2.2 Impostare una simulazione

Come già anticipato in precedenza, per poter eseguire una simulazione, è necessario conoscere alcuni dati di partenza; è infatti fondamentale disporre dei dati inerenti all'altimetria, le coordinate degli estremi del poligono che delimita l'area del progetto e, eventualmente, mappe o immagini georeferenziate.

I dati georeferenzati devono inoltre appartenere ad uno stesso sistema di riferimento di coordinate cartesiane, non sono infatti ammessi sistemi basati su coordinate polari.

### 2.2.1 Digital Elevation Model (DEM)

La topografia rappresenta il dato di ingresso più importante poiché i risultati forniti dalle simulazioni sono fortemente dipendenti dalla accuratezza e la precisione con cui viene modellato il terreno.

Questo modello, detto DEM (Digital Elevation Model), è un file di tipo raster che racchiude le informazioni legate all'altimetria e all'andamento morfologico del terreno che vengono associate a ciascun pixel, e costituisce, perciò, la rappresentazione della distribuzione delle quote assolute di un territorio in formato digitale.

Il DEM può essere prodotto con tecniche diverse ma per zone molto ampie questi modelli sono in genere realizzati attraverso tecniche di telerilevamento, ovvero tecniche di misura che non prevedono il contatto con l'oggetto, tramite fotogrammetria o dati acquisiti attraverso un sensore montato su un satellite o un aeromobile.

RAMMS, in particolare, è in grado di operare su file dei seguenti formati:

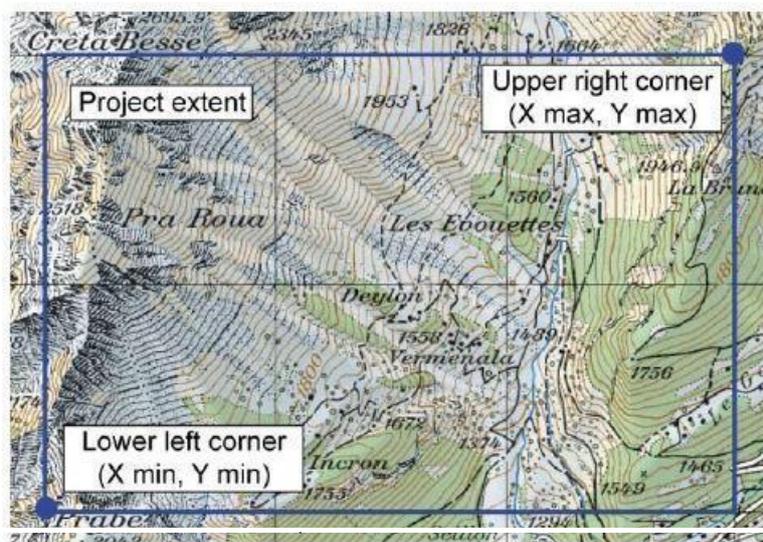
- ESRI ASCII grid;
- ASCII X, Y, Z singolarmente spaziati;
- GEOTIFF.

### 2.2.2 Creazione del progetto

Inserito il modello topografico di elevazione, viene a questo punto creato un progetto a partire da un'area di interesse selezionata e individuata tramite le coordinate di due estremi, come rappresentato in *Figura 30*.

All'interno di un progetto e di una stessa area possono essere analizzati diversi scenari e, per ciascuno di essi, viene svolto un calcolo; partendo da un'unica base topografica, perciò, un progetto consiste in diversi scenari con i relativi dati di input.

Non è quindi possibile modificare il dato topografico senza creare un nuovo progetto mentre gli altri parametri, come area di distacco, dominio di calcolo, intervallo di tempo e risoluzione della griglia, possono essere variati per ogni scenario.



**Figura 30:** Estensione dell'area di interesse e coordinate di riferimento (RAMMS::DEBRISFLOW manual).

È ora necessario definire le condizioni iniziali come l'area di distacco (*release area*) e le proprietà del terreno.

In RAMMS::DEBRISFLOW l'area e il tipo di distacco possono essere definiti in due modi:

- Release area (or *block release*): rilascio di tutta la massa come un blocco unico;
- Input hydrograph: rilascio graduale della massa in funzione del tempo, impostando un idrogramma.

La scelta avviene in funzione del tipo di fenomeno che si vuole modellare, si distinguono pertanto due possibili tipologie di colata che può essere incanalata (*channelized*) o meno (*unchannelized*).

Infatti, per colate non incanalate e di piccole dimensioni è conveniente adottare una superficie di distacco, con un opportuno spessore associato, rilasciata come un unico blocco mentre, per una colata incanalata è più appropriato definire un idrogramma; in quest'ultimo caso, tuttavia, è necessario conoscere la quantità di materiale che potrebbe transitare attraverso una sezione specifica del canale.

La scelta e la definizione di questi dati influiscono in modo radicale sui risultati della simulazione per cui è necessario affidarsi a metodi e sistemi il più accurati possibili in fase di misura.

## 2.2.3 Modello reologico

Anche per la scelta dei parametri reologici è necessaria la dovuta attenzione in quanto i risultati, come già anticipato, a seconda dei valori impiegati, possono differire notevolmente e alterare, di conseguenza, la soluzione; è perciò necessaria una opportuna calibrazione basata sulle informazioni disponibili come rilievi, misure sul campo, immagini o stime della velocità di flusso e altezze raggiunte, così come la composizione del materiale.

Tutto ciò dovrà essere oggetto di misura o, in caso di modellazione a posteriori, di *back analysis*.

Il modello reologico adottato dal modulo RAMMS::DEBRISFLOW è basato sul modello attritivo in regime turbolento di Voellmy, in cui la resistenza al taglio è data da due componenti: una componente secca legata all'attrito secondo il criterio di Coulomb con un coefficiente  $\mu = \tan \varphi_a$  a scalare la pressione normale  $N = \rho gh$ , e una componente legata all'attrito viscoso-turbolento direttamente proporzionale al quadrato della velocità mediante il coefficiente  $\xi$ .

La resistenza a taglio  $S$  [Pa] risulta perciò:

$$S = \mu N + \frac{\rho g \hat{v}^2}{\xi}$$

dove  $\rho$  è la densità,  $g$  l'accelerazione gravitazionale,  $\varphi_a$  l'angolo di attrito apparente,  $h$  l'altezza del flusso e  $\hat{v}$  il vettore  $\hat{v} = (v_x, v_y)^T$  contenente le componenti di velocità del flusso in direzione  $x$  e  $y$ .

Il modello è perciò governato da due coefficienti di attrito  $\mu$  e  $\xi$ , strettamente correlati al comportamento del flusso:

- il coefficiente di attrito  $\mu$  prevale con flusso in condizioni prossime all'arresto;
- il coefficiente di attrito turbolento  $\xi$  prevale in condizioni di flusso veloce.

Questi parametri sono assunti costanti all'interno di un dominio di calcolo e per l'intera simulazione, tuttavia, è possibile individuare più domini di calcolo con diversi valori dei coefficienti di attrito.

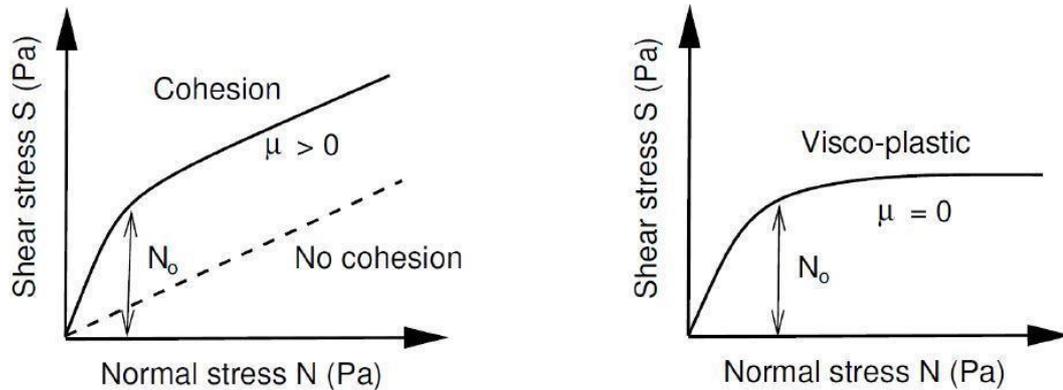
Nelle versioni più recenti, inoltre, l'equazione di base del modello di Voellmy è stata modificata in modo da considerare anche un punto di snervamento legato all'eventuale presenza di terreno coesivo.

Molti materiali come neve e fango, infatti, non esibiscono un comportamento di tipo lineare con coefficiente  $\mu = \text{costante}$ ; viene pertanto introdotto un coefficiente  $N_0$  che consente di modellare il comportamento plastico del materiale: in questo caso  $N_0$  funge da tensione di snervamento mentre  $\mu$  un parametro di incrudimento, come riportato in *Figura 31*.

La resistenza a taglio  $S$  risulta quindi così definita:

$$S = \mu N + \frac{\rho g \hat{v}^2}{\xi} + (1 - \mu) \cdot N_0 - (1 - \mu) \cdot N_0 \cdot e^{-\frac{N}{N_0}}$$

Al contrario del modello di Coulomb questa equazione tende a zero ( $S \rightarrow 0$ ) solo se  $N \rightarrow 0$  e  $U \rightarrow 0$ ; inoltre il valore del taglio risulta incrementato e ciò causa un arresto anticipato del flusso, a seconda del valore di  $N_0$ .



**Figura 31:** Relazione tra sforzo normale  $N$  e taglio  $S$  (RAMMS::DEBRISFLOW manual).

Nonostante quanto già visto nel capitolo precedente a proposito dei dati relativi a una colata detritica, si ha comunque un'idea dell'intervallo in cui ricadono i parametri da impiegare; la maggior difficoltà per la simulazione dei *debris flow* ricade nella grande varietà di materiali e composizioni del flusso che si possono incontrare e che influenzano i parametri reologici.

RAMMS::DEBRISFLOW considera il flusso come un continuo equivalente monofasico, per cui non è possibile distinguere la fase solida da quella liquida: questo implica che i parametri reologici debbano essere scelti attraverso un processo di calibrazione in cui vengono fatti variare fino ad ottenere una simulazione il più possibile coincidente con il comportamento reale del flusso o con le caratteristiche che ci si attende da quest'ultimo.

È molto comune che eventi diversi avvenuti nello stesso luogo presentino composizioni differenti: ciò rende essenziale e più complesso il processo di calibrazione che può essere necessario ripetere per ciascun evento.

## 2.2.4 Erosione

Un altro aspetto fondamentale, con un forte impatto sulla soluzione e che, per questo, bisogna tenere in conto in una simulazione è l'erosione.

Con il termine erosione si intende l'abbassamento in elevazione del letto del canale come conseguenza dell'asporto dei sedimenti per effetto del flusso.

In RAMMS è presente un modulo specifico per considerare la profondità di erosione del versante causata dal passaggio della colata, prevedendone così l'aumento di volume durante l'avanzamento lungo il canale.

Tale sezione è basata sulla generalizzazione di osservazioni in situ della stazione di monitoraggio di Illgraben, in Svizzera, e su ripetute scansioni laser della zona; i dati mostrano che, come prevedibile, la profondità di erosione aumenta con la forza e l'energia del flusso e che il tasso di erosione può essere anche molto rapido.

Altre osservazioni indicano che *debris flow* di piccole dimensioni non provano sempre fenomeni erosivi, per cui, il modello include una tensione tangenziale critica che consente l'asportazione del materiale solo quando questo valore limite,  $\tau_c$ , viene superato.

L'algoritmo così definito predice un valore potenziale della massima profondità di erosione,  $e_m$ , in funzione della tensione tangenziale di taglio calcolata al contatto tra fluido e superficie di scorrimento per ogni cella. Risulta quindi:

- $e_m = 0$  per  $\tau < \tau_c$ ;
- $e_m = \frac{dz}{d\tau} \cdot (\tau - \tau_c)$  per  $\tau > \tau_c$ .

Il cosiddetto *Sediment Erosion Rate* è stato ricavato mediante sensori interrati nel letto del canale ed è stato stimato come pari a 0.025 m/s in direzione normale; i detriti vengono poi asportati finché non viene raggiunta la massima profondità di erosione

$$e_m \cdot \frac{dz}{d\tau} = 0.0025 \text{ per } e_t < e_m.$$

dove  $e_t$  è la profondità di erosione, relativa all'inizio della simulazione, all'istante  $t$  e  $z$  è la coordinata in direzione verticale.

Qualora la tensione tangenziale, dopo un primo processo erosivo, venisse nuovamente superata, la massima profondità di erosione, relativa al valore iniziale di elevazione del letto del canale, è automaticamente aggiornata e l'asportazione del materiale può avvenire fino al raggiungimento di un nuovo valore di  $e_m$ .

La quota del canale, inoltre, non varia durante una simulazione ma l'utente stesso può decidere se richiedere o meno al programma di applicare le correzioni topografiche relative ai fenomeni di erosione o di deposizione per eventuali simulazioni successive.

## 2.3 Svolgimento di una simulazione

Per avviare il calcolo o simulare uno specifico scenario compreso in un nuovo progetto è necessario svolgere le seguenti operazioni:

- definire un'area di rilascio (*release area*);
- impostare un tempo di durata della simulazione e l'intervallo tra gli istanti successivi di calcolo in secondi;
- scegliere la modalità di rilascio (tra *block release* e *hydrograph*) e inserire l'eventuale idrogramma di progetto;
- inserire l'angolo della direzione di distacco;
- definire un dominio di calcolo;
- definire un'eventuale area e i parametri di erosione;

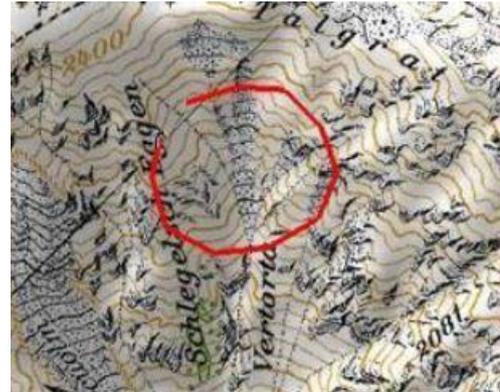
- inserire i parametri del flusso come densità e coefficienti del modello reologico.

Sorvolando sugli specifici passaggi all'interno del programma, sono qui di seguito approfonditi i punti principali appena esposti.

### 2.3.1 Area di rilascio

La definizione dell'area di rilascio può essere effettuata tramite il comando *Input* sulla barra degli strumenti, secondo due diverse possibilità:

- *"Create a new release area"*: consente, dopo aver attivato la modalità 2D, di creare una nuova area di rilascio direttamente dal programma, disegnando un nuovo poligono in formato *shapefile* (*draw new polygon shapefile*), *Figura 32*,
- *"Open an existing polygon shapefile"*: consente di introdurre un'area di rilascio preesistente in formato *shapefile*;

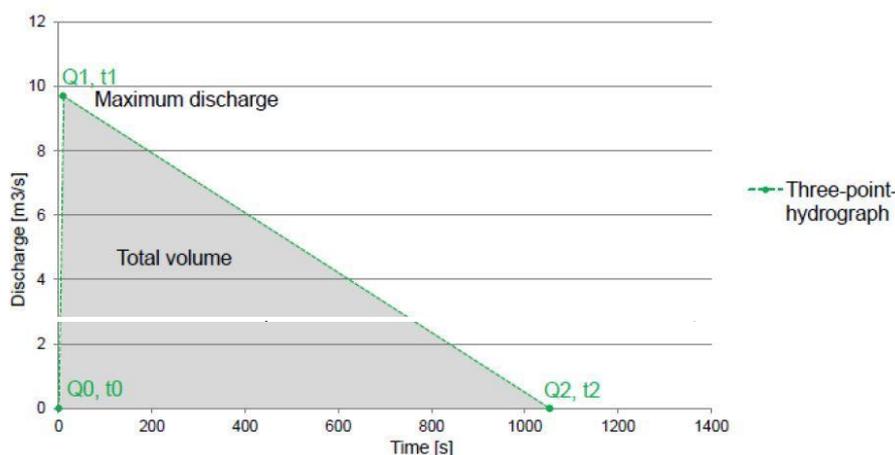


**Figura 32:** Tracciamento di una nuova area di rilascio (*RAMMS::DEBRISFLOW manual*).

Una volta creato o aperto il poligono relativo all'area instabile, è necessario definire lo spessore dello strato associato a tale superficie; ciò viene fatto dal menù a destra, cliccando con il tasto destro del mouse sul nome del file appena importato o creato. Tramite il comando *"Details/Edit release area"* sarà possibile impostare lo spessore desiderato e, di conseguenza, ricavare il valore di area e volume soggetti al cinematismo, oltre che informazioni in merito a altitudine media e pendenza.

## 2.3.2 Idrogramma di ingresso

Come già visto in precedenza, nel simulare un *debris flow* di tipo incanalato (*"channelized debris flow"*), è conveniente impiegare un idrogramma (*"input hydrograph"*), come l'esempio riportato in *Figura 33*, piuttosto che un distacco unico del blocco (*"block release"*), tuttavia ciò richiede la conoscenza della quantità di materiale che fluisce attraverso una specifica sezione.

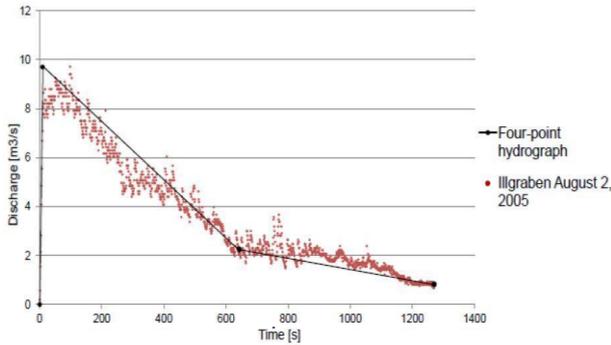


**Figura 33**: Esempio di idrogramma a 3 punti (RAMMS::DEBRISFLOW manual).

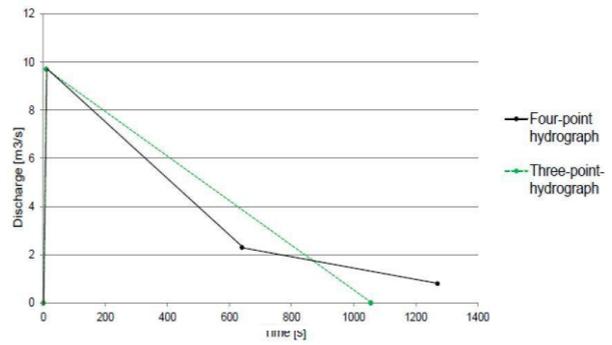
Per svolgere il calcolo con il software RAMMS si hanno due possibili opzioni: o si conoscono i valori di portata in una sezione a diversi istanti, stimandoli ad esempio a partire da misure delle altezze di flusso per le corrispondenti sezioni del canale, oppure è possibile sfruttare leggi empiriche che mettono in correlazione il volume instabilizzato stimato con il massimo valore di portata come quella proposta da Rickenmann (RICKENMANN, 1999) e già implementata nel programma.

Assumendo, infatti, una buona stima del volume, è possibile calcolare il valore di portata massima  $Q$  e il corrispondente istante  $t_1$ , così come il tempo finale  $t_2$ ; risulta così definito un idrogramma a tre punti.

Come si può vedere dalle immagini seguenti (*Figura 34* e *Figura 35*), generalmente un idrogramma risulta meglio descritto tramite quattro punti; tuttavia, l'utilizzo di tre punti nella sua descrizione porta a valori di altezze di flusso e velocità post-picco maggiori e, pertanto, più conservativi; per questo motivo è utile optare per tale tipologia, specie se l'idrogramma non è noto.



**Figura 34** : Idrogramma a 4 punti per l'evento del 2 Agosto 2005, Illgraben, Valais Svizzera (RAMMS::DEBRISFLOW manual).

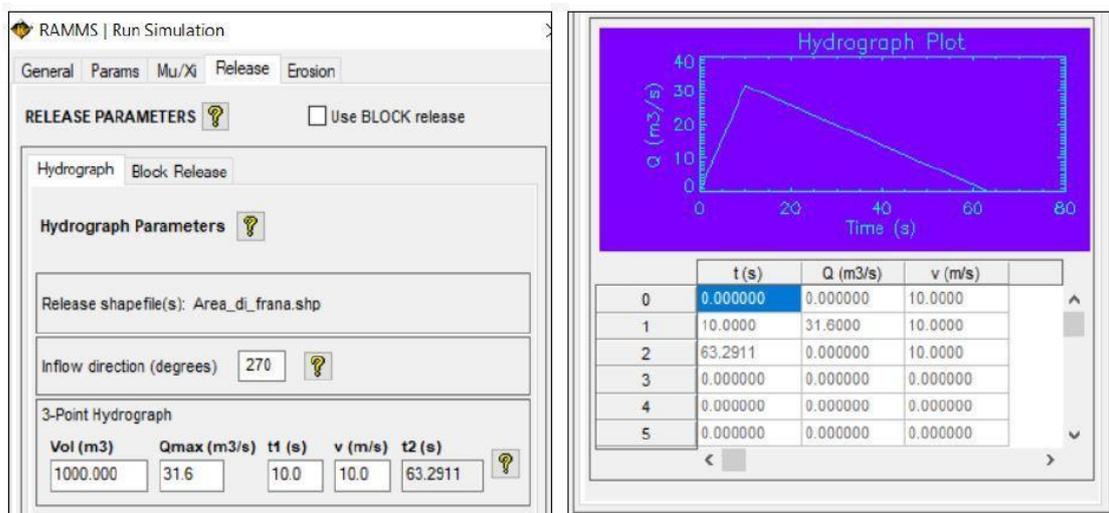


**Figura 35** : Confronto tra due idrogrammi a 3 e 4 punti con stesso volume totale (RAMMS::DEBRISFLOW manual).

In RAMMS::DEBRISFLOW, in caso di sezioni strumentate o valori noti, si ha la possibilità di inserire fino a 10 punti per la definizione dell'idrogramma; in particolare, sono necessari la portata  $Q$ , il tempo  $t$  e la velocità  $v$  a diversi istanti.

La seconda possibilità consiste, invece, nell'inserimento del volume totale  $V_{tot}$ , corrispondente ad un valore massimo di portata  $Q_{MAX}$  e al suo tempo di arrivo  $t_{MAX}$ .

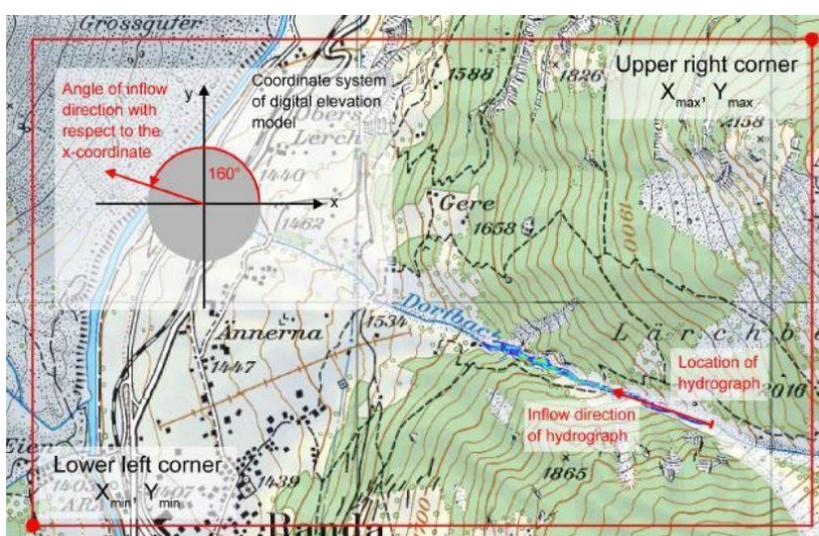
In questo caso, come mostrato in *Figura 36*, sfruttando la teoria di Rickenmann e la sua relazione empirica, vengono stimati automaticamente dal programma i valori del tempo totale  $t_2$  a partire da volume, velocità iniziale e  $t_{MAX}$  che devono essere comunque noti o calibrati.



**Figura 36** : Definizione dell'idrogramma a 3 punti con la relazione di Rickenmann.

È importante specificare, in merito all'idrogramma di piena, che, al contrario di quanto si possa lecitamente immaginare, quest'ultimo non ha alcuna correlazione diretta con la quantità di precipitazione raccolta dal bacino, né tantomeno con la quantità di pioggia netta infiltrata nel terreno, che ha provocato l'innescò della colata detritica; esso è riferito, infatti, esclusivamente alla portata del flusso al variare del tempo e non è pertanto possibile ricavarlo mediante un modello di infiltrazione o qualsiasi altro modello idrologico.

In ogni caso, infine, un ulteriore parametro che viene richiesto per lo svolgimento della simulazione è l'angolo dato dalla direzione di distacco, definito come mostrato in *Figura 37*, identificato come l'angolo valutato in senso antiorario rispetto all'asse x di un sistema di riferimento parallelo al modello digitale del terreno.



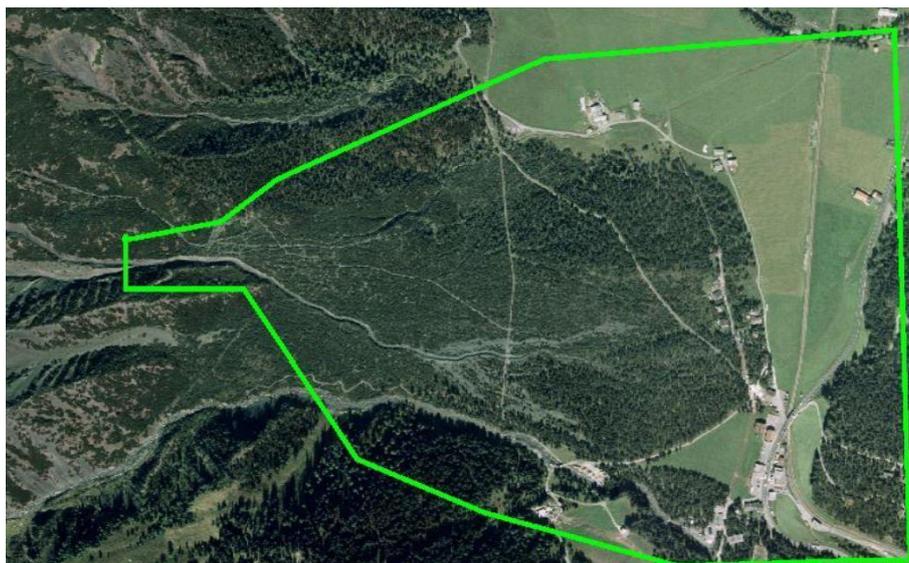
**Figura 37:** Angolo della direzione di direzione di distacco rispetto all'asse x (RAMMS::DEBRISFLOW manual).

### 2.3.3 Dominio di calcolo

Come nei casi precedenti il dominio di calcolo viene inserito in formato *shapefile*, tramite la selezione di un file preesistente. Nel caso in cui non se ne disponga, si ha la possibilità di tracciare manualmente un poligono direttamente sul software.

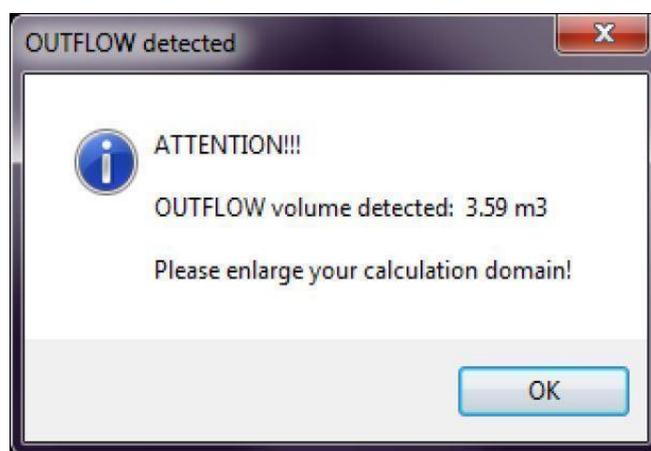
Le dimensioni del dominio sono strettamente legate al tempo di calcolo necessario a completare l'analisi; a tal proposito è possibile ottimizzare il dominio partendo da un modello digitale del terreno con celle di dimensioni maggiori e osservando l'esito di una simulazione preliminare, per poi infittire la suddivisione e ottenere risultati più precisi.

Un esempio di dominio di calcolo è riportato in *Figura 38*.



*Figura 38* : Esempio di dominio di calcolo (RAMMS::DEBRISFLOW manual).

Oltre a ciò, tuttavia, può accadere che la zona di arresto del flusso ricada al di fuori del dominio ipotizzato; il programma segnalerà quindi un errore legato al volume fuoriuscito, come mostrato in *Figura 39*, suggerendo di modificare il dominio di calcolo espandendolo.

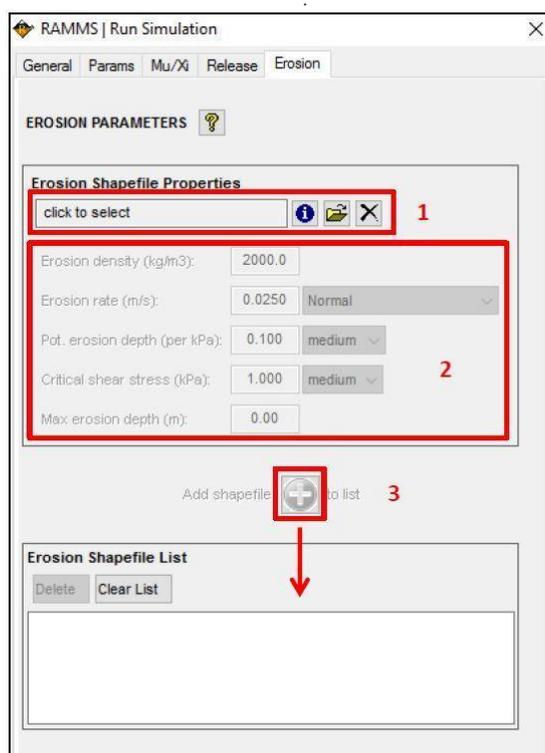


*Figura 39* : Avviso di errore per fuoriuscita del flusso dal dominio (RAMMS::DEBRISFLOW manual).

## 2.3.4 Area e parametri di erosione

Anche in questo caso, per la definizione dell'area soggetta al fenomeno di erosione, è possibile seguire due diverse procedure.

Nel caso si voglia definire l'area direttamente su RAMMS, questo può essere fatto seguendo la procedura per il calcolo dell'area di distacco, tramite, cioè, il comando *Input* nella barra degli strumenti e selezionando l'opzione "*draw new polygon shapefile*"; in alternativa è possibile inserire uno *shapefile* creato in precedenza tramite l'apposita sezione "*Erosion*" prima dell'avvio della simulazione, come riportato in *Figura 40*.



**Figura 40**: Scheda relativa a area e parametri di erosione (RAMMS::DEBRISFLOW manual).

Come si può notare dalla figura precedente nel riquadro contraddistinto dal numero 2 il fenomeno erosivo viene descritto attraverso ulteriori parametri che, tuttavia, non sono facili da valutare; per questo motivo vengono tipicamente considerati quelli proposti di default dal software, frutto di monitoraggi, casi studio reali e confronti con pubblicazioni presenti in letteratura.

Si riporta qui di seguito una breve descrizione e alcuni suggerimenti utili nella scelta dei valori forniti dagli stessi ricercatori e sviluppatori di RAMMS.

- **Densità del materiale eroso** (*Erosion Density*) [ $\text{kg/m}^3$ , default 2000]: in assenza di informazioni più dettagliate si suggerisce di considerare il valore adottato per il flusso o mantenere quello di default pari a  $2000 \text{ kg/m}^3$ ;
- **Velocità di erosione** (*Erosion Rate*) [ $\text{m/s}$ , default 0.025]: è la velocità con cui il *debris flow* trattiene materiale dal letto di sedimenti; anche in questo caso si hanno pochi

valori disponibili derivanti da misure in situ, per cui viene proposto l'utilizzo di un valore costante basato sulla pubblicazione dello studio, condotto da Berger et al. nel 2011, per il torrente Illgraben in cui la velocità di erosione è stata misurata grazie a sensori interrati nel letto del canale e stimata pari a 0.025 m/s. Tale velocità viene utilizzata dal modello fino al raggiungimento della profondità di erosione prevista e il suo aumento provoca un tasso di erosione più elevato con la conseguenza di generare fronti di flusso più ampi.

- **Profondità potenziale di erosione** (*Potential Erosion Depth*) [per kPa, default 0.1]: rappresenta il coefficiente angolare della retta che lega la profondità di massima erosione  $e_m$  in funzione della tensione tangenziale massima raggiunta in ogni cella; modificandone il valore, ad esempio portandolo a 0.2, si raddoppierà l'entità della massima profondità potenziale di erosione.
- **Taglio critico** (*Critical Shear Stress*) [kPa, default 0.1]: è il valore per cui inizia a verificarsi il fenomeno erosivo e ci si aspetta che possa variare significativamente a seconda che il letto del canale sia costituito da blocchi mutuamente incastrati o da materiale saturo a granulometria fine.  
Il valore proposto dagli autori è derivato dall'interpolazione di dati forniti nella pubblicazione di Schürch et al. (2011).
- **Massima profondità di erosione** (*Max Erosion Depth*) [m]: consente di impostare il massimo spessore dello strato erodibile se il dato è disponibile.

## 2.4 Risultati

In seguito alla creazione di un nuovo progetto tramite il software RAMMS e al termine della simulazione, quest'ultimo creerà automaticamente diversi file riassunti nella tabella seguente (*Tabella 3*) e commentati in seguito, contenenti in particolare i dati di input, l'output della simulazione e un file di testo con i dati salienti del calcolo svolto.

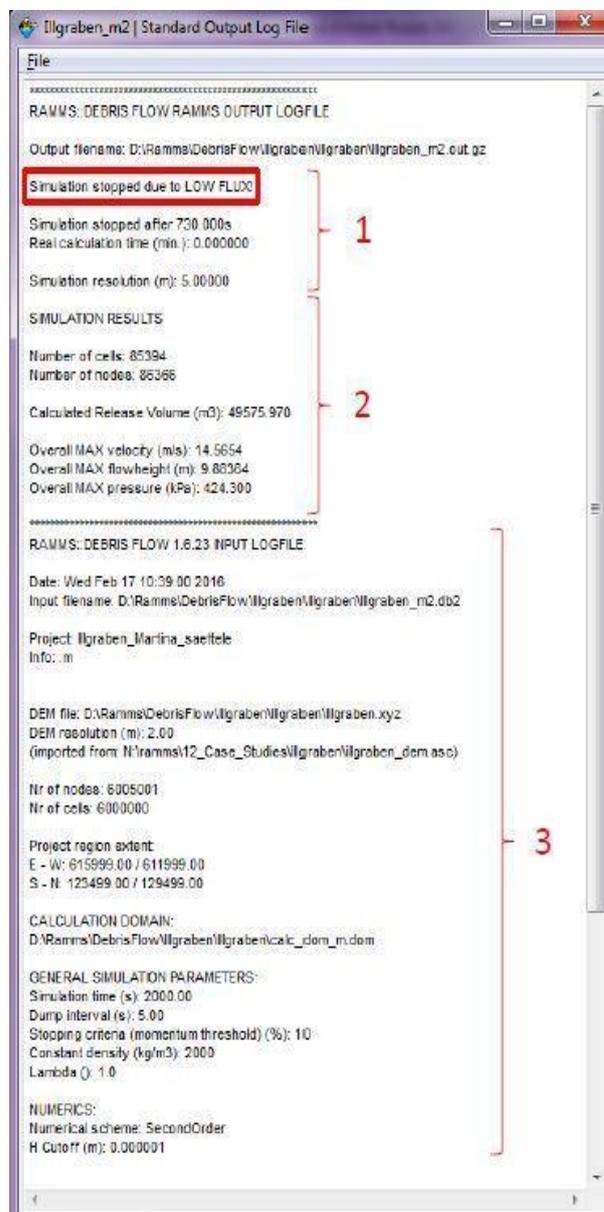
*Tabella 3: Elenco dei file e tipi di formato generati dal software (RAMMS::DEBRISFLOW manual).*

File/Folder	Purpose
<b>doc (folder)</b>	Folder containing input and output logfiles
<b>logfiles (folder)</b>	Project creation and calculation log files
<b>dhm.asc</b>	ASCII grid with altitude values
<b>dhm.sav</b>	Height information used in RAMMS
<b>_.db2</b>	Input file
<b>_.dom</b>	Calculation domain ASCII file
<b>_.dom.shp</b>	Calculation domain shapefile
<b>_.dom.shx</b>	Calculation domain shapefile
<b>_.dom.dbf</b>	Calculation domain shapefile
<b>_.xyz</b>	Topographic data used in RAMMS

Completato il calcolo, l'animazione della simulazione e l'output *logfile* vengono aperti automaticamente in una finestra.

L'output *logfile*, di cui se ne riporta un esempio in *Figura 41*, contiene informazioni relative al progetto e all'esito del calcolo, per questo rappresenta una dei primi aspetti da controllare per verificare i risultati.

1. La sezione 1 contiene informazioni in merito al tempo di simulazione e la risoluzione della maglia della griglia considerata; molto importante è la dicitura evidenziata in figura ("*Simulation stopped due to low flux*") perché assicura che l'arresto del flusso si sia verificato per l'esaurimento del fenomeno. in caso contrario l'output "*Time end condition*" informa l'utente che il termine della simulazione è dovuto alla scelta di un intervallo di calcolo troppo breve, prima cioè del raggiungimento del criterio e la soglia di arresto definiti;
2. La sezione 2 contiene un riassunto dei risultati della simulazione;
3. La sezione 3 contiene l'*input logfile* in cui sono riportati i dati generali sul progetto, i parametri di input come il DTM utilizzato, numero di celle, area di rilascio ed eventuali mappe o ortofoto inserite.



**Figura 41:** Esempio di output logfile (RAMMS::DEBRISFLOW manual).

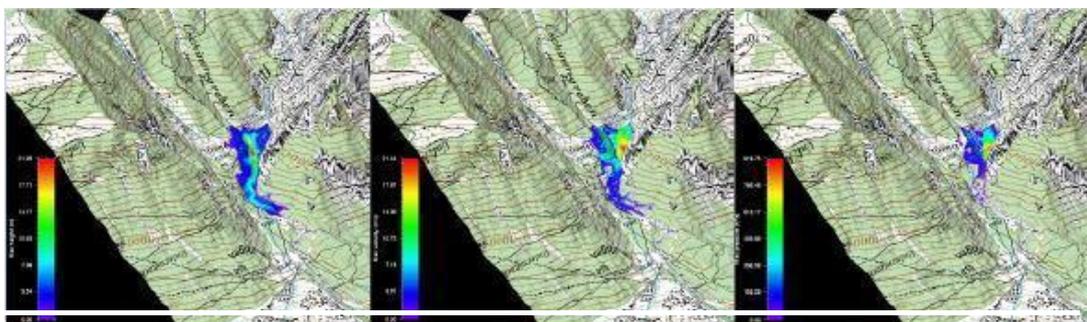
## 2.4.1 Visualizzazione e analisi dei risultati

Al termine dell'analisi, RAMMS restituisce diversi risultati che devono comunque essere interpretati con cura poiché, come già detto, il calcolo deriva da un modello, ovvero una rappresentazione della realtà che parte da ipotesi più o meno semplificative.

I risultati che possono essere ottenuti sono i seguenti:

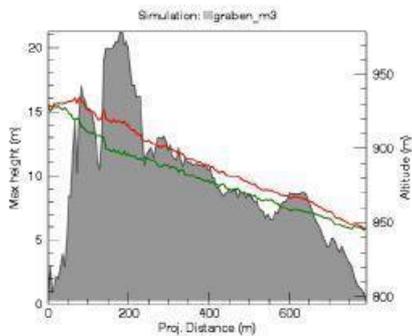
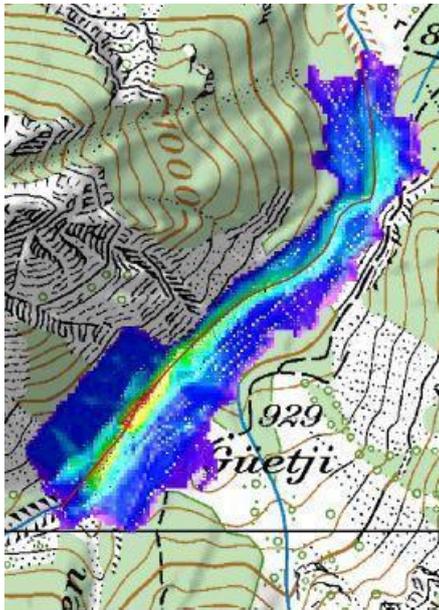
- Altezza del flusso (Flow height);
- Velocità del flusso (Flow velocity);
- Pressione del flusso (Flow pressure);
- Quantità di moto del flusso (Momentum);
- Erosione;
- Valori massimi di altezza, velocità, pressione, quantità di moto, taglio e erosione;
- DEM modificato con la rimozione delle superfici erose e l'aggiunta della deposizione;
- Analisi del flusso;
- Parametri reologici ( $\mu$ ,  $\xi$ )

Essi vengono rappresentati direttamente sul modello topografico, come riportato in *Figura 42*, e possono essere visualizzati anche variandone il fattore di scala, così da enfatizzarne i valori e le differenze.

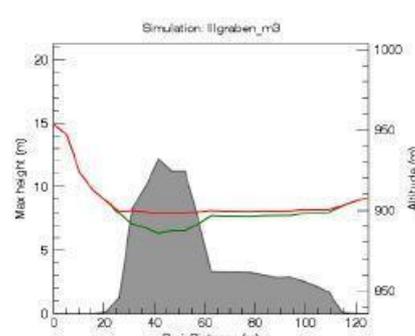
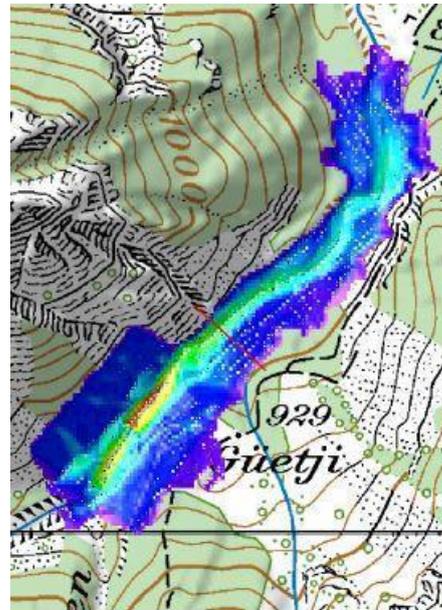


**Figura 42:** Visualizzazione dei risultati su modello topografico dei valori rispettivamente di altezza massima, velocità e pressione (RAMMS::DEBRISFLOW manual).

Un'altra possibilità di estrazione dei risultati, qualora fosse necessario conoscere i valori di altezza, velocità o pressione del flusso in un punto o una sezione specifica, è il comando "line profile" che consente, appunto, di creare o importare un profilo in direzione trasversale o longitudinale e di mostrare i valori di interesse raggiunti in corrispondenza di tale sezione in un grafico dedicato, come raffigurato in *Figura 43* e *Figura 44*.



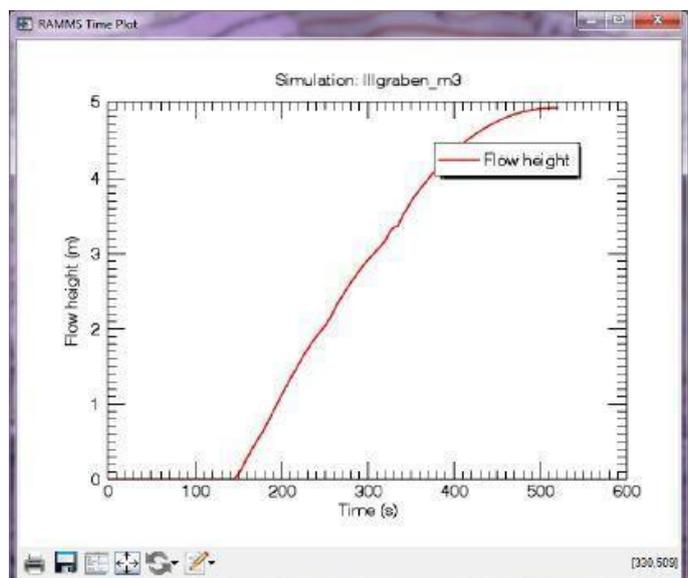
**Figura 43:** Comando Line profile in direzione longitudinale (RAMMS dbf manual).



**Figura 44:** Comando Line profile in direzione trasversale (RAMMS dbf manual).

Una ulteriore tipologia di rappresentazione, inoltre, è quella definita dal comando "time plot": essa consente di graficizzare il valore di un parametro in funzione del tempo per un punto specifico del dominio di calcolo, come nell'esempio in *Figura 45*.

RAMMS dà, inoltre, la possibilità di esportare i risultati sotto forma di immagini in diversi formati o, in alternativa, sotto forma di GIF in versione animata.



**Figura 45:** Time plot (RAMMS dbf manual).

## 2.5 Meccanismo di arresto

L'arresto del flusso, come visto in precedenza, è strettamente correlato a molteplici condizioni che giocano un ruolo fondamentale nell'ultima fase del moto, come la tipologia di materiale, la pendenza nella zona di propagazione, i parametri reologici e il volume totale mobilizzato.

È pertanto necessario definire un criterio che consenta di discriminare quando è possibile interrompere una simulazione e considerare pertanto il fenomeno come esaurito o proseguire nel calcolo.

In RAMMS il criterio di arresto è basato sulla quantità di moto  $p$  che, nella fisica classica, è definita come il prodotto della massa di un corpo per la sua velocità ed ha come unità di misura nel Sistema Internazionale i  $\text{kgm/s}$  o l'equivalente  $\text{Ns}$ .

Per ogni intervallo tra un istante di calcolo e il successivo, quindi, il software calcola la somma delle quantità di moto associate ad ogni cella e confronta i risultati con il valore massimo; qualora la percentuale così ottenuta risultasse inferiore ad una soglia definita di default o dall'utente stesso, la simulazione viene interrotta e il flusso è considerato fermo.

Valori ragionevoli della soglia sono compresi tra l'1% e il 10%: tale intervallo è solo un suggerimento degli stessi sviluppatori ma è sempre possibile determinarne empiricamente uno specifico per ciascun caso.

Tuttavia, valori di soglia maggiori del 10% possono portare a arresti prematuri e poco realistici, mentre soglie più basse implicano simulazioni di gran lunga più dispersive, con movimenti del flusso molto lenti e oscillazioni di velocità.

Nel caso di rilascio tramite "*block release*", per via del distacco in blocco dell'intero volume instabile, si osservano tipicamente valori di quantità di moto decisamente più elevati rispetto alle simulazioni con idrogramma, motivo per cui è possibile fissare un valore di soglia più piccolo rispetto a quest'ultimo caso.

Per concludere, il programma fornisce alcune opzioni aggiuntive come l'inserimento di argini, barriere frangicolata o la creazione di nuovi modelli digitali del terreno con l'incremento delle quote in corrispondenza delle celle soggette a deposizione. Tuttavia, non essendo questi argomenti oggetto del presente lavoro e ricoprendo un ruolo marginale rispetto alle funzionalità del software, non si è ritenuto necessario fornirne un approfondimento, che può essere comunque svolto tramite il manuale fornito dai produttori.

---

## CAP. 3 – CASO STUDIO

---

Il presente lavoro di tesi ha come oggetto l'evento verificatosi a Camasco, frazione del comune di Varallo in provincia di Vercelli, nella notte tra il 2 e il 3 ottobre 2020.

In quei giorni, infatti, Piemonte e Liguria sono state investite da precipitazioni di intensità eccezionale dovute al passaggio della tempesta Alex, responsabile degli ingenti danni provocati in svariati paesi europei.

Per quanto riguarda la regione Piemonte, tra le zone più colpite sono ricadute il basso Piemonte e le aree del biellese, verbano e vercellese, area quest'ultima in cui ricade l'evento studiato e dove, come riportato sul rapporto emesso da Arpa Piemonte, si sono registrati picchi di intensità di precipitazione mai toccati prima, per lo meno da quando sono presenti stazioni strumentali di misura.

Un evento piovoso di tale entità, concentrato in sole 24-48 ore, ha provocato ondate di piena nei corsi d'acqua dei bacini più colpiti, portando alla distruzione di collegamenti e infrastrutture viarie di notevole importanza oltre che problemi dovuti a esondazioni, erosione e dissesti su tutto il territorio.

In questo scenario si inserisce il fenomeno di colata detritica che, a partire dal punto di innesco in corrispondenza del *colle del Ranghetto* (1.272 m s.l.m.), ha raggiunto e interessato le frazioni di Corte e Camasco (760 m s.l.m.), causando la distruzione di due ponti carrabili ed uno pedonale, oltre a numerosi danni a edifici e collegamenti.

### 3.1 Inquadramento Geografico



Come anticipato, il fenomeno oggetto di studio si è verificato a Camasco, piccola frazione del comune di Varallo, in *Figura 46*, secondo più esteso della provincia di Vercelli (VC) e situato in prossimità dello sbocco della Valsesia nella pianura vercellese, alla confluenza del torrente Mastallone nel fiume Sesia.

Il territorio comunale culmina a nord con la Massa del Turlo (1960 m), tocca la quota minima sul Sesia (398 m) al confine con Quarona e risale, sulla sponda opposta del fiume, fino ai 1827 m del Castello di Gavala e ai 1631 m della Res, che domina la cittadina da sud-ovest.

**Figura 46**: Posizionamento geografico del comune di Varallo (<https://it.wikipedia.org/wiki/Varallo>).

L'abitato di Camasco, a circa 8 km di distanza da Varallo, sorge ad una quota di 760 m sulle pendici della Cima del Camossaro e dell'Alpe Ranghetto, dov'è inoltre situato il colle del Ranghetto, a quota 1272 m s.l.m.

Il valico, punto di innesco della colata detritica in esame, si trova sul crinale che divide la Valsesia dalla conca del Lago d'Orta.

Lo spartiacque verso nord sale al Monte Ostano (1.509 m s.l.m.), mentre a sud risale fino al rilievo a quota 1.312 (talvolta denominato *Monte Ranghetto*) e prosegue in direzione del Monte Novesso.

Dal tratto di crinale che collega il monte Ostano con il passo si stacca verso sud-est una cresta che culmina con la Cima del Camossaro e che divide tra loro i due valloni valesiani di Nono e del torrente Bagnola (a nord). Sul versante cusiano le acque sono, invece, drenate dal torrente Fiumetta.

Il colle amministrativamente si trova sul confine tra il comune cusiano di Quarna Sotto e quello valesiano di Varallo.

### 3.1 Topografia ed orografia

Una descrizione generale delle caratteristiche topografiche si può ritrovare nel Piano Regolatore Generale Comunale (P.R.G.C.) del Comune di Varallo, variante del 2011, rinvenibile sul sito istituzionale del Comune, in cui si legge che il territorio di Varallo, pur non essendo compreso all'interno della Catena Alpina e, nonostante le cime dei rilievi più alti superino di poco i 2000 m s.l.m., presenta caratteristiche prettamente montane.

I dislivelli, inoltre, sono decisamente importanti per via del fondovalle profondamente inciso e situato a quote relativamente basse, come avviene in corrispondenza di Varallo stesso, posto ad una altitudine di 453 m s.l.m.

I versanti montuosi possono quindi raggiungere un grande sviluppo altimetrico, anche fino a 1500 m, con una topografia molto mossa e la frequente presenza di zone più aspre con bastionate e pareti rocciose subverticali di grandi dimensioni, in alcuni casi anche di 100 e più metri.

È frequente la presenza di piccole balze rocciose che si inseriscono in versanti generalmente molto ripidi, oltre che una fascia di terreni con morfologia più morbida attorno alle quote di 600-800 m s.l.m. sia lungo il lato destro che lungo il sinistro del fiume Sesia e delle valli tributarie.

Infine, mentre le valli secondarie presentano un fondo sempre stretto tra versanti ravvicinati e per lo più limitato al solo corso d'acqua con rare e modeste spianate, il fondovalle della Valsesia si allarga con superfici pianeggianti in direzione longitudinale e trasversale, a formare aree passibili di un utilizzo urbano e agricolo.

### 3.2 Inquadramento geologico

Sempre a partire dal P.R.G.C. e dalla carta Geologica 1:100000 di cui si riporta un estratto in *Figura 47*, sono state ricavate le seguenti informazioni in merito alla litologia e alle caratteristiche geologiche dell'area interessata.

La parte meridionale della zona Ivrea Verbano, che corrisponde ad una parte del territorio di Varallo, viene associata a due diverse tipologie di formazioni principali: la formazione kinzigitica e quella basica.

L'area di interesse, ovvero quella che comprende la frazione di Camasco, appartiene alla formazione kinzigitica.

Il complesso Kinzigitico presenta la prevalenza di un paragneiss di colore rosso-bruno con aspetto di roccia scistosa e spesso fibrosa. In alternanza vi sono le anfiboliti, di colore scuro e struttura orientata. Sono presenti marmi e calcefiri, in alcune zone predominanti, come a monte del Santuario del S. Monte, nelle rupi della Falconera e sul versante in destra Sesia nel tratto tra Parone e Locarno.

Infine, come ricavato tramite indagini a scopo minerario in località Alpe Sacchi, si trovano filoni acidi, pegmatitici a quarzo, ortoclasio o microclino e muscovite con concentrazioni prossime alla possibilità di coltivazione del feldspato.

La formazione kinzigitica si dispone a formare un'ampia fascia (compresa tra il S. Monte e Roccapietra) che attraversa il territorio comunale con direzione sudovest-norddest coprendo la valle principale del fiume Sesia e occupando l'intero versante orografico destro della valle del torrente Pascone.

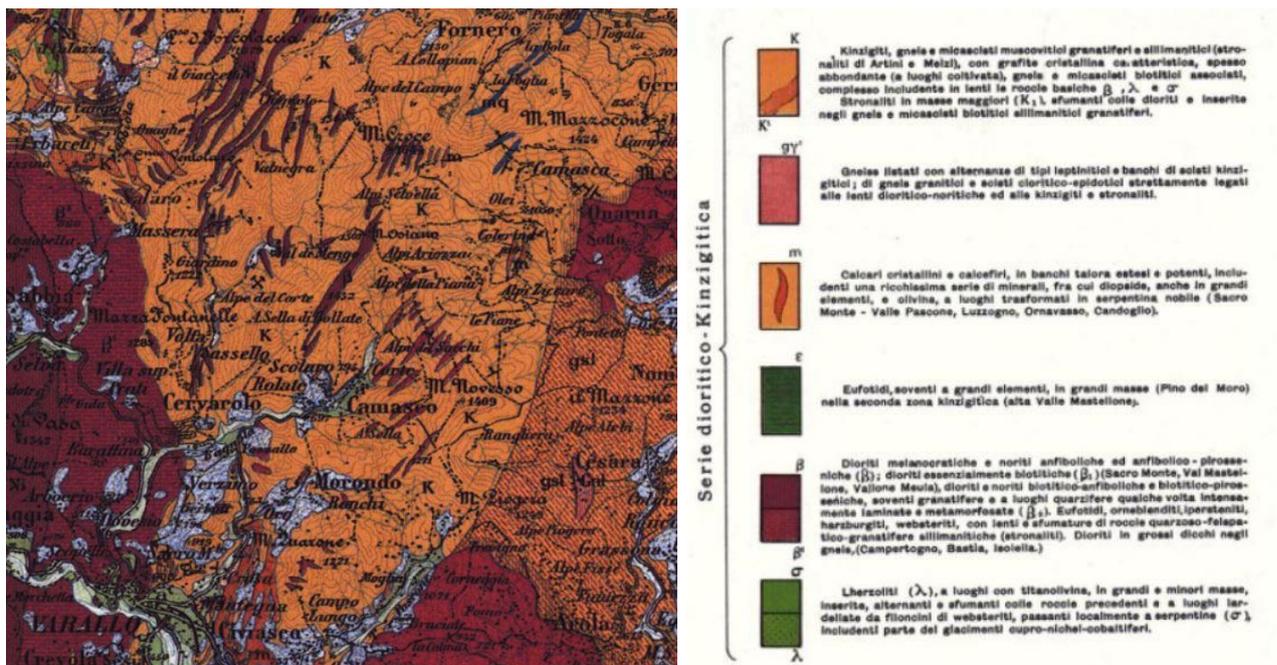


Figura 47: Estratto della Carta Geologica d'Italia 1:100000, Foglio 30, dell'Istituto geografico militare.

### 3.2.1 Geologia e geomorfologia del quaternario (Strati superficiali)

I terreni quaternari, che costituiscono gli strati di copertura superficiale del sito, sono costituiti da depositi di formazione più recente e derivano da una serie di processi che hanno determinato la progressiva erosione delle aree montane e il conseguente deposito dei materiali allo sbocco delle valli, lungo i fondivalle più pianeggianti ed al piede del rilievo montuoso.

Un lavoro fondamentale in questi termini è stato svolto dai ghiacciai e, ancora oggi, viene portato avanti dai fiumi e dai processi di alterazione e disgregazione degli ammassi rocciosi che hanno originato, e continuano a formare, terreni diversi per caratteristiche idrogeologiche e geotecniche.

I terreni di copertura quaternari sono irregolarmente distribuiti sulla superficie comunale in modo spesso discontinuo; hanno, però, una grande importanza perché sono

quelli più direttamente e frequentemente interessati dagli interventi antropici ed esercitano una fondamentale influenza sull'assetto idrogeologico del territorio, per le loro caratteristiche di permeabilità.

Si distinguono:

- accumuli gravitativi, rappresentati da detrito di falda e accumuli di frana;
- depositi alluvionali;
- depositi glaciali.

### 3.2.2 Accumuli gravitativi

Sono costituiti dai cosiddetti "detriti di falda" e dagli "accumuli di frana", ovvero a tutti quegli accumuli riconducibili ai terreni posti al piede dei versanti più ripidi e dalla dinamica più attiva, o, nel caso degli accumuli di frana, alle frane da crollo, che generalmente interessano il basamento roccioso, alle frane per scivolamento rotazionale e ai movimenti gravitativi composti, solitamente riguardanti i terreni quaternari di copertura.

Tra i principali motivi di degradazione dovuti agli agenti atmosferici, presentano un ruolo rilevante il processo di disgregazione meccanica delle rocce, causato dalla gelivazione, e le modificazioni chimiche delle rocce, che ne causano l'alterazione superficiale.

La gelivazione (o azione di gelo e disgelo) è provocata dai cambiamenti di temperatura al di sopra e al di sotto del punto di congelamento in presenza d'acqua; cristallizzando entro le discontinuità della roccia, infatti, il ghiaccio tende ad allontanare le pareti delle fessure, con conseguente frantumazione in blocchi rocciosi di dimensioni diverse, che finiscono poi per formare "falde detritiche" ai piedi delle pareti rocciose, formando talvolta depositi di forma conica.

La loro presenza è quindi correlata alla topografia ed alla fratturazione dell'ammasso roccioso, motivo per cui sono più frequenti ed estesi in corrispondenza delle rocce della formazione Kinzigitica.

Il detrito di falda si confonde spesso con gli accumuli di frane di crollo ed è tipicamente formato da piccoli crolli di cui è difficile definirne i contorni.

### 3.2.3 Depositi alluvionali

Questi depositi riguardano i terreni che affiorano lungo gli alvei di fiumi e torrenti, sia nei rami principali che secondari, e sono composti da ciottoli e ghiaie grossolane con elementi arrotondati e frequenti massi dell'ordine del metro cubo. La matrice sabbiosa di questi depositi è grossolana con granuli a spigoli vivi; più scarsa lungo i corsi d'acqua minori, si ritrova relativamente più abbondante lungo il f. Sesia, dove la pendenza

longitudinale dell'alveo è minore e la larghezza maggiore fino a formare delle lenti omogenee, nel passato oggetto di coltivazione per l'attività edile.

I depositi recenti, inoltre, hanno formato una serie di terrazzamenti distinti come segue:

*1° terrazzo* - I depositi più recenti formano il terrazzo morfologico più basso e presentano le stesse caratteristiche granulometriche delle alluvioni attuali. Spesso inondabili, poiché poco elevate rispetto al fondo dei vicini alvei attivi, mostrano delle lenti di copertura sabbiose a grana più fine, di potenza variabile, generalmente modesta e discontinua.

*2° terrazzo e 3° terrazzo* - I depositi di questi terrazzi si dispongono a quote più elevate rispetto agli altri depositi alluvionali più recenti, con una sequenza di piccole scarpate e fasce poco inclinate che rispecchiano il susseguirsi delle varie fasi della dinamica fluviale.

La granulometria di questi terreni è del tutto simile a quella degli altri depositi alluvionali con una minor presenza di elementi di grosse dimensioni. Sono inoltre presenti depositi sabbiosi nelle zone al riparo della corrente principale.

I depositi in questione si dispongono ai lati del fondo vallivo principale, specialmente lungo le anse più riparate dall'azione erosiva delle acque del fiume Sesia.

### 3.2.4 Depositi glaciali (morene)

Nell'area in esame la morfologia glaciale è presente sia con forme di erosione che con forme di accumulo di materiali sciolti (depositi glaciali).

I terreni di origine glaciale sono legati alla presenza del ghiacciaio valsesiano e si trovano in corrispondenza del fondo e dei fianchi dell'antico solco vallivo, interessando anche le vallette laterali del Bagnola e del Nono fino all'altezza di Camasco.

Le caratteristiche litologiche presentate in generale da questo tipo di terreni sono contraddistinte da una composizione caotica, sia dal punto di vista granulometrico sia dalla distribuzione delle diverse fasi.

La frazione fine (sabbie fini e limi) si mescola alla matrice sabbiosa, che ingloba ciottoli e massi e che porta a distinguere questi terreni dalle alluvioni anche per altre caratteristiche, come la permeabilità e i parametri geotecnici.

Le potenze degli strati sono molto variabili in quanto possono esser stati soggetti a erosione e rimodellamenti da parte delle acque superficiali.

I depositi glaciali in genere hanno perso le caratteristiche tipiche della morfologia glaciale in quanto, successivamente al ritiro dei ghiacciai, sono stati parzialmente rielaborati da processi morfogenetici diversi, in particolare quelli delle acque superficiali.

Associati ai depositi glaciali si rilevano depositi fluvioglaciali e glaciolacustri; contrariamente alle morene, questi depositi possono presentare dei livelli, anche di notevole potenza, di materiali omogenei generalmente fini (sabbiosi).

### 3.3 Geomorfologia e dinamica dei versanti

La morfologia del territorio deriva da fattori di ordine geologico (litologia, tettonica), a cui si associano fattori di ordine climatico (precipitazioni, temperature, umidità ecc.) e agenti del modellamento superficiale (forza di gravità, ghiacci, acque libere e incanalate, cicli di gelo e disgelo ecc.), tra i quali rientra anche l'azione antropica.

La morfologia del territorio di Varallo risulta in primo luogo caratterizzata dalla diversa litologia. Nella zona di affioramento delle rocce metamorfiche (kinzigiti), la morfologia è più dolce con forme collinari; invece, nel settore interessato dalle rocce gabbriiche, più compatte, si hanno forme acclivi con versanti e cime rocciose, talvolta caratterizzati da pareti strapiombanti.

Le trasformazioni subite dall'area sono legate agli eventi che hanno caratterizzato l'evoluzione di tutta la catena montuosa, tra i quali prevalgono gli intensi processi erosivi e di trasporto, detti processi esogeni, conseguenti all'innalzamento dell'arco alpino.

A questi si aggiungono fenomeni morfogenetici legati ai corsi d'acqua e ai processi gravitativi e di modellamento dei versanti.

L'effetto della gravità sulle pareti rocciose e sulle coperture detritiche provoca fenomeni di dissesto che rappresentano un elemento di pericolo e rischio per gli insediamenti, le infrastrutture e, soprattutto, per le persone.

Nel territorio in esame, sono state rilevate, infatti, numerose frane di diverse tipologie; queste sono state catalogate attenendosi alla classificazione di Varnes già descritta nel primo capitolo, ed è possibile, tramite codici numerici ad esse attribuiti, risalire a ciascuna scheda descrittiva e alla relativa cartografia contenute nel database SIFRAP di Arpa Piemonte.

Per un miglior inquadramento e per fornire una contestualizzazione efficace del fenomeno in esame, si elencano di seguito le tipologie di dissesto osservate all'interno del Comune di Varallo:

- **Scivolamenti rotazionali:** generalmente presenti dove la potenza dei terreni di copertura è maggiore.
- **Movimenti franosi composti:** sono particolarmente estesi in alcune grandi frane, che interessano il settore settentrionale del territorio, nella zona di affioramento delle rocce

kinzigitiche. Danno origine a vasti accumuli generalmente stabilizzati, con fenomeni di riattivazione circoscritti ai margini degli accumuli stessi.

- **Colamenti – frane per saturazione e fluidificazione della copertura detritica:** si verificano con maggiore frequenza quando sono collegati a movimenti gravitativi più superficiali e di estensione ridotta. Si tratta, in genere, di colamenti rapidi di materiale estremamente fluidificato, che interessano prevalentemente le coltri detritiche superficiali.

Queste frane avvengono in caso di precipitazioni intense che provocano la saturazione del terreno; il piano di scivolamento corrisponde generalmente con il limite con il substrato roccioso.

I versanti più colpiti sono quelli con inclinazioni comprese tra i 30° e 40° o ancora maggiori, come nel caso dell'evento oggetto di back analysis.

- **Frane da crollo e ribaltamento:** molto frequenti nella zona d'interesse dove si verificano in svariati punti del territorio comunale, interessando principalmente le formazioni kinzigitiche; oltre all'azione degli agenti atmosferici e di modellazione superficiale a cui si è fatto riferimento, altre cause scatenanti sono rappresentate dall'azione degli apparati radicali delle piante, soprattutto delle specie ad alto fusto. Vengono segnalati in particolare fenomeni di caduta massi lungo la strada per Camasco.
- **Valanghe:** nonostante i rilievi siti all'interno del territorio comunale non siano caratterizzati da quote molto elevate, il fenomeno valanghivo è frequente e di intensità spesso sorprendenti; si può inoltre verificare come quest'ultimo sia presente anche a quote più basse ma con carattere puntiforme. Tramite l'analisi di foto aeree è possibile individuare aree potenzialmente a rischio anche se, ad oggi, l'unica valanga segnalata che abbia direttamente interessato un nucleo abitato è avvenuta nel 1695 in località Scolaro, provocando delle vittime e la distruzione di diversi edifici.

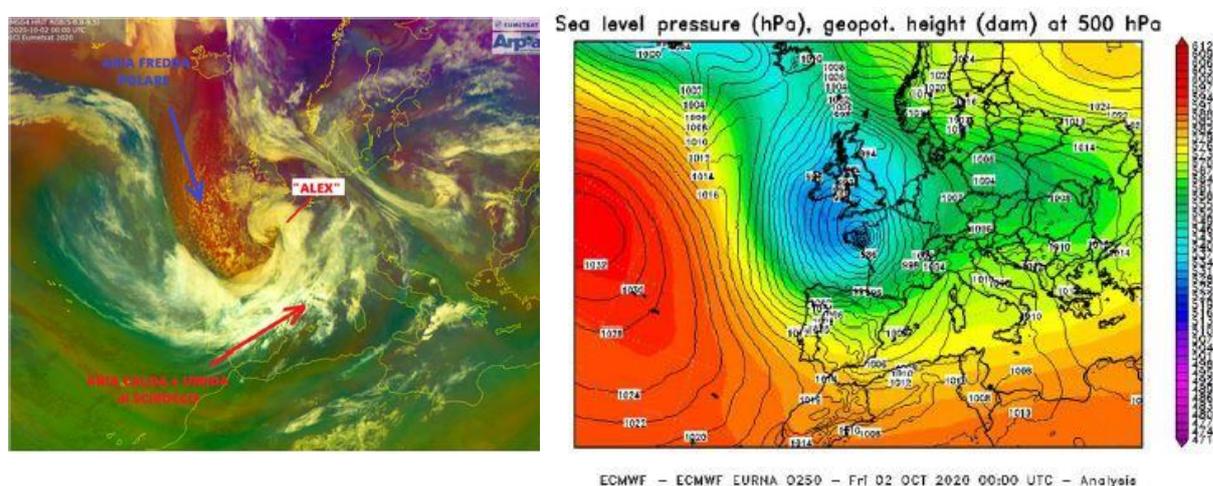
## 3.4 Evento del 2-3 Ottobre 2020

Nel contesto inquadrato dai paragrafi precedenti, si inserisce il dissesto alla base di questo lavoro di tesi.

Fattori concomitanti come la notevole pendenza del versante (superiore a 25°) unita ad un apporto idrico di carattere eccezionale, riconducibile agli effetti della tempesta Alex, nella notte tra il 2 e il 3 ottobre hanno portato al distacco di una massa di terreno e detriti di oltre 5000 m<sup>3</sup> incanalatasi nella valle del Nono, provocando così un'ondata di piena di fango e detriti che, propagandosi per circa 4 km e con altezze anche superiori ai 4 m, ha interessato la frazione di Camasco, a pochi chilometri dal Comune di Varallo, fino ad esaurirsi nelle acque del rio Pianale.

### 3.4.1 Analisi meteorologica e idrologica

Dal punto di vista meteorologico, rielaborando quanto si può leggere più approfonditamente sul rapporto dell'evento del 2-3 Ottobre 2020 redatto da ARPA Piemonte, l'evento ha inizio giovedì 1° ottobre 2020, quando un vasto sistema di bassa pressione posizionato sulle Isole Britanniche attraversa il Canale della Manica, muovendosi gradualmente verso il nord della Francia e assumendo le caratteristiche di tempesta extra-tropicale.



**Figura 48:** 00:00 UTC del 2 Ottobre 2020: Immagine dal satellite Meteosat che evidenzia la tipologia di masse d'aria sull'Europa (a sx); Pressione al livello del mare; (Rapporto evento 2-3 Ottobre ARPA).

Il minimo di pressione, toccato venerdì 2 ottobre, ha convogliato masse di aria calda e umida sulla costa meridionale francese, sulla Liguria e sul Piemonte, con venti nei bassi strati dapprima di libeccio (sud-ovest) e successivamente, a fine giornata, di scirocco (sud-est).

Il tutto è avvenuto in un contesto dove il fronte meridionale del sistema perturbato, guidato dai venti intensi, è stato alimentato dall'umidità proveniente dall'oceano stesso

(Figura 48) e, successivamente, dal transito sul Mar Mediterraneo occidentale, il tutto con temperatura superficiale abbondantemente al di sopra della media.

Nel pomeriggio e nella serata del 2 ottobre, l'aria umida e calda meridionale, convergendo inizialmente sui rilievi meridionali piemontesi e, complice anche la risalita orografica, ha provocato piogge e temporali di eccezionale intensità sulla fascia tra la Val Roya e l'alto Tanaro.

Nel corso del pomeriggio il flusso umido ha investito continuativamente anche l'**alto Piemonte**, permanendo fino alle prime ore del giorno successivo.

L'interazione del flusso umido sudoccidentale con i rilievi ha, inoltre, generato un minimo di pressione locale sul Cuneese nella notte tra venerdì e sabato, contribuendo ad intensificare ulteriormente la convergenza dei venti e le precipitazioni su alto Tanaro, **Sesia** e Verbanò, e determinando apporti pluviometrici da record.

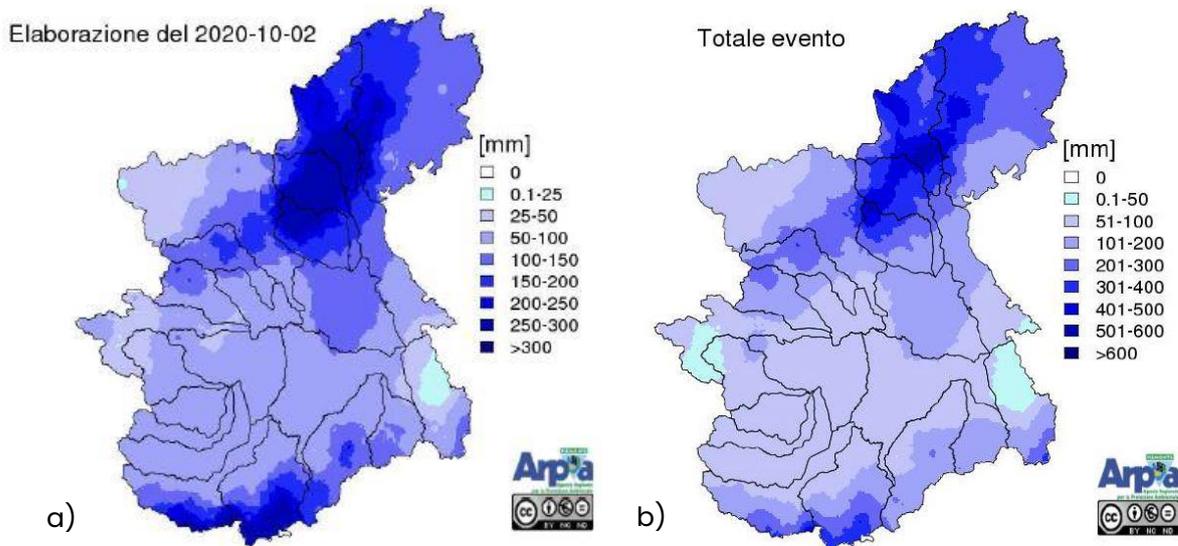
Lo zero termico, a causa della dominanza delle correnti caldo-umide, è stato elevato in corrispondenza delle precipitazioni più intense, fino ai 3300-3600 m, favorendo la componente liquida delle stesse e limitando la neve alle quote più elevate.

Il fenomeno meteorologico in questione è stato causato dall'insieme di più elementi: la presenza di una struttura barica molto profonda, dinamicamente molto attiva e alimentata da aria fredda polare, con forti gradienti di pressione e venti intensi che hanno colpito la Gran Bretagna e il nord della Francia; tutto ciò, inoltre, in concomitanza di una corrente caldo-umida presente a tutte le quote e proveniente dall'Atlantico e dal Mediterraneo, a carattere persistente, amplificata e spinta verso sud dal minimo di pressione.

L'unione di questi due aspetti ha causato una configurazione meteorologica molto rara alle nostre latitudini e differente rispetto alla dinamica degli eventi alluvionali che hanno colpito il Piemonte in passato. La tempesta Alex, come nominata da MeteoFrance, è risultata anomala per intensità e stagione, tanto da risultare una delle peggiori tempeste anche per i paesi dell'Europa occidentale che sono stati colpiti.

Per quanto riguarda l'andamento **pluviometrico** si evidenziano valori di precipitazione areali molto elevati in data 2 ottobre sui bacini del Sesia (325 mm), Cervo (222,8 mm) e sul Toce (368,3 mm); valori eccezionali di precipitazione sono stati registrati nel comune di Valstrona (VB) con oltre 650 mm di pioggia e nel comune di Mergozzo (VB) con oltre 600 mm mentre, nell'alta Val Tanaro, la stazione di Limone Piemonte (CN) ha registrato quasi 600 mm, quasi tutti nella giornata del 2 ottobre.

Una rappresentazione dei valori di precipitazione è riportata in *Figura 49*.



**Figura 49:** Rappresentazione spaziale delle precipitazioni giornaliere del 2 Ottobre 2020 (a) e della pioggia totale cumulata dal 1 al 4 Ottobre 2020 (b); (Rapporto evento 2-3 Ottobre 2020 ARPA Piemonte).

Tali valori rappresentano, a livello di stazione, più del 50% della precipitazione media annuale.

Nelle stazioni maggiormente coinvolte dalle precipitazioni i tempi di ritorno stimati per le durate di 12 e 24 ore superano i 200 anni: le stazioni di Limone Piemonte (CN) e Sambughetto (VB) hanno registrato valori estremi per tutte le durate (1, 2, 6, 12, 24 ore), confermando l'eccezionalità dell'evento.

In particolare, dall'analisi dei dati misurati dalla stazione di Sambughetto, considerata come riferimento poiché la più vicina all'area di studio, con 7 km lineari di distanza dalla frazione di Camasco, sono stati ricavati i valori riportati nelle *Tabella 4*, *Tabella 5* e *Figura 50*, rappresentativi dei massimi valori tra tutti quelli registrati dalle stazioni più significative.

**Tabella 4:** Massimi di pioggia in mm per diverse durate e alcune stazioni significative;

(Rapporto evento 2-3 Ottobre 2020 ARPA Piemonte).

Bacino	Comune	Prov.	Stazione	Max 1h	Max 3h	Max 6h	Max 12h	Max 24h
<b>Ticino</b>	Valstrona	VB	Sambughetto	66.4	171.2	303.4	491	<b>619.6</b>
<b>Ticino</b>	Mergozzo	VB	Candoglia Toce	57	138	272	486.2	<b>592</b>
<b>Tanaro</b>	Limone Piemonte	CN	Limone Pancani	72.6	166.2	312.8	517.6	<b>581.6</b>

**Tabella 5:** Valori di pioggia cumulata giornaliera e totale dell'evento in mm per diverse durante e alcune stazioni significative; (Rapporto evento 2-3 Ottobre 2020 ARPA Piemonte).

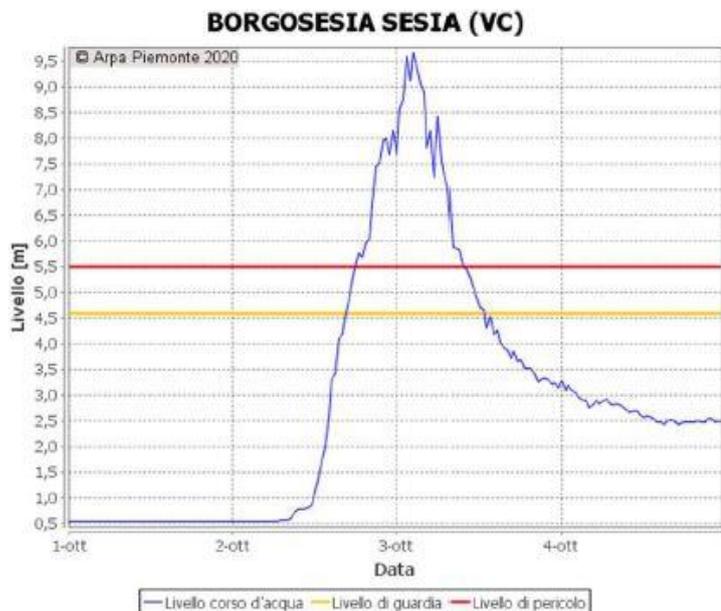
Bacino	Comune	Prov.	Stazione	1 Ottobre	2 Ottobre	3 Ottobre	4 Ottobre	Tot
<b>Ticino</b>	Valstrona	VB	Sambughetto	1.2	504.4	143.2	21.8	<b>670.6</b>
<b>Ticino</b>	Mergozzo	VB	Candoglia Toce	1.4	463	139.6	22.4	<b>626.4</b>
<b>Tanaro</b>	Limone Piemonte	CN	Limone Pancani	0	549.4	33.2	6.8	<b>589.4</b>



**Figura 50:** Precipitazioni orarie (blu) e cumulate (verde) tra il 2 e il 3 Ottobre 2020 per la stazione di Sambughetto; (Rapporto evento 2-3 Ottobre ARPA).

Le piogge hanno generato, con incrementi di livello repentini sui corsi d'acqua del reticolo principale e secondario della regione, **onde di piena** eccezionali che, nei bacini del Toce e del Sesia, hanno superato i livelli di riferimento storici dell'evento di ottobre 2000 e sull'alto Tanaro quelli del novembre 2016.

Il fiume Sesia, da monte a valle, come testimoniato dall'idrogramma in *Figura 51*, ha raggiunto colmi mai registrati da quando esistono le stazioni di misura.



**Figura 51:** Idrogramma del fiume Sesia presso Borgosesia (VC); (Rapporto evento 2-3 Ottobre ARPA).

In particolare, a Borgosesia (VC) si è superato di oltre 4 metri il livello di pericolo, con una portata  $>3000 \text{ m}^3/\text{sec}$ , e la portata al colmo nella sua sezione di chiusura a Palestro (PV) può essere stimata superiore ai  $5000 \text{ m}^3/\text{sec}$ ; si è trattato di un evento estremo con ricorrenza più che duecentennale nel bacino dell'alto Tanaro e **duecentennale** sul Sesia.

Sulla base dei primi sopralluoghi conoscitivi effettuati dalla Società Tecnosesia per la definizione degli effetti al suolo, si può ipotizzare che le precipitazioni abbiano comportato lungo i corsi d'acqua processi con un'energia pari o in alcuni casi anche superiore agli eventi precedenti (1993, 1994, 2000 e 2016), mentre per quanto riguarda le frane, i rapidi ruscellamenti e deflussi superficiali sui versanti non hanno consentito l'innescò di fenomeni più profondi.

L'elevata intensità delle precipitazioni nelle parti alte dei bacini ha comportato un'importante attività torrentizia, in particolare sulle zone delle alte valli Vermenagna e Tanaro e della Val Sesia, responsabile del trascinamento negli alvei dell'ingente quantità di **materiale ligneo**, che ha caratterizzato il deflusso in tutte le aste.

L'evento di piena per il fiume Sesia ha rivestito carattere eccezionale anche nel tratto di pianura, con erosioni, esondazioni e diffusi danni.

### 3.4.2 Effetti al suolo

Come descritto nel paragrafo precedente, l'entità dell'evento che ha interessato il bacino del fiume Sesia è stata estrema.

Nelle porzioni montane, le intense piogge si sono manifestate per lo più sotto forma di trasporto iperconcentrato, ovvero come eventi di piena con elevato trasporto di fondo e colate detritiche, mentre le zone più coinvolte sono state quelle intermedie e terminali.

In particolare, la densità maggiore dei fenomeni di dissesto si è concentrata nella media-bassa Valsesia, interessando tutto il reticolato minore del bacino del Sesia, comprese le valli secondarie dei tributari laterali, soprattutto lungo le sponde dei torrenti Mastallone, Nono e Croso.

Nello specifico, si evidenzia la piena che ha interessato il Rio Pianale e ha colpito gli abitati di Corte e Camasco.

Tra le 3 e le 4 di notte, come raccontato dai vari testimoni e dalle testate giornalistiche di cronaca locale, un'ondata di fango e detriti, alimentata anche dall'erosione e da una rilevante quantità di materiale ligneo, ha invaso l'alveo del Rio Pianale, causando il crollo e l'asportazione di tre ponti, di cui due carrabili.

La piena, imputabile all'innescò di una colata detritica e caratterizzata da elevata velocità, distaccatasi dall'Alpe Ranghetto, ha inoltre provocato la sottoescavazione e l'erosione di alcuni tratti dell'unica strada di collegamento, isolando i paesi a monte e causando l'interruzione del servizio elettrico, fortunatamente, però, senza perdite in termini di vite umane e danni limitati alle abitazioni.

Nelle figure seguenti (*Figura 52, Figura 54, Figura 53 e Figura 55*), si possono osservare alcune immagini dei danni riportati a argini e infrastrutture di Corte e Camasco, oltre alle evidenze del fenomeno erosivo e del trasporto di materiale ligneo.



**Figura 52:** *Sottoescavazione della strada di accesso a Camasco per erosione da parte del torrente Nono; (Rapporto evento 2-3 Ottobre ARPA).*



**Figura 53:** *Uno dei due ponti carrabili crollati e successivamente asportati per effetto della pressione dell'ondata di piena; (www.cittadinovara.com).*



**Figura 54:** *Danni alle infrastrutture e alla rete elettrica nella frazione di Corte; (www.cittadinovara.com).*



**Figura 55 :** Ulteriore vista sull'abitato di Corte, visibile l'entità dell'erosione spondale e dell'alveo, oltre ai danni alle infrastrutture e materiale ligneo trasportato dalla piena. ([www.cittadinovara.com](http://www.cittadinovara.com)).



---

## CAP. 4 – BACK ANALYSIS E SIMULAZIONE DELL'EVENTO

---

Il seguente capitolo è incentrato sulla ricostruzione dell'evento del 2-3 Ottobre 2020 tramite back analysis, cioè attraverso un procedimento iterativo di simulazione, svolto interamente con il software RAMMS::DEBRIS FLOW, con lo scopo di determinare i valori caratteristici e i parametri reologici che descrivono il comportamento della colata detritica e utili per lo svolgimento di analisi previsionali di pericolosità.

L'obiettivo di questo capitolo è di fornire una descrizione dettagliata e sequenziale dei passaggi e le necessarie assunzioni che hanno portato all'ottenimento dei risultati come output del programma di calcolo.

Le analisi e le conclusioni, descritte nei seguenti paragrafi, sono state effettuate in collaborazione con Eleonora Giovarruscio, che le ha a sua volta raccolte nella sua tesi dal titolo "*Modellazione di un evento di colata detritica in Valsesia e proposta di un intervento di difesa*" (2021) e sono alla base del presente lavoro.

### 4.1 Modellazione del fenomeno

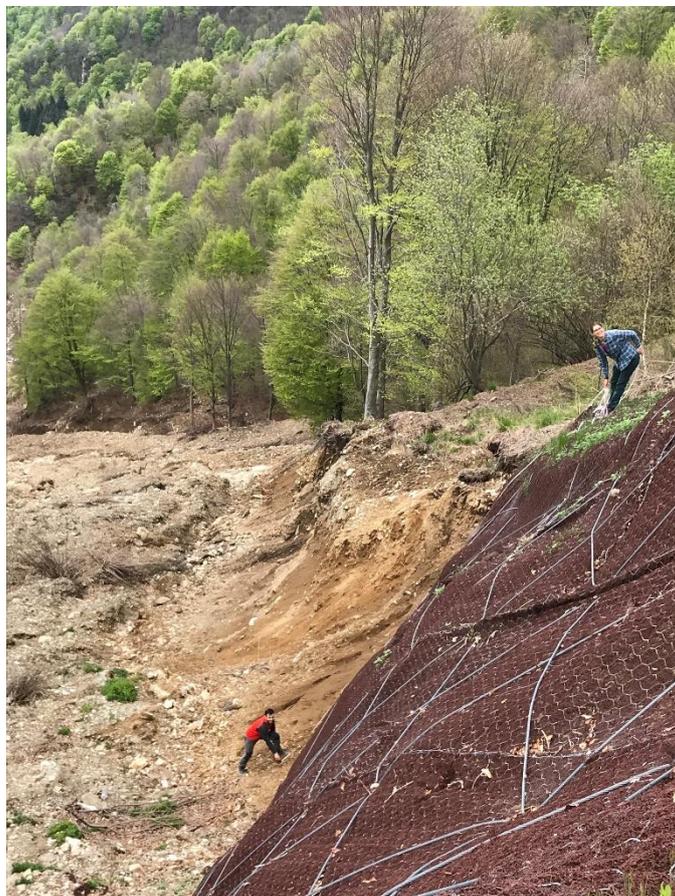
Trattandosi di un fenomeno riconducibile alla categoria delle colate detritiche, per i motivi descritti nei capitoli precedenti, buona parte del lavoro iniziale ha riguardato la definizione e calibrazione dei dati di ingresso; vista la già citata imprevedibilità dei debris flow e, di conseguenza, della totale assenza di monitoraggio o sezioni strumentate utili alla raccolta e alla misurazione dei parametri di interesse, si sono resi necessari svariati sopralluoghi ad opera principalmente del Dott. Geol. Giovanni Cavagnino e dei suoi collaboratori, che hanno ricoperto un ruolo fondamentale nella stesura di questa tesi, oltre che alla raccolta di dati in situ svolta in prima persona.

Queste indagini hanno consentito, innanzitutto, di ricavare, tramite un rilievo speditivo lungo il perimetro mediante ricevitore GPS palmare, le coordinate geografiche e l'area della zona di distacco (*Figura 56*) e, successivamente, tramite semplici misure manuali, una stima del volume mobilitato, entrambi fondamentali per lo svolgimento delle analisi successive.



**Figura 56** : Immagine a monte del coronamento dell'area di distacco con i primi interventi di stabilizzazione realizzati; sullo sfondo la frazione di Corte colpita dall'area di piena.

Nelle immagini di *Figura 57* e *Figura 58*, si riportano alcuni scatti raffiguranti la misura delle scarpate laterali e di quella principale, utile per la realizzazione del modello geometrico.



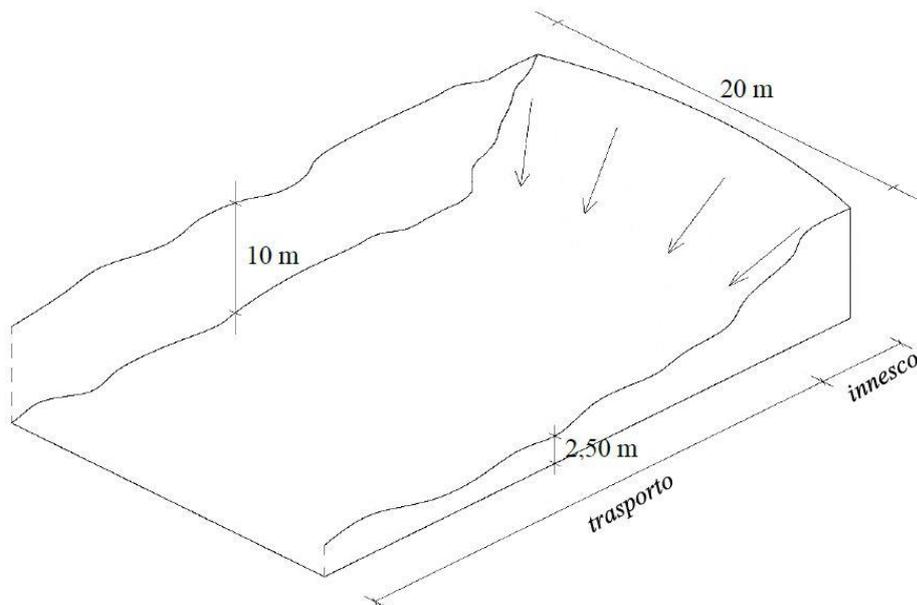
**Figura 57** : Misurazione manuale della scarpata laterale.



**Figura 58 :** *Scarpata principale e intervento di stabilizzazione.*

A partire dalle coordinate dei punti dell'arco superiore della nicchia di distacco e delle misurazioni effettuate sul campo, è stato ricreato un modello geometrico dell'area di distacco così da poter stimare il volume della massa instabilizzata all'istante iniziale, che si è successivamente incanalato nell'alveo del Rio Pianale.

Il modello geometrico e i dati sono riportati rispettivamente in *Figura 59* e *Tabella 6*.



**Figura 59 :** *Modello geometrico del volume instabilizzato.*

*Tabella 6 : Dati misurazione fronte di innesco.*

Elemento	Misura o stima
<b>Lunghezza coronamento [m]</b>	20
<b>Pendenza media [°]</b>	28
<b>Scarpata destra [m]</b>	10
<b>Scarpata sinistra [m]</b>	2,5
<b>Lunghezza di trasporto [m]</b>	40
<b>Lunghezza innesco [m]</b>	4,23
<b>Lunghezza totale [m]</b>	44,23
<b>Area calcolata [m<sup>2</sup>]</b>	884,52
<b>Volume di distacco [m<sup>3</sup>]</b>	5528,3

Il volume totale iniziale calcolato sulla base del modello geometrico è stato infine approssimato da  $V = 5528 \text{ m}^3$  ad un valore più cautelativo pari a  $V = 6000 \text{ m}^3$ , impiegato come dato di input per le simulazioni.

Una volta ricavato il volume mobilitato, si è proceduto con l'impostazione del modello nel software RAMMS, come descritto di seguito.

Il primo passo per lo svolgimento di una simulazione e la creazione di un nuovo progetto in RAMMS::DEBRIS FLOW consiste nella definizione di una *base topografica*, ovvero nell'inserimento di un modello digitale del terreno, **DTM**, ottenibile in assenza di specifici rilievi direttamente dal Geoportale ([www.geoportale.piemonte.it](http://www.geoportale.piemonte.it)) della Regione Piemonte. In questo caso particolare è stato utilizzato il DTM denominato come "*Ripresa Aerea Ice 2009-2011 DTM 5*", avente celle di lato 5m e una precisione altimetrica compresa tra 0.30 e 0.60 m.

Attraverso il software QGIS è stato possibile ritagliare le dimensioni in base all'estensione dell'area di interesse.

Dopo aver importato i punti del rilievo GPS, è stato quindi tracciato il poligono che delimita l'**area di distacco** (Figura 60) da importare anch'essa, come fondamentale dato di input sotto la dicitura "release area", nel software di simulazione in formato *shapefile*.



**Figura 60** : Dettaglio dell'area di distacco presso il Colle del Ranghetto, 1272 m s.l.m.

Nella definizione dell'area di distacco si è deciso di utilizzare QGIS innanzitutto per sfruttare i dati GPS a disposizione e, inoltre, per ottenere un risultato più preciso e realistico rispetto a quello ottenibile tramite l'interfaccia disponibile su RAMMS.

Un aspetto fondamentale dell'analisi consiste nella scelta del metodo di rilascio. Quest'ultimo può essere di tipo "block release" oppure definito tramite un idrogramma di piena.

Come descritto nel Capitolo 2, trattandosi di un fenomeno di colata detritica incanalatosi dapprima lungo una incisione del versante e, successivamente, nell'alveo del torrente che attraversa le frazioni di Corte e Camasco, si è optato per una modellazione dell'innescò tramite idrogramma di piena a tre punti. Per la sua definizione, non disponendo di sezioni strumentate e dati specifici in termini di tempi e portate, ci si è affidati alla teoria di Rickenmann (Rickenmann, 1999), attraverso la quale viene calcolato automaticamente all'interno del software.

Imponendo dunque i seguenti dati di input:

- *Volume iniziale* = 6000 m<sup>3</sup>;
- *Tempo iniziale* = 10 s;
- *Velocità iniziale* = 10 m/s;
- *Direzione di deflusso* = 260 °;

tramite le leggi empiriche della teoria di Rickenmann, si è ottenuto l'idrogramma a tre punti con:

- *Portata massima stimata* = 140 m/s;
- *Tempo finale* = 85.53 s.

I dati di partenza sono stati assunti sulla base dei valori tipici presenti in letteratura e grazie alle testimonianze degli abitanti, i quali hanno raccontato di una violenta ondata caratterizzata da velocità molto elevata ed esauritasi completamente nel giro di pochi secondi.

Una volta inseriti l'area e il meccanismo di rilascio, è necessario introdurre i parametri reologici del modello di Voellmy che descrivono il comportamento della massa in movimento.

Anche in questo caso, non disponendo di alcun tipo di dato a riguardo, tali parametri sono stati definiti per tentativi, a partire dai valori medi suggeriti dal manuale (RAMMS::DEBRISFLOW User Manual, 2007) e automaticamente adottati dal software.

Nelle simulazioni iniziali, pertanto, sono stati fissati i seguenti coefficienti:

- *coefficiente di attrito di Coulomb*,  $\mu = 0,200$ ;
- *coefficiente di attrito turbolento*,  $\xi = 100 \text{ m/s}^2$ .

A questo punto sono stati avviati i primi tentativi di simulazione della colata sulla base dei dati finora descritti. Non sono stati introdotti ulteriori parametri, come ad esempio un dominio di erosione, per evitare l'aumento delle variabili incognite.

## 4.2 Parametri di controllo

Partendo dai dati di input descritti precedentemente e volendo affinare tali valori in modo da ottenere una simulazione più realistica possibile, occorre effettuare una taratura dei parametri inseriti nel software di calcolo.

Ciò comporta una procedura iterativa di affinamento basata sulle informazioni disponibili sull'evento o sugli effetti che esso ha causato nelle aree colpite.

A tale scopo, quindi, sono stati assunti diversi parametri di riferimento, anche detti parametri di controllo, di seguito elencati:

- **zona di arresto**: i parametri reologici, come descritto nel *Paragrafo 1.8*, sono strettamente correlati al comportamento del flusso e incidono profondamente sulla distribuzione della massa nella zona di arresto e, soprattutto, sulla lunghezza di propagazione della colata;
- **meccanismo di arresto**: legato alle impostazioni del software e soprattutto al tempo di simulazione, sono state considerate valide soltanto le simulazioni con arresto di tipo *low flux*, ovvero i casi in cui la simulazione viene interrotta quando la quantità di moto

calcolata dal programma assume valori compresi tra l'1 e il 10 % del valore massimo, a cui corrisponde una porzione di flusso in movimento trascurabile;

- o **altezza massima**: rappresenta il principale parametro di riferimento nel controllo dei risultati ottenuti, in quanto si hanno riscontri ben evidenti sui livelli raggiunti dal flusso, identificati con le altezze dei ponti asportati dalla piena.

Per quanto riguarda la definizione della zona di arresto occorre precisare che nel caso in esame non è stato possibile identificare una vera e propria area di deposito poiché, a causa dell'incanalamento del flusso nell'alveo del rio Pianale, l'effetto della colata è andato via via smorzandosi fino a confluire, esaurendosi, nelle acque del torrente. Questo, per effetto dei processi erosivi e di trasporto, ne ha impedito la deposizione.

L'area di arresto, come si evince dalla *Figura 61* e dalla *Figura 62*, è stata assunta in corrispondenza della zona più a valle in cui, a fronte dei sopralluoghi e delle testimonianze immediatamente successivi all'evento, erano ancora tangibili i segni del passaggio dell'ondata di piena e presso cui erano presenti i depositi di maggiore entità, segno di una ormai ridotta energia del flusso.

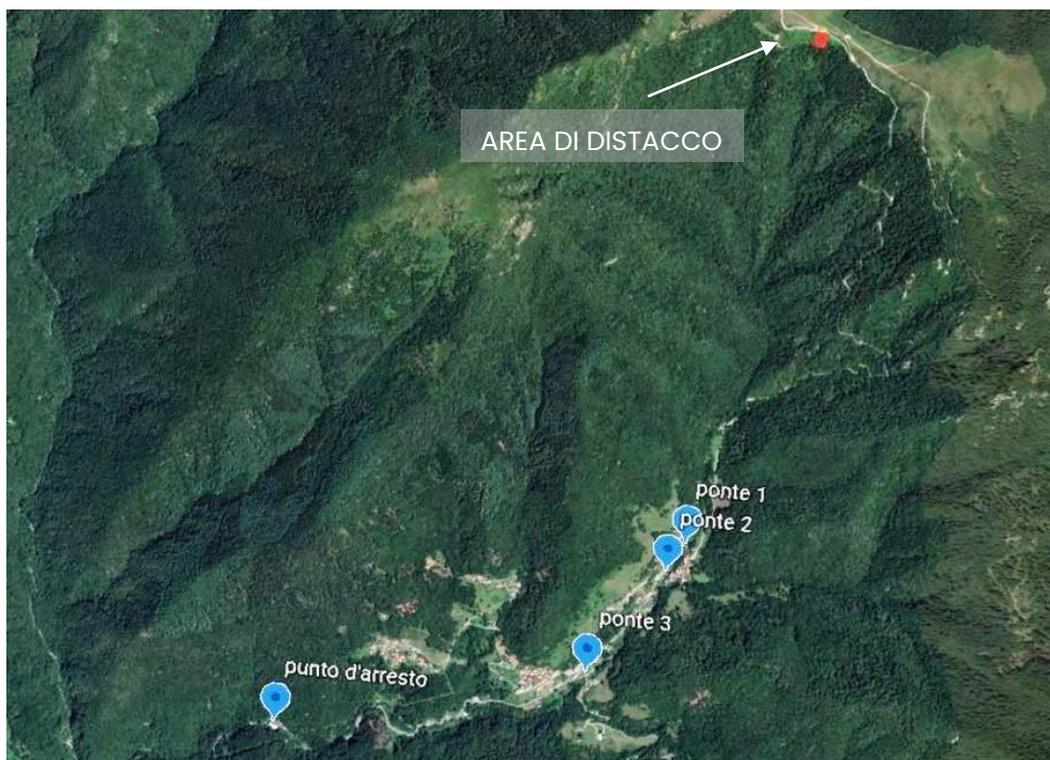


*Figura 61: Zona di innesco (rosso) e di propagazione (giallo) fino alla zona ipotizzata di arresto a valle della frazione di Camasco.*

Nella calibrazione del secondo parametro, invece, si è proceduto per tentativi, incrementando via via il tempo di simulazione fino a quando nel file di output si è passati dalla configurazione di arresto per *time end condition* a quella di arresto per *low flux*,

ovvero quando la quantità di moto del materiale è risultata trascurabile; ciò ha portato al raggiungimento di tempi di **10000 s** e oltre.

L'altezza massima, invece, è stata valutata in corrispondenza dei tre ponti asportati dalla piena (*Figura 62*), le cui altezze tra estradosso dell'impalcato e l'alveo del torrente sono state misurate manualmente tramite rotella metrica. Si è cercato di risalire il più fedelmente possibile alla configurazione precedente rispetto alla loro distruzione basando le misure su quanto resta delle strutture, cioè gli appoggi: i dati così ottenuti sono riportati nella seguente *Tabella 7*, in cui si trovano tipologia, luce della campata e altezza.



*Figura 62: Individuazione dei ponti asportati e della zona di arresto, oltre che della zona di distacco.*

*Tabella 7: Dati principali ottenuti mediante le misurazioni dei ponti.*

Ponte	Tipologia	Luce [m]	Altezza [m]
<b>1</b>	Carrabile	11	2,9
<b>2</b>	Pedonale	10	4,5
<b>3</b>	Carrabile	14	3,5

Come si può notare dall'altezza del ponte n° 2, della tipologia a campata unica e ad arco, oltre alla notevole energia necessaria all'asportazione delle infrastrutture descritte, è possibile assumere che la piena abbia raggiunto un livello decisamente importante, anche dell'ordine di 4-5 m, livello poi mantenuto per lunghe distanze, come testimoniato dall'altezza del ponte n° 3, posizionato decisamente più a valle e a ragguardevole distanza rispetto alla nicchia di distacco.

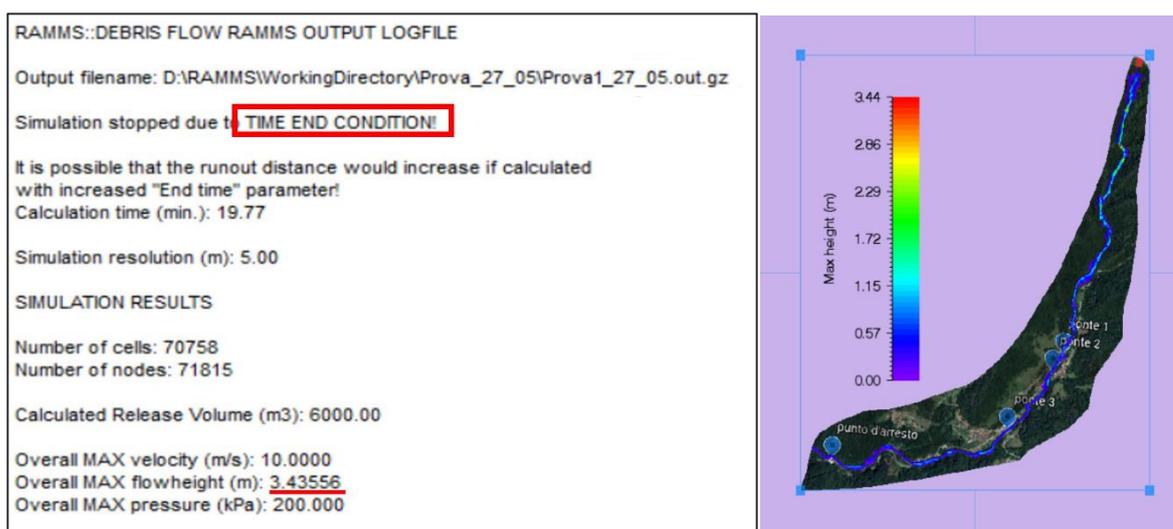
## 4.3 Simulazioni iniziali e calibrazione parametri reologici

Il primo obiettivo perseguito nello svolgimento delle simulazioni iniziali ha riguardato la calibrazione e la taratura dei parametri reologici che, come discusso in precedenza, governano e descrivono il comportamento della massa mobilizzata una volta innescato il flusso detritico della colata.

Si è iniziato, quindi, con una simulazione i cui dati di input relativi al modello di Voellmy (coefficiente di attrito  $\mu$  e coefficiente di attrito turbolento  $\xi$ ) sono riassunti in *Tabella 8*:

**Tabella 8:** Parametri reologici di tentativo - Prova 1.

Prova 1 _ 27 _ 05	
$\mu$ [-]	0,200
$\xi$ [ $m/s^2$ ]	100



**Figura 63:** Output logfile e rappresentazione delle massime altezze del flusso lungo il percorso - Prova 1.

Dall'analisi dei risultati forniti dal software RAMMS (*Figura 63*) si è osservato che l'arresto della simulazione è avvenuto non per il raggiungimento di un valore della quantità di moto inferiore alla soglia prevista ma per un intervallo di simulazione troppo breve. Si nota infatti che il file di testo in output presenta la dicitura di arresto per "time end condition" e non per quella desiderata, ovvero per "low flux"; da qui l'esigenza di aumentare il tempo di simulazione.

Inoltre, si può notare dalla distribuzione delle massime altezze raggiunte che queste non risultano coerenti con le altezze dei ponti asportati e tantomeno con la loro

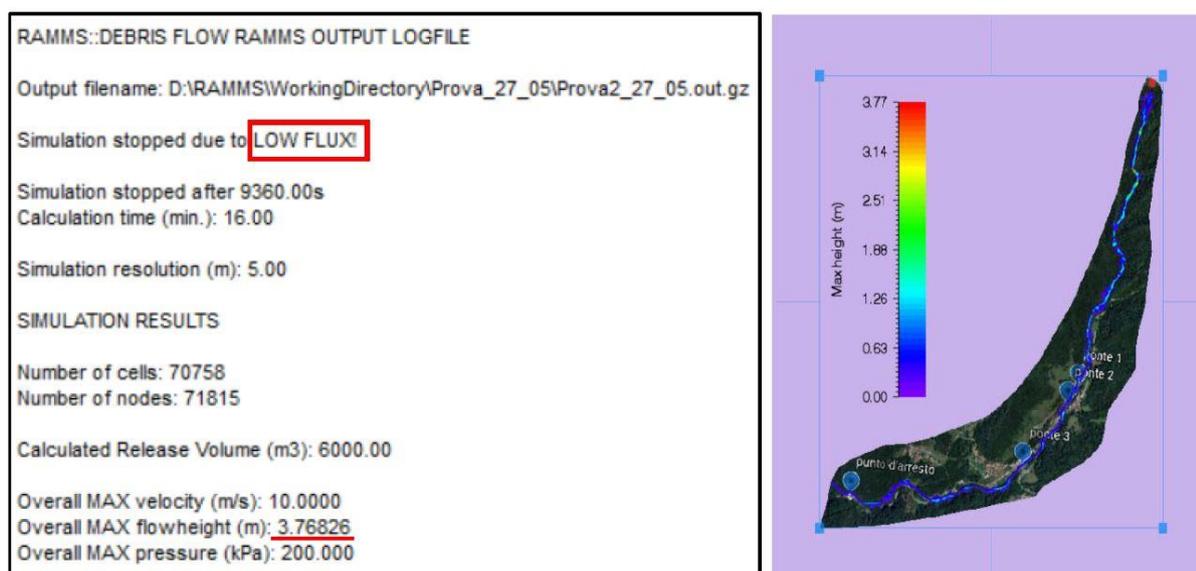
ubicazione, il valore massimo raggiunto è infatti pari a 3,44 m a monte del centro abitato mentre, in corrispondenza dei ponti, si hanno sempre valori inferiori a 1 m.

Anche per quanto riguarda i parametri reologici, perciò, si è reso necessario modificare i valori in ingresso, cercando di ottenere un esito più rappresentativo della realtà.

Per svolgere tale operazione e per un maggior controllo sui risultati, si è proceduto variando separatamente i due coefficienti di attrito che caratterizzano la dissipazione di energia del flusso, condizionando di conseguenza i risultati; a questo proposito, inizialmente, come evidenziato dalla *Tabella 9*, si è mantenuto fisso il coefficiente di attrito di Coulomb, aumentando il coefficiente di attrito turbolento che, sulla base di quanto riportato e suggerito dal manuale del software (RAMMS::DEBRISFLOW User Manual, 2007), per flussi granulari rientra in un intervallo compreso tra 100 e 200  $m/s^2$ .

**Tabella 9:** Parametri reologici di tentativo - Prova 2.

Prova 2_27_05	
$\mu$ [-]	0,200
$\xi$ [ $m/s^2$ ]	200



**Figura 64:** Output logfile e rappresentazione delle massime altezze del flusso lungo il percorso - Prova 2.

Dall'*output logfile* della seconda simulazione (*Figura 64* a sinistra) si può chiaramente notare che il nuovo intervallo temporale di calcolo, fissato a 10000 s, risulta adeguato e che il meccanismo d'arresto rispetta la condizione di *low flux*, il calcolo, infatti, si è interrotto autonomamente e in prossimità della zona di arresto stimata sulla base delle indagini sul posto.

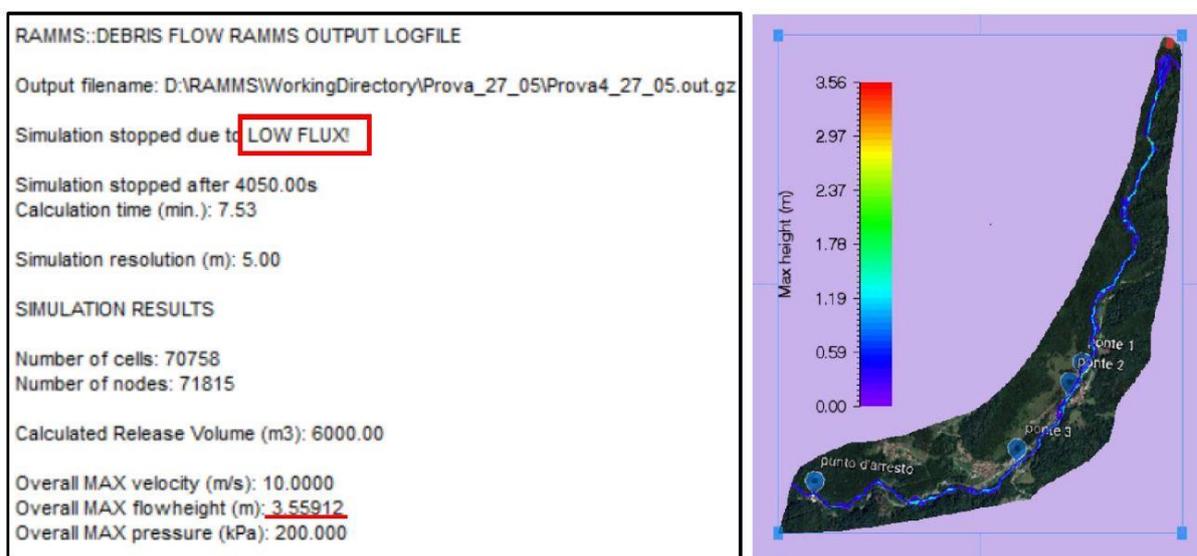
Per quanto riguarda le altezze massime, rappresentate in *Figura 64* a destra, si riscontra, invece, un leggero aumento che tuttavia risulta ancora sottostimato rispetto ai

parametri di controllo da verificare; i valori massimi, infatti, pari a 3,77 m sono raggiunti in prossimità della zona di innesco mentre, nelle zone più a valle, si hanno altezze comprese tra 0,63 e 1,26 m, ben lontane perciò da quelle presenti al di sotto dei ponti distrutti dalla piena.

Volendo affinare ulteriormente il risultato, è stata effettuata una simulazione aggiuntiva, diminuendo ulteriormente il parametro di attrito coulombiano e mantenendo costante il coefficiente di attrito turbolento, come riportato nella *Tabella 10*.

**Tabella 10:** Parametri reologici di tentativo – Prova 4.

Prova 3_27_05	
$\mu$ [-]	0,100
$\xi$ [ $m/s^2$ ]	200



**Figura 65:** Output logfile e rappresentazione delle massime altezze del flusso lungo il percorso – Prova 4.

I risultati di tale simulazione, riportati in *Figura 65*, mostrano che, pur variando il coefficiente di attrito di Coulomb, il meccanismo di arresto viene comunque rispettato e il termine del calcolo avviene al raggiungimento di bassi valori di quantità di moto, ovvero per scarsità di massa in movimento; con riferimento alle altezze massime, invece, queste ultime risultano nuovamente inferiori rispetto alla precedente simulazione.

Si è pertanto deciso, sulla base dei risultati ottenuti, che la simulazione più soddisfacente per continuare a lavorare alla modellazione del fenomeno fosse la *Prova 2*, caratterizzata dai valori:

- coefficiente di attrito di Coulomb,  $\mu = 0,200$ ;
- coefficiente di attrito turbolento,  $\xi = 200 \text{ m/s}^2$ .

Tale modello, oltre a rispettare le condizioni di arresto, ha restituito, seppur non ancora in modo del tutto soddisfacente, i valori di altezze massime raggiunte dal flusso più conservativi e realistici.

## 4.4 Calibrazione dei parametri erosivi

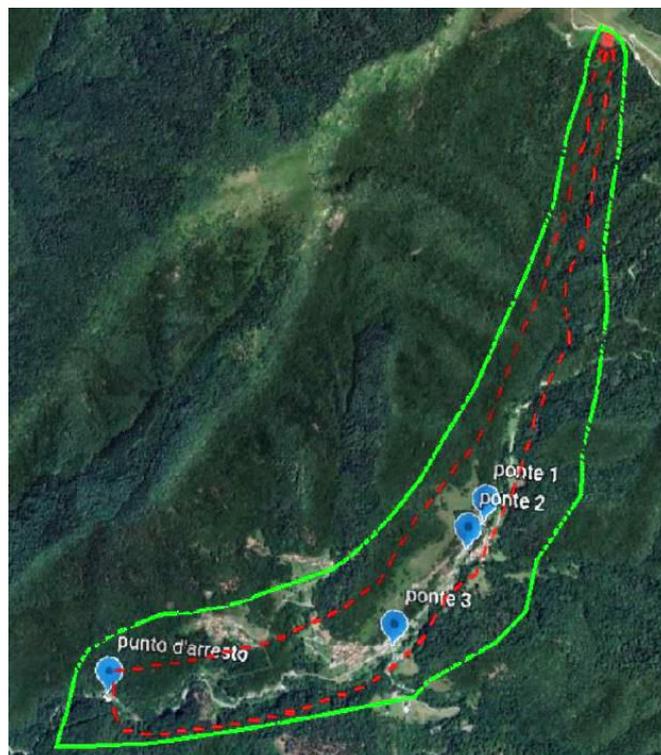
Una volta effettuata la prima taratura dei parametri del modello reologico e, date le evidenze fisiche degli effetti dell'ondata di piena a seguito dei sopralluoghi, si è ritenuto indispensabile introdurre all'interno del modello l'effetto dovuto all'erosione del materiale lungo il percorso del *debris flow*.

La grande energia della massa in movimento unita all'azione delle piogge, infatti, ha provocato intensi fenomeni erosivi lungo tutto il canale e l'alveo del rio Pianale con un conseguente aumento di volume e delle altezze massime raggiunte dal flusso.

Proprio per questo motivo, quindi, si è introdotto nel modello il modulo legato all'erosione, attendendo come dati di output altezze massime più vicine a quanto effettivamente verificatosi.

A partire dai dati di input delle simulazioni precedenti e considerando i parametri reologici derivati dalla prima taratura, sono state aggiunte informazioni circa il modello erosivo.

Uno dei primi dati richiesti è rappresentato dal dominio di erosione che, come visto in precedenza, può essere direttamente tracciato sul DTM mediante l'interfaccia di RAMMS::DEBRIS FLOW (Figura 66). A tale dominio viene poi associata una serie di grandezze a cui è necessario attribuire un valore opportuno (Tabella 11); come primo tentativo, pertanto, il dominio di erosione è stato realizzato direttamente in RAMMS seguendo grossolanamente la zona di propagazione interessata dalla colata.



**Figura 66** : Modello di input con dominio di erosione (tratteggiato in rosso).

*Tabella 11: Parametri erosivi di input.*

Parametri erosivi	Valore
Densità di erosione [kg/m <sup>3</sup> ]	2000
Velocità di erosione [m/s]	0.025
Profondità di erosione potenziale [kPa]	0.1
Sforzo di taglio critico [kPa]	1.0
Massima profondità di erosione [m]	1.0

I parametri considerati di densità, velocità, potenziale di erosione e sforzo critico sono stati assunti di default secondo la teoria di (Frank, 2015):

- o la *densità* si riferisce a quella del materiale coinvolto nel fenomeno di erosione;
- o la *velocità di erosione* rappresenta la quantità di materiale asportata per unità di tempo;
- o la *potenziale profondità di erosione* influenza il massimo valore di profondità erosa,  $e_m$ ;
- o lo *sforzo di taglio critico* è il valore limite oltre il quale inizia a verificarsi l'erosione;
- o la *profondità massima di erosione* rappresenta lo spessore massimo erodibile dello strato.

Tali fattori, in assenza di analisi specifiche, sono complessi da definire: per questo motivo sono stati assunti pari a quelli suggeriti dal manuale del software (RAMMS::DEBRISFLOW User Manual, 2007) e proposti di default dal programma.

Anche in questo caso, per la definizione del dominio di erosione si è proceduto per tentativi, mentre, per quanto riguarda la **profondità massima di erosione**, si è optato per un valore cautelativo, valutato mediante l'osservazione degli effetti provocati dal fenomeno, pari a **1m**.

I risultati dell'analisi condotta, come prevedibile, hanno mostrato una forte sovrastima dell'area interessata dall'erosione; dalla *Figura 67* si può notare come l'output generato dal software riporti il passaggio del flusso in un'area decisamente più vasta, con esondazioni che coinvolgono buona parte del centro abitato di Camasco, circostanza fortunatamente non verificatasi nell'evento reale.

```

RAMMS::DEBRIS FLOW RAMMS OUTPUT LOGFILE

Output filename: D:\RAMMS\WorkingDirectory\Prova_27_05\Prova5_27_05.out.gz

Simulation stopped due to LOW FLUX!

Simulation stopped after 9000.00s
Calculation time (min.): 23.88

Simulation resolution (m): 5.00

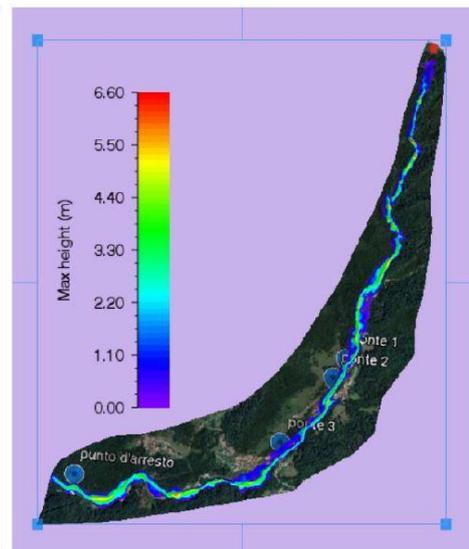
SIMULATION RESULTS

Number of cells: 70758
Number of nodes: 71815

Calculated Release Volume (m3): 6000.00

Overall MAX velocity (m/s): 11.2542
Overall MAX flowheight (m): 6.59827
Overall MAX pressure (kPa): 253.315

```



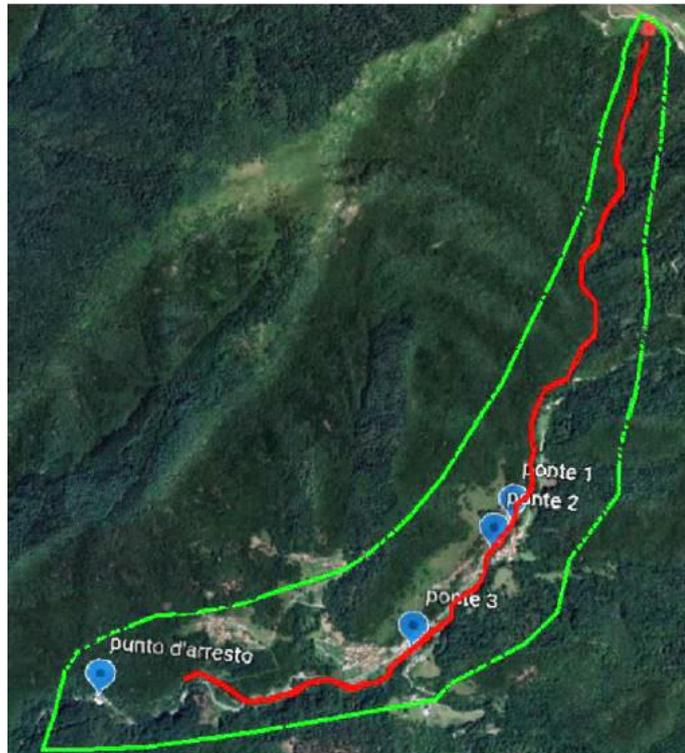
*Figura 67: Output logfile e rappresentazione delle massime altezze del flusso lungo il percorso con erosione – Prova 5.*

Per la determinazione del dominio di erosione, perciò, sono state effettuate diverse simulazioni variando soltanto l'area a cui vengono associati i parametri erosivi, ma sempre tracciandone i profili attraverso il software; i risultati così ottenuti si sono dimostrati sempre inaccettabili poiché il software, come dedotto proprio grazie a questi tentativi, considera il fenomeno erosivo come uniforme su tutto il dominio circoscritto dal poligono tracciato.

Si è notato, infatti, che i valori ottenuti risultavano eccessivi rispetto al valore atteso a causa dell'eccessiva estensione del dominio considerato, con conseguenti altezze e aree invase dalla piena senza alcuna corrispondenza con i fatti realmente accaduti.

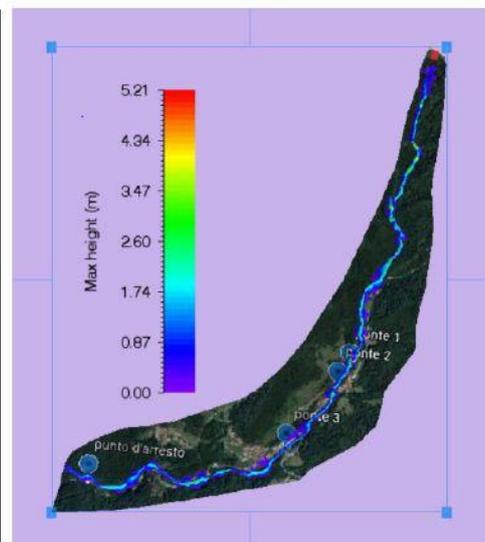
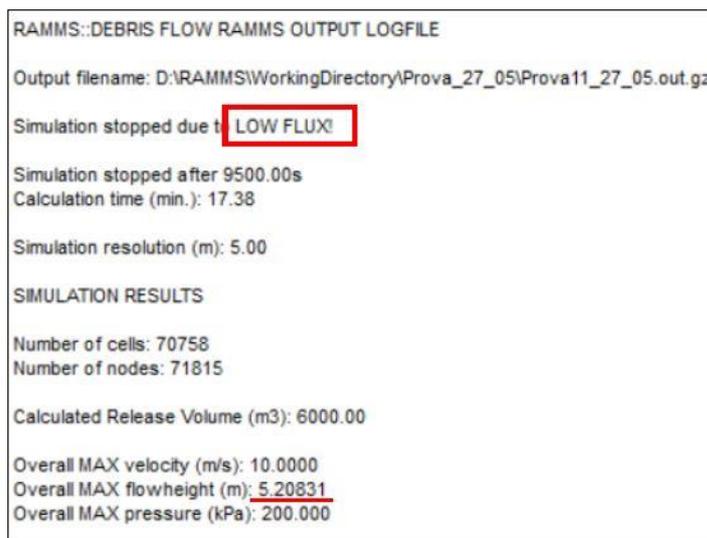
Alla luce di tali osservazioni, quindi, come già effettuato per il tracciamento dell'area di rilascio, si è proceduto con la realizzazione del dominio tramite il software QGis, ricoprendo con maggior precisione le aree interessate dalla colata, seppur con una certa inevitabile approssimazione.

Così facendo è stato possibile ricavare un'area di erosione ridotta e per lo più limitata al letto del torrente che, una volta importata in RAMMS (*Figura 68*), ha consentito di ottenere risultati più attinenti a quanto osservato in seguito all'evento.



**Figura 68** : Modello di input con dominio di erosione (tratteggiato in rosso) tracciato tramite QGIS.

Dopo le modifiche effettuate si può osservare come il meccanismo di arresto venga rispettato; la propagazione del flusso, infatti, termina per esaurimento del materiale e in prossimità del punto di arresto identificato come riferimento. Inoltre, le altezze massime si avvicinano ai valori di riferimento dei ponti asportati, assunti come parametri di controllo e in ultimo, la traiettoria della colata detritica appare coerente con lo sviluppo dell'alveo del Rio Pianale e contenuta in gran parte al suo interno, così come effettivamente verificatosi (*Figura 69*).



**Figura 69** : Output logfile e rappresentazione delle massime altezze del flusso lungo il percorso con erosione – Prova II.

Nonostante la simulazione sia ora molto più soddisfacente, per affinare ulteriormente la stima delle caratteristiche della massa in movimento, sono state condotte analisi aggiuntive variando nuovamente dapprima il parametro erosivo di **massima profondità di erosione** (Tabella 12) ed in seguito i **parametri reologici** (Tabella 13 e Tabella 14).

Tabella 12: Parametri erosivi di input – Prova 12.

Parametri erosivi	Valore
Densità di erosione [kg/m <sup>3</sup> ]	2000
Velocità di erosione [m/s]	0.025
Profondità di erosione potenziale [kPa]	0.1
Sforzo di taglio critico [kPa]	1.0
Massima profondità di erosione [m]	2.0

Anche in questo caso, con profondità massima di erosione pari a 2m, si può osservare come le altezze raggiunte dal flusso (Figura 70) non sono ancora corrispondenti con quanto ricercato ma, al contrario, risultano essere addirittura inferiori a quelle ottenute imponendo una profondità massima di erosione inferiore.

```

RAMMS::DEBRIS FLOW RAMMS OUTPUT LOGFILE

Output filename: D:\RAMMS\WorkingDirectory\Prova_27_05\Prova12_27_05.out.gz

Simulation stopped due to LOW FLUX!

Simulation stopped after 9500.00s
Calculation time (min.): 0.00

Simulation resolution (m): 5.00

SIMULATION RESULTS

Number of cells: 70758
Number of nodes: 71815

Calculated Release Volume (m3): 6000.00

Overall MAX velocity (m/s): 10.0000
Overall MAX flowheight (m): 4.75832
Overall MAX pressure (kPa): 200.000
    
```

Figura 70: Output logfile – Prova 12.

Per avere un riscontro sull'influenza della reologia sul fenomeno di colata in presenza di erosione (di cui non si era tenuto conto nelle simulazioni iniziali) sono stati nuovamente variati i parametri reologici, modificando prima il coefficiente di attrito di Coulomb (Tabella 13) e successivamente il coefficiente di attrito turbolento (Tabella 14).

**Tabella 13:** Parametri reologici di input – Prova 14.

Prova 14_27_05	
$\mu$ [-]	0,100
$\xi$ [m/s <sup>2</sup> ]	200

**Tabella 14:** Parametri reologici di input – Prova 17.

Prova 17_27_05	
$\mu$ [-]	0.200
$\xi$ [m/s <sup>2</sup> ]	100

```

RAMMS::DEBRIS FLOW RAMMS OUTPUT LOGFILE
Output filename: D:\RAMMS\WorkingDirectory\Prova_27_05\Prova14_27_05.out.gz
Simulation stopped due to LOW FLUX!
Simulation stopped after 3730.00s
Calculation time (min.): 7.42
Simulation resolution (m): 5.00
SIMULATION RESULTS
Number of cells: 70758
Number of nodes: 71815
Calculated Release Volume (m3): 6000.00
Overall MAX velocity (m/s): 10.1966
Overall MAX flowheight (m): 4.17510
Overall MAX pressure (kPa): 207.939
    
```

```

RAMMS::DEBRIS FLOW RAMMS OUTPUT LOGFILE
Output filename: D:\RAMMS\WorkingDirectory\Prova_27_05\Prova17_27_05.out.gz
Simulation stopped due to LOW FLUX!
Simulation stopped after 9920.00s
Calculation time (min.): 19.15
Simulation resolution (m): 5.00
SIMULATION RESULTS
Number of cells: 70758
Number of nodes: 71815
Calculated Release Volume (m3): 6000.00
Overall MAX velocity (m/s): 10.0000
Overall MAX flowheight (m): 4.75952
Overall MAX pressure (kPa): 200.000
    
```

**Figura 71:** Output logfile di Prova 14 (a sinistra) e Prova 17 (a destra).

Si è così concluso che, anche variando i parametri erosivi e reologici impostati come base per le simulazioni, i dati di altezza massima del flusso (*Figura 71*) non rispecchiano del tutto le osservazioni effettuate sul campo.

Per questo motivo si è deciso di assumere come risultato finale quello ottenuto dalla *Prova 11*, approfondendo successivamente le ragioni del crollo delle infrastrutture per effetto delle pressioni idrodinamiche generate dal flusso.

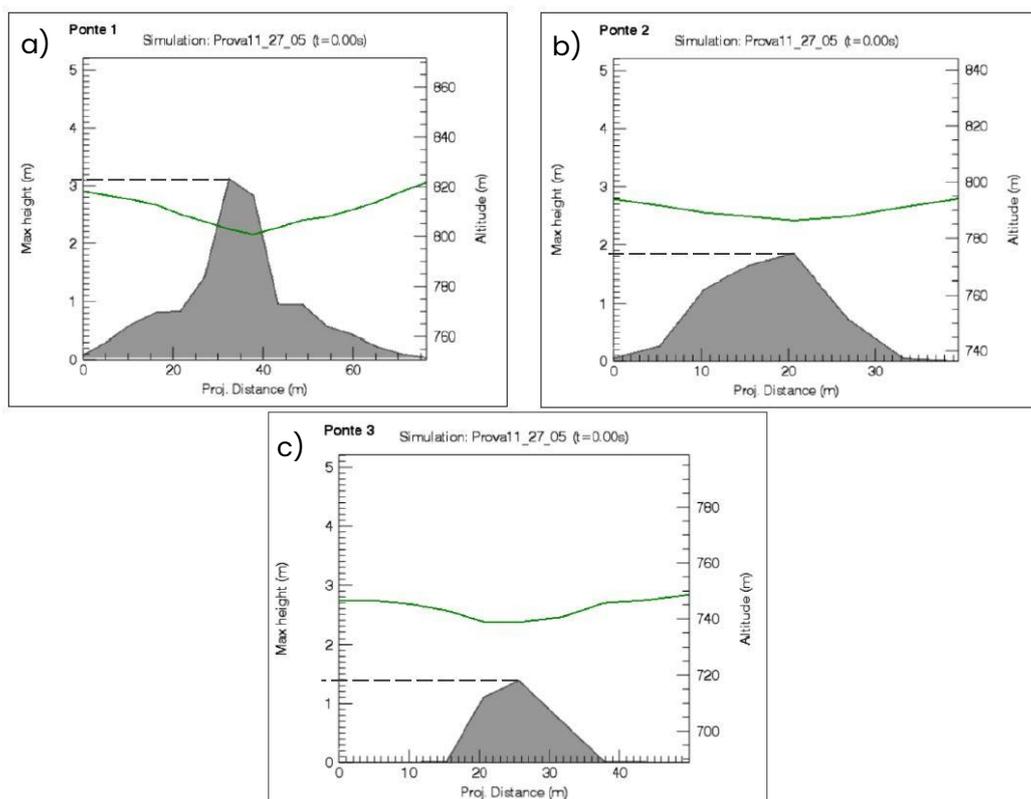
## 4.5 Dati output ricavati dal software

Definita la simulazione e ottenuti i parametri di riferimento, individuati nel modello corrispondente alla *Prova 11*, sono stati ricavati dai dati di output i valori delle altezze e delle pressioni massime raggiunte dal flusso nei particolari punti di interesse, ovvero nelle posizioni in cui erano ubicate le infrastrutture asportate dalla colata detritica, le cui altezze sono riportate in *Tabella 15*.

In particolare, sono stati ricavati mediante il software RAMMS i profili di massima altezza relativi alle sezioni trasversali al canale, tracciate in prossimità della posizione dei ponti distrutti (*Figura 72*).

**Tabella 15:** Altezze dei ponti ottenute mediante le misurazioni.

Ponte	Tipologia	Altezza [m]
<b>1</b>	Carrabile	2,9
<b>2</b>	Pedonale	4,5
<b>3</b>	Carrabile	3,5



**Figura 72:** Profili di massima altezza per le sezioni trasversali all'alveo in corrispondenza dei ponti: a) Ponte 1, b) Ponte 2 e c) Ponte 3.

**Tabella 16:** Altezze massime raggiunte dal flusso in corrispondenza dei ponti.

Ponte	Tipologia	Altezza massima del flusso [m]
<b>1</b>	Carrabile	3,1
<b>2</b>	Pedonale	1,9
<b>3</b>	Carrabile	1,4

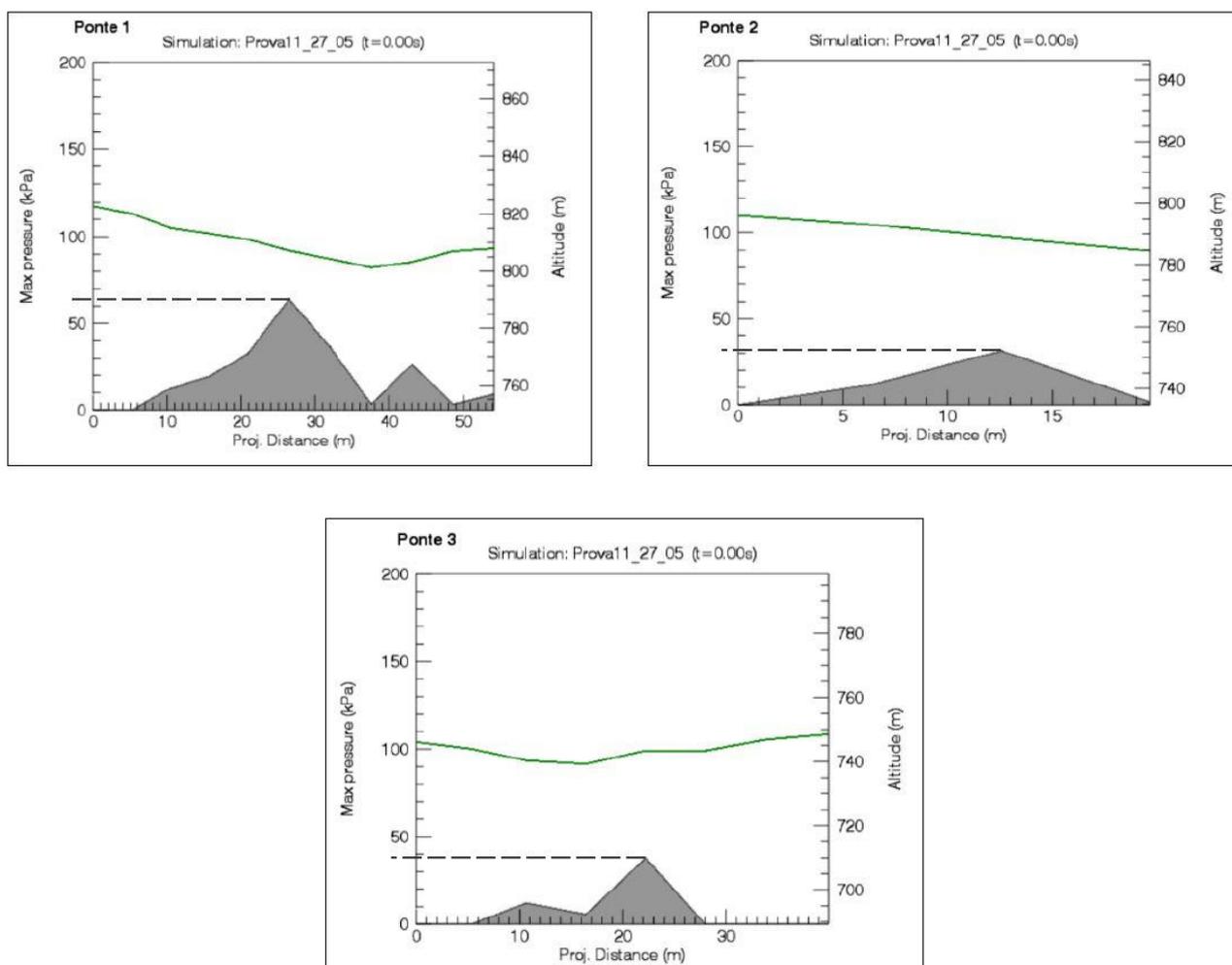
Dal confronto effettuato tra le altezze massime raggiunte dal flusso nella simulazione (Tabella 16) e quelle misurate dei ponti (Tabella 15), si può notare come solamente nel caso del primo ponte si sono ottenuti valori compatibili, mentre, nel caso del secondo ed in particolare per il terzo ponte, le altezze raggiunte nella simulazione si sono rivelate nettamente inferiori.

I valori ottenuti, tuttavia, sono stati ritenuti comunque accettabili in quanto nelle simulazioni svolte con RAMMS::DEBRIS FLOW il materiale è considerato come un continuo equivalente con caratteristiche reologiche omogenee.

Questa ipotesi in molti casi non risulta realistica poiché non si può considerare la presenza di blocchi in materiale lapideo di grosse dimensioni e, soprattutto, l'elevata

presenza di materiale ligneo trasportato dal flusso, che ha causato l'ostruzione dell'alveo al di sotto delle campate, ostacolando il deflusso della piena.

Al fine di validare comunque la back analysis effettuata, quindi, si è deciso di analizzare gli effetti della colata sulle infrastrutture in termini di pressioni, effettuando un confronto tra quelle agenti, risultato delle simulazioni (*Figura 73 e Tabella 17*) e i valori limite di pressione sopportabili dalle strutture calcolati analiticamente, così da verificare se tali risultati giustificano comunque il crollo dei ponti.



**Figura 73:** Profili di pressione in corrispondenza delle sezioni dei ponti.

**Tabella 17:** Pressioni massime raggiunte dal flusso in corrispondenza dei ponti.

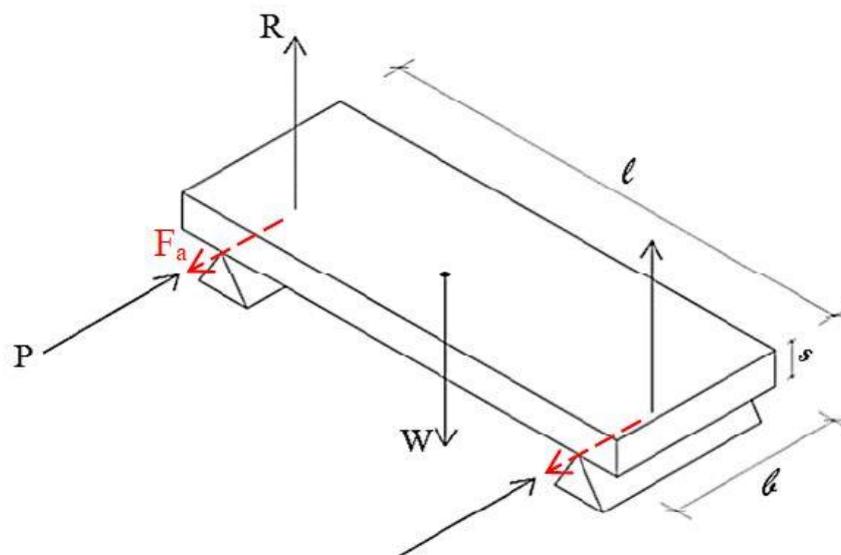
Ponte	Tipologia	Pressione massima del flusso [kPa]
<b>1</b>	Carrabile	62
<b>2</b>	Pedonale	30
<b>3</b>	Carrabile	40

A partire dai dati di output così ricavati, attraverso ipotesi estremamente semplificative, si è proceduto con la valutazione dell'**equilibrio a traslazione** dei ponti. Questi ultimi sono stati approssimati come travi semplicemente appoggiate e considerati come *corpi rigidi*, a causa della mancanza di dati e dettagli costruttivi relativi alla reale geometria delle strutture.

## 4.6 Verifica a traslazione degli impalcati dei ponti

Come già anticipato nel paragrafo precedente, i ponti sono stati cautelativamente approssimati a travi piene in calcestruzzo armato, di dimensioni analoghe all'ingombro misurato delle strutture preesistenti, come indicato in *Figura 74*, e il loro comportamento assimilato a quello di un corpo rigido.

Le ipotesi alla base di questo calcolo sono fortemente semplificative ma consentono di effettuare stime e considerazioni sulle pressioni in gioco e sull'equilibrio degli impalcati.



*Figura 74: Schema statico semplificato dei ponti in esame e delle pressioni agenti.*

Come noto dalla fisica classica un corpo è detto in equilibrio quando esso non è soggetto a traslazione, né tantomeno ad alcuna rotazione; ciò si verifica ogni volta in cui la somma delle forze esterne, rappresentate dai carichi concentrati, dalle risultanti dei carichi distribuiti, e dai momenti ad esso applicati è nulla.

Nel caso particolare di trave semplicemente appoggiata, l'equilibrio è garantito dalle reazioni vincolari R che si generano agli appoggi, uguali e contrarie alla forza peso W, principale forza agente in condizioni normali di esercizio, entrambe calcolabili come:

- $W = mg$  (forza peso);
- $R = W = mg$  (reazione vincolare agli appoggi);

Ipotizzando, poi, di applicare una forza esterna orizzontale data dalla pressione  $p$ , applicata lungo lo spessore laterale dell'impalcato, si avrà una perturbazione dell'equilibrio descritto in precedenza e legato alla massa del corpo; tale forza, infatti, qualora non fosse in alcun modo contrastata, comporterebbe una traslazione rigida dell'impalcato nel suo stesso verso di applicazione.

Essendo la trave considerata semplicemente appoggiata, essa non risulta in alcun modo vincolata alla traslazione sul piano orizzontale nella direzione di applicazione del carico distribuito dato dalla pressione: l'unica forza ad opporsi a tale traslazione, pertanto, è da individuarsi nella forza di attrito sviluppata nei punti di contatto tra spalla del ponte e impalcato.

Condizione necessaria affinché si verifichi il movimento è che la risultante delle pressioni,  $P$ , superi il valore della forza di attrito  $F_a$ , calcolabile come  $F_a = \mu_s \cdot N$  dove:

- $\mu_s$  è il coefficiente di attrito statico;
- $N$  è la forza normale alla superficie di scorrimento, che in questo caso è pari al peso  $W$ .

Avendo ottenuto in precedenza i valori di pressione agente, relative alle sezioni situate in corrispondenza dei ponti, per ciascuno di essi sono stati calcolati i valori della forza resistente, ovvero la forza di attrito tra impalcato e appoggi.

#### 4.6.1 Ponte 1

*Tabella 18 : Dati geometrici Ponte 1.*

Grandezza	Valore
<b>Altezza [m]</b>	2,9
<b>Lunghezza [m]</b>	11
<b>Larghezza [m]</b>	8
<b>Spessore [m]</b>	0,8
<b>Area laterale [m<sup>2</sup>]</b>	8,8
<b>Massa volumica cla [kN/m<sup>3</sup>]</b>	25
<b>Volume [m<sup>3</sup>]</b>	70,4

A partire dai valori della geometria, riportati in *Tabella 18*, è stata calcolata l'entità della forza peso  $W$ , come prodotto tra il volume della trave equivalente considerata e il peso specifico del materiale che, da ipotesi, è stato considerato come calcestruzzo armato di densità pari a  $25 \text{ kN/m}^3$ :

$$\text{Forza peso: } W = V \cdot \gamma = 1760 \text{ kN}$$

Successivamente si è svolta un'indagine bibliografica per la definizione del valore del coefficiente d'attrito tra superficie e appoggio; non disponendo di dati certi sulla tipologia

di appoggio esistente prima del crollo dei ponti (*Figura 75*), stando all'epoca della loro costruzione, si è ipotizzato che questi potessero essere di due tipologie:

- Appoggio calcestruzzo-calcestruzzo, con coefficiente di attrito  $\mu_{s,cls} = 0,3$ ;
- Appoggio in materiale polimerico, con coefficiente di attrito  $\mu_{s,p} = 0,2$ .



**Figura 75:** Immagini del Ponte 1 antecedenti al crollo (*Google Earth*).

Sono state così calcolate le forze resistenti dovute all'attrito per le due tipologie di appoggio ipotizzate:

- $F_{a,cls} = W \cdot \mu_{s,cls} = 1760 \cdot 0,3 = 528 \text{ kN}$
- $F_{a,p} = W \cdot \mu_{s,p} = 1760 \cdot 0,2 = 352 \text{ kN}$

Definite le forze agenti, per poter effettuare un confronto diretto con le pressioni dovute al flusso, queste sono state ricondotte a loro volta ad un valore associato di pressione, agente sulla superficie laterale della trave ma con verso opposto rispetto alla propagazione del flusso:

- $s_{cls} = F_{a,cls}/A_l = 528/8,8 = 60 \text{ kPa}$
- $s_p = F_{a,p}/A_l = 352/8,8 = 40 \text{ kPa}$

Poiché dai dati ottenuti tramite il software (*Tabella 12*) il valore di pressione agente sul Ponte 1 risulta essere circa pari a  $P_{a,1} \cong 62 \text{ kPa}$ , il valore di pressione resistente derivante dal solo contributo attritivo è perciò superato per entrambe le tipologie d'appoggio.

L'abbattimento della struttura da parte della pressione agente nella sola direzione considerata risulta perciò giustificato e coerente con le simulazioni effettuate.

## 4.6.2 Ponte 2

In merito alla seconda struttura distrutta per effetto della colata detritica, è stato possibile ricavare immagini più precise sulla tipologia d'appoggio, che risultava essere completamente in calcestruzzo (*Figura 76*); inoltre, sempre a partire dalle immagini, sono stati ottenuti ulteriori dettagli per ciò che riguarda la geometria dell'impalcato, rappresentabile da una forma trapezoidale (*Tabella 19*).



*Figura 76* : Immagini del Ponte 2 antecedenti al crollo (Google Earth).

*Tabella 19* : Dati geometrici Ponte 2.

Grandezza	Valore
<b>Altezza [m]</b>	4,5
<b>Lunghezza [m]</b>	10
<b>Larghezza [m]</b>	2,5
<b>Spessore 1 [m]</b>	0,8
<b>Spessore 2 [m]</b>	1,3
<b>Area laterale [m<sup>2</sup>]</b>	8
<b>Massa volumica cla [kN/m<sup>3</sup>]</b>	25
<b>Volume [m<sup>3</sup>]</b>	26,25

Anche per il *Ponte 2*, dati i valori geometrici, si è proceduto con il calcolo della forza peso, moltiplicando il volume per il peso specifico del materiale:

$$\text{Forza peso: } W = V \cdot \gamma = 656,25 \text{ kN}$$

Successivamente, stando a quanto visibile dalle immagini, è stata fatta l'ipotesi di appoggio semplice cls-cls, considerando di conseguenza l'opportuno coefficiente d'attrito  $\mu_{s,cls} = 0,3$ , è stata calcolata la forza resistente dovuta all'attrito:

$$\circ F_{a,cls} = W \cdot \mu_{s,cls} = 656,25 \cdot 0,3 = 196,88 \text{ kN}$$

E di conseguenza il relativo valore di pressione:

$$\circ s_{cls} = F_{a,cls} / A_l = 196,88 / 8 = 24,6 \text{ kPa}$$

Essendo il valore di pressione ricavato dal software in corrispondenza della sezione del *Ponte 2* (*Tabella 12*) pari a  $P_{a,2} \cong 30 \text{ kPa}$ , si ottiene che  $P_{a,2} > S_{cls}$  ed il collasso della struttura è nuovamente giustificabile sulla base della simulazione effettuata.

### 4.6.3 Ponte 3

Gli stessi calcoli, infine, sono stati ripetuti per l'ultimo ponte, situato a valle dell'abitato di Camasco.

Come nel caso del *Ponte 1*, non è stato possibile definirne con certezza e a priori la geometria e la tipologia degli appoggi (*Figura 77*), motivo per cui è stata effettuata una valutazione delle pressioni critiche per entrambi i casi, considerando i due diversi tipi di materiale generalmente impiegati nella realizzazione degli appoggi.



*Figura 77: Immagini del Ponte 3 antecedenti al crollo (Google Earth).*

*Tabella 20: Dati geometrici Ponte 3.*

Grandezza	Valore
<b>Altezza [m]</b>	4,5
<b>Lunghezza [m]</b>	10
<b>Larghezza [m]</b>	2,5
<b>Spessore 1 [m]</b>	0,8
<b>Spessore 2 [m]</b>	1,3
<b>Area laterale [m<sup>2</sup>]</b>	8
<b>Massa volumica cla [kN/m<sup>3</sup>]</b>	25
<b>Volume [m<sup>3</sup>]</b>	26,25

Applicando la stessa procedura utilizzata per i casi precedenti, è stato effettuato il calcolo del peso proprio dell'impalcato, a partire dai dati in *Tabella 20*.

$$\text{Forza peso: } W = V \cdot \gamma = 656,25 \text{ kN}$$

Anche in questo caso, non è stato possibile risalire al materiale costituente gli appoggi tra spalla e impalcato, motivo per cui sono stati nuovamente considerati i due casi seguenti:

- Appoggio calcestruzzo-calcestruzzo, con coefficiente di attrito  $\mu_{s,cls} = 0,3$ ;
- Appoggio in materiale polimerico, con coefficiente di attrito  $\mu_{s,p} = 0,2$ .

Sono state così calcolate le forze resistenti dovute all'attrito per le due tipologie di appoggio ipotizzate:

- $F_{a,cls} = W \cdot \mu_{s,cls} = 1260 \cdot 0,3 = 378 \text{ kN}$
- $F_{a,p} = W \cdot \mu_{s,p} = 1260 \cdot 0,2 = 252 \text{ kN}$

Le forze ottenute sono state ricondotte ad un relativo valore di pressione:

- $s_{cls} = F_{a,cls}/A_l = 378/11,2 = 33,75 \text{ kPa}$
- $s_p = F_{a,p}/A_l = 252/11,2 = 22,5 \text{ kPa}$

Dal confronto tra le pressioni equivalenti, dovute alla forza di attrito, e il valore di spinta agente, dovuto al flusso, in corrispondenza della medesima sezione, pari circa a  $P_{a,3} \cong 40 \text{ kPa}$ , essendo quest'ultimo maggiore della resistenza stimata, si può assumere che la struttura abbia subito una traslazione nella direzione e verso della colata, fino al suo completo collasso (*Figura 78*).



**Figura 78** : Immagine del Ponte 3 successiva all'evento ([www.cittadinovara.com](http://www.cittadinovara.com)).

È necessario far notare che il calcolo fin qui descritto non tiene in considerazione di eventuali sotto spinte in direzione verticale date dal passaggio del fluido al di sotto dei ponti, che riduce di conseguenza il valore del peso proprio sugli appoggi e, pertanto, i contributi resistenti legati alla forza di attrito; i risultati ottenuti nella simulazione, seppur con una sovrastima del volume degli elementi strutturali, sono perciò abbondantemente cautelativi.

Inoltre, un altro aspetto di fondamentale importanza è rappresentato dal trasporto solido tipico dei fenomeni erosivi e di piena; quest'ultimo, per effetto della sedimentazione di detriti e materiale ligneo, si traduce generalmente in una ostruzione della sezione di

deflusso, con il conseguente innalzamento delle altezze del flusso a monte e un corrispondente aumento delle pressioni agenti sulla sezione o struttura di interesse.

A fine di verificare l'ipotesi che un'ostruzione anche parziale della sezione di deflusso possa aver generato un incremento delle altezze del flusso stesso in corrispondenza dei ponti, si è proceduto con un'analisi dell'ostruzione attraverso l'applicazione di formule empiriche per la valutazione del risalto idraulico ( $\Delta y$ ) e dell'incremento delle pressioni per gli effetti idrodinamici ad esso associati.

## 4.7 Analisi dell'ostruzione della sezione di deflusso

Nella valutazione delle condizioni di deflusso di una corrente è di fondamentale importanza tenere in considerazione le problematiche relative all'interazione del flusso con le opere di sostegno dell'impalcato di un ponte collocate in alveo, ovvero le pile e le spalle.

Tali opere, infatti, provocando il restringimento della sezione stessa, rappresentano uno dei principali ostacoli al moto della corrente causandone, conseguentemente, la variazione dell'assetto idrometrico, in particolare durante il passaggio della portata di piena.

Il fenomeno idraulico più frequente e rilevante, indotto dalle strutture inserite nell'alveo, è l'aumento del tirante idrico a monte dell'ostacolo, ovvero un cosiddetto rialzo idraulico; in particolare, per portate relative a tempi di ritorno elevati come nel caso oggetto di studio, si possono osservare rialzi notevoli, proprio in relazione al restringimento della sezione e alle condizioni di deflusso che si instaurano.

La dipendenza del rigurgito a monte della struttura dal grado di restringimento, inoltre, può essere correlata a possibili ulteriori riduzioni della sezione di deflusso, dovute in primo luogo all'ostruzione parziale delle luci presenti, fenomeno molto probabile nelle parti alte del bacino a causa del trasporto di materiale solido galleggiante come detriti, tronchi, ecc.

## 4.7.1 Deflusso delle acque in corrispondenza di un restringimento della sezione

Durante l'evento di piena è necessario garantire il deflusso della portata di progetto attraverso le luci del ponte, assicurando la formazione di rialzi idraulici compatibili con le arginature presenti; tale obiettivo può essere raggiunto attraverso diversi accorgimenti da tenere in conto durante la fase progettuale oppure tramite opere di adeguamento delle strutture esistenti. Tali accorgimenti sono qui elencati:

- dimensionamento delle luci tale da non creare eccessivi restringimenti sulla sezione;
- assegnazione di un dislivello minimo (6-7 m) tra fondo dell'alveo e quota di sottotrave;
- rispetto di un franco di sicurezza (1,5-2 m) tra il livello idrometrico raggiunto in corrispondenza dell'impalcato e la quota di sottotrave durante la piena di progetto considerata;
- valutazione della necessità di adeguare tali franchi, nel caso in cui il ponte possa essere soggetto a fenomeni di ostruzione parziale delle luci.

Queste indicazioni sono utili a garantire sufficiente sicurezza contro l'eventuale superamento dell'impalcato da parte della corrente durante la piena di progetto; tale situazione, infatti, oltre a trasmettere sollecitazioni orizzontali improprie alla struttura, determina un risalto idraulico verso monte che può provocare l'esondazione al di fuori degli argini esistenti.

Per quanto riguarda i ponti esistenti, bisogna effettuare una distinzione tra i ponti costruiti sino al Secondo Dopoguerra e quelli di moderna concezione.

Questi ultimi, infatti, attraverso l'introduzione di materiali qualitativamente superiori, l'applicazione di schemi strutturali iperstatici e tecniche di scavo più avanzate, risultano quasi ininfluenti sul deflusso di piena, contrariamente a quanto avveniva in passato.

In generale, quindi, i ponti di vecchia costruzione molto spesso non rispettano i franchi relativi alla quota di sottotrave né sono in grado di garantire sufficienti luci libere, inducendo così un eccessivo grado di restringimento alla sezione interessata.

## 4.7.2 Dinamica della corrente in presenza di un restringimento

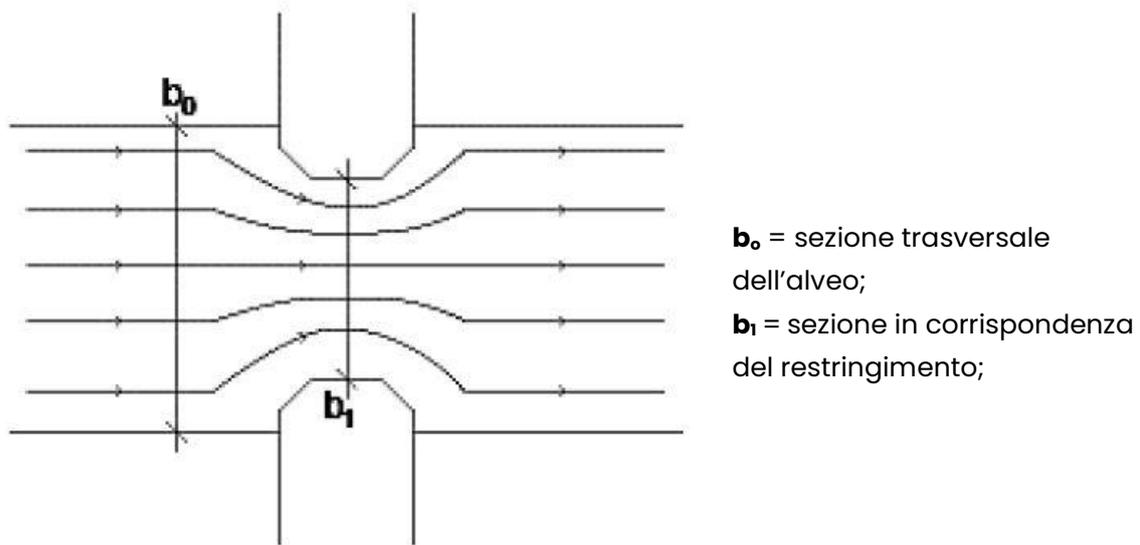
In termini generali, con riferimento alle varie casistiche, è possibile individuare due tipologie fondamentali di restringimento della sezione di deflusso di un corso d'acqua:

- **contrazione**, quando si ha un restringimento che lascia libera una luce nella zona centrale del corso d'acqua, come avviene, ad esempio, nel caso delle spalle dei ponti (*Figura 79*).

- **ostruzione**, caratterizzata dalla presenza di ostacoli nella zona centrale della sezione di deflusso che provocano la separazione della corrente, come avviene nel caso delle pile.

Nel caso specifico dell'evento oggetto di studio, i ponti sono a campata unica senza pile in alveo.

Sebbene le spalle dei ponti in questione siano ben integrate negli argini e non arrechino disturbo al normale transito della corrente, si ipotizza la possibilità di deposizione di materiale ligneo o di detriti e massi trasportati dalla piena lungo gli argini, provocando una contrazione della sezione di deflusso.



*Figura 79: Schema di un restringimento per contrazione (M. Fugazza, 2004/05).*

Il parametro fisico che più condiziona il regime idraulico nel tratto interessato dal restringimento è il **rapporto di contrazione r**: considerando per semplicità una sezione trasversale di forma rettangolare, schematizzata in *Figura 79*, esso è definito come il rapporto tra la misura della sezione libera  $b_1$  in corrispondenza del restringimento e la larghezza trasversale  $b_0$  dell'alveo a monte e a valle dell'opera.

$$r = \frac{b_1}{b_0}$$

Il grado di restringimento, inoltre, viene indicato anche con un parametro detto **coefficiente di ingombro  $\alpha$** , calcolato come:

$$\alpha = \frac{b_1 - b_0}{b_0} = 1 - r$$

Entrambi i parametri, quindi, forniscono informazioni sull'entità del restringimento; in particolare, mentre il rapporto di contrazione indica la percentuale di luce libera rispetto

a quella disponibile a monte, il coefficiente d'ingombro rappresenta la percentuale della sezione trasversale occupata rispetto alla luce libera.

## 4.8 Stima del rialzo idraulico tramite metodi empirici

Come accennato in precedenza, per un'ulteriore validazione dei risultati ottenuti si è deciso di analizzare gli effetti dovuti ad un restringimento della sezione di deflusso in corrispondenza dei ponti, riconducibile alla deposizione di detriti e all'elevato quantitativo di materiale ligneo trasportato dalla corrente.

A tale scopo, è stata valutata l'entità del rialzo idraulico mediante le sottoelencate formule sperimentali, (Fugazza, 2004/2005), in seguito brevemente descritte:

1. Formula di D'Aubuisson (1852);
2. Formula di Nagler (1918);
3. Formula di Rehbock (1919);
4. Formula di Yarnell (1934);
5. Formula di Yarnell corretta da Charbeneu e Holley (2001);
6. Formula di Al-Nassri (1994).

In ciascuna formula, i pedici 1,2 e 3 stanno a indicare rispettivamente le zone in cui devono essere calcolati i parametri, rispettivamente a valle, in corrispondenza e a monte della contrazione.

### 4.8.1 Formula di D'Aubuisson (1852)

Viene scritta in modo implicito rispetto al rialzo idraulico  $\Delta y$  come:

$$Q = K_{DA} b_2 y_3 \cdot \sqrt{2g\Delta y + v_1^2}$$

dove:

- Q = portata di progetto;
- $K_{DA}$  = coefficiente di forma della sezione di D'Aubuisson (tabella in *Figura 81*);
- $b_2$  = larghezza dell'alveo nella sezione ristretta;
- $y_3$  = altezza del flusso a monte del restringimento;
- $\Delta y$  = rialzo idraulico.
- $v_1$  = velocità del flusso a valle del restringimento.

Esplicitando, quindi, rispetto al rialzo  $\Delta y$ , si ottiene:

$$\Delta y = \frac{Q^2}{2gA^2 K_{DA}^2} - \frac{v_1^2}{2g}$$

dove:  $A = b_2 \cdot y_3$ .

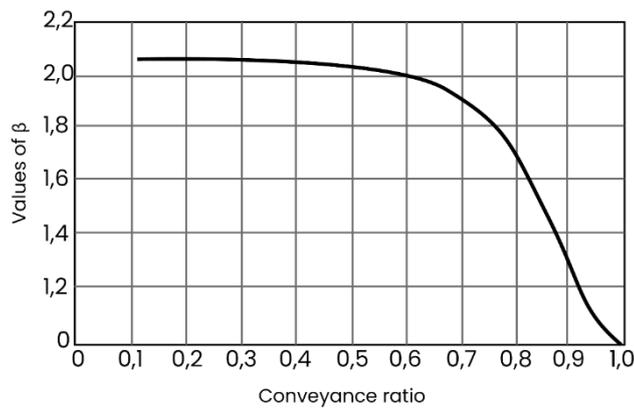
## 4.8.2 Formula di Nagler (1918)

La formula di Nagler presenta una forma simile a quella proposta da D'Abuisson e viene scritta come:

$$Q = K_N b_2 \cdot \sqrt{2g} \cdot (y_3 - \theta \cdot \frac{v_3^2}{2g}) \cdot \sqrt{\Delta y + C_r \cdot \frac{v_1^2}{2g}}$$

dove, oltre ai termini già considerati, compaiono:

- $\theta = 0,3$  coefficiente di aggiustamento che rapporta il tirante osservato a valle con quello sul restringimento;
- $K_N$  = coefficiente di forma delle pile (tabella in *Figura 81*);
- $V_3$  = velocità del flusso a monte del restringimento;
- $C_R$  = coefficiente funzione del rapporto di contrazione  $r$  (*Figura 80*);



**Figura 80:** Metodo di Nagler, valori del coefficiente  $C_R$  in funzione del rapporto di contrazione  $r$  (Fugazza, 2004/2005).

## 4.8.3 Formula di Rehbock

Valida solo per correnti poco turbolente nei pressi del restringimento, questa formula è espressa come segue:

$$\Delta y = K_R \cdot (1 - r) \cdot \frac{v_2^2}{2g}$$

con  $K_R$  coefficiente di forma di Rehbock (tabella in *Figura 81*).

Pier shape	$K_{DA}$	$K_N$	$K_R$
Semicircular nose and tail	1.079	0.934	3.35
Lens-shaped nose and tail	1.051	0.952	3.55
Twin cilinder piers with connecting diaphragm (L/D=4)	0.966	0.907	5.99
Twin cilinder piers without connecting diaphragm (L/D=4)	0.991	0.892	6.13
90° triangular nose and tail	1.050	0.887	3.54
Square nose and tail without batter	1.065	0.871	2.64

**Figura 81:** Tabella dei coefficienti di forma sperimentali da adottare in funzione della tipologia di pila in alveo (Fugazza, 2004/2005).

#### 4.8.4 Formula di Yarnell (1934)

La formula, presentata nel 1934 e ricavata tramite interpolazione di dati sperimentali, è la più utilizzata tra le diverse espressioni per la stima del rialzo idraulico e viene formulata come segue:

$$\Delta y = 2K_Y \cdot (K_Y + 5Fr_3^2 - 0,6) \cdot (\alpha + 15\alpha^4) \frac{v_3^2}{2g}$$

dove:

- $\Delta y$  = rialzo idraulico dovuto alla contrazione;
- $K_Y$  = coefficiente di forma ottenuto sperimentalmente da Yarnell (tabella in *Figura 82*);
- $Fr_3$  = numero di Froude immediatamente a valle del restringimento definito come:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$$

essendo:

$v$  la velocità del flusso misurata nella sezione di interesse (ricavata come output dalle simulazioni con RAMMS::DEBRIS FLOW);

$h$  l'altezza libera di deflusso, ipotizzata come distanza tra alveo e intradosso dell'impalcato del ponte;

- $\alpha$  = coefficiente d'ingombro;
- $v_3$  = velocità della corrente nella sezione a valle del ponte.

#### 4.8.5 Formula di Yarnell corretta (2001)

La formulazione, corretta da Charbeneau e Holley (2001) mediante due parametri,  $\beta$  e  $\mu$ , che assumono rispettivamente un valore pari a 1,24 e 0,4, risulta:

$$\frac{\Delta y}{y} = \beta K_Y \cdot (K_Y + \mu 5Fr_3^2 - 0,6) \cdot (\alpha + 15\alpha^4) \cdot Fr_3^2$$

Pier Shape		Pier Coefficient
Semicircular nose and tail		0.90
Twin-cylinder piers with connecting diaphragm		0.95
Twin-cylinder piers without diaphragm		1.05
90° triangular nose and tail		1.05
Square nose and tail		1.25
Ten pile trestle bent		2.50

*Figura 82: Metodo di Yarnell corretto, tabella dei coefficienti di forma  $K_Y$  (Fugazza, 2004/2005).*

## 4.8.6 Formula di Al-Nassri (1994)

La formula deriva da risultati sperimentali riferiti al rialzo idraulico generato a monte di un restringimento caratterizzato da coefficienti d'ingombro compresi tra 0,07 e 0,47 (S.Al-Nassri, 1996) e viene scritta come:

$$\frac{\Delta y}{y_3} = \frac{0,0678}{\Phi^{0,95}} \cdot \left[ \frac{Fr_3}{(1-\alpha)^{1,8}} \right]^{2,29}$$

dove  $\Phi$  è un coefficiente di forma definito come il rapporto tra l'area delle pile esposta alla corrente sul restringimento e l'area  $A_3$  di deflusso a valle dello stesso.

Trattandosi di formule empiriche ricavate per situazioni o dati di partenza diversi, per ottenere un unico valore rappresentativo del fenomeno, si è proceduto con la loro applicazione ai tre ponti oggetto di analisi, considerando infine come risultato finale il valore medio tra quelli ottenuti.

## 4.9 Stima del rialzo idraulico presso il Ponte 1

### 4.9.1 Formula di D'Aubuisson

Considerando la pressoché totale integrazione delle spalle del ponte all'interno degli argini, si è assunta la larghezza libera dell'alveo uguale alla campata del ponte misurata in situ e pari a  $b_0 = 11$  m.

Non conoscendo il reale grado di restringimento, sono stati considerati valori progressivi di contrazione della sezione variabili dal 10 al 90%.

L'altezza di riferimento è stata anch'essa considerata pari a quella misurata,  $y_2 = 2,9$  m mentre la portata di progetto è stata posta pari a quella calcolata mediante la teoria di Rickenmann,  $Q = 140,3$  m<sup>3</sup>/s; i risultati del calcolo sono riportati nella *Tabella 21*.

**Tabella 21:** Formula di D'Aubuisson applicata al Ponte 1.

%	$b_1$ [m]	$A_2$ [m <sup>2</sup> ]	$K_{DA}$	$v_1$ [m/s]	$\Delta y$ [m]
<b>10</b>	9,9	28,71	1,065	6	0,062
<b>20</b>	8,8	25,52			0,077
<b>30</b>	7,7	22,33			0,361
<b>40</b>	6,6	19,14			0,580
<b>50</b>	5,5	15,95			1,642
<b>60</b>	4,4	12,76			3,598
<b>70</b>	3,3	9,57			7,823
<b>80</b>	2,2	6,38			19,896
<b>90</b>	1,1	3,19			85,088

## 4.9.2 Formula di Nagler

Assunti come riferimento i valori di portata e di restringimento descritti in precedenza, è stata fatta l'ipotesi secondo la quale la velocità abbia valore costante immediatamente a monte e a valle della contrazione e pari a quella ricavata mediante il software,  $v_1 = v_3 = 6 \text{ m/s}$ .

I dati impiegati e i risultati ottenuti dal calcolo sono riassunti in *Tabella 22*.

**Tabella 22:** Formula di Nagler applicata al Ponte 1.

%	$b_1$ [m]	$C_r$	$K_N$	$v_1=v_3$ [m/s]	$r(b_1/b_0)$ [-]	$\theta$ [-]	$\Delta y$ [m]
<b>10</b>	9,9	1,3	0,871	6	0,9	0,3	3,36
<b>20</b>	8,8	1,7			0,8		4,15
<b>30</b>	7,7	1,9			0,7		6,01
<b>40</b>	6,6	2,0			0,6		9,25
<b>50</b>	5,5	2,05			0,5		14,85
<b>60</b>	4,4	2,07			0,4		25,27
<b>70</b>	3,3	2,08			0,3		47,87
<b>80</b>	2,2	2,08			0,2		112,48
<b>90</b>	1,1	2,08			0,1		461,35

## 4.9.3 Formula di Rehbock

Rappresenta la formula più semplice per il calcolo del rialzo idraulico e, anche in questo caso, è stato imposto un valore di velocità costante  $v_2 = 6 \text{ m/s}$  mentre i dati di output sono riportati in *Tabella 23*.

**Tabella 23:** Formula di Rehbock applicata al Ponte 1.

%	$K_R$	$v_2$ [m/s]	$r(b_1/b_0)$ [-]	$\Delta y$ [m]
<b>10</b>	2,64	6	0,9	0,48
<b>20</b>			0,8	0,97
<b>30</b>			0,7	1,45
<b>40</b>			0,6	1,94
<b>50</b>			0,5	2,42
<b>60</b>			0,4	2,91
<b>70</b>			0,3	3,39
<b>80</b>			0,2	3,88
<b>90</b>			0,1	4,36

## 4.9.4 Formula di Yarnell e variante corretta

Nell'applicazione della formula di Yarnell è stata adottata una velocità costante a valle del restringimento e pari a  $v_3 = 6 \text{ m/s}$ , utilizzata, inoltre, per il calcolo del numero di Froude.

Come descritto in precedenza, tuttavia, in letteratura è presente una variante corretta di tale espressione, anche detta di Charbeneau e Holley che, tramite l'aggiunta di due coefficienti correttivi  $\beta = 1.24$  e  $\mu = 0.4$ , consente di ricavare valori più affidabili del rialzo idraulico,  $\Delta y$  (corretto), come visibile dalla *Tabella 24*.

**Tabella 24:** Formule di Yarnell e variante corretta applicate al Ponte 1.

%	$F_{r3}$	$K_Y$	$v_1=v_3$ [m/s]	$\alpha (1-r)$ [-]	$\Delta y$ [m]	$\Delta y$ (corretto) [m]
<b>10</b>	0,42	1,25	6	0,1	0,72	0,08
<b>20</b>				0,2	1,58	0,18
<b>30</b>				0,3	2,98	0,34
<b>40</b>				0,4	5,54	0,63
<b>50</b>				0,5	10,15	1,16
<b>60</b>				0,6	17,97	2,05
<b>70</b>				0,7	30,38	3,46
<b>80</b>				0,8	49,04	5,59
<b>90</b>				0,9	75,86	8,64

## 4.9.5 Formula di Al-Nassri

Al fine di utilizzare la formulazione di Al-Nassri, è necessario introdurre il coefficiente  $\Phi$ , definito come il rapporto tra l'area del restringimento esposta alla corrente,  $A_p$ , e l'area  $A_3$  a valle dello stesso.

Pertanto, a partire dall'area totale  $A_{tot} = b_0 \cdot h = 11 \cdot 2,9 = 31,9 \text{ m}^2$  e l'area di deflusso  $A_3 = b_1 \cdot h$ , calcolata al variare del grado di contrazione, si può ottenere l'area  $A_p$  come  $A_{tot} - A_3$ .

Il coefficiente  $\Phi$  risulta pertanto pari a:

$$\Phi = \frac{A_p}{A_3}$$

I dati di output ricavati dal calcolo sono infine riportati in

*Tabella 25.*

**Tabella 25** : Formula di Al-Nassri applicata al Ponte 1.

%	$b_1$ [m]	$A_{tot}$ [m <sup>2</sup> ]	$A_p$ [m <sup>2</sup> ]	$A_p$ [m <sup>2</sup> ]	$\Phi$	$F_{r3}$	$\alpha$	$\Delta y$ [m]
<b>10</b>	9,9	31,9	3,19	28,71	0,11	0,42	0,1	0,34
<b>20</b>	8,8		6,38	25,52	0,25		0,2	0,26
<b>30</b>	7,7		9,57	22,33	0,43		0,3	0,26
<b>40</b>	6,6		12,76	19,14	0,67		0,4	0,33
<b>50</b>	5,5		15,95	15,95	1,00		0,5	0,47
<b>60</b>	4,4		19,14	12,76	1,50		0,6	0,81
<b>70</b>	3,3		22,33	9,57	2,33		0,7	1,74
<b>80</b>	2,2		25,52	6,38	4,00		0,8	5,55
<b>90</b>	1,1		28,71	3,19	9,00		0,9	44,73

Come spesso accade nell'applicazione di formule empiriche come quelle viste finora, ricavate a partire da dati diversi relativi a casi studio specifici, i risultati ottenuti sono in genere i più disparati e anche molto diversi tra loro; diventa perciò inverosimile l'adozione di uno di essi come valore rappresentativo dell'intero campione, motivo per cui, salvo criteri o esigenze specifiche, viene spesso considerata una media dei risultati derivanti dal calcolo.

Anche nel caso dell'analisi svolta in questa sede, pertanto, si è optato per l'adozione di un valore medio calcolato tra i risultati ricavati tramite l'applicazione delle formule empiriche sopra descritte.

**Tabella 26** : Valori di altezza massima del flusso ricavati tramite RAMMS e altezze effettive dei ponti.

Ponte	Altezza massima del flusso [m]	Altezza effettiva dei ponti [m]
<b>1</b>	3,1	2,9
<b>2</b>	2,0	4,5
<b>3</b>	1,5	3,5

A partire dai dati di altezza massima del flusso in corrispondenza delle sezioni coincidenti con i ponti, riportati in *Tabella 26*, per verificare il livello effettivamente raggiunto dall'ondata di piena, si è proceduto con la somma di questi valori con il rialzo idraulico medio calcolato per i vari gradi di restringimento.

**Tabella 27:** Altezze massime per diverso grado di ostruzione in corrispondenza del Ponte 1.

%	$\Delta y$ [m]	h [m]
10	0,383	3,48
20	0,708	3,81
30	1,190	4,29
40	1,985	5,09
50	3,328	6,43
60	5,537	8,64
70	9,067	12,17
80	14,866	17,97
90	30,879	33,98

Come si può osservare dalla *Tabella 27*, senza spingersi fino a gradi di ostruzione troppo elevati ma considerando percentuali di restringimento del **20%** (che rappresentano una riduzione della sezione di circa 1 m), i livelli così ottenuti risultano del tutto ragionevoli e compatibili con quanto effettivamente verificatosi nella notte tra il 2 e il 3 ottobre, nonché con quanto ottenuto dalle simulazioni effettuate.

## 4.10 Rialzo idraulico per i ponti 2 e 3

Ripetendo il medesimo procedimento per i due ponti situati a valle, *Ponte 2* e *Ponte 3*, in corrispondenza dei quali i livelli massimi del flusso forniti dal software non risultavano compatibili con le altezze delle strutture, si può osservare come, considerando nuovamente un restringimento della sezione di deflusso pari al 20%, i valori ritrovati siano allineati con quelli misurati in situ.

I risultati dei calcoli eseguiti sono riportati nelle seguenti *Tabella 28* e *Tabella 29*.

**Tabella 28:** Altezze massime per diverso grado di ostruzione in corrispondenza del Ponte 2.

%	$\Delta y$ [m]	h [m]
10	1,153	3,15
20	2,384	4,38
30	3,124	5,12
40	3,428	5,33
50	5,947	7,85
60	10,167	12,07
70	16,970	18,87
80	28,177	30,08
90	58,769	60,67

**Tabella 29:** Altezze massime per diverso grado di ostruzione in corrispondenza del Ponte 3.

<b>%</b>	<b><math>\Delta y</math> [m]</b>	<b>h [m]</b>
<b>10</b>	0,860	2,36
<b>20</b>	1,984	3,48
<b>30</b>	2,762	4,26
<b>40</b>	4,851	6,35
<b>50</b>	8,536	10,04
<b>60</b>	14,745	16,24
<b>70</b>	24,768	26,27
<b>80</b>	41,187	42,69
<b>90</b>	84,453	85,95



---

## CAP. 5 – ULTERIORI SCENARI

---

Una volta conclusa l'analisi a ritroso, il modello validato mediante la back analysis è stato utilizzato per una serie di successive analisi, riferite a diversi scenari sempre inerenti al medesimo versante.

Quest'ultimo, infatti, come facilmente osservabile recandosi sul posto, presenta numerosi segni di dissesti, che potrebbero riattivarsi sfociando in nuovi casi di debris flow, colpendo così nuovamente gli abitati a valle, con conseguenti danni a edifici, infrastrutture o persone.

Vista la natura sempre meno occasionale di eventi piovosi di carattere eccezionale, con quantitativi record di pioggia caduta in tempi molto ristretti, non è affatto da escludere e, anzi, occorre prestare una crescente attenzione al fatto che fenomeni di colata come quello accaduto nel bacino di Camasco possano ripetersi, a maggior ragione qualora sussistano tutte o quasi le tipologie di cause predisponenti e scatenanti.

In questo contesto si inserisce l'analisi oggetto di questo capitolo, in cui, a partire dai medesimi dati ottenuti e calibrati nell'analisi a ritroso, sono stati simulati ulteriori possibili scenari di innesco, così da studiarne l'evoluzione e valutarne gli effetti e le ripercussioni sui manufatti a valle.

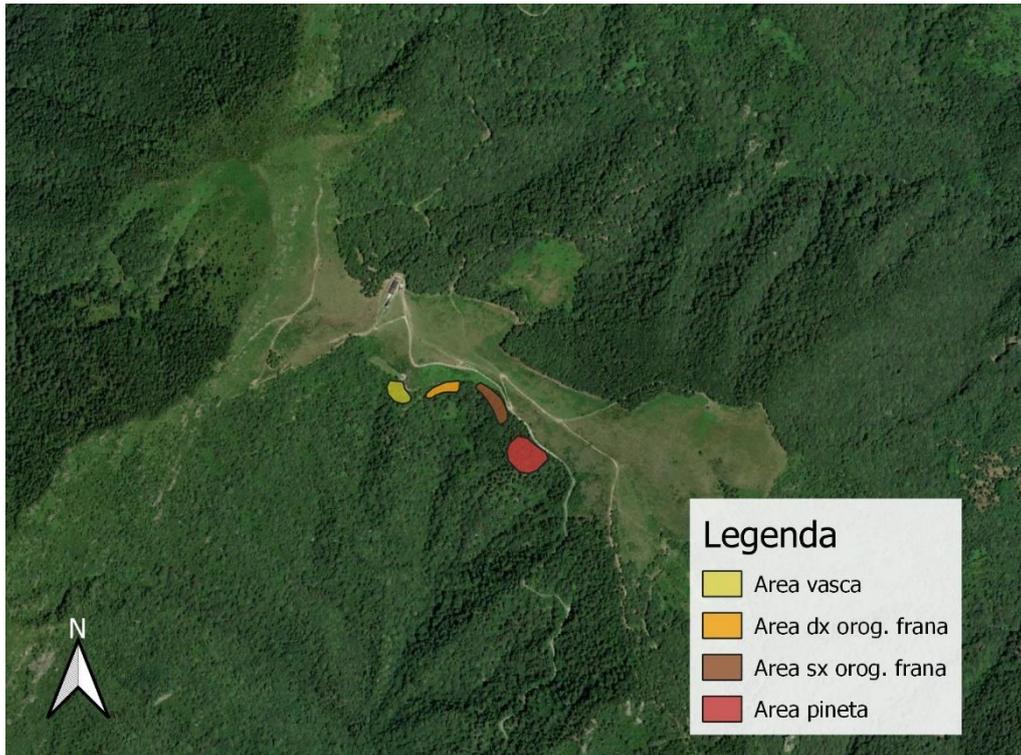
### 5.1 Impostazione delle simulazioni

Anche in questo caso si è fatto ricorso all'utilizzo del software RAMMS::DEBRIS FLOW e il primo passo nello svolgimento delle analisi ha riguardato l'individuazione delle potenziali aree instabili da simulare.

Tali aree sono state definite grazie alla cartografia fornita dalla Società Tecnosesia ed elaborata in seguito a sopralluoghi e misurazioni in situ, che hanno permesso di eseguire una stima delle potenze degli strati superficiali presenti nell'area del bacino, oltre ad effettuare una classificazione dei dissesti e delle potenziali aree instabili.

Si è pertanto deciso di focalizzare l'attenzione sulle quattro aree rappresentate in *Figura 83* e denominate come:

- Area vasca;
- Area destra orografica frana;
- Area sinistra orografica frana;
- Area pineta.



*Figura 83 : Potenziali aree di distacco considerate.*

Come si può notare, tutte le aree sono situate in prossimità della nicchia di distacco della colata detritica analizzata, motivo per cui si ritengono validi con buona approssimazione i medesimi parametri utilizzati nelle analisi precedenti.

Le aree di distacco individuate sono state di difficile determinazione e sono risultate di estensione decisamente più ampia rispetto al fenomeno verificatosi, pertanto, in aggiunta a un innesco complessivo dell'area considerata sono stati anche simulati distacchi parziali con volumi ridotti.

Ciò è stato fatto variando le potenze degli strati, ovvero, a partire dal distacco totale con spessore dello strato sottostante pari a 3m, sono stati simulati dissesti caratterizzati da un volume pari al 70% e 40% del volume totale che, in termini di spessori degli strati coinvolti si traduce in altezze di 2,1 m e 1,2 m.

Oltre al volume instabilizzato, infine, per ogni scenario considerato sono stati opportunamente variati l'angolo della direzione di rilascio, diverso a seconda della giacitura e dell'ubicazione della nicchia di distacco, e il tempo di simulazione in modo da raggiungere le condizioni di arresto per "low flux" già descritte in precedenza.

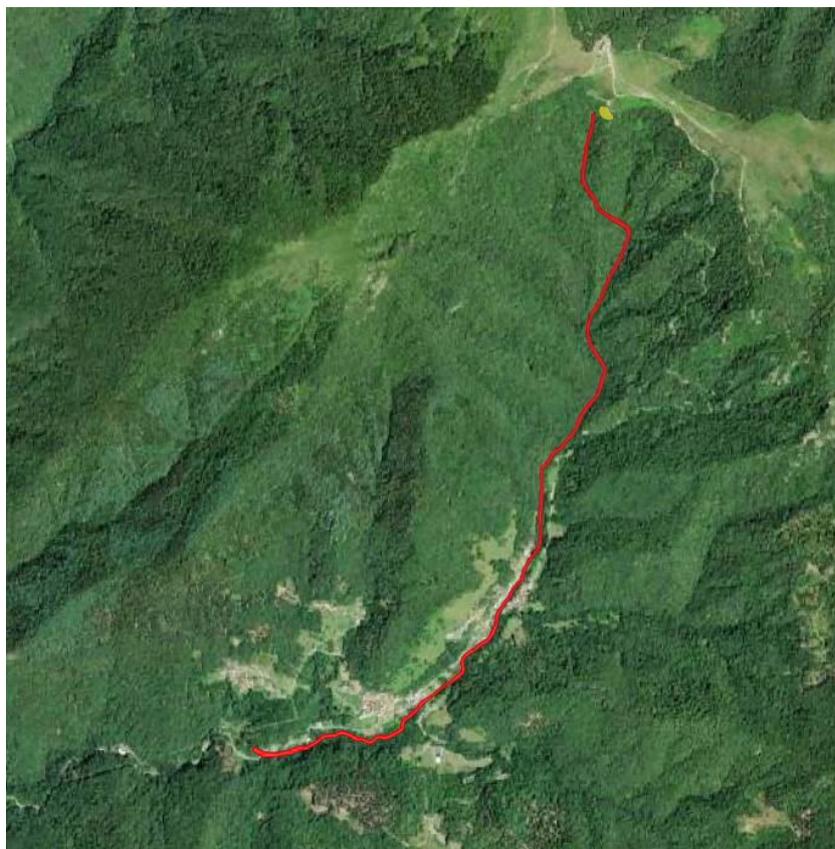
## 5.2 Area vasca

Le principali differenze nei parametri utilizzati, riassunti in *Tabella 30*, riguardano, oltre al volume considerato, il tempo di simulazione che, per raggiungere la condizione di arresto per "low flux", è stato necessario aumentare fino a 1800 s e, inoltre, l'angolo di rilascio, definito in base alla direzione di maggior pendenza così da rispecchiare la probabile direzione iniziale del flusso e fissato a 240°.

*Tabella 30: Parametri impiegati - Area vasca.*

Spessore depositi [m]	Volume [m <sup>3</sup> ]	Calculation time [s]	Flow direction [°]	$\mu$	$\xi$ [m/s <sup>2</sup> ]
<b>3</b>	8063,76	18000	240	0,200	200
<b>2,1</b>	5644,63	18000	240	0,200	200
<b>1,2</b>	3225,50	18000	240	0,200	200

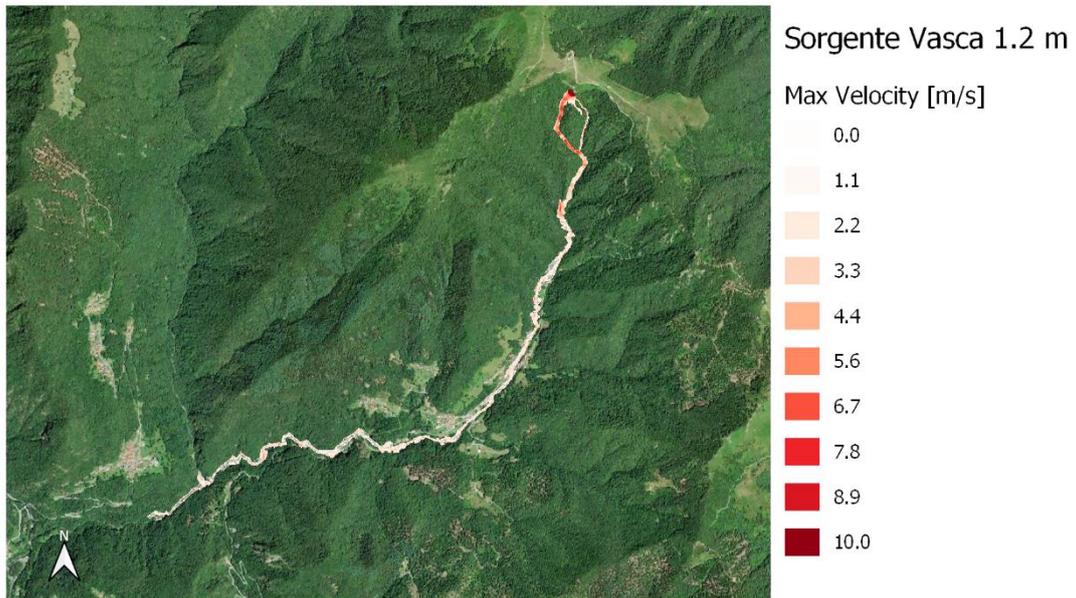
È stato inoltre considerato un dominio di erosione con profondità massima di erosione pari a 1m ed estensione ipotizzata come rappresentato in *Figura 84*.



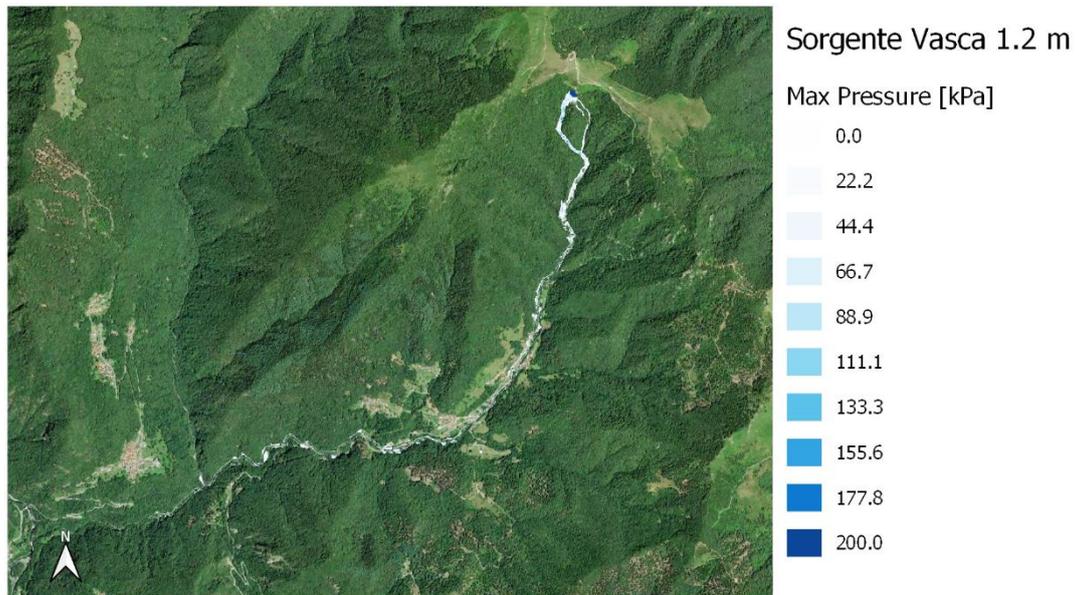
*Figura 84: Dominio di erosione Area vasca.*

Pertanto, variando le altezze dello strato instabile a cui sono associati valori diversi di volume di rilascio, sono stati ottenuti i risultati esposti nei punti seguenti.

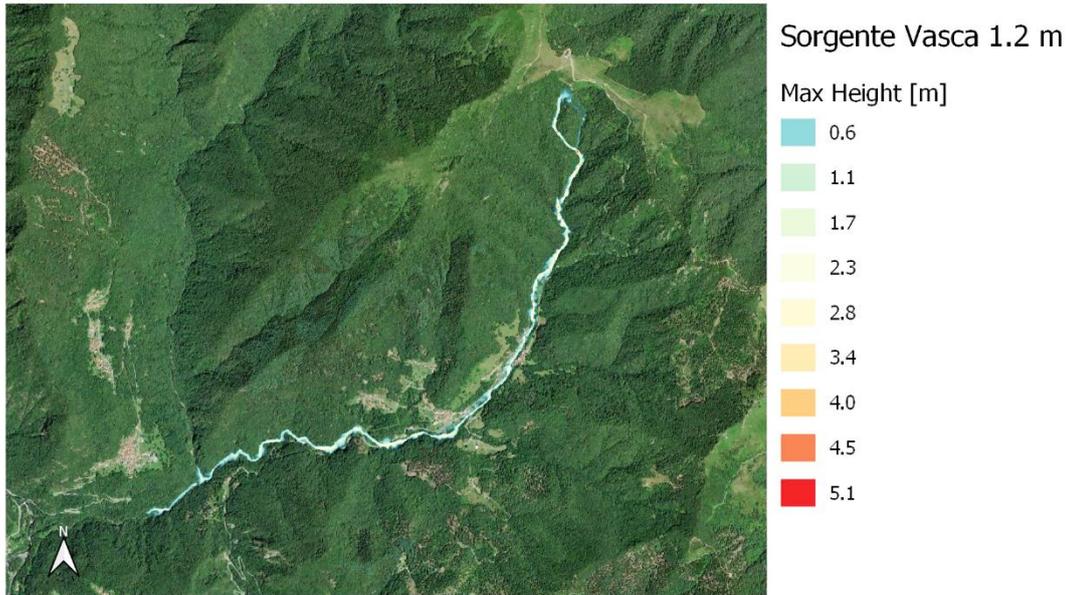
○ **Area Vasca – 1,2 m**



*Figura 85 : Velocità massima – Area Vasca 1,2 m.*



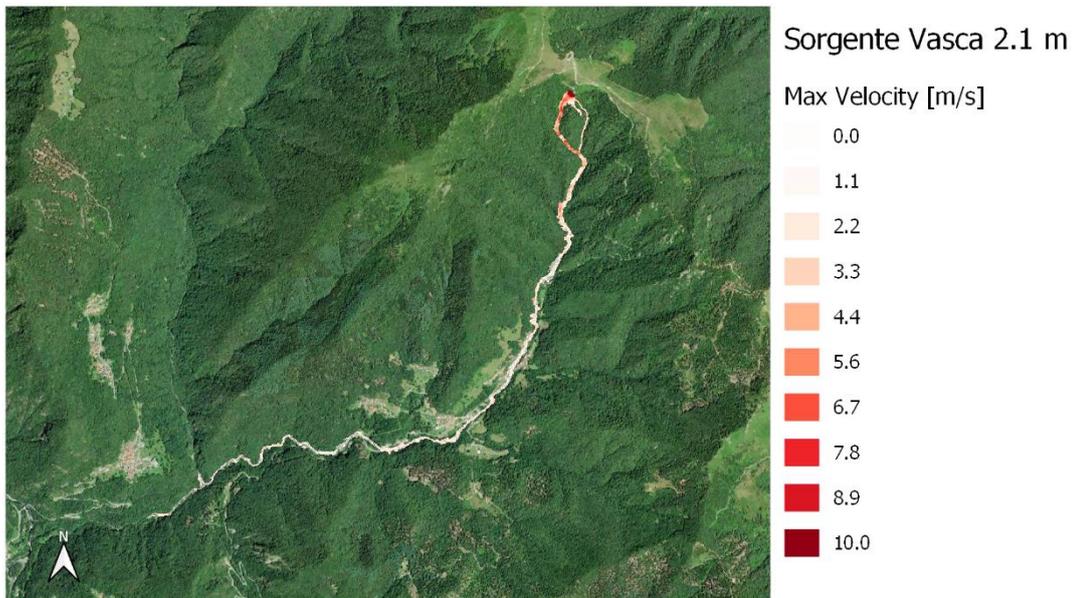
*Figura 86 : Pressione massima – Area Vasca 1,2 m.*



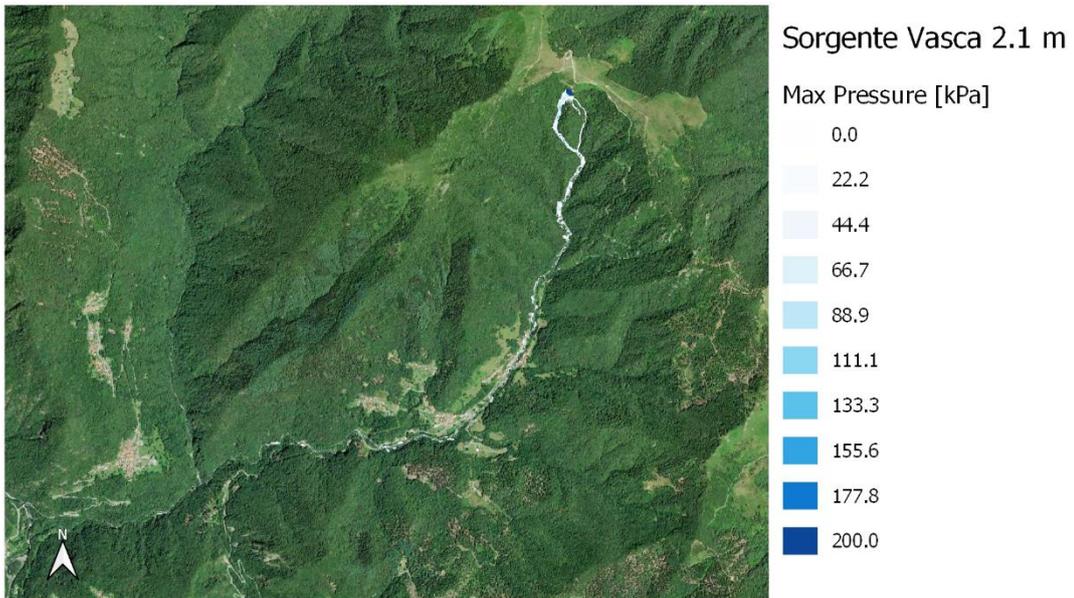
**Figura 87:** Altezza massima - Area Vasca 1,2 m.

Nelle *Figure 85, 86 e 87* sono riportati gli output ottenuti per strato instabile di spessore pari a 1,2 m; si osservano pertanto valori di velocità massima dell'ordine dei 4,5 m/s mentre, per quanto riguarda le pressioni massime e le altezze del flusso, raggiunte nel centro abitato, si hanno picchi intorno a 40 kPa e 3,2 m rispettivamente.

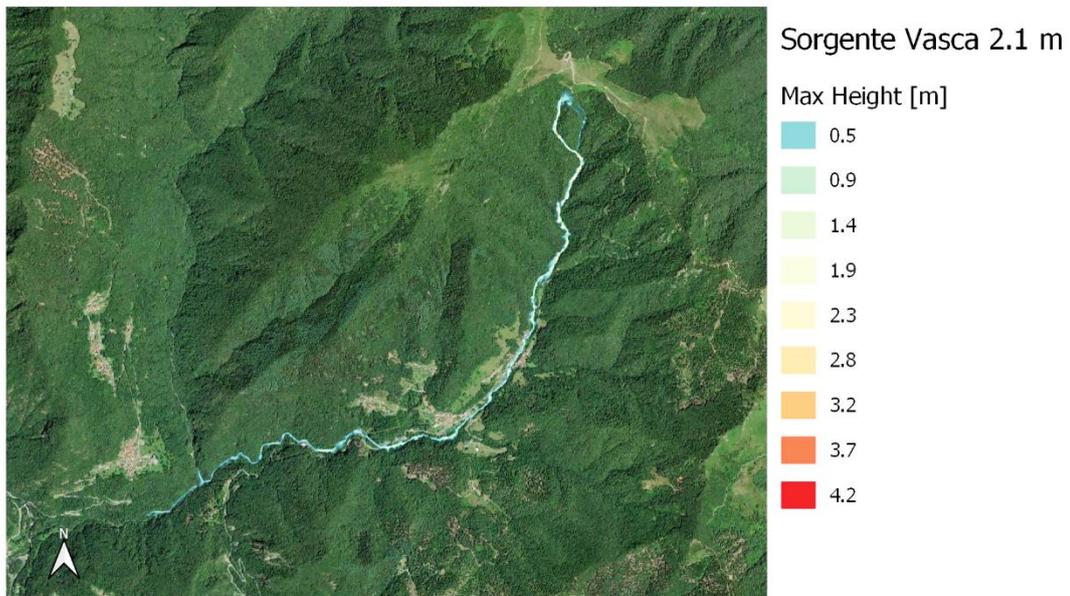
○ **Area Vasca – 2,1 m**



**Figura 88:** Velocità massima - Area Vasca 2,1 m.



**Figura 89:** Pressione massima - Area Vasca 2,1 m.

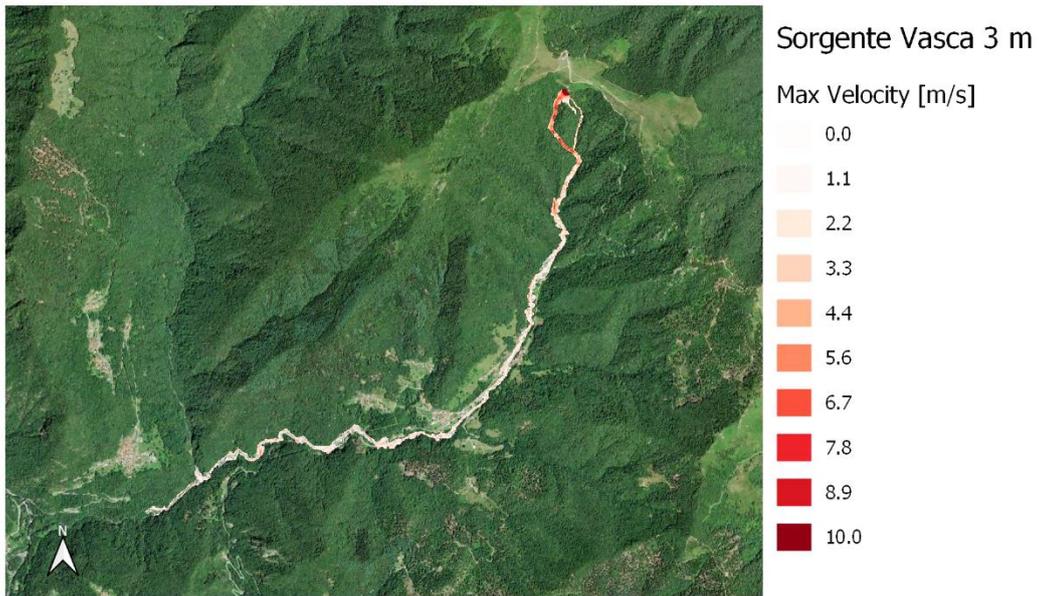


**Figura 90:** Altezza massima - Area Vasca 2,1 m.

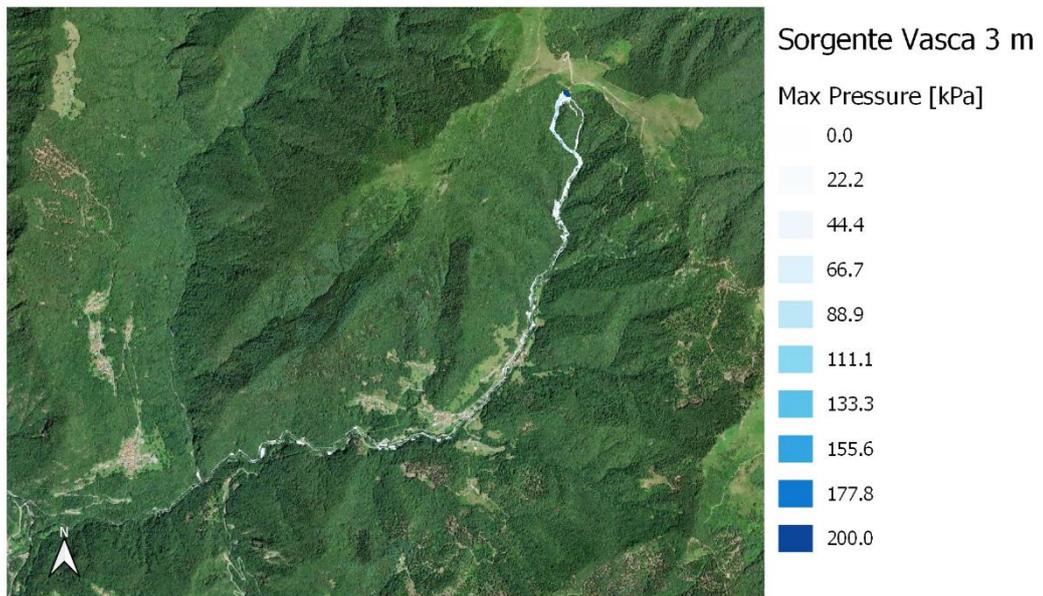
Nelle *Figure 88, 89 e 90* sono rappresentati i risultati della simulazione eseguita considerando una profondità di 2,1 m; dalle immagini si osservano valori di velocità massima fino a 4,8 m/s mentre pressioni massime e altezze del flusso raggiungono i 46 kPa e 2 m.

Si nota quindi una non significativa variazione per quanto riguarda i valori di velocità, una riduzione delle altezze massime rispetto al caso precedente e un incremento della pressione massima, tutto ciò può essere tuttavia giustificato dalla maggior estensione dell'area inondata.

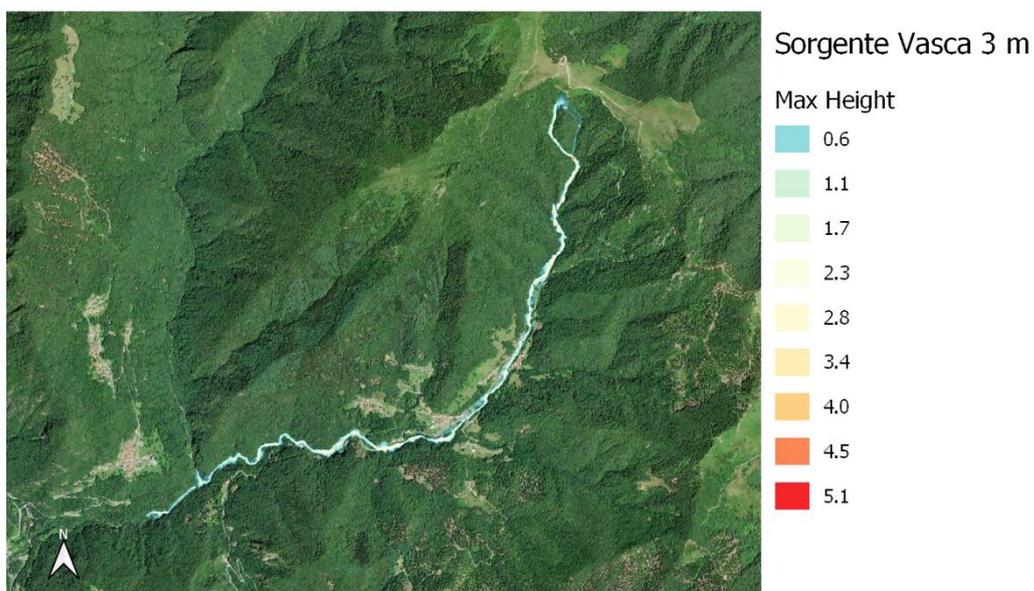
○ **Area Vasca – 3 m**



*Figura 91: Velocità massima – Area Vasca 3 m.*

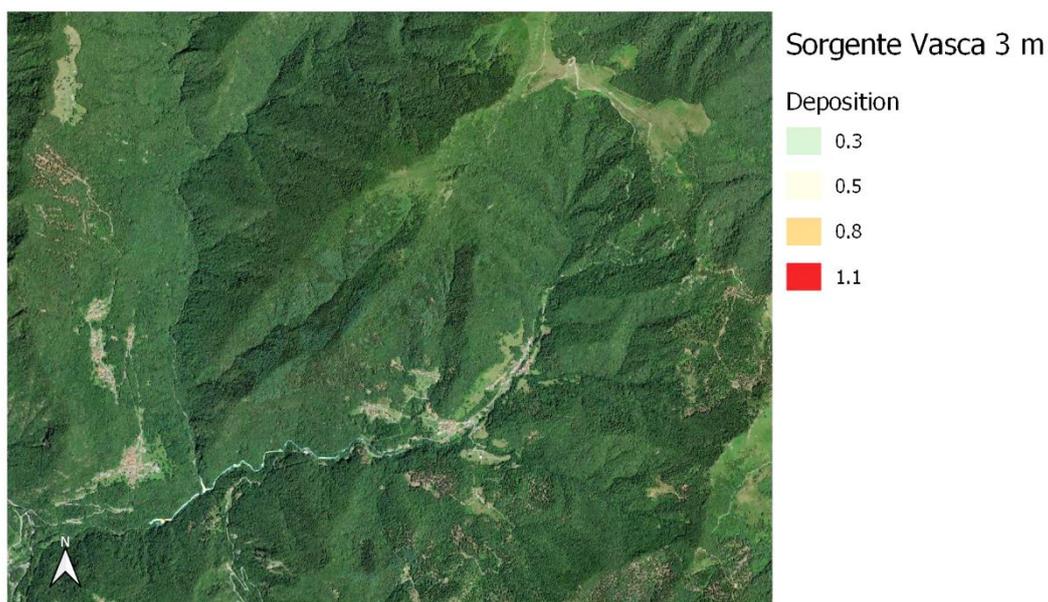


*Figura 92: Pressione massima – Area Vasca 3 m.*



**Figura 93** : Altezza massima - Area Vasca 3 m.

Nelle *Figure 91, 92 e 93*, sono rappresentati i risultati della simulazione per la zona di distacco in esame, svolta nel caso più pessimistico, ovvero considerando un'altezza dello strato soggetto ad instabilizzazione pari a 3 m; i risultati mostrano una velocità massima fino a 5,2 m/s, pressioni massime anche superiori ai 50 kPa e altezze del flusso di 3,3 m, sempre considerando una estensione importante dell'area interessata.



**Figura 94** : Deposizione - Area Vasca 3 m.

Si riporta, infine, in *Figura 94*, l'area di deposizione per l'ultimo caso considerato che presenta valori di spessore massimi di circa 1 m e risulta congruente con quanto ipotizzato nella back analysis, seppur con maggior estensione dovuta anche al maggior volume in gioco.

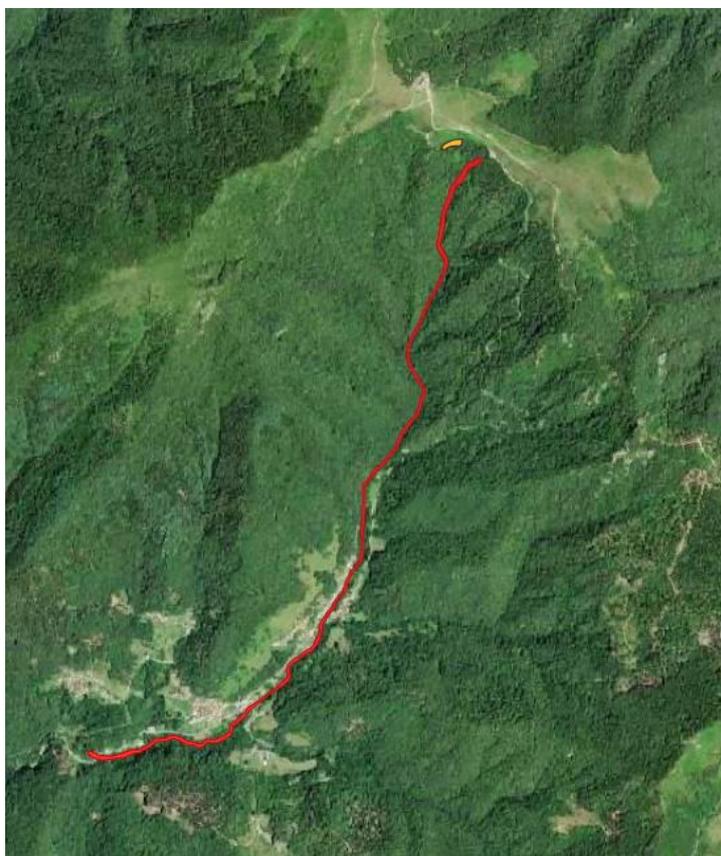
## 5.3 Area destra orografica

In *Tabella 31* si riassumono, anche per l'area di distacco denominata "destra orografica", i principali dati di input per le simulazioni i cui esiti vengono descritti in seguito; oltre al volume considerato si riporta il tempo di simulazione, che in questo caso è stato sufficiente fissare a 1500 s e, inoltre, l'angolo di rilascio, definito sempre in base alla direzione di maggior pendenza e pari a 285°.

*Tabella 31: Parametri impiegati - Area destra orografica.*

Spessore depositi [m]	Volume [m <sup>3</sup> ]	Calculation time [s]	Flow direction [°]	$\mu$	$\xi$ [m/s <sup>2</sup> ]
<b>3</b>	6454,07	15000	285	0,200	200
<b>2,1</b>	4517,85	15000	285	0,200	200
<b>1,2</b>	2581,63	15000	285	0,200	200

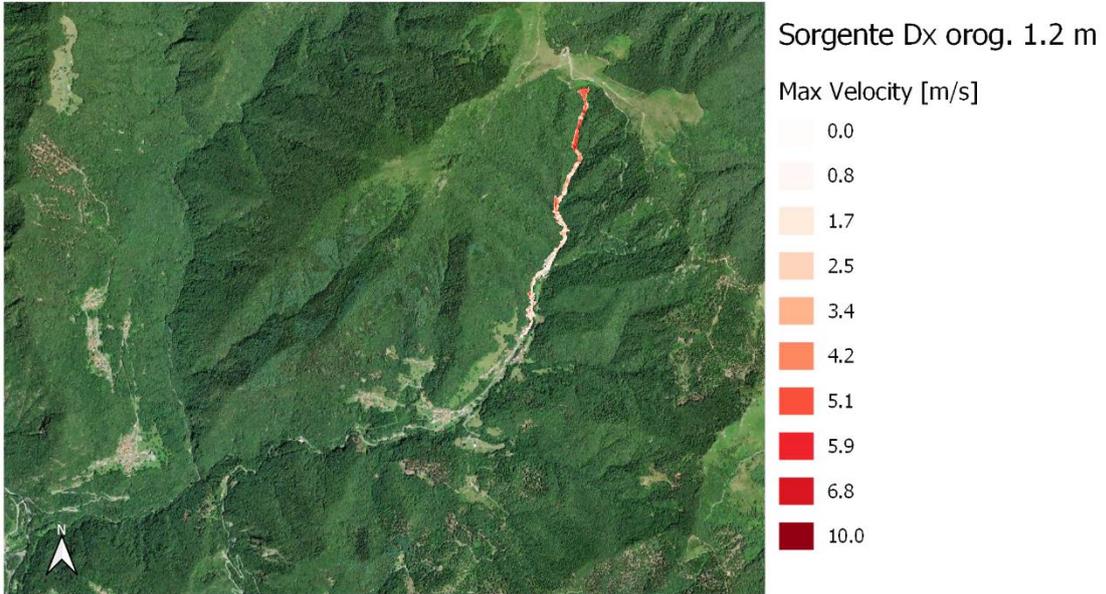
Si è inoltre definito un dominio di erosione con estensione coincidente con quella riportata in *Figura 95* e profondità massima di erosione pari a 1m.



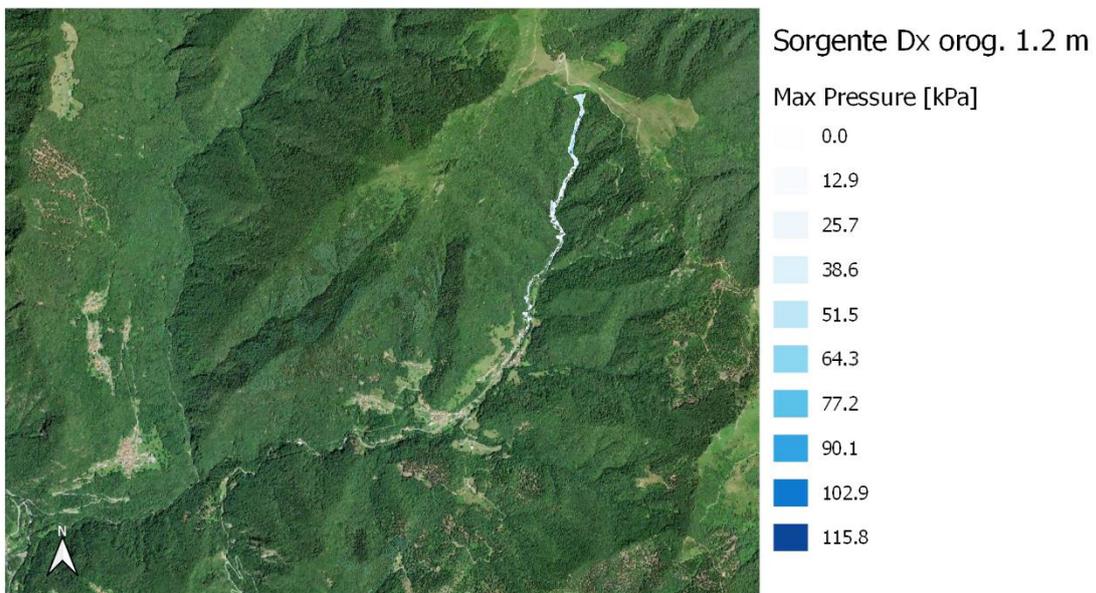
*Figura 95: Dominio di erosione Area destra orografica.*

Come nel caso precedente, quindi, variando le altezze dello strato instabile a cui sono associati valori diversi di volume di rilascio, sono stati ottenuti i risultati esposti nei punti seguenti.

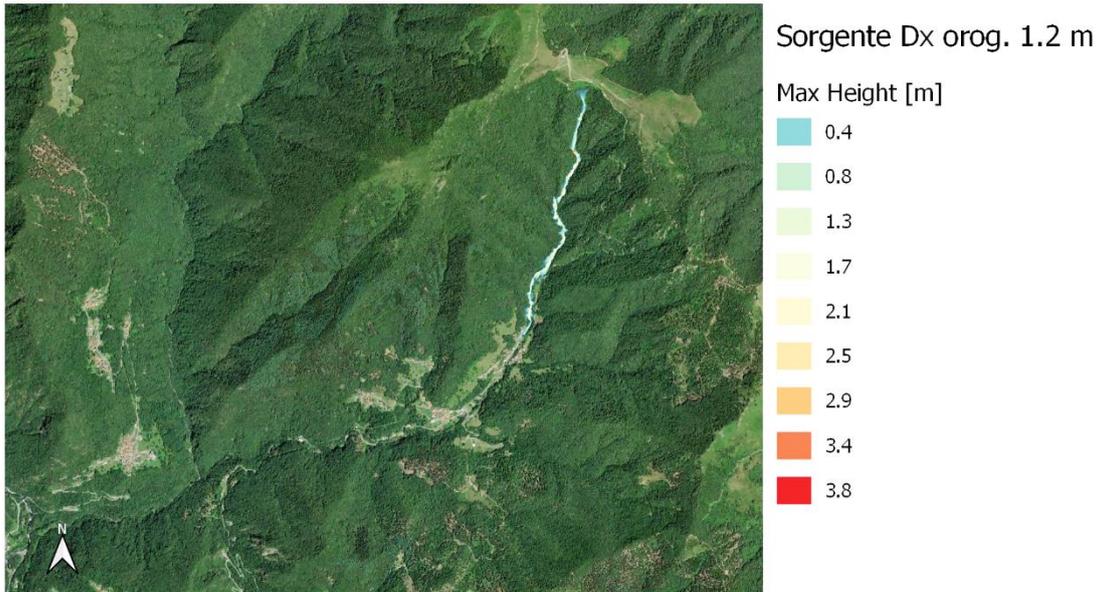
○ **Area destra orografica – 1,2 m**



*Figura 96: Velocità massima - Area dx orog. 1,2 m.*



*Figura 97: Pressione massima - Area dx orog. 1,2 m.*

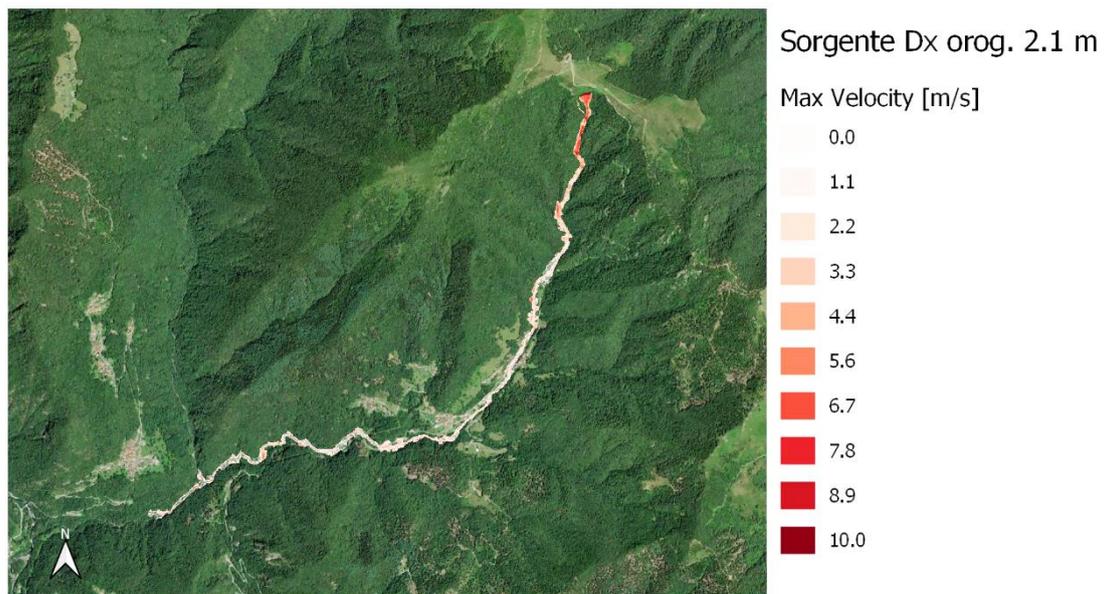


*Figura 98* : Altezza massima - Area dx orog. 1,2 m.

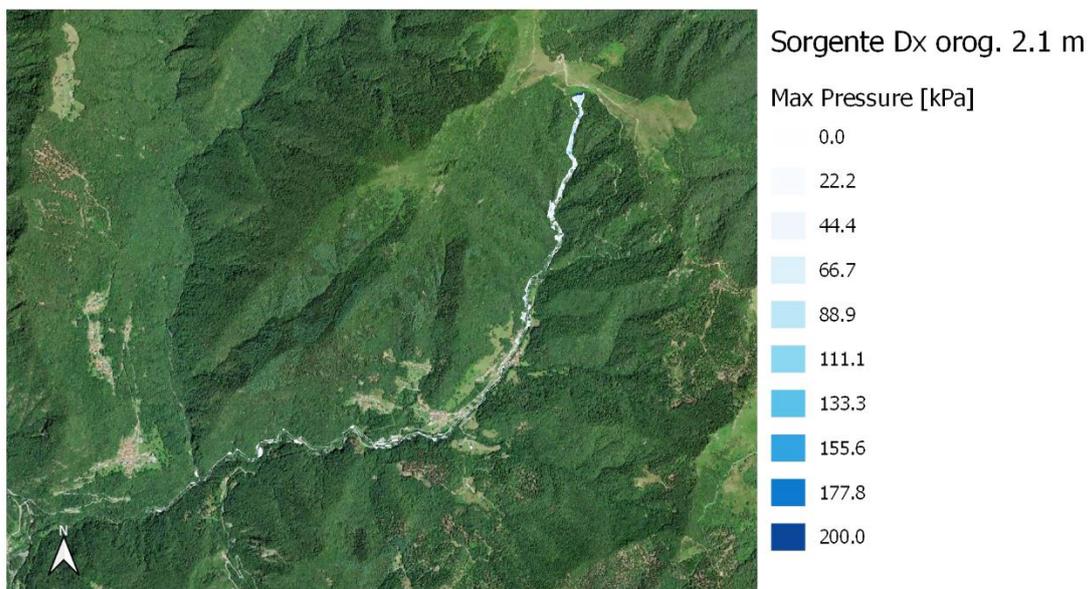
Le *Figure 96, 97 e 98* riportano i risultati ottenuti per strato instabile di spessore pari a 1,2 m; come si può notare l'arresto del flusso avviene a monte del paese, interessando solo il terreno e il capannone adiacente all'unico edificio presente.

Si osservano perciò valori di velocità massima molto bassi e con un massimo di 2 m/s mentre, per quanto riguarda le pressioni massime e le altezze del flusso, si hanno picchi intorno a 13 kPa e 0,4 m rispettivamente.

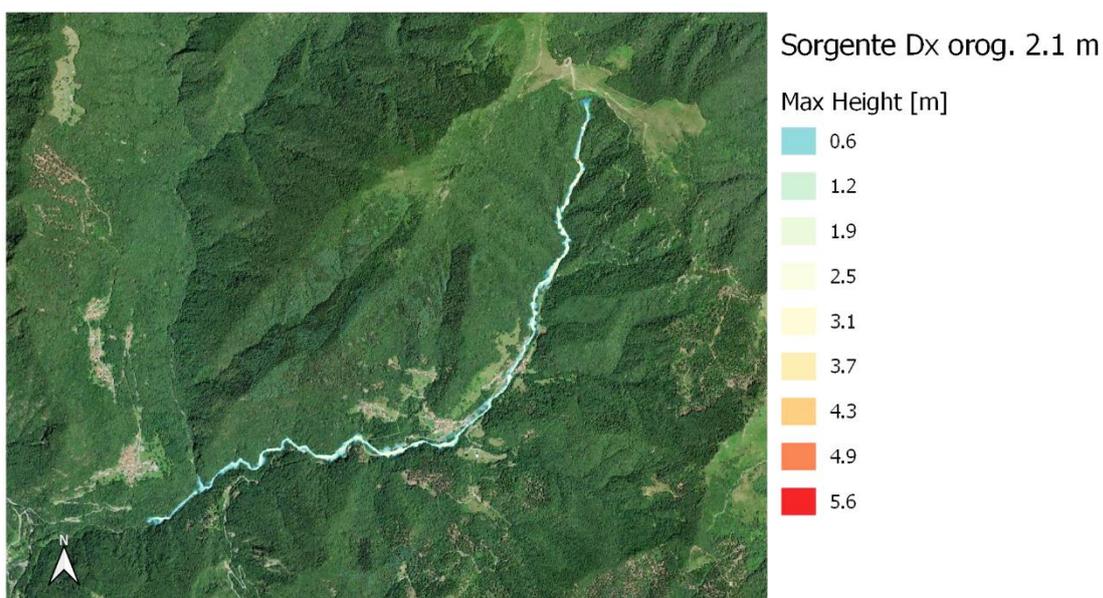
o **Area destra orografica – 2,1 m**



*Figura 99* : Velocità massima - Area dx orog. 2,1 m.



**Figura 100** : Pressione massima - Area dx orog. 2,1 m.

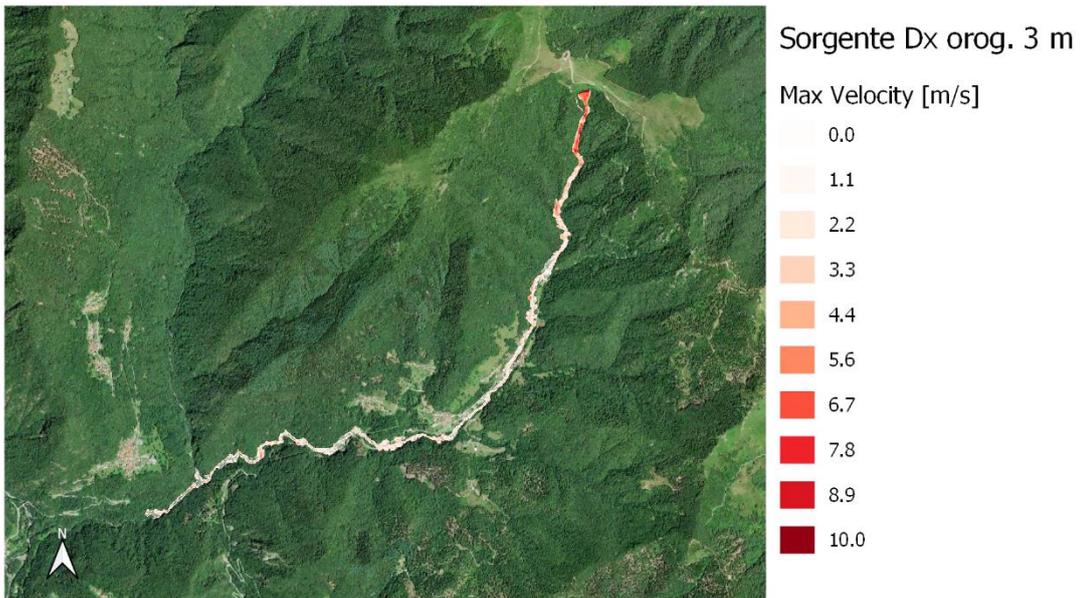


**Figura 101** : Altezza massima - Area dx orog. 2,1 m.

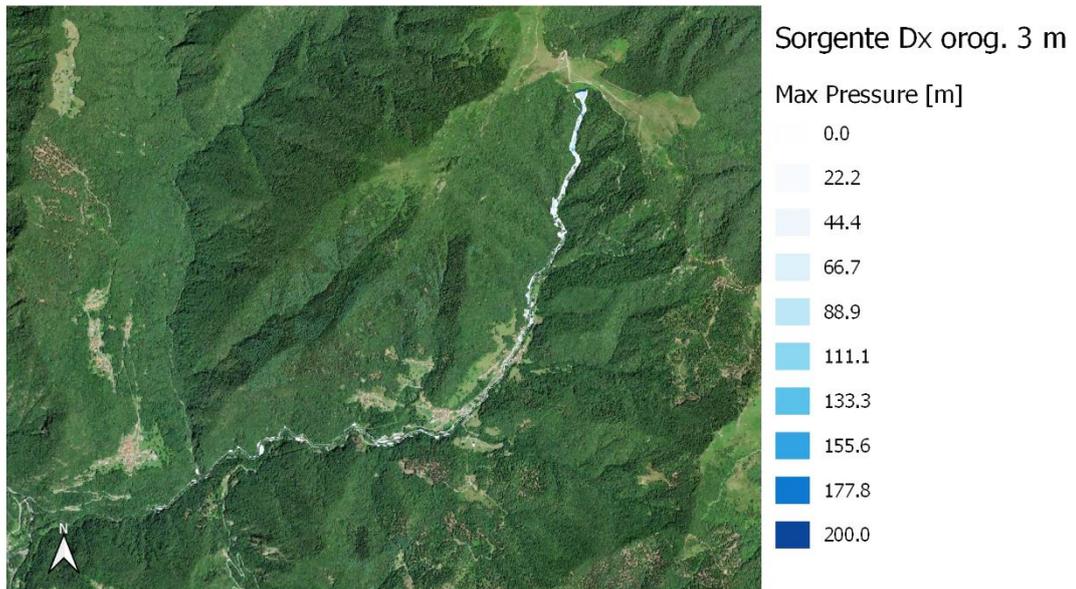
I risultati della simulazione eseguita considerando una profondità di 2,1 m sono riportati nelle *Figure 99, 100 e 101*; dalle immagini si nota che i valori di velocità massima sono compresi tra 4,5 e 5,5 m/s, le pressioni massime presentano valori eterogenei con picchi oltre i 30 kPa e le altezze raggiungono picchi di 3,2 m mentre è evidente la maggiore distanza di propagazione del flusso.

Si osservano quindi importanti differenze rispetto alla condizione più cautelativa con spessore 1,2 m sia dal punto di vista della distanza di propagazione, sia per quanto riguarda i valori di velocità, pressione e altezza raggiunti dal flusso.

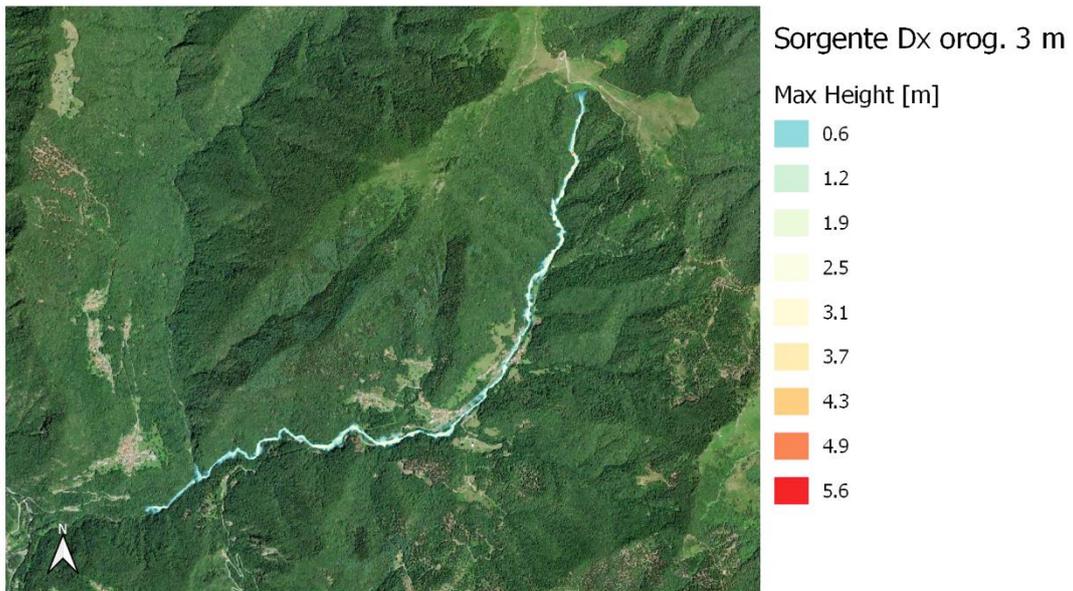
○ **Area destra orografica – 3 m**



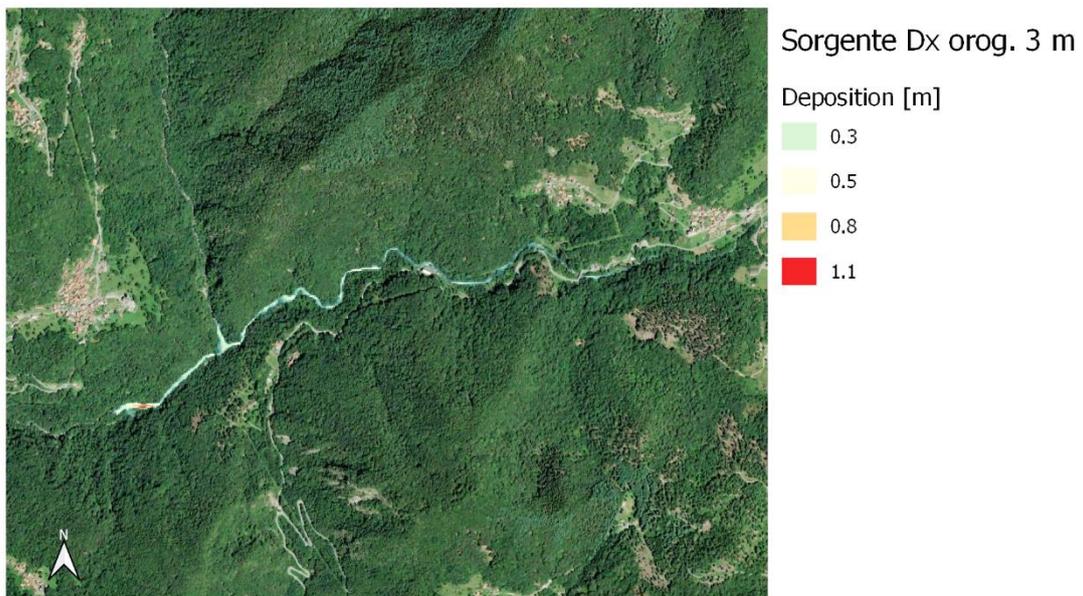
*Figura 102: Velocità massima - Area dx orog. 3 m.*



*Figura 103: Pressione massima - Area dx orog. 3 m.*



**Figura 104:** Altezza massima - Area dx orog. 3 m.



**Figura 105:** Deposizione - Area dx orog. 3 m.

Nelle figure da 102 a 104, sono rappresentati i risultati della simulazione per la zona di distacco in esame, svolta nel caso più pessimistico, ovvero considerando un'altezza dello strato soggetto ad instabilizzazione pari a 3 m; in termini di velocità non si osservano grandi differenze rispetto al caso precedente, con spessore 2,1 m, e valori sempre compresi nell'intervallo tra 4,5 e 5,5 m/s; salta però all'occhio una diversa distribuzione con esondazioni importanti e più estese nelle aree adiacenti al torrente.

Per quanto riguarda le pressioni massime, si registrano picchi oltre i 50 kPa mentre le altezze massime raggiungono valori anche di 3,5 m in corrispondenza del centro abitato.

Si riporta, infine, in *Figura 105*, l'area di deposizione che presenta valori massimi di circa 1 m e risulta nuovamente congruente con quanto ipotizzato nella back analysis.

## 5.4 Area sinistra orografica

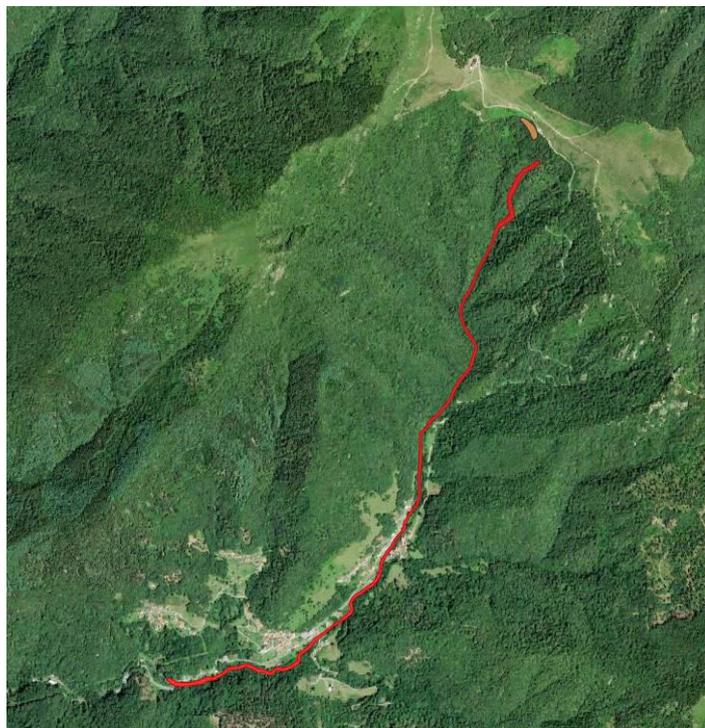
Nella *Tabella 32* sono riportati i dati di input impostati: la variazione del volume considerato in ciascun caso specifico, il tempo di simulazione pari nuovamente a 15000 s e l'angolo di direzione stimato pari a 240°.

**Tabella 32:** Parametri impiegati - Area sinistra orografica.

Spessore depositi [m]	Volume [m <sup>3</sup> ]	Calculation time [s]	Flow direction [°]	$\mu$	$\xi$ [m/s <sup>2</sup> ]
<b>3</b>	10534,18	15000	240	0,200	200
<b>2,1</b>	7373,92	15000	240	0,200	200
<b>1,2</b>	4213,67	15000	240	0,200	200

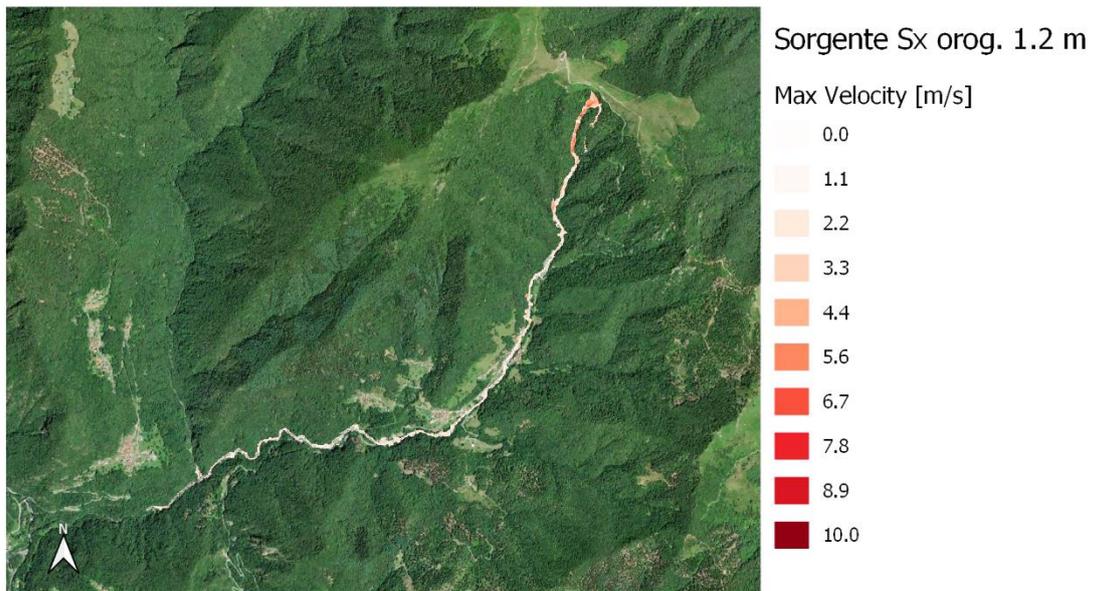
Anche in questo caso, è stato considerato il fenomeno dell'erosione il cui dominio è riportato nella *Figura 106*, con profondità massima di erosione pari a 1m.

Nel seguito si riportano i principali risultati ottenuti.

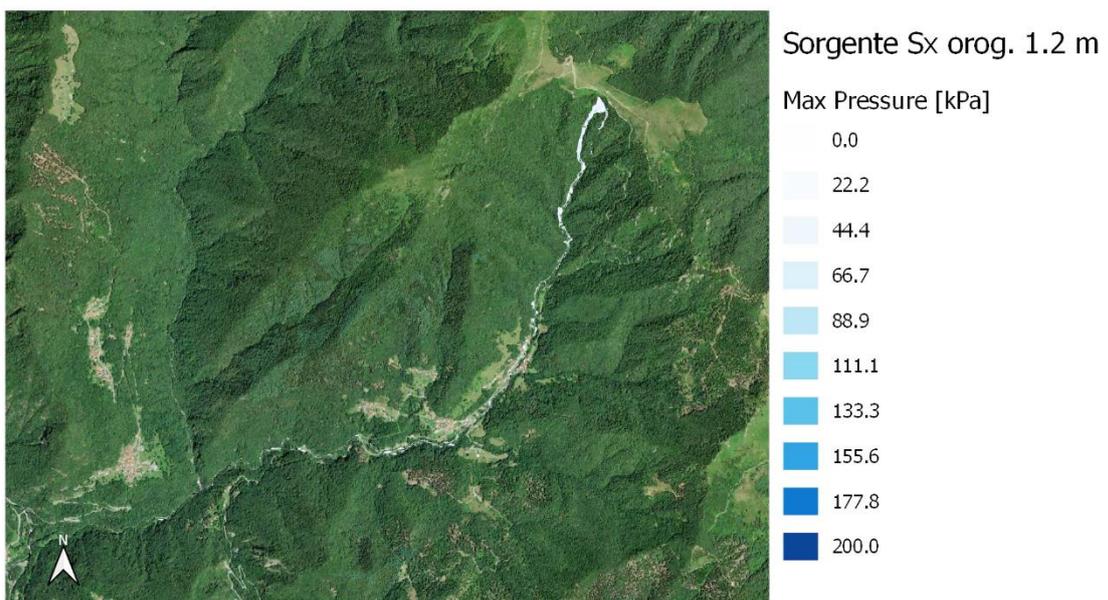


**Figura 106:** Dominio di erosione Area sinistra orografica.

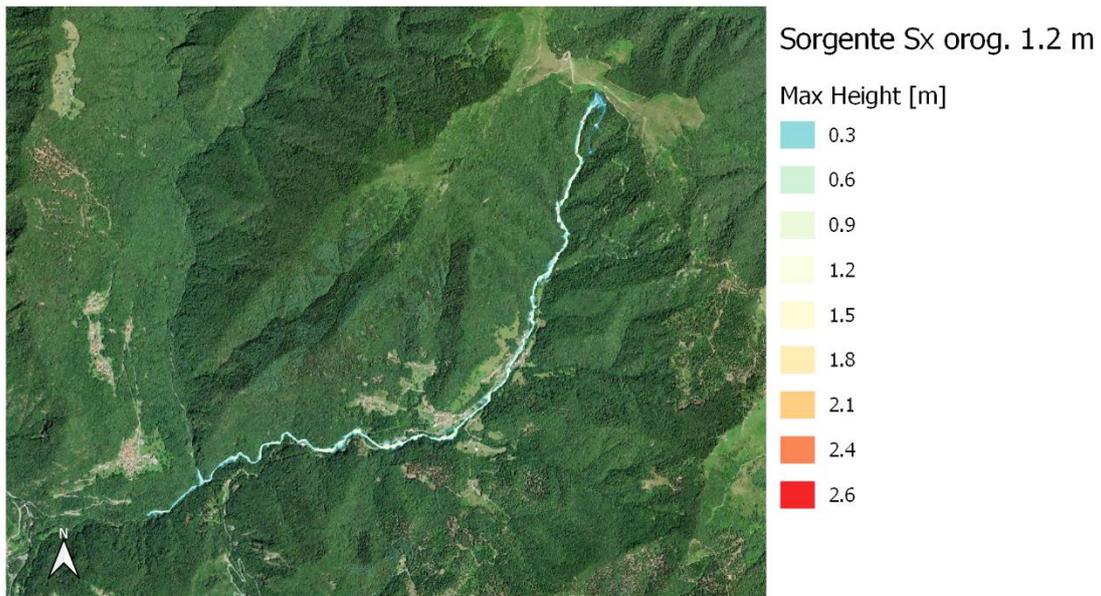
○ **Area sinistra orografica – 1,2 m**



*Figura 107: Velocità massima – Area sx orog. 1.2 m.*



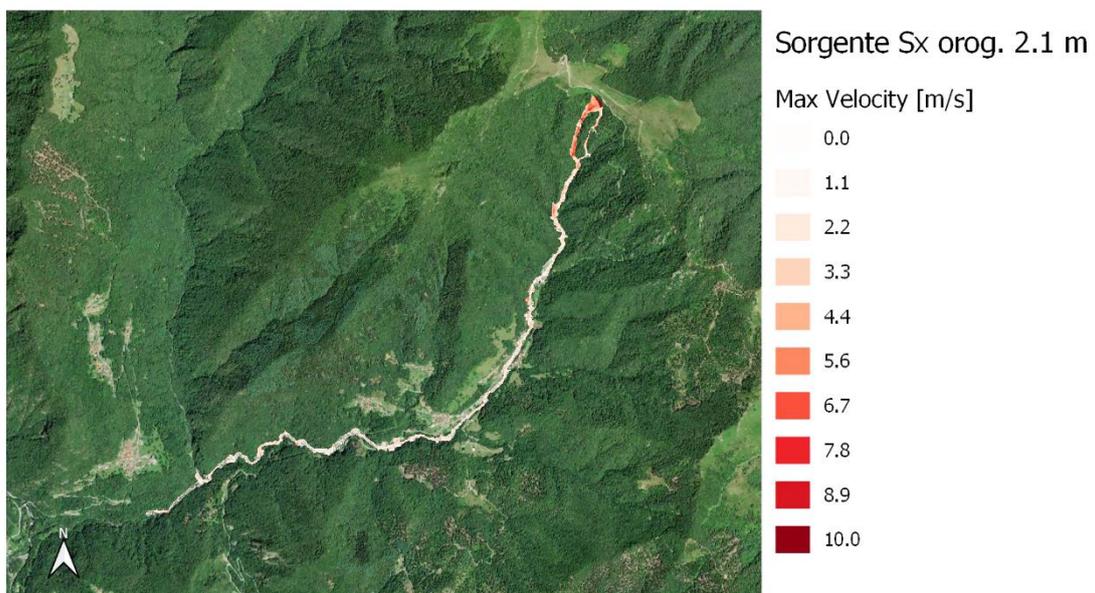
*Figura 108: Pressione massima – Area sx orog. 1.2 m.*



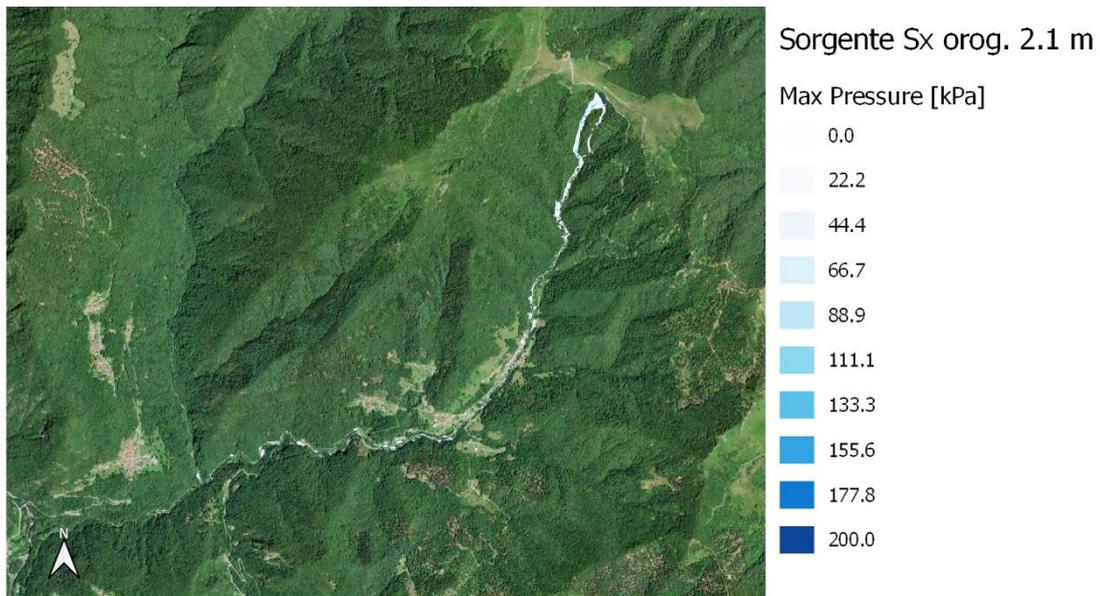
**Figura 109:** Altezza massima - Area sx orog. 1.2 m.

Nelle *Figure 107, 108 e 109*, sono riportati gli output ottenuti per strato instabile di spessore pari a 1,2 m: si osservano pertanto valori di velocità massima dell'ordine dei 5 m/s mentre, per quanto riguarda le pressioni massime e le altezze del flusso, si hanno picchi intorno a 40 kPa e 2 m rispettivamente.

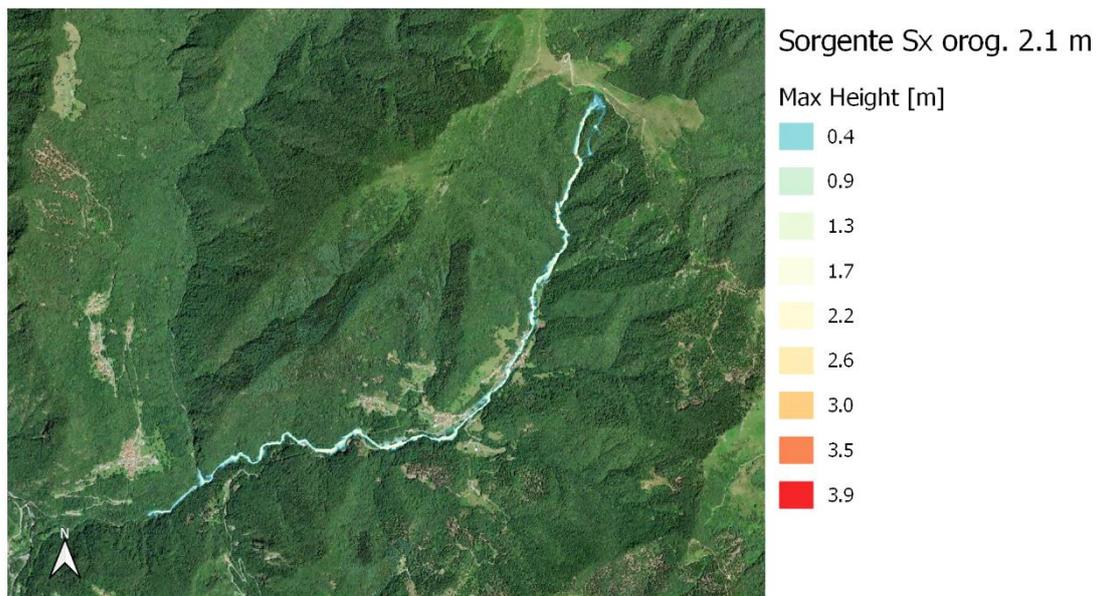
○ **Area sinistra orografica – 2,1 m**



**Figura 110:** Velocità massima - Area sx orog. 2.1 m.



**Figura 111:** Pressione massima - Area sx orog. 2.1 m.

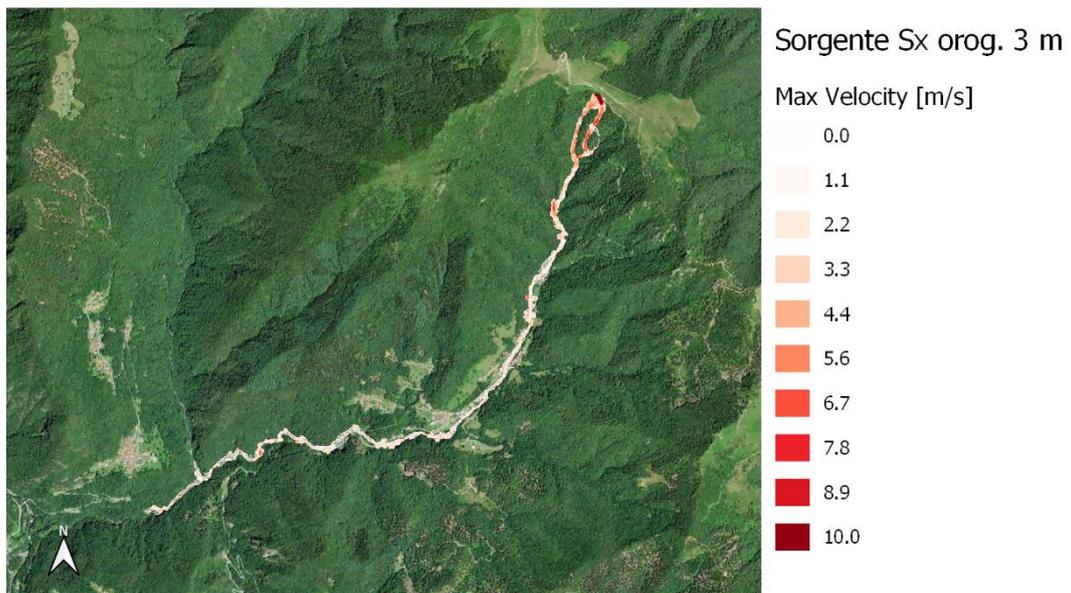


**Figura 112:** Altezza massima - Area sx orog. 2.1 m.

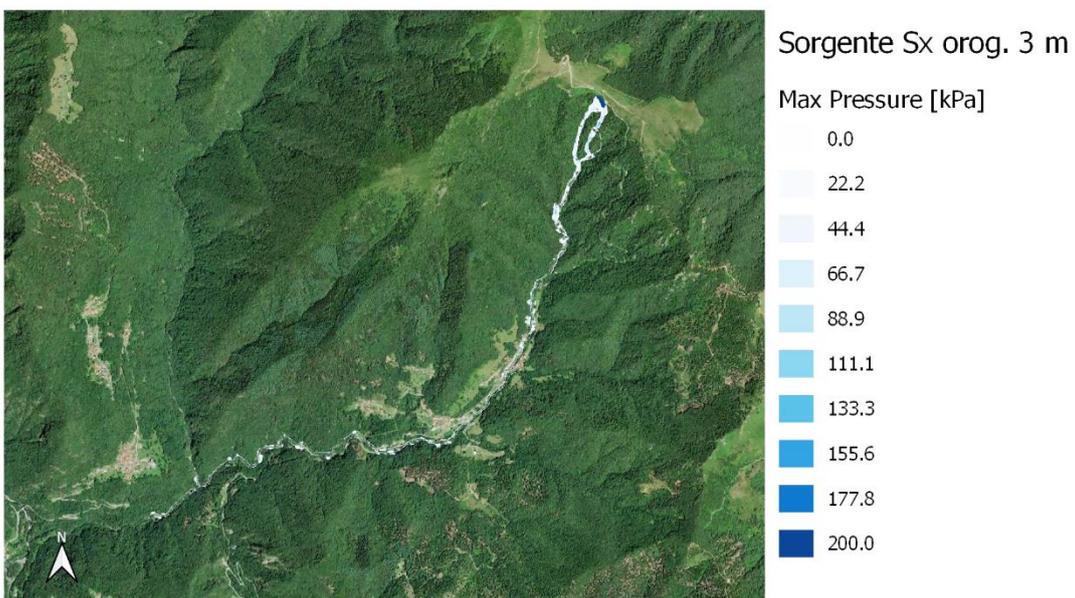
Nelle immagini delle *Figure 110, 111 e 112*, sono rappresentati i risultati della simulazione eseguita considerando una profondità di 2,1 m; dalle immagini si nota che i valori di velocità massima risultano compresi tra 4,5 e 5,5 m/s con livelli di esondazione più marcati rispetto al caso precedente, pressioni massime con valori eterogenei con picchi entro i 40 kPa e altezze del flusso che raggiungono picchi compresi tra 2,5 e 2,8 m.

Si osservano quindi valori di velocità e pressioni simili ai precedenti mentre, per quanto riguarda le altezze massime, si riscontrano aumenti fino a 0,8 m.

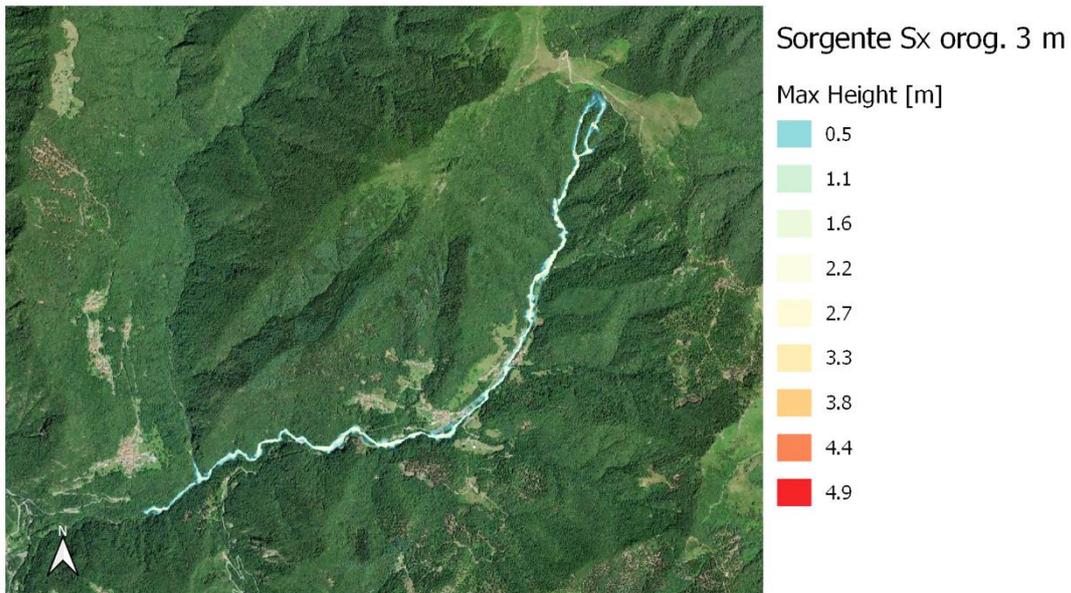
○ **Area sinistra orografica – 3 m**



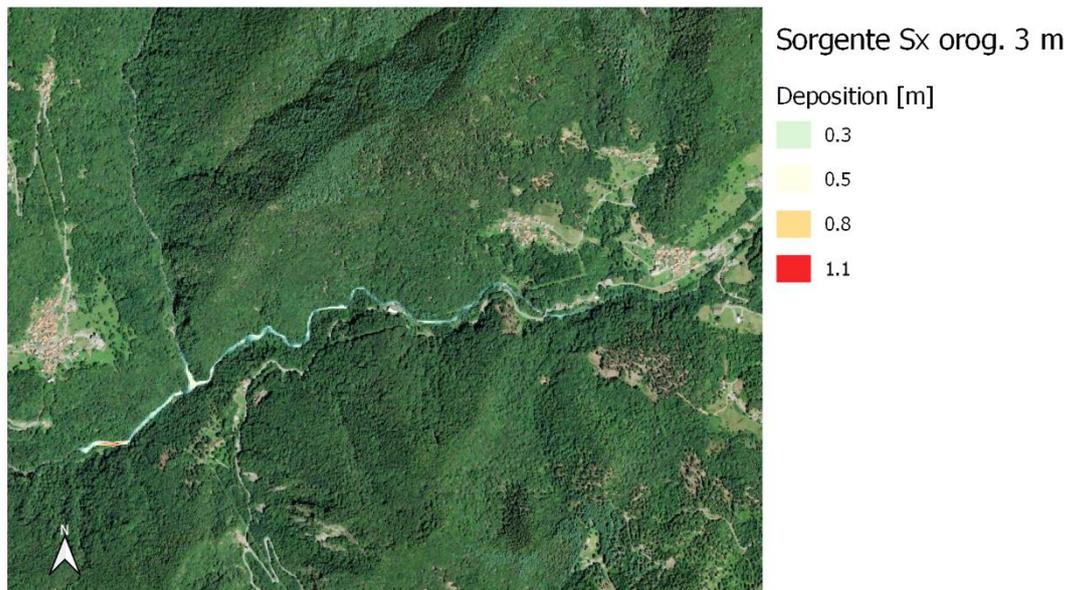
*Figura 113: Velocità massima - Area sx orog. 3 m.*



*Figura 114: Pressione massima - Area sx orog. 3 m.*



**Figura 115:** Altezza massima - Area sx orog. 3 m.



**Figura 116:** Deposizione - Area sx orog. 3 m.

Nelle *Figure 113, 114 e 115* precedenti sono rappresentati i risultati della simulazione nel caso più pessimistico, considerando cioè un'altezza dello strato instabile pari a 3 m; in termini di velocità si osservano picchi anche abbondantemente maggiori di 5 m/s, con un ancor maggiore livello di esondazione nelle aree circostanti.

Per quanto riguarda le pressioni massime, si registrano picchi oltre i 50 kPa mentre le altezze massime raggiungono picchi di 3,6 m in prossimità del centro abitato.

Si riporta, infine, in *Figura 116*, l'area di deposizione che presenta valori massimi di circa 1 m e non mostra grandi differenze rispetto ai casi visti finora.

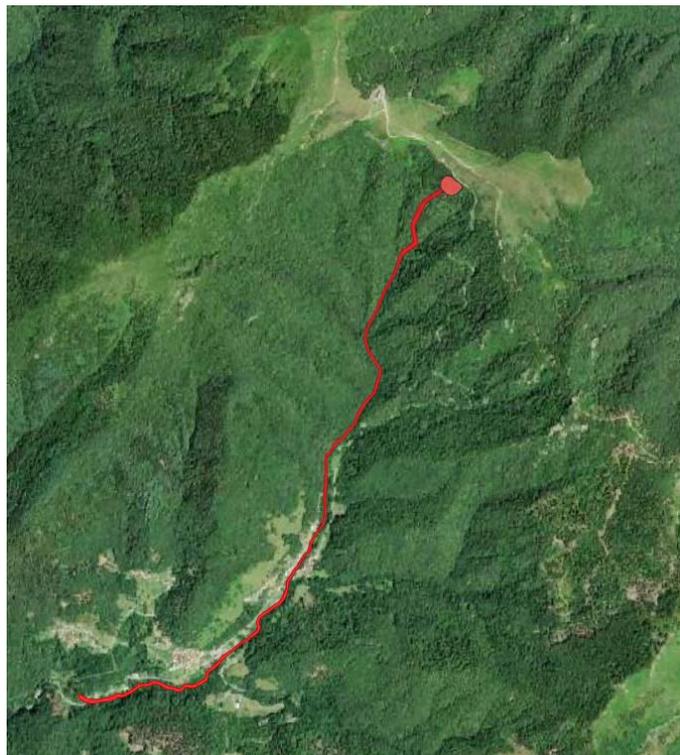
## 5.5 Area pineta

In *Tabella 33* si riportano i dati di ingresso utilizzati come input: il volume considerato, il tempo di calcolo (in questo caso differenziato per garantire il raggiungimento della condizione di arresto per "low flux") e l'angolo di rilascio fissato a 240°.

**Tabella 33**: Parametri impiegati - Area pineta.

Spessore depositi [m]	Volume [m <sup>3</sup> ]	Calculation time [s]	Flow direction [°]	$\mu$	$\xi$ [m/s <sup>2</sup> ]
<b>3</b>	21162,83	18000	240	0,200	200
<b>2,1</b>	14813,98	15000	240	0,200	200
<b>1,2</b>	8465,131	15000	240	0,200	200

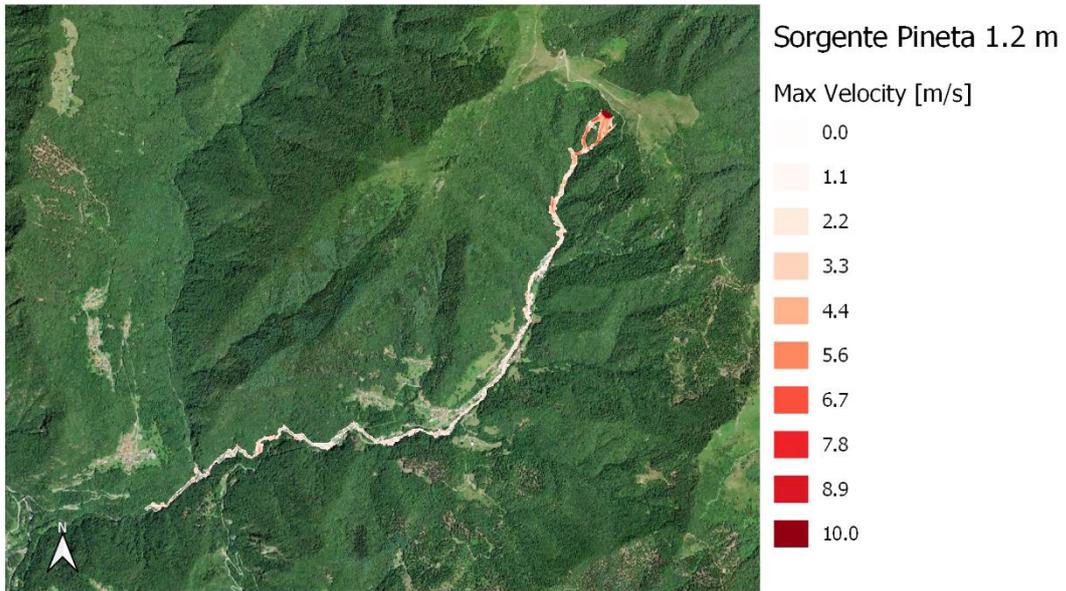
Per quanto concerne il dominio di erosione, si è fatto riferimento ad un'area ipotizzata la cui estensione è rappresentata in *Figura 117*.



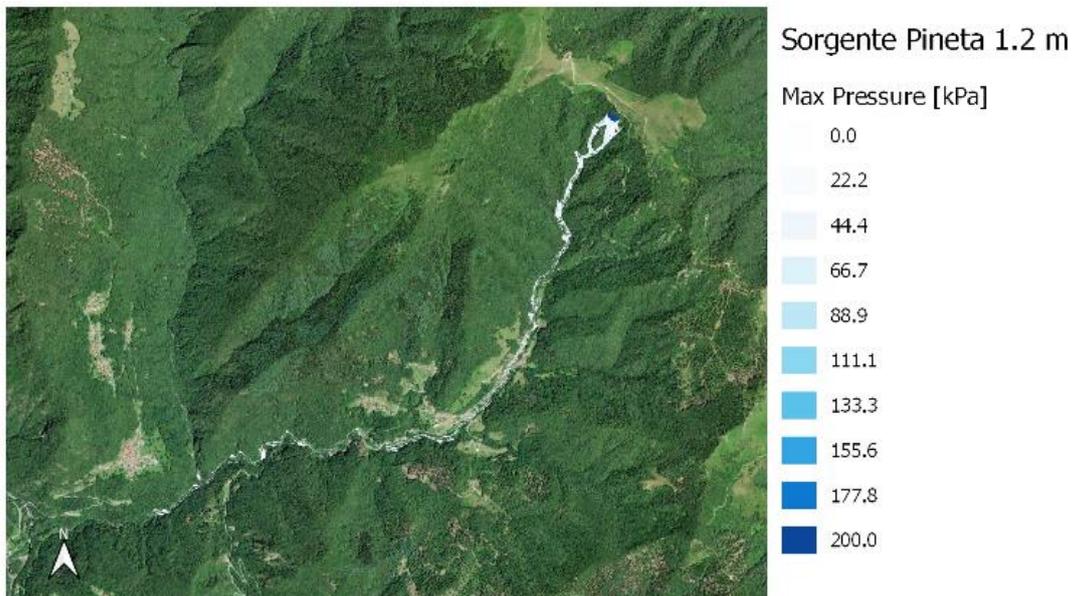
**Figura 117**: Dominio di erosione Area pineta.

Di seguito i risultati ottenuti dalle simulazioni.

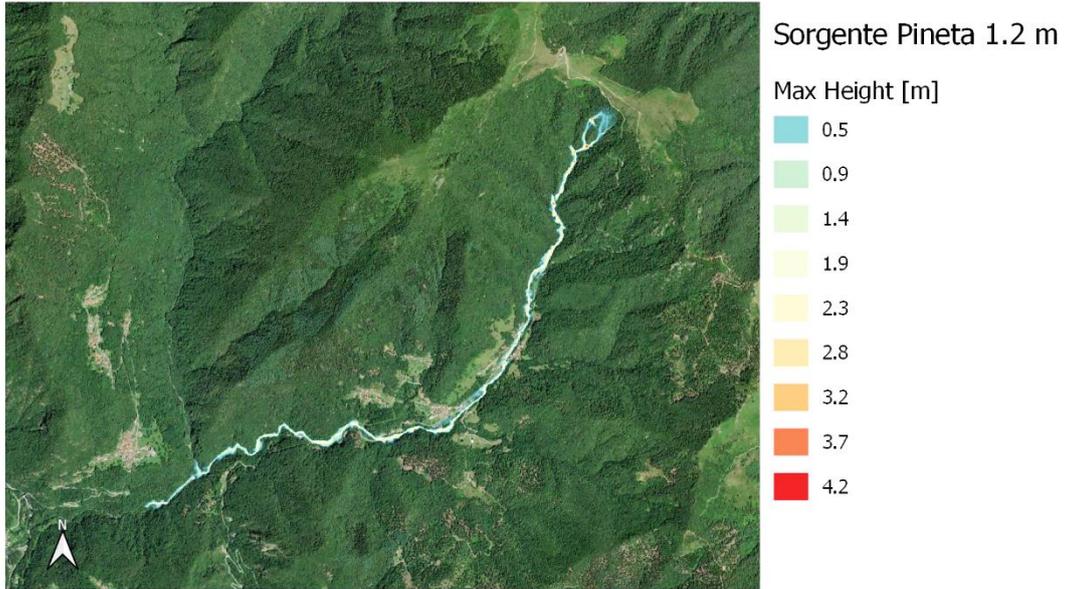
○ **Area pineta – 1.2 m**



*Figura 118: Velocità massima – Area pineta 1.2 m.*



*Figura 119: Pressione massima – Area pineta 1.2 m.*

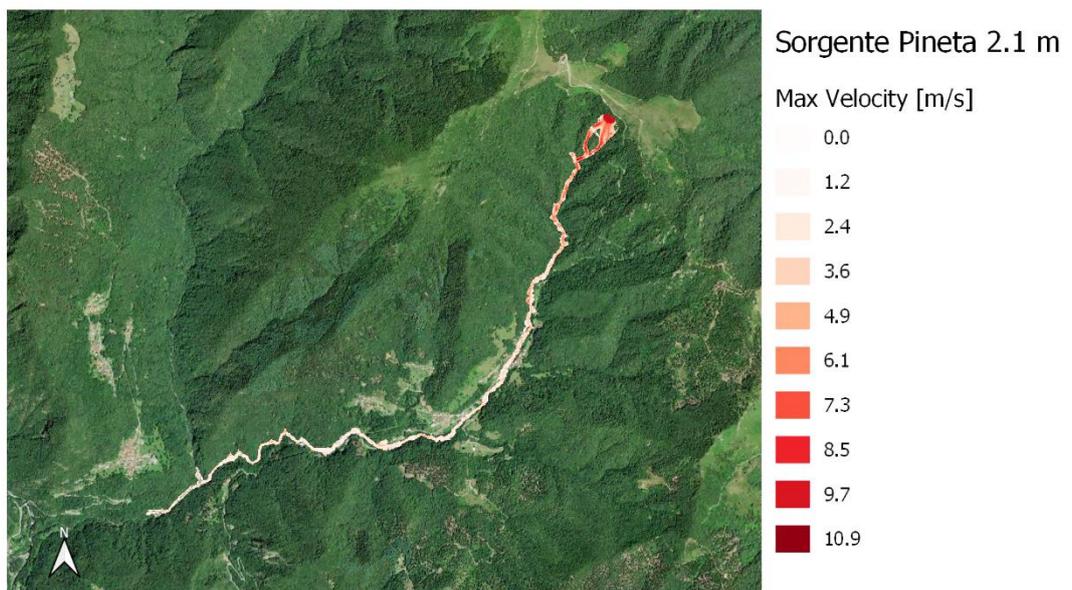


*Figura 120 : Altezza massima - Area pineta 1.2 m.*

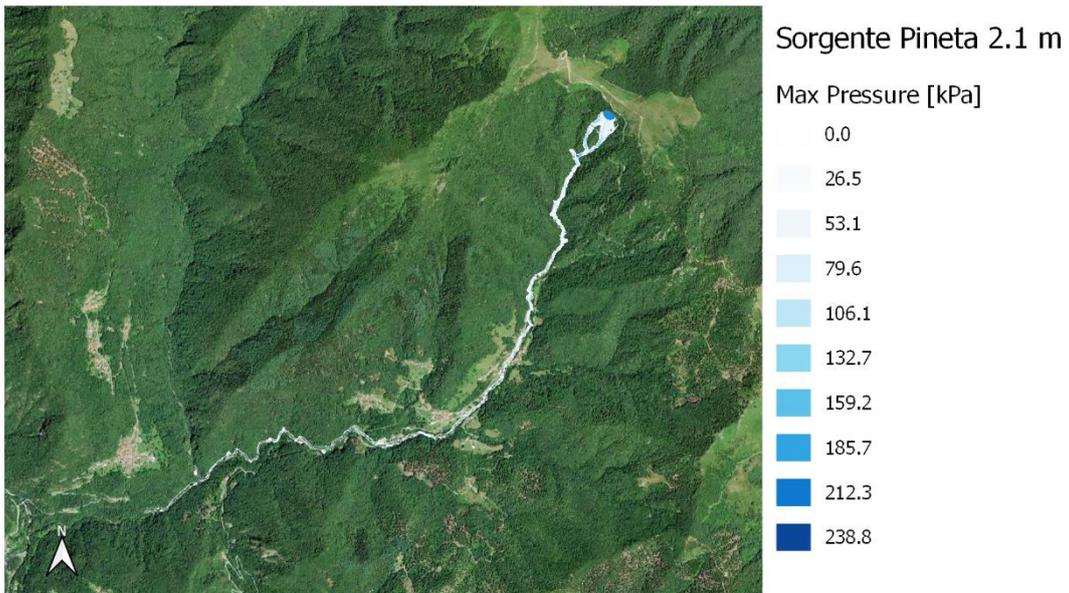
Nelle *Figure 118, 119 e 120* sono riportati gli output ottenuti per strato instabile di spessore pari a 1,2 m: dall'osservazione dei risultati si può notare che i valori di velocità massima si attestano per lo più intorno ai 4,3 m/s ma con picchi localizzati oltre anche a 5 m/s.

Per quanto riguarda le pressioni massime, invece, si hanno valori più eterogenei ma compresi tra i 30 e i 40 kPa mentre le altezze del flusso presentano valori dell'ordine di 2,5 m e picchi di oltre 3 m.

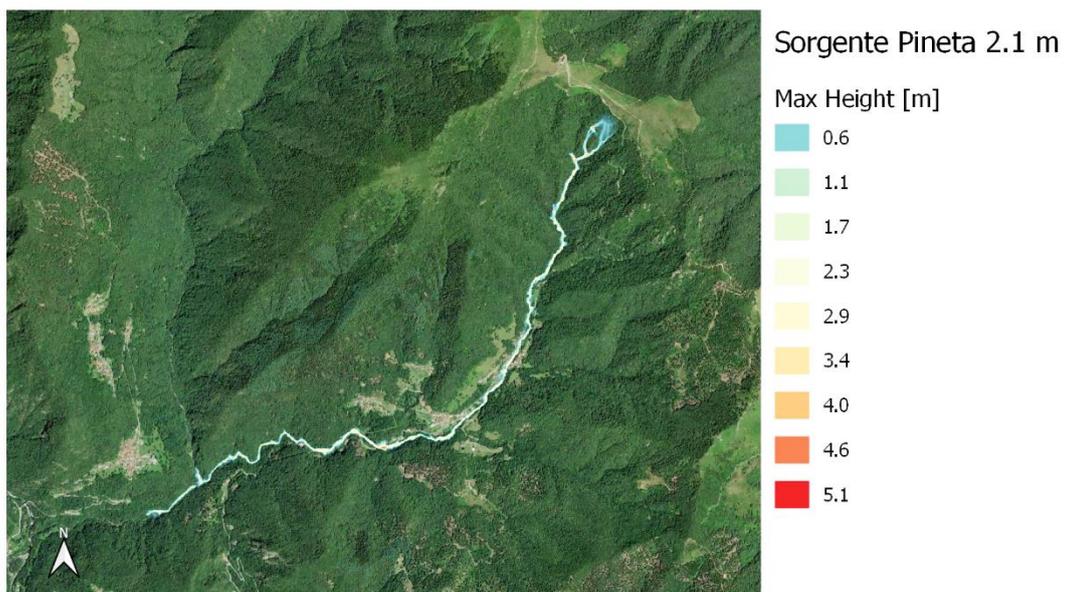
○ **Area pineta – 2.1 m**



*Figura 121 : Velocità massima - Area pineta 2.1 m.*



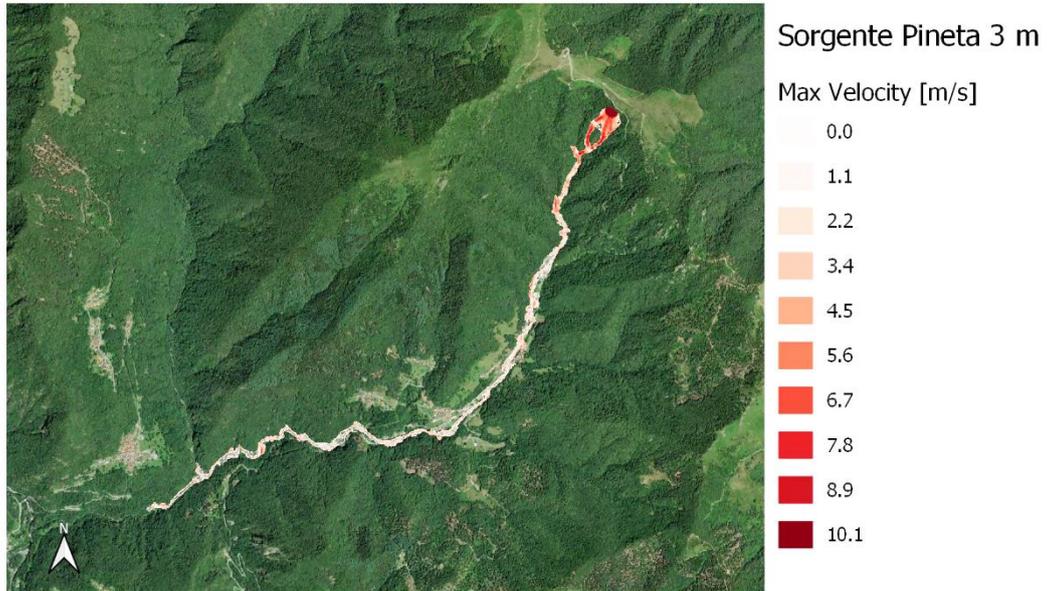
**Figura 122:** Pressione massima - Area pineta 2.1 m.



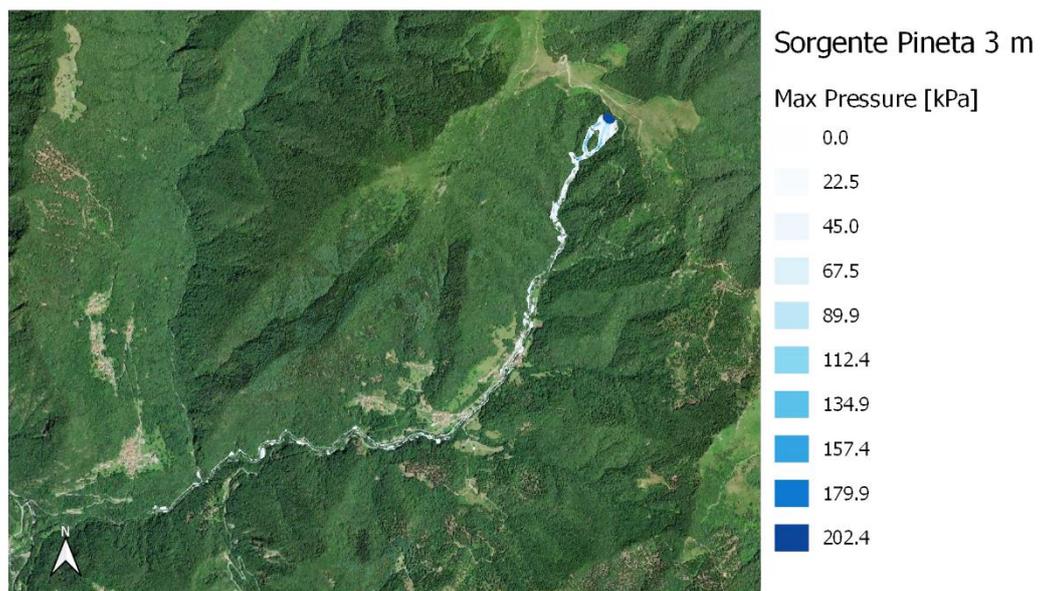
**Figura 123:** Altezza massima - Area pineta 2.1 m.

In *Figura 121*, *Figura 122* e *Figura 123*, sono rappresentati i risultati della simulazione eseguita considerando una profondità di 2,1 m; come si può notare i valori di velocità massima risultano mediamente pari a 5 m/s, pur presentando picchi oltre i 6m/s e livelli di esondazione importanti. Le pressioni massime presentano valori eterogenei oltre i 50 kPa con picchi anche di 70 kPa e altezze del flusso che raggiungono, nei punti più critici, valori superiori ai 4 m.

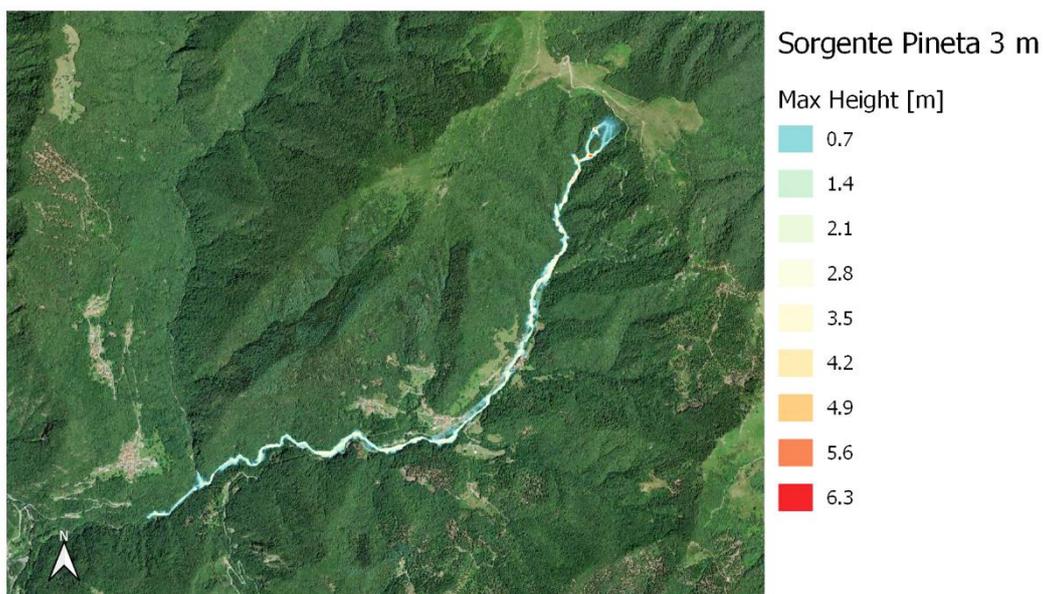
○ **Area pineta – 3 m**



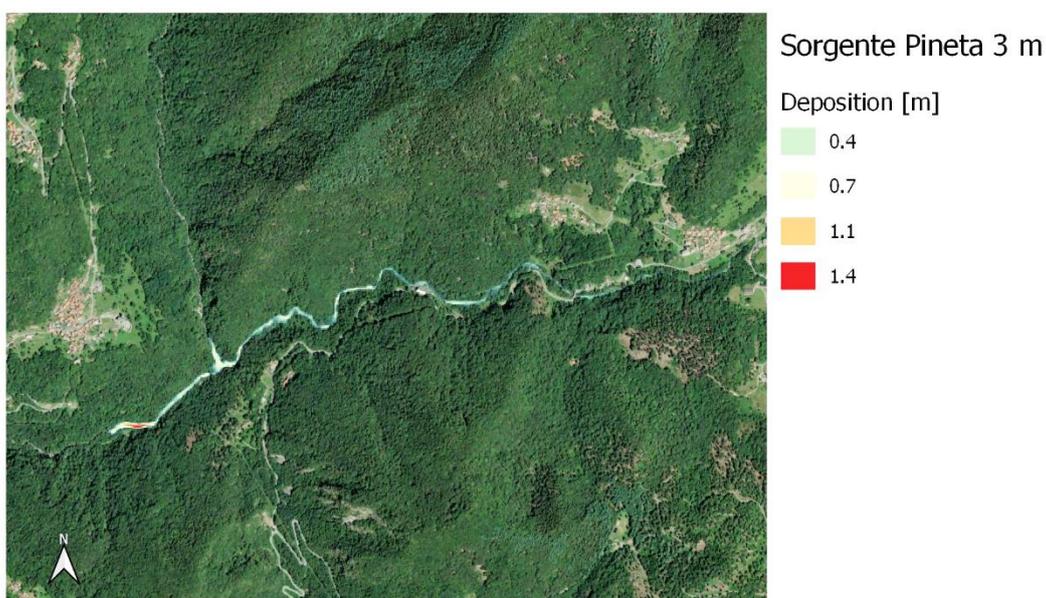
*Figura 124: Velocità massima - Area pineta 3 m.*



*Figura 125: Pressione massima - Area pineta 3 m.*



**Figura 126** : Altezza massima - Area pineta 3 m.



**Figura 127** : Deposizione - Area pineta 3 m.

Per finire, le immagini di *Figura 124*, *Figura 125* e *Figura 126*, fanno riferimento allo scenario peggiore tra quelli considerati poiché il volume di 21162,83 m<sup>3</sup> di materiale detritico instabilizzato supera di oltre tre volte l'evento del 2-3 Ottobre 2020 oggetto della back analysis.

Un simile evento, come si può facilmente prevedere dai dati fin qui presentati, è necessariamente caratterizzato da livelli di inondazione elevati così come tutti i parametri oggetto di studio.

Le velocità in gioco, infatti, si attestano anche oltre i 6 m/s, le pressioni massime, a loro volta, superano non di rado i 70 kPa, mentre, per quanto riguarda le altezze massime

raggiunte dal flusso, queste presentano valori regolarmente intorno ai 3,5 m con picchi anche superiori a 4 m.

Si riporta, infine, in *Figura 127*, l'area di deposizione che presenta valori massimi di spessore di circa 1,4 m.

## 5.6 Considerazioni finali sulle simulazioni

In base a quanto finora esposto nel presente lavoro, si può affermare che l'area oggetto di studio e più in generale il comune di Varallo sia frequentemente oggetto di dissesti di carattere idrogeologico per la natura geomorfologica del territorio.

I cambiamenti climatici in atto, inoltre, comportano un crescente aumento di fenomeni piovosi di carattere alluvionale e rara intensità, creando i presupposti per l'innescò di eventi franosi come colate detritiche, dall'alto potere distruttivo e caratterizzate da una quasi totale imprevedibilità.

Tramite la raccolta di dati in situ e sulla base dei risultati ottenuti con riferimento alla back analysis dell'evento del 2-3 ottobre 2020, l'individuazione di quattro aree con uguale propensione al dissesto sotto forma di *debris flow* sono stati modellati quattro possibili futuri scenari.

In particolare, sono state considerate le due zone immediatamente in destra e sinistra orografica rispetto alla frana oggetto di studio (2-3 ottobre 2020), la zona in destra orografica in prossimità della vasca antincendio e quella in sinistra orografica in corrispondenza della pineta lì presente.

Le simulazioni effettuate mostrano come eventi franosi della stessa natura di quello effettivamente verificatosi, potrebbero coinvolgere infrastrutture e strutture a valle della zona di distacco, come peraltro già verificatosi.

Si ritiene pertanto indispensabile intervenire nell'analizzata con azioni di mitigazione del rischio connesso agli eventi di instabilità.

In tal senso, l'analisi della correlazione tra l'innescò dell'instabilità e la principale causa predisponente e innescante (piovosità) è un mezzo molto utile per la gestione del rischio.

Proprio in tale prospettiva si inserisce l'analisi sviluppata nel seguente e ultimo capitolo, dedicato all'individuazione delle soglie pluviometriche minime per l'innescò di ulteriori fenomeni di colata oltre che a una mappatura preliminare delle potenziali aree instabili in funzione dei livelli di pioggia critici individuati.



---

## CAP. 6 – CONDIZIONI DI INNESCO E CARTA DELLA PERICOLOSITÀ PER INSTABILITÀ DEI VERSANTI

---

Il presente capitolo è dedicato alla descrizione dello studio effettuato sulle condizioni di innesco, con riferimento soglie minime di precipitazione che potrebbero causare fenomeni di dissesto e, in particolare, colate detritiche nel bacino del rio Pianale, definiti vari scenari di pericolosità.

Le soglie, inoltre, vengono determinate per l'intera area in funzione delle caratteristiche del terreno, sia in termini di parametri meccanici e idraulici, sia a livello di spessore degli strati che costituiscono le coperture superficiali.

Grazie a questo è stato possibile correlare i livelli critici di precipitazione alla collocazione spaziale delle potenziali aree instabili, procedendo così ad una mappatura, tramite software GIS, delle possibili zone di innesco in funzione della pioggia netta infiltrata.

Tramite un'analisi storica sugli effetti dei dissesti di tipo idrogeologico è stato osservato come i danni provocati da questi ultimi siano in costante aumento, secondo una tendenza che si protrae ormai da svariati decenni; tra le motivazioni di tale crescita, oltre ai già menzionati cambiamenti climatici, è possibile includere la maggior disponibilità di informazioni e di sensibilizzazione al problema ma, soprattutto, un rilevante ampliamento delle aree urbanizzate spesso associato a scelte territoriali errate.

Uno degli effetti della continua distruzione che accompagna fenomeni di questo genere è l'ingente perdita di ricchezza subita dalla comunità, con relativi costi e sforzi di ricostruzione che spesso superano quelli necessari ad attività di prevenzione: per questo motivo, previsione e prevenzione, sono ormai fortunatamente due dei principali obiettivi di chi si occupa della gestione del territorio.

Una delle prime attività da attuare per definire una strategia di prevenzione è la valutazione della pericolosità geologica, ovvero la determinazione della probabilità di accadimento di un determinato processo in un'area specifica e con una certa intensità.

Vista la molteplicità dei dati necessari e delle variabili in gioco, oltre all'inevitabile variabilità ad essi associata, valutazioni di questo genere sono piuttosto problematiche, specie all'aumentare dell'estensione del territorio in esame.

Aree più limitate, infatti, consentono una miglior definizione dei parametri, della geometria e una più dettagliata raccolta ed elaborazione delle informazioni più significative, con una conseguente maggior accuratezza nei risultati.

Nel caso specifico di questo studio, pertanto, per lo svolgimento delle analisi a scala minore si è fatto riferimento alla procedura seguita da Arpa Piemonte nella realizzazione della "Carta della pericolosità per instabilità dei versanti" per il territorio piemontese contenuto entro i limiti del Foglio I.G.M. 1:50.000 n. 211 *Dego*.

## 6.1 Modello di calcolo

Nel valutare la pericolosità associata a fenomeni franosi superficiali e ricorrenti su aree estese, come nel caso delle colate detritiche oggetto di questa tesi, è molto utile ricorrere a modelli che possano essere facilmente implementati e gestiti in un Sistema Informativo Geografico (GIS).

In ambiente GIS è infatti possibile rappresentare la distribuzione spaziale di diverse variabili e condurre calcoli e operazioni tra di esse, mantenendone l'attributo della localizzazione geografica.

Il risultato sarà costituito da carte di pericolosità a varia scala (dettaglio, locale, regionale, ecc.), ciascuna riferita ad un determinato scenario temporale di accadimento.

La chiara correlazione tra precipitazioni e innesco dei debris flow o di frane superficiali in generale, oltre alla crescente quantità di dati e informazioni disponibili su tali fenomeni, suggeriscono la possibilità di definire scenari temporali di innesco sulla base della ricorrenza delle piogge nella zona di indagine, utilizzando metodi che accoppiano generalmente un modello di stabilità all'equilibrio limite e un modello idrologico.

Uno dei principali motivi di innesco delle frane superficiali, infatti, è riconducibile all'infiltrazione di acqua nel terreno che genera una falda temporanea nella zona di contatto con uno strato sottostante meno permeabile, provocando così un aumento della pressione interstiziale con la conseguente riduzione della resistenza a taglio e la formazione di una superficie di scorrimento.

Date le precedenti considerazioni, in questa tesi si è fatto riferimento all'approccio sviluppato da *Montgomery & Dietrich (1994)*, basato sulla valutazione della capacità di smaltire il contributo d'acqua proveniente da monte, in condizioni di stazionarietà per ogni elemento in cui viene discretizzata la zona studiata.

Tale modello, che accoppia ad un modello di stabilità all'equilibrio limite del pendio un modello idrologico stazionario, rappresenta una metodologia di valutazione della pericolosità applicabile anche su larga scala.

Può essere adottato nel caso di frane superficiali di limitato spessore con superficie di rottura posta in corrispondenza del contatto tra lo strato mobilizzabile ed uno sottostante meno permeabile.

Il modello è stato già utilizzato per la redazione della *Carta della pericolosità per instabilità dei versanti – foglio 211, DEGO*, come descritto nelle Note illustrative (Campus, Forlati, & Nicolò, 2005), in quanto:

- Si tratta di un metodo conosciuto e universalmente accettato;
- È di facile implementazione e richiede la conoscenza di relativamente pochi parametri;
- Fornisce risultati accettabili in rapporto ai bassi costi di realizzazione della base dati che richiede;

- Modella bene processi legati ad eventi meteorologici di lunga durata.

Definito pertanto il modello, se ne riporta nel paragrafo successivo una descrizione più approfondita, con riferimento alle ipotesi di base e i parametri necessari alla sua applicazione.

### 6.1.1 Modello di Montgomery & Dietrich (1994)

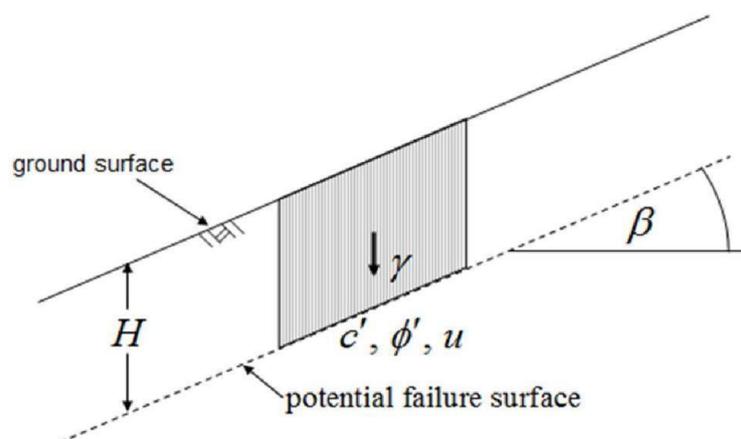
Come anticipato in precedenza, l'approccio di *Montgomery & Dietrich (1994)* accoppia un modello idrologico ed uno di stabilità dei pendii all'equilibrio limite.

Le principali assunzioni alla base della formulazione sono quelle di:

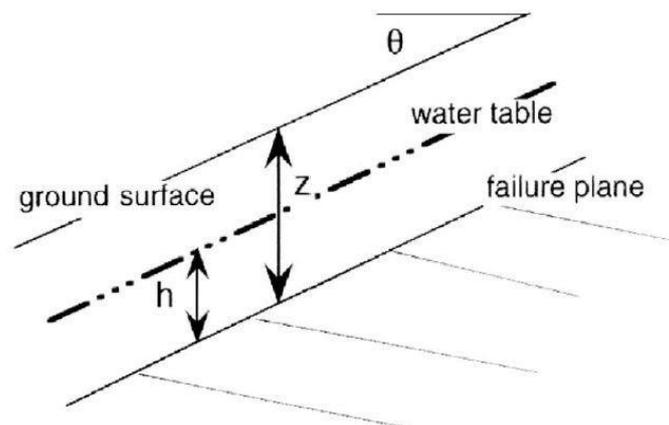
- Pendio indefinito:

Con l'ipotesi di pendio indefinito ci si riferisce a una situazione stratigrafica caratterizzata da una profondità dello strato potenzialmente instabile (calcolata in direzione ortogonale alla superficie del terreno) molto minore rispetto all'estensione longitudinale di instabilità (calcolata lungo il versante); tale ipotesi semplificativa consente di svolgere l'analisi su un elemento rappresentativo, come quello evidenziato in *Figura 128*, senza dover considerare l'intera zona instabile ma estendendo successivamente i risultati all'estensione totale della superficie di rottura.

- Superficie di rottura piana, parallela al pendio e localizzata al contatto tra coltre detritica alterata superficiale e livello a minore permeabilità sottostante;
- Criterio di resistenza del terreno espresso secondo Mohr-Coulomb in termini di tensioni efficaci;
- Flusso stazionario parallelo al pendio;
- Assenza di drenaggio profondo e di flusso nel substrato.



**Figura 128** : Schema della condizione di pendio indefinito.



**Figura 129** : Schema altezze del modello.

Come noto dal principio degli sforzi efficaci, all'aumentare dell'altezza  $h$  dello strato di terreno saturo (rappresentata in *Figura 129*), si ha una diminuzione della tensione agente normalmente al piano di rottura e, conseguentemente, una riduzione della resistenza al taglio disponibile lungo la stessa superficie.

Tale altezza viene riferita allo spessore totale della coltre detritica ( $z$ ) mediante la seguente relazione (1):

$$\frac{h}{z} = \frac{q}{T} \cdot \frac{a}{b \cdot \sin \theta} = W$$

dove:

$q$  = pioggia netta infiltrata [L/T];

$T = K \cdot z \cdot \cos \theta$  = trasmissività idraulica [L<sup>2</sup>/T];

$K$  = coefficiente di permeabilità del terreno saturo [L/T];

$a$  = area contribuente (superficie drenata a monte di ogni cella) [L<sup>2</sup>];

$b$  = larghezza della sezione di deflusso [L];

$W$  = rapporto tra lo spessore dello strato saturo e lo spessore totale [-];

$\theta$  = inclinazione del versante [-].

Nell'espressione precedente (1), quindi, si possono distinguere due fattori presenti al secondo membro: uno definito come "termine idrologico", funzione della pioggia netta infiltrata e valutata secondo un modello idrologico e della trasmissività idraulica, l'altro detto "termine topografico" i cui parametri  $a$ ,  $b$  e  $\theta$  sono ottenuti mediante operazioni sul modello digitale del terreno in ambiente GIS.

In aggiunta al modello idrologico, inoltre, viene incluso nell'equazione un modello di stabilità che consente di calcolare un fattore di sicurezza nei confronti dell'insacco del fenomeno di scivolamento.

A partire dalle ipotesi precedentemente riportate, con particolare riferimento a quelle di pendio indefinito con filtrazione parallela alla superficie, formulando l'espressione della resistenza al taglio secondo il criterio di Mohr-Coulomb e introducendo il rapporto tra spessore di terreno in condizioni sature e spessore verticale totale dello strato ( $h/z$ ), il

fattore di sicurezza può essere espresso secondo la formulazione di Skempton e De Lory (*Skempton & De Lory, 1957*):

$$F = \frac{c' + (\gamma - W \cdot \gamma_w) \cdot z \cdot \theta \cdot \tan \varphi'}{\gamma \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}$$

dove:

$c'$  = coesione efficace;

$z$  = profondità verticale della superficie di scivolamento;

$\gamma$  = peso del terreno umido per unità di volume;

$\gamma_w$  = peso dell'acqua per unità di volume;

$\varphi'$  = angolo di resistenza al taglio del terreno.

In relazione a quanto finora enunciato, la **condizione di instabilità** per ciascuna cella del dominio è espressa dalla seguente relazione:

$$\frac{a}{b} \geq \left[ \frac{c'}{\gamma_w \cdot z \cdot \theta \cdot \tan \varphi'} + \frac{\gamma}{\gamma_w} \cdot \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \varphi'} \right) \right] \cdot \frac{T}{q} \cdot \sin \theta$$

Tale condizione viene verificata esclusivamente sulle celle del dominio che non soddisfano altre due condizioni dette di "*assoluta stabilità*" e "*assoluta instabilità*" indicate dalle seguenti disequazioni:

- *Assoluta stabilità*:  $\tan \theta \leq \left( 1 - \frac{\gamma}{\gamma_w} \right) \cdot \tan \varphi'$
- *Assoluta instabilità*:  $\tan \theta \geq \frac{c'}{\gamma \cdot z \cdot \theta} + \tan \varphi'$

La condizione di *assoluta stabilità* è soddisfatta da tutti gli elementi topografici che risultano stabili anche nella situazione di terreno completamente saturo ( $W = 1$ ); si osserva, inoltre, che la relazione, non considerando la presenza di una eventuale coesione, è definita in modo conservativo.

La condizione di *assoluta instabilità*, invece, individua gli elementi topografici classificati come instabili anche in assenza di pioggia.

Infine, imponendo l'uguaglianza tra il primo ed il secondo termine della *condizione di instabilità*, ovvero stabilendo un fattore di sicurezza unitario e risolvendo l'equazione rispetto alla pioggia infiltrata,  $q$ , è possibile ricavare la soglia di infiltrazione critica,  $q_{cr}$ , che porta a condizioni di equilibrio limite, tale valore è calcolabile come:

$$q_{cr} = \left[ \frac{c'}{\gamma_w \cdot z \cdot \theta \cdot \tan \varphi'} + \frac{\gamma}{\gamma_w} \cdot \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \varphi'} \right) \right] \cdot \frac{T \cdot b}{a}$$

## 6.2 Modellazione GIS

La scelta di un modello di calcolo deterministico e semplificato è stata dettata proprio dall'esigenza di dover calibrare pochi parametri, unicamente sulla base di osservazioni speditive di terreno e cartografia tematica disponibile.

Come anticipato nei paragrafi precedenti, obiettivo delle analisi svolte era quello di valutare le soglie di precipitazione critica e realizzare una carta di pericolosità sulla scala dell'intero bacino del rio Pianale, compito per cui risultano ormai indispensabili software in grado di trattare dati georeferenziati sotto forma di mappe digitali come QGIS, utilizzato per l'intero svolgimento dei calcoli e la rappresentazione dei dati ottenuti.

Anche in questo caso è stata perciò necessaria una prima fase di studio e di valutazione, volta alla determinazione dei parametri di input oltre che alla comprensione e il perfezionamento delle procedure da attuare, di cui si fornisce una breve descrizione.

### 6.2.1 Parametri geotecnici

Il primo passo affrontato nella preparazione dei dati di input ha riguardato la determinazione dei parametri geologici, di natura soggetti a forti incertezze e a maggior ragione se valutati su aree vaste come quella oggetto di studio.

Le informazioni richieste dal modello, in particolare, riguardano:

- proprietà del terreno come il peso in condizioni di suolo umido;
- la formulazione del criterio di rottura secondo l'espressione di Coulomb, ovvero l'angolo di attrito interno  $\phi'$  e l'eventuale presenza di coesione  $c'$ ;
- la permeabilità dello strato interessato.

Per la definizione di tali parametri si è potuto far affidamento ai risultati di una prova di taglio diretto, eseguita da Tecno Piemonte SpA, società privata che si occupa della fornitura di servizi, in particolare di prove e certificazione, nel settore delle opere di ingegneria civile.



**Figura 130** : Zona di prelievo del campione.

La prova, il cui certificato è riportato per intero in allegato, è stata svolta nei giorni immediatamente successivi al prelievo del campione, effettuato in data 23/09/2019 e in prossimità dell'area di distacco della colata detritica oggetto della *back analysis*, così come rappresentato indicativamente in *Figura 130*.

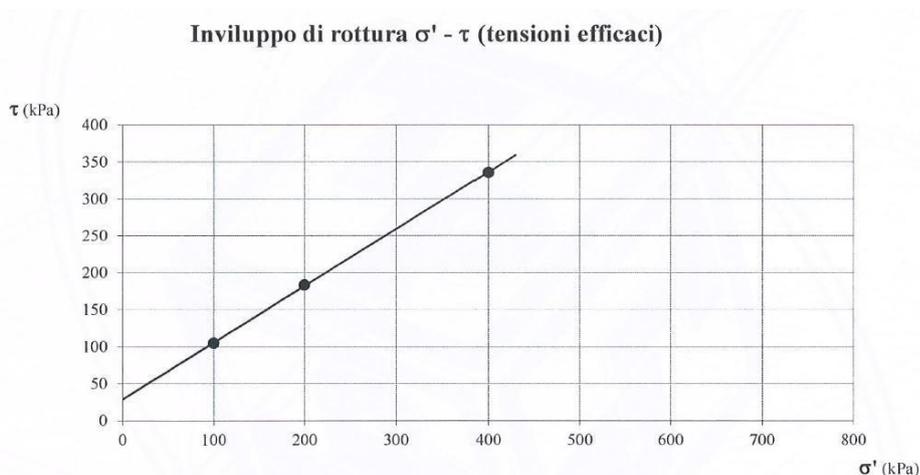
Per quanto riguarda la massa volumica del terreno in condizioni umide, questa è stata calcolata a partire dai dati di laboratorio ottenuti per provini ricavati su passante di 5mm e mediante costipamento manuale, così come indicato in *Tabella 34*.

**Tabella 34** : Dati prova di taglio e calcolo massa volumica.

Grandezza	Provino 1	Provino 2	Provino 3
<b>Volume iniziale [cm<sup>3</sup>]</b>	95,008	95,008	95,008
<b>Massa tara [g]</b>	78,18	78,73	78,02
<b>Massa tara + massa umida iniziale [g]</b>	252,22	250,24	250,78
<b>Massa umida iniziale [g]</b>	174,04	171,51	172,76
<b>Massa volumica terreno umido [g/ cm<sup>3</sup>]</b>	1,818		
<b>Massa volumica terreno umido [KN/ m<sup>3</sup>]</b>	17,83		

Al fine di determinare le caratteristiche di resistenza a taglio del terreno è stata condotta una prova di taglio diretto in condizioni drenate.

Mediante interpretazione della relazione  $\tau/\sigma'$  nel piano di Mohr (*Figura 4*), sono stati ricavati i valori di angolo di attrito e coesione riportati in *Tabella 35*.



**Figura 131**: Inviluppo di rottura per il campione sottoposto a prova di taglio diretto.

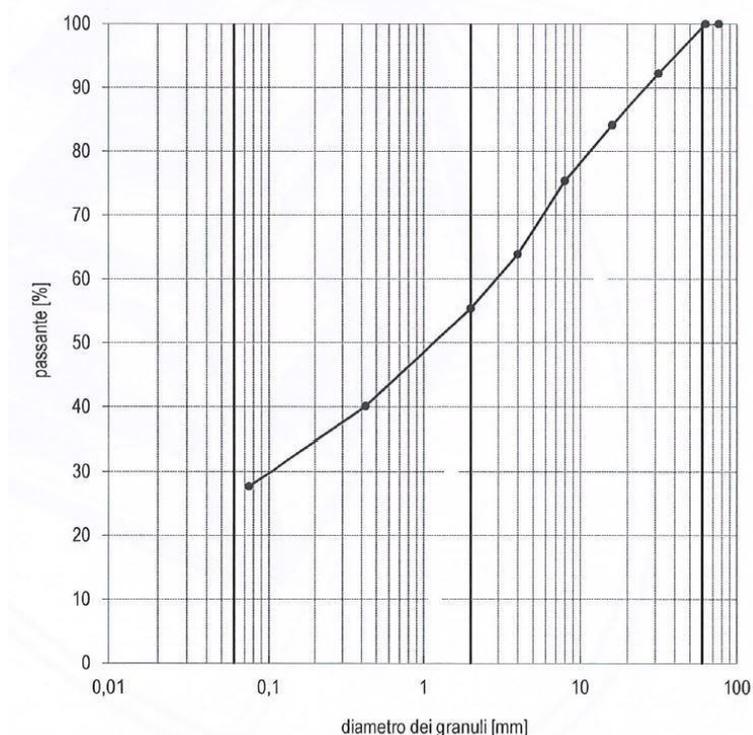
Grandezza	Valore
<b>Angolo di attrito <math>\phi'</math> [°]</b>	38
<b>Coesione <math>c'</math> [kPa]</b>	29

**Tabella 35** : Valori di angolo di attrito e coesione ricavati dalla prova di taglio.

Per quanto riguarda la permeabilità del terreno,  $K$ , non disponendo di prove specifiche, ci si è affidati all'analisi granulometrica effettuata da Tecno Piemonte SpA e riportata in *Figura 132*.

Dalla curva granulometrica è stato possibile classificare il terreno che, analizzando i valori di passante ai vari setacci, infatti, è risultato composto in prevalenza da ghiaia, sabbia limosa e argillosa e, pertanto, appartenente alla classe **A2-4** della classificazione AASHTO M 145.

A partire da valori medi presenti in letteratura relativi a tale classe, è stato così possibile stimare un valore di permeabilità pari a  $10^{-4}$  m/s.



*Figura 132*: Curva granulometrica del campione in esame.

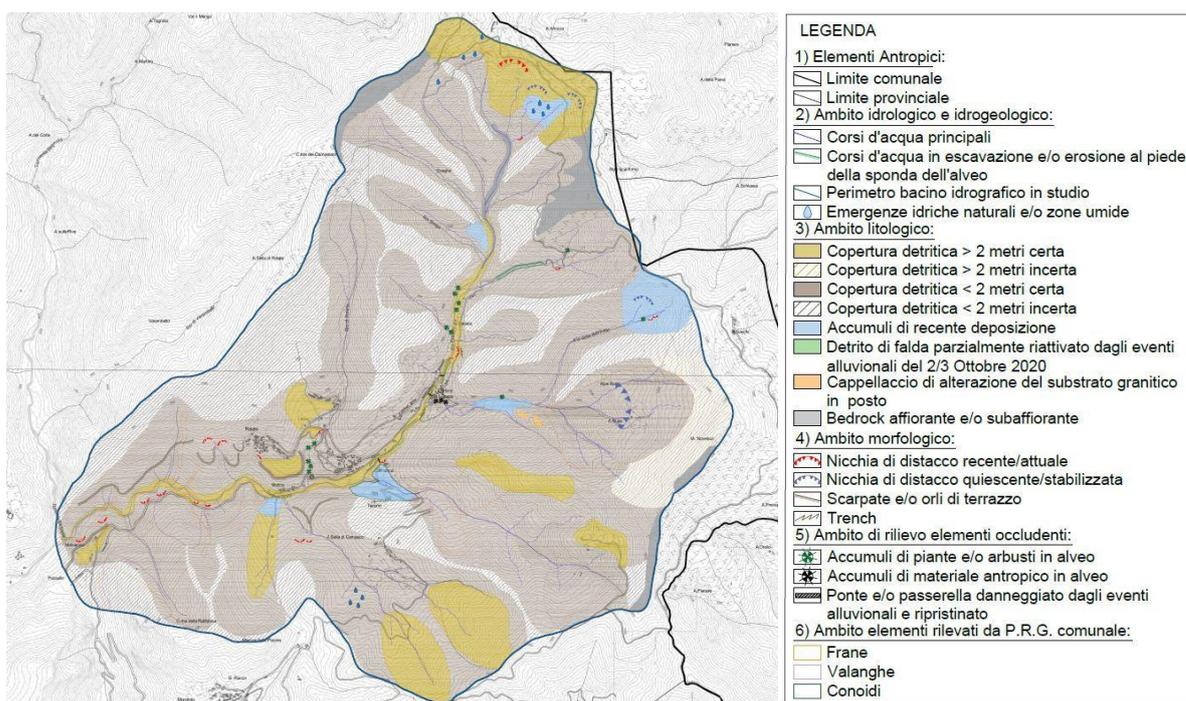
In conclusione, è necessario specificare che, come tutti i risultati forniti da prove di laboratorio effettuate a partire da campioni prelevati in situ, ammesso di trascurare l'eventuale disturbo arrecato in fase di prelievo, i dati riportati in questo paragrafo sono di carattere puntuale e non necessariamente rappresentativi dell'intero strato, né tantomeno dell'area circostante.

Ciò nonostante, nel caso specifico, dovendo caratterizzare l'intero bacino del rio Pianale disponendo della sola prova di taglio descritta in precedenza e, vista l'assenza di elementi peculiari che lasciassero presagire diverse caratteristiche meccaniche del terreno, è stata fatta l'assunzione semplificativa di considerare **valori omogenei** per tutta l'area oggetto di studio, validata dalle osservazioni speditive di terreno effettuate dai tecnici della Società Tecnosesia.

## 6.2.2 Parametri topografici

I parametri topografici rappresentano il dato principale per lo svolgimento delle analisi e, in generale, vengono derivati a partire dal modello digitale del terreno mediante appositi plugin o funzioni specifiche implementate sul software QGIS.

Per la definizione delle potenze degli strati, invece, si è fatto riferimento alla “Carta del rilievo del bacino idrografico del torrente Nono e i suoi affluenti minori presso la frazione di Camasco” redatta dallo studio tecnico associato di geologia Tecnosesia del Dott. Cavagnino, in collaborazione con il geologo Dott. Marco Stoppa di cui si riporta un estratto in *Figura 133*.



**Figura 133:** Carta del rilievo del bacino idrografico del torrente Nono e i suoi affluenti minori presso la frazione di Camasco.

Come mostrato in Legenda, i valori di copertura sono stati classificati come spessori maggiori o minori di 2m ma, essendo frutto di stime approssimative, talvolta “incerti”.

Per avere un dato univoco e definito da poter impiegare nel modello, sono stati assunti i valori riportati in *Tabella 36*.

**Tabella 36:** Valori di copertura adottati.

Indicazione copertura	Valore adottato
> 2 m	3,5 m
Incerta > 2	2 m
Incerta < 2	2 m
< 2	1 m

Dopo aver stabilito le altezze di copertura da associare ciascuna zona dell'area in esame, dalla carta rappresentata in *Figura 133* sono stati estrapolati i confini delle aree associate a ciascuno spessore in formato dxf, questi ultimi sono stati successivamente importati in QGIS, assemblati e, dopo aver associato a ciascuna area il valore opportuno di copertura, il tutto è stato convertito in un unico file di tipo raster.

Come già anticipato, le ulteriori variabili topografiche, pendenza e immersione, sono state ottenute sfruttando le informazioni contenute nel DEM per l'area di Camasco e utilizzando le funzionalità di analisi raster già disponibili su QGIS.

Per esempio, uno strumento utile a ricavare informazioni aggiuntive dai modelli digitali di elevazione è il plugin di analisi geomorfologica attivabile da *Raster -> Analisi -> DEM (Terrain Model)*.

Il plugin Analisi geomorfologica (Raster Terrain Modelling), infatti, consente di calcolare pendenza, esposizione e altri parametri come l'indice di asperità e la curvatura totale, di non interesse in questo caso specifico, a partire da un DEM; i risultati ottenuti dall'analisi sono successivamente salvati in un nuovo file raster e un nuovo layer.

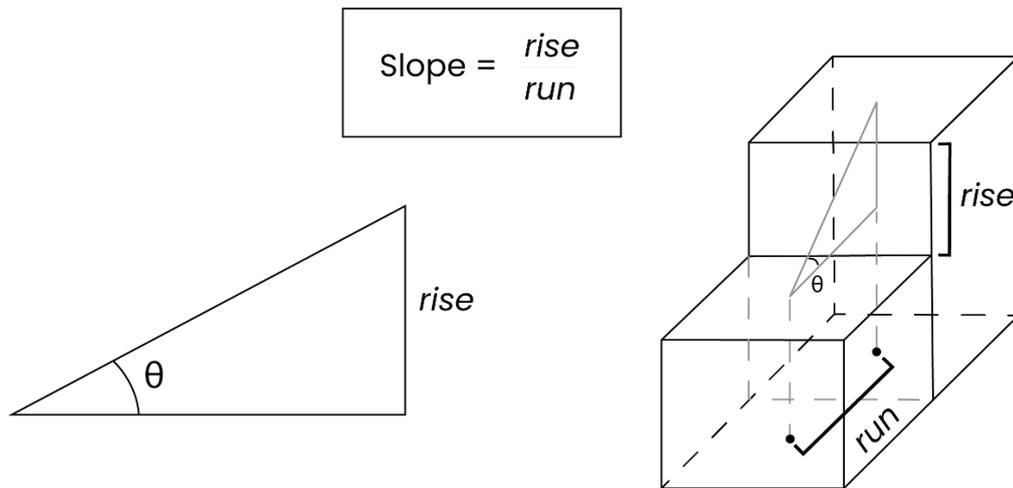
### 6.2.2.1 Calcolo di pendenze e immersione

La **pendenza** ricopre un ruolo fondamentale all'interno del modello adottato poiché, oltre a esserne uno dei principali parametri, rappresenta un elemento discriminante e distintivo per ogni cella nelle valutazioni di stabilità.

Nei file raster la superficie topografica è descritta numericamente dall'equazione  $z=f(x,y)$ : l'elevazione, quindi, è legata alla posizione sul piano di riferimento tramite una funzione al variare della coppia di coordinate  $x,y$ .

L'analisi delle variazioni locali di pendenza del terreno si basa sul calcolo delle **derivate prima** e **seconda** della superficie  $z = f(x,y)$  e ricopre un ruolo primario in termini di stabilità dei versanti poiché ad una variazione maggiore di pendenza è associata una maggiore instabilità dei terreni.

Nei software GIS il calcolo della pendenza di un terreno viene effettuata sulla base di dati raster le cui celle contengono l'informazione altimetrica (DEM); per ogni cella la pendenza viene calcolata come rapporto tra la differenza di quota (*rise*) tra la cella immediatamente vicina e quella corrente e la distanza (*run*) tra i centri delle due celle, così come schematizzato in *Figura 134*.



**Figura 134** : Schema di calcolo delle pendenze (<https://www.nicoladeinnoentis.it/>).

La pendenza rappresenta l'angolo della tangente rappresentata trigonometricamente dal rapporto:

$$\tan \vartheta = \frac{\text{rise}}{\text{run}}$$

e può essere espressa in gradi o in percentuale.

Dal punto di vista matematico la funzione  $z = f(x,y)$ , è una funzione delle due variabili  $x$  e  $y$ , le quali rappresentano anche le direzioni dei due assi coordinati del sistema di riferimento geografico o cartografico. Ciò comporta che la pendenza possa assumere valori diversi a seconda della direzione considerata.

Di conseguenza, per ogni cella il calcolo della pendenza viene effettuato valutando la variazione di quota tra una cella e le sue otto adiacenti tramite una finestra mobile 3×3. Dell'insieme di valori di pendenza così calcolati, alla cella viene assegnato un valore tra il massimo, la media o la mediana.

Un ulteriore parametro di interesse per l'approccio di calcolo adottato è l'immersione di ciascuna cella, anche detta esposizione.

L'esposizione di una superficie esprime il suo orientamento rispetto ai punti cardinali e può essere considerato come la proiezione sul piano orizzontale della direzione di massima pendenza, mentre non ha significato per le superfici orizzontali.

Viene misurata in gradi rispetto alla direzione del Nord geografico ( $0^\circ \div 360^\circ$ ) e il calcolo avviene nuovamente mediante una finestra mobile 3×3: tale finestra viene di volta in volta centrata in ogni cella del raster di input, a cui viene infine applicato un algoritmo di derivazione basato sui valori delle 8 celle adiacenti.

L'angolo così ottenuto, per poter essere utilizzato all'interno del modello, deve infine essere riportato al primo ottante della circonferenza goniometrica.

### 6.2.3 Parametri idrologici

Trattandosi di un approccio accoppiato che unisce un modello di stabilità a uno idrologico, è necessario scegliere un modello di infiltrazione e definire alcuni parametri idrologici fondamentali: l'area contribuyente  $a$ , ovvero la superficie drenata a monte di ogni cella e la larghezza della sezione di deflusso  $b$ .

#### **a) Calcolo dell'area contribuyente - a**

L'area contribuyente,  $a$ , definita come l'area a monte di ogni cella che contribuisce al drenaggio dell'acqua netta infiltrata, è stata calcolata tramite il metodo delle *Infinite Directions* (Dinf) ideato da Tarboton (1997) ed implementato per l'ambiente GIS nel *tool TauDEM* (Tarboton, 2002).

TauDEM (Terrain Analysis Using Digital Elevation Models) è un insieme di strumenti per l'estrazione e l'analisi di informazioni idrologiche dalla topografia rappresentata da un DEM; si tratta di un software sviluppato dalla Utah State University (USU) per l'analisi idrologica dei modelli digitali di elevazione e la delimitazione dei bacini idrografici.

In particolare, lo strumento utilizzato è stato il plugin denominato *D-Infinity Contributing Area*.

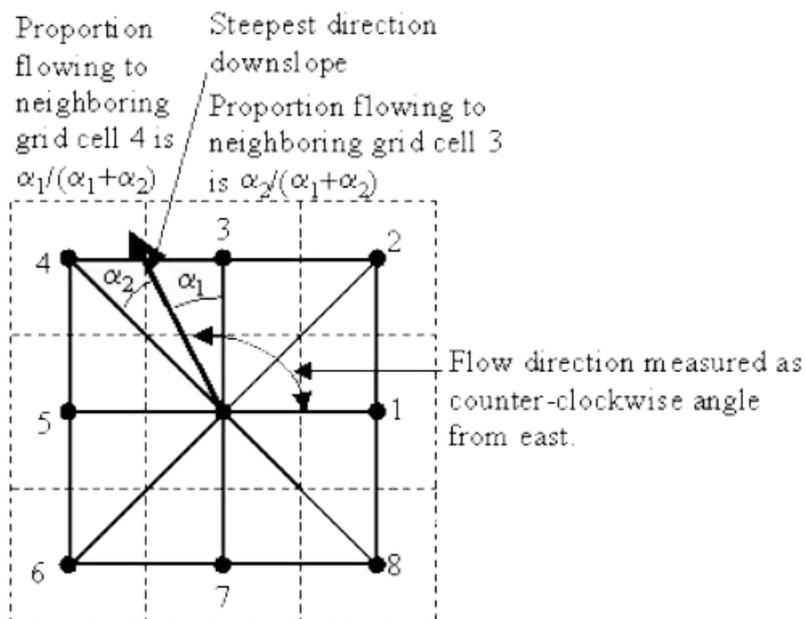
Per essere impiegato in modo efficace questo strumento richiede alcuni passaggi preliminari:

- *Eliminazione di anomalie nel DEM*: questo passaggio è necessario a identificare ed eliminare i cosiddetti "pits", ovvero celle con sbalzi negativi di quota presenti nei modelli digitali di elevazione (DEM) completamente circondate da zone più elevate. In genere sono considerati manufatti che interferiscono con il flusso e vengono pertanto rimossi innalzando la loro elevazione fino al punto inferiore delle celle sovrastanti, cioè fino al confine dello "spartiacque" che drena verso la cella.

Non è necessario svolgere questo tipo di analisi nel caso in cui le fosse nel DEM siano reali; qualora alcune di esse esistessero realmente, e quindi non dovessero essere rimosse, mentre altre fossero ritenute artefatti che devono essere rimossi, bisognerebbe assegnare a queste ultime, valori di elevazione NODATA nel loro punto più basso. I valori NODATA servono a definire i bordi del dominio e le elevazioni vengono aumentate solo nel punto in cui il flusso si allontana da un bordo, quindi, un valore NODATA interno impedirà la rimozione di una buca, se necessario.

L'operazione è stata eseguita da un plugin denominato "Pit remove", che riceve come input il DEM e restituisce un raster "pit-filled" corretto;

- *Calcolo delle direzioni di deflusso*: le direzioni di deflusso sono state definite grazie al plugin "D-Infinity flow directions" il quale assegna una direzione di flusso in base alla pendenza più elevata calcolata sulle faccette (facets) triangolari (Tarboton, 1997) di un blocco quadrato costruito unendo i centri delle celle contigue alla cella analizzata e contenute in una finestra 3x3.



**Figura 135**: Schema per l'identificazione della direzione di deflusso (<https://docs.qgis.org/>).

La direzione del flusso è identificata come un angolo in radianti in senso antiorario rispetto a est compreso tra 0 e  $2\pi$ . Il flusso risultante in una griglia viene solitamente ripartito in modo proporzionale tra le due celle vicine che definiscono la sfaccettatura triangolare con la pendenza più ripida in funzione dell'angolo formato  $\alpha_1$  o  $\alpha_2$ , come mostrato in *Figura 135*.

In questo caso il plugin riceve in ingresso il raster *pit filled* ottenuto in precedenza o, qualora non fosse stato corretto, direttamente il dem e fornisce in uscita un ulteriore raster contenente le direzioni di deflusso.

- *Calcolo dell'area contribuyente,  $\alpha$* : si passa infine al calcolo dell'area contribuyente mediante il plugin "D-Infinity Contributing Area" il quale calcola una griglia di bacini idrografici specifici, utilizzando l'approccio D-Infinity a direzione di flusso multipla.

L'area contribuyente di ciascuna cella della griglia è considerata come il proprio contributo più il contributo dei vicini a monte che hanno una frazione che drena verso di essa.

Il flusso di ogni cella drena tutto verso una vicina se l'angolo cade lungo una direzione cardinale ( $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ ) o intermedia ( $\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4$ ); negli altri casi viene ripartito tra la due celle adiacenti come già visto precedentemente.

È importante osservare che, per impostazione predefinita, lo strumento controlla la contaminazione dei bordi, definita come la possibilità che il valore dell'area contribuente sia sottostimato a causa del mancato conteggio delle celle della griglia al di fuori del dominio.

Ciò si verifica quando il drenaggio avviene dall'esterno verso l'interno dei confini considerati o in aree con valore "no data" per l'elevazione; in tal caso l'algoritmo riconosce automaticamente le possibili criticità o sottostime e riporta il valore "no data" di area contribuente per le celle interessate.

Non è infatti raro osservare intere zone con valore "no data" estendersi verso l'interno lungo i percorsi di flusso che entrano nel dominio da un confine; ciò indica che l'area contribuente per queste celle della griglia è sconosciuta perché dipende dal terreno al di fuori del dominio dei dati disponibili.

Tuttavia, come effettuato nella presente analisi, il controllo della contaminazione dei bordi può essere disattivato una volta accertato che non rappresenti un problema o lo si possa ignorare, ad esempio se il DEM è stato ritagliato lungo il contorno di uno spartiacque.

## **b) Calcolo della larghezza della sezione di deflusso b e scelta del modello di infiltrazione**

Anche la cosiddetta larghezza della sezione di deflusso,  $b$ , è un parametro che viene calcolato a partire dalle informazioni altimetriche contenute nel DEM; essa è infatti definita come segue:

$$b = \frac{l}{\cos \beta}$$

dove:

- $l$  = lato della cella, nel caso in esame 5m costante;
- $\beta$  = angolo di immersione della cella riportato al primo e ottavo ottante della circonferenza goniometrica.

Avendo già ricavato e opportunamente convertito il valore di immersione, come descritto nei paragrafi precedenti, ci si è avvalsi del calcolatore raster per il calcolo di  $b$ .

Infine, volendo correlare i valori di pioggia critica o i valori di pioggia netta infiltrata con le intensità di precipitazione totale associate ai relativi tempi di ritorno, si è reso necessario adottare un opportuno modello di infiltrazione.

In questo caso si è scelto di utilizzare un metodo percentuale, basato sull'ipotesi che l'assorbimento da parte del suolo di una quota parte di precipitazione avviene in maniera proporzionale.

In tal modo è possibile valutare l'intensità di pioggia netta come una percentuale dell'intensità totale di precipitazione tramite un coefficiente di afflusso  $\psi$  assunto tipicamente costante e pari ad un opportuno valore per tutta la durata della precipitazione:

$$i_n = \psi \cdot i_{tot}$$

Il coefficiente di afflusso può essere visto come il complementare a 1 del coefficiente di deflusso del bacino, ovvero il rapporto tra il volume d'acqua defluito alla sezione di chiusura di un bacino e gli afflussi per precipitazione.

Com'è noto, infatti, le acque meteoriche non raggiungono interamente la sezione di chiusura poiché in parte disperse per evapotraspirazione, ristagni, adsorbimento da parte di superfici porose ma, soprattutto, per infiltrazione nel terreno.

L'infiltrazione nel terreno dipende fortemente da numerosi fattori quali, ad esempio, la natura e il livello di permeabilità delle superfici o la presenza e il tipo di vegetazione; ogni superficie, pertanto, è caratterizzata da uno specifico coefficiente di deflusso (o afflusso) che ne caratterizza il contributo in termini di portata di piena, o in questo caso, la capacità di assorbimento.

Estendendo il ragionamento all'intero bacino e considerando la varietà di superfici e coperture che lo costituiscono, è facile intuire come questo sia caratterizzato da diversi coefficienti di deflusso; in tal caso viene attribuito all'intero bacino un unico coefficiente di deflusso dato dalla media pesata dei coefficienti delle singole aree coinvolte, la cui formula può essere espressa come segue:

$$\varphi_{med} = \sum \frac{S_i \cdot \varphi_i}{S_{tot}}$$

dove:

- $S_i$  è l'*i*-esima porzione di superficie;
- $\varphi_i$  è il coefficiente di deflusso dell'*i*-esima porzione di superficie;
- $S_{tot}$  è la superficie totale.

Tale valore può variare teoricamente da 0 (in condizione di completo deflusso) a 1 (in condizioni di totale infiltrazione), valori tipici per diverse tipologie di copertura sono riportati in *Figura 136* (Montin, 2012).

Tipologia superficie	$\varphi$
Verde su suolo profondo, prati, orti, superfici agricole	0.10-0.15
Terreno incolto, sterrato non compattato	0.20-0.30
Superfici in ghiaia sciolta – parcheggi drenanti	0.30-0.50
Pavimentazioni in macadam	0.35-0.50
Superfici sterrate compatte	0.50-0.60
Coperture tetti	0.85-1.00
Pavimentazioni in asfalto o cls	0.85-1.00

**Figura 136** : Valori tipici del coefficiente di deflusso per diverse tipologie di superficie (Montin, 2012).

Nello specifico caso di interesse, vista l'omogeneità della tipologia di copertura, in prevalenza costituita da terreni boschivi a fronte di piccole aree urbane o pascoli (che tuttavia influirebbero in modo limitato nel calcolo di un valore medio) non disponendo inoltre di dati certi, si è deciso di adottare un valore uniforme per l'intera superficie e di considerare, così, un coefficiente di afflusso pari a 0,8. Questo, tradotto in termini percentuali, comporta un'infiltrazione pari all'80% della precipitazione totale.

Tale valore risulta essere in accordo, se confrontato con quanto riportato nell'immagine precedente (*Figura 136*) e con altri valori generici ritrovati in letteratura. L'ipotesi di completa infiltrazione, inoltre, seppur decisamente più cautelativa, non sembra essere adeguata a casi come quello oggetto del presente studio in quanto, per eventi piovosi di carattere alluvionale con livelli record di precipitazione concentrati in lassi di tempo piuttosto brevi, così come richiesto per l'innescò di colate detritiche o scivolamenti superficiali, non risulta realistico che un tale apporto idrico in tempi così ristretti venga completamente assorbito dal terreno.

### 6.3 Risultati dell'analisi

Una volta determinati i parametri necessari all'applicazione del modello di *Montgomery & Dietrich (1994)*, si è potuto procedere con il calcolo dei risultati finali; questo è stato possibile grazie al *calcolatore raster*, strumento che consente di effettuare operazioni algebriche tra raster o applicarvi funzioni trigonometriche e disponibile sul software QGIS.

Per quanto riguarda le caratteristiche del materiale, sono stati considerati due scenari distinti, uno considerando un valore di coesione  $c'$  pari a quello ottenuto dalla prova di laboratorio e, più cautelativamente, uno scenario privo di coesione.

Tale scelta è legata all'incertezza associata al valore di  $c'$  che, essendo frutto di prove di laboratorio su campione disturbato e frutto di interpolazione dei risultati ottenuti da un numero limitato di provini, potrebbe sovrastimato ed eccessivamente a favore di sicurezza.

### 6.3.1 Verifica delle condizioni di assoluta stabilità e instabilità

Il primo passo nello svolgimento delle analisi ha riguardato la verifica delle condizioni di assoluta stabilità, necessaria in quanto, oltre a essere utile all'individuazione di aree particolarmente critiche, ne consente la rimozione dalle analisi successive che, invece, sono incentrate sulle aree soggette ad una progressiva instabilizzazione in funzione di valori crescenti di precipitazione.

Riprendendo le formulazioni sopra riportate, le verifiche di assoluta stabilità e instabilità vengono espresse come segue:

- *Assoluta stabilità:*  $\tan \theta \leq \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma}\right) \cdot \tan \varphi'$
- *Assoluta instabilità:*  $\tan \theta \geq \frac{c'}{\gamma \cdot z \cdot \theta} + \tan \varphi'$

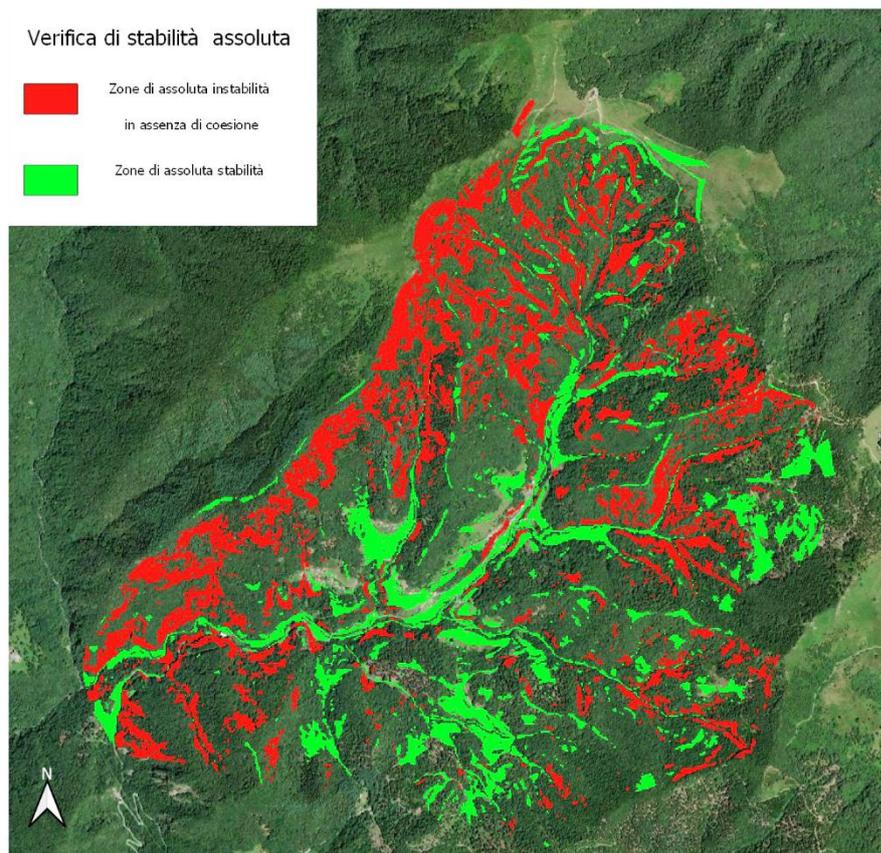
La verifica di assoluta stabilità è totalmente indipendente dalla coesione  $c'$  e strettamente legata alle condizioni di pendenza della cella e all'angolo di attrito; definiti i valori di massa volumica del terreno e dell'acqua, inoltre, si può facilmente dedurre come, affinché una determinata cella sia un condizione di assoluta stabilità, la tangente dell'angolo di inclinazione debba essere minore o uguale alla metà della tangente dell'angolo di attrito, e cioè per angoli di pendenza inferiori approssimativamente ai 19°, assumendo  $\varphi'=38^\circ$  e  $\gamma=17,83 \text{ kN/m}^3$ .

Al contrario, per ciò che riguarda l'instabilità, è necessario distinguere i due scenari di coesione  $c'$ .

In particolare, si osserva che in caso si abbia  $c'=0$ , la verifica è nuovamente ricondotta a una disequazione tra angoli e l'esito è positivo qualora l'angolo di inclinazione del versante sia maggiore dell'angolo di attrito.

I risultati ottenuti sono rappresentati in forma grafica nell'immagine di *Figura 137*; è importante notare, inoltre, che dal calcolo non emergono zone assolutamente instabili in presenza di coesione.

Le zone così ottenute, di conseguenza, essendo la loro condizione indipendente dalla pioggia infiltrata, sono state escluse dalle analisi presentate di seguito.



**Figura 137:** Zone di assoluta stabilità e instabilità per il bacino di Camasco.

### 6.3.2 Calcolo della pioggia critica $q_{cr}$

Viene definita pioggia critica quel valore di precipitazione netta infiltrata che porta a condizione di equilibrio limite il pendio  $\alpha$ , in questo caso, la cella considerata; tale condizione corrisponde al raggiungimento di un valore unitario del fattore di sicurezza.

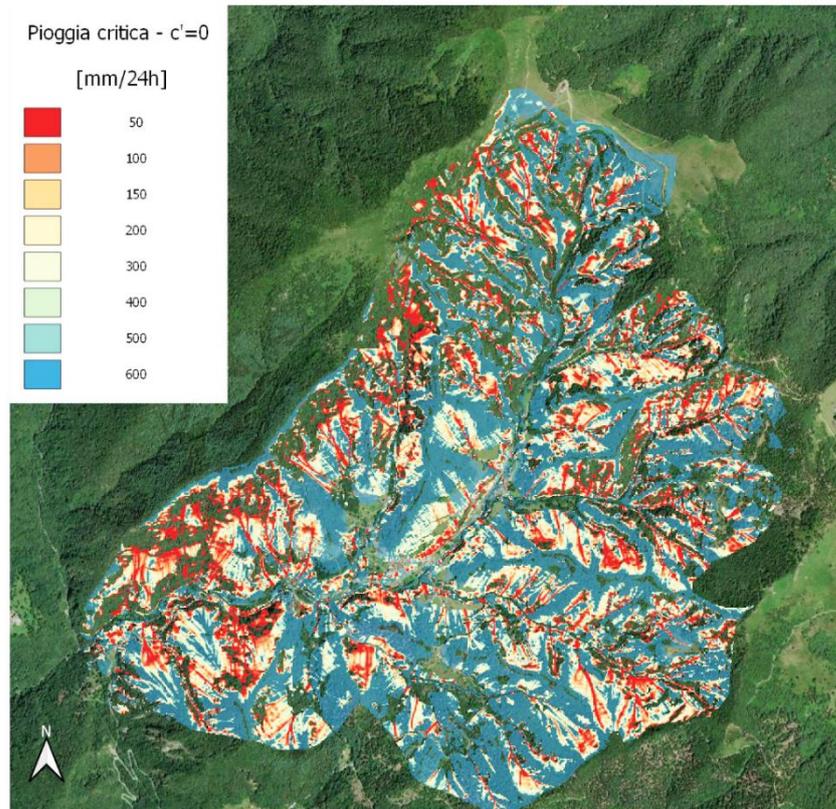
La pioggia critica  $q_r$ , pertanto, si ottiene dall'approccio adottato ricercando i valori di pioggia infiltrata  $q$  per cui si ha un fattore di sicurezza pari a 1, il che, riprendendo quanto visto in precedenza, si traduce nel calcolo della seguente espressione:

$$q_{cr} = \left[ \frac{c'}{\gamma_w \cdot z \cdot \theta \cdot \tan \varphi'} + \frac{\gamma}{\gamma_w} \cdot \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \varphi'} \right) \right] \cdot \frac{T \cdot b}{a}$$

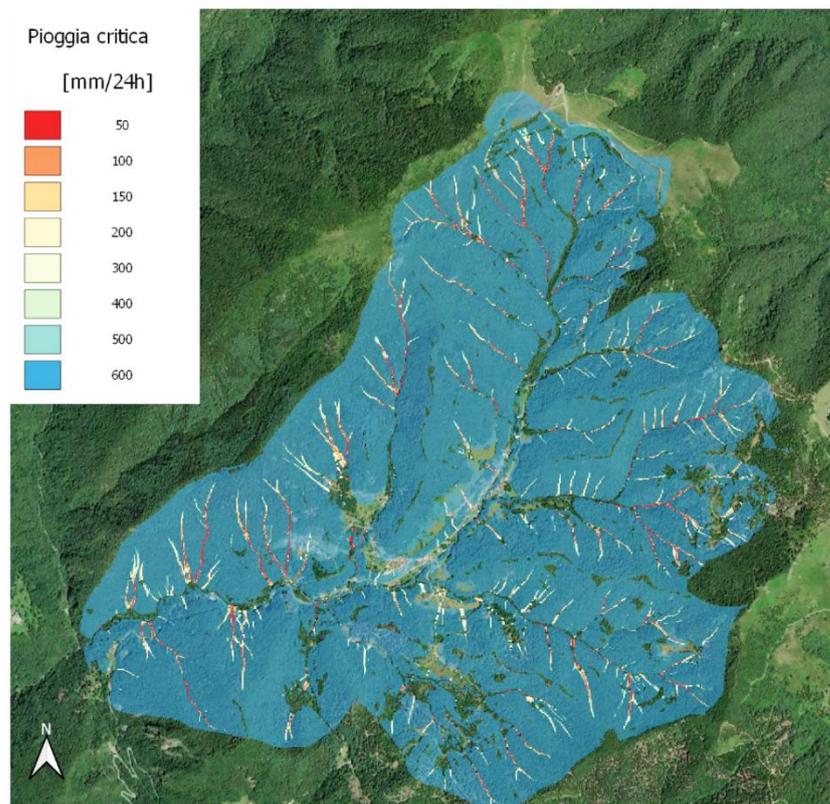
Anche in questo caso sono stati considerati i due scenari in assenza di coesione e con  $c'=29$  kPa in tutto il dominio.

I risultati ottenuti sono rappresentati in *Figura 138* e *Figura 139*, dove si riportano i valori di precipitazione netta infiltrata ordinati dai più critici (rosso) ai valori più alti (azzurro), associati alle aree più stabili.

Come si può facilmente notare, l'influenza del termine coesivo nei confronti della stabilità è evidente e il valore assunto risulta coerente con quanto osservabile in situ.



**Figura 138** : Pioggia critica in assenza di coesione.



**Figura 139** : Pioggia critica in presenza di coesione.

### 6.3.3 Calcolo del fattore di sicurezza

Per la realizzazione di una mappa di pericolosità per l'innescò di frane superficiali nel bacino del torrente Nono, il primo passo riguarda il calcolo del fattore di sicurezza, effettuato con la seguente espressione:

$$F = \frac{c' + (\gamma - W \cdot \gamma_w) \cdot z \cdot \theta \cdot \tan \varphi'}{\gamma \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}$$

In cui, come già visto, compare il termine  $W$ , ricavabile dal modello di *Montgomery & Dietrich (1994)* come:

$$W = \frac{q}{T} \cdot \frac{a}{b \cdot \sin \theta}$$

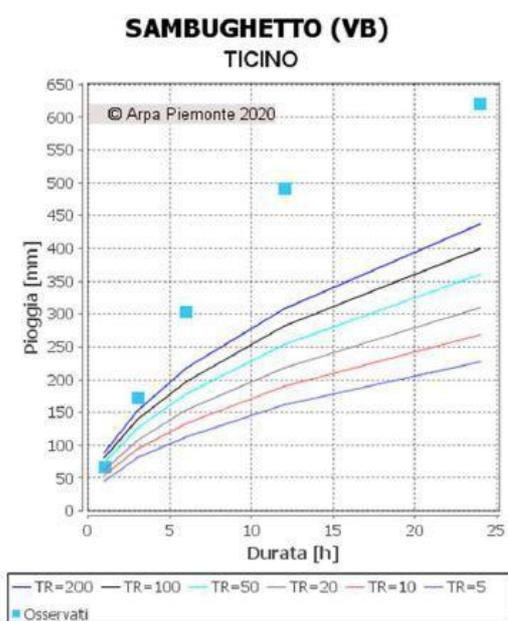
con  $q$  valore di infiltrazione netta.

Ciascun fattore di sicurezza così calcolato, infatti, è associato ad una intensità di precipitazione relativa ad un evento con un determinato tempo di ritorno.

A tal fine, è necessario definire i valori di precipitazione da considerare in funzione dei tempi di ritorno interessati e, successivamente, trasformarli in pioggia infiltrata come descritto nel *paragrafo 6.2.3*.

Una volta definiti i valori di  $q$ , quindi, è possibile ricavare i fattori di sicurezza per ciascuna soglia di precipitazione per poi elaborare la carta di pericolosità.

Per la determinazione delle altezze di pioggia è possibile ricorrere, se disponibili, alle cosiddette *curve di possibilità pluviometrica*, definite come particolari tipi di curve che esprimono la relazione tra le altezze massime e le durate di pioggia che si possono verificare in una determinata zona, per un assegnato valore del periodo di ritorno.



**Figura 140:** Curve di possibilità pluviometrica per la stazione di Sambughetto (VB) con valori relativi all'evento del 2/3 Ottobre 2020, (Rapporto Arpa Piemonte evento del 2/3 Ottobre 2020).

Ricorrendo nuovamente al rapporto redatto da Arpa Piemonte per l'evento del 2/3 Ottobre 2020, è stato possibile rinvenire tali curve, riportate in *Figura 140*, per la stazione di Sambughetto, già assunta come riferimento nelle precedenti analisi.

Si è a questo punto deciso di svolgere il calcolo del fattore di sicurezza per i tempi di ritorno di 5, 20, 100 e 200 anni, estraendo così dalle curve il relativo valore di precipitazione totale corrispondente a una durata di 24h, da cui ricavare infine la pioggia netta infiltrata utile per il calcolo.

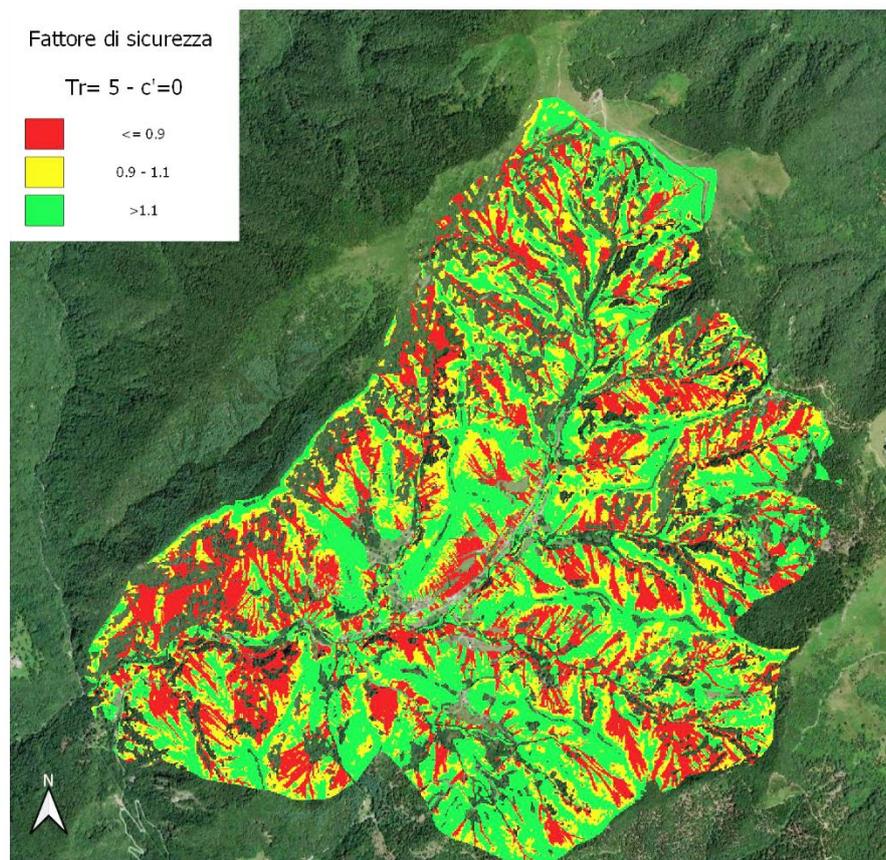
I dati estrapolati e i dati di input considerati sono riassunti nella *Tabella 37* seguente:

**Tabella 37:** Valori di precipitazione totale ( $i_{tot}$ ) e pioggia netta ( $i_n$ ) associati ai tempi di ritorno considerati.

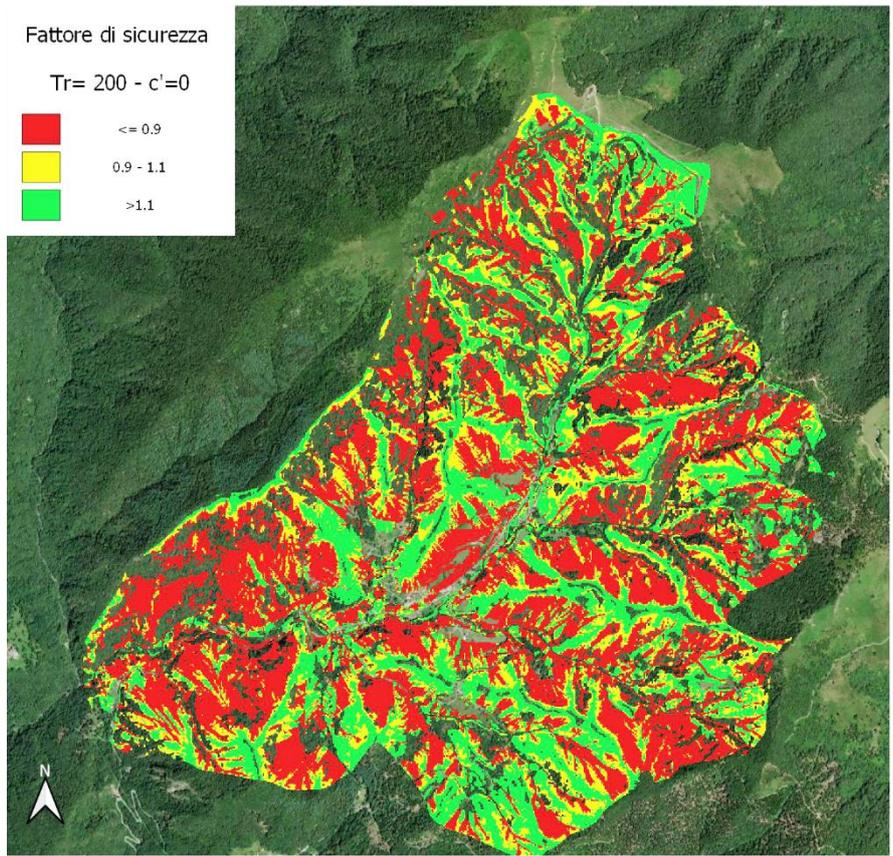
$T_r$ [anni]	$i_{tot}$ [mm/24h]	$i_n$ [mm/24h]
<b>5</b>	225	<b>180</b>
<b>20</b>	315	<b>250</b>
<b>100</b>	400	<b>320</b>
<b>200</b>	440	<b>350</b>

Definiti i valori di precipitazione infiltrata per i diversi scenari di tempi di ritorno, sono stati calcolati i fattori di sicurezza ad essi associati, escludendo dall'analisi le zone di assoluta stabilità e instabilità e distinguendo nuovamente i due scenari di coesione ( $c'=0$  e  $c'=29$  kPa).

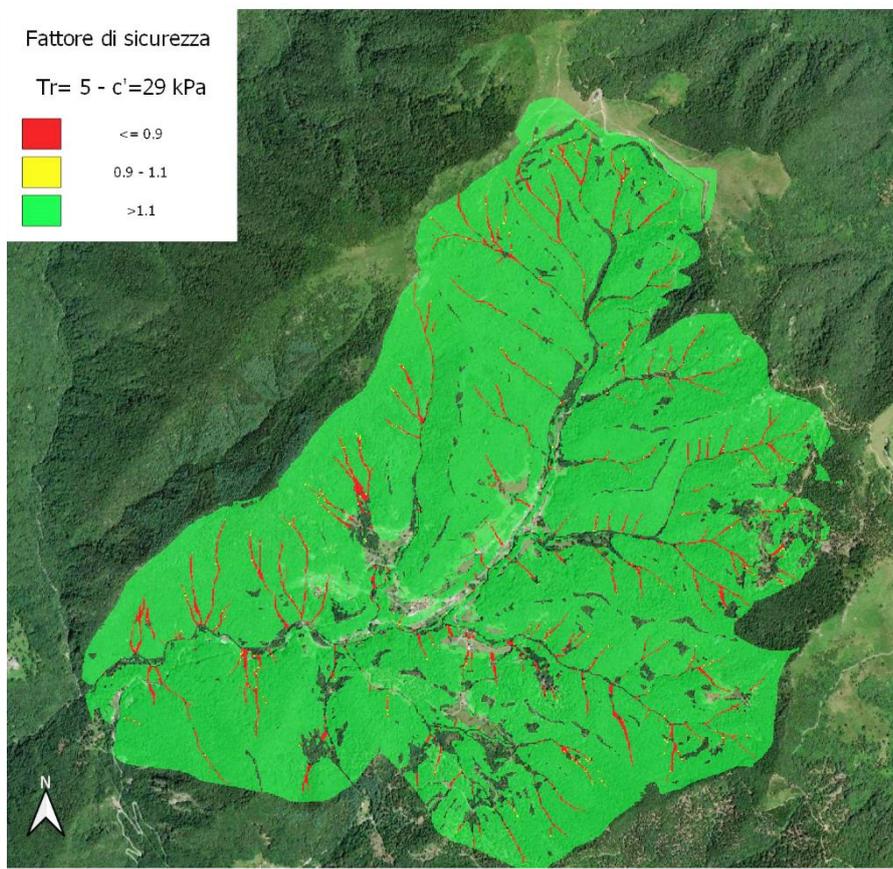
Di seguito si riportano a titolo esemplificativo i valori estremi per gli scenari con i tempi di ritorno di 5 e 200 anni per i valori di coesione adottati:



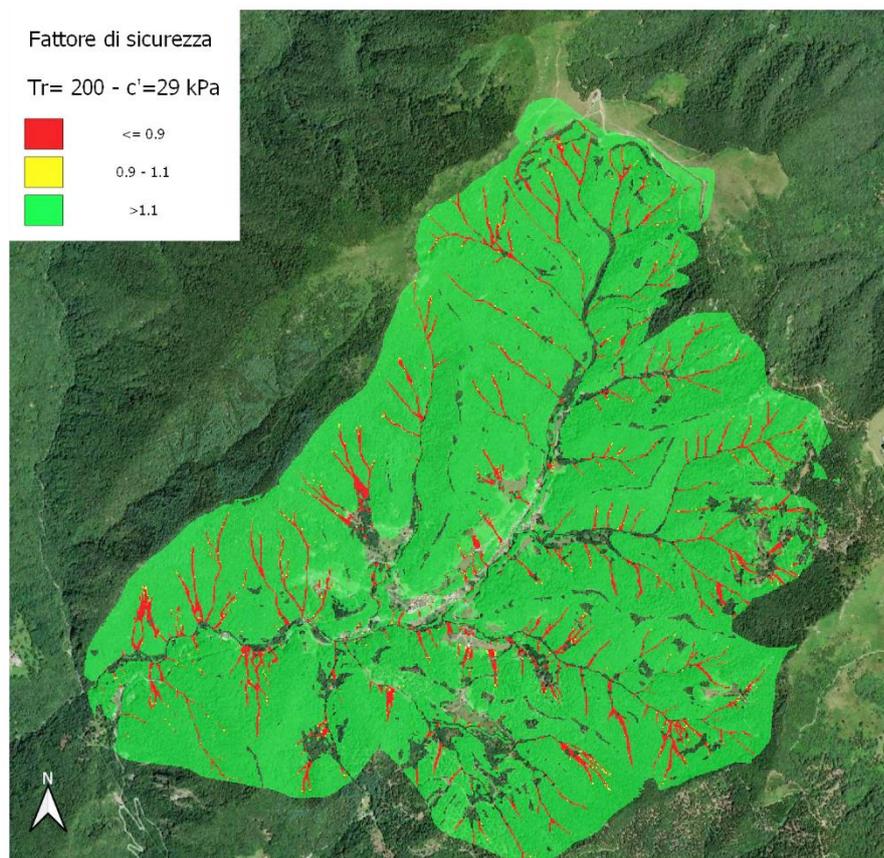
**Figura 141:** Fattore di sicurezza per  $T_r=5$  anni e  $c'=0$ .



**Figura 142:** Fattore di sicurezza per  $Tr=200$  anni e  $c'=0$ .



**Figura 143:** Fattore di sicurezza per  $Tr=5$  anni e  $c'=29 \text{ kPa}$ .



**Figura 144** : Fattore di sicurezza per  $Tr=200$  anni e  $c'=29$ .

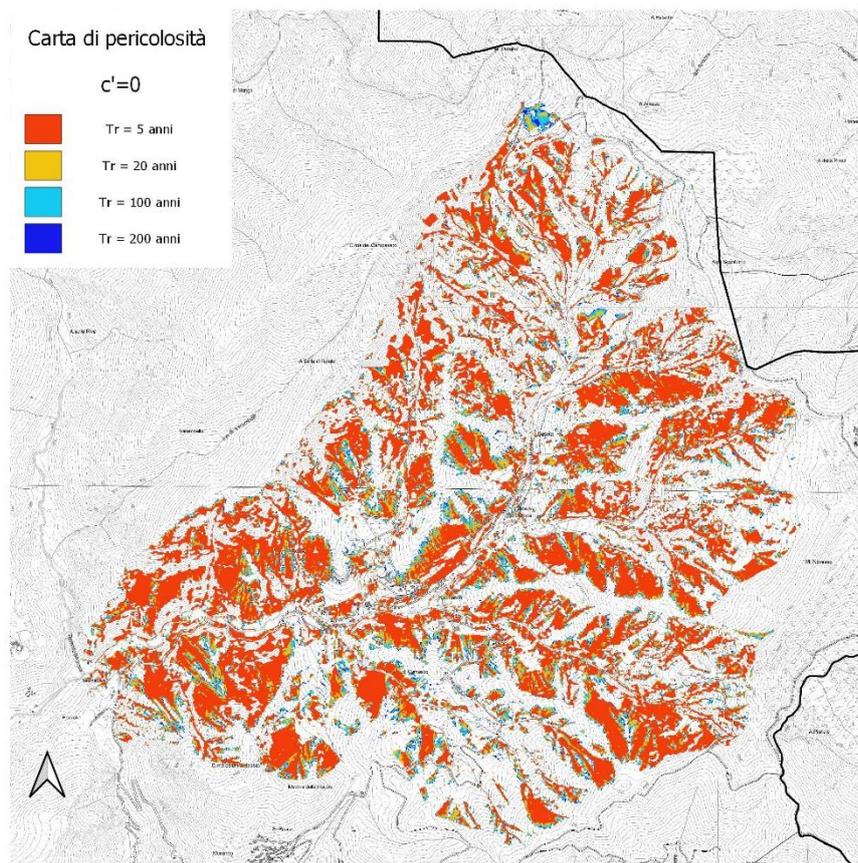
In *Figura 141* e *Figura 142* sono rappresentati gli output del software QGIS per quanto riguarda gli eventi con tempo di ritorno pari a 5 e 200 anni in assenza di coesione, ed in *Figura 143* e *Figura 144* con valore di  $c'$  uguale a 29 kPa; come si può facilmente osservare i risultati mostrano grandi differenze.

In particolare, è evidente come le aree critiche, rappresentate con colore rosso, aumentino all'aumentare del tempo di ritorno mentre, come atteso, si ha una drastica diminuzione delle stesse all'aumentare del valore di coesione.

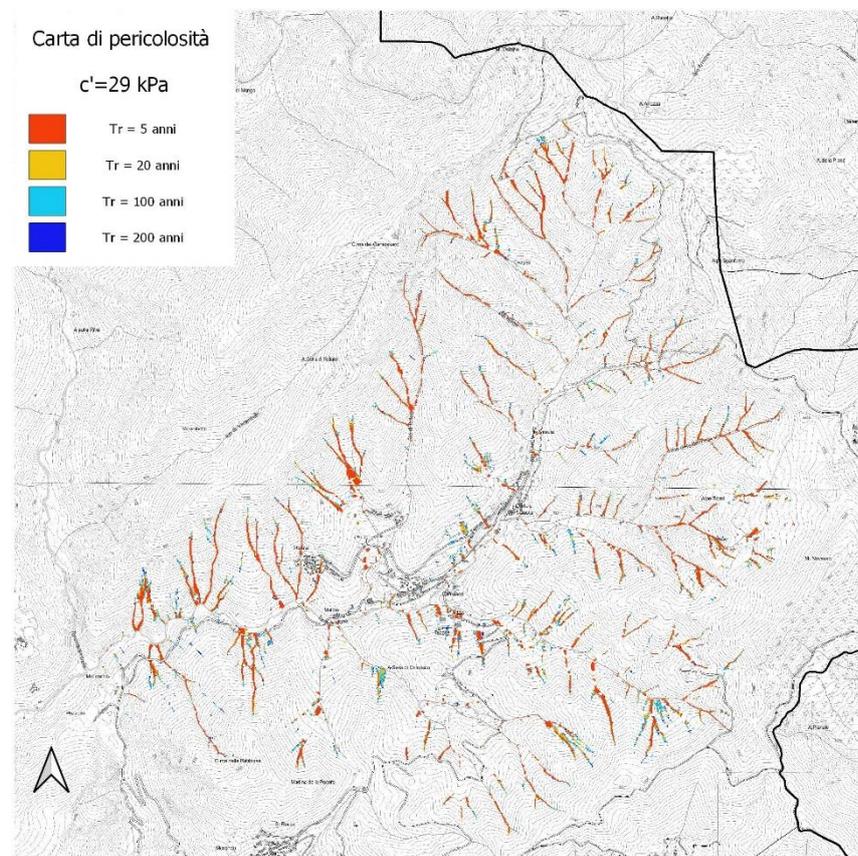
#### 6.3.4 Carta della pericolosità per instabilità dei versanti

A partire dai coefficienti di sicurezza calcolati, infine, è stata costruita la carta di pericolosità per instabilità dei versanti per il bacino di Camasco.

In particolare, su questa mappa, vengono riportate le zone critiche che potenzialmente potrebbero raggiungere la condizione di instabilità per i vari valori di precipitazione considerati e, di conseguenza, per i corrispondenti tempi di ritorno. Coerentemente con quanto svolto finora, anche in questo caso sono stati distinti i due scenari, uno in assenza di coesione, l'altro con coesione  $c'$  pari a 29 kPa, i cui risultati sono raffigurati nelle immagini seguenti.



**Figura 145:** Carta di pericolosità in assenza di coesione.



**Figura 146:** Carta di pericolosità in presenza di coesione.

In *Figura 145* e *Figura 146* sono rappresentate le aree potenzialmente instabili, che presentano valori del fattore di sicurezza inferiori a quello unitario per le precipitazioni associate ai tempi di ritorno di 5, 20, 100 e 200 anni, avendo pertanto escluso le aree assolutamente stabili e assolutamente instabili dalla rappresentazione.

Dalle carte così ottenute è ben evidente l'effetto della coesione nei confronti della stabilità che, come atteso, si traduce in aree instabili più estese per valori di  $c'$  pari a 0; tuttavia, tale scenario appare piuttosto irrealistico e catastrofico, motivo per cui, considerando anche il parere degli esperti della zona, si ritiene che il caso a cui fare riferimento sia lo scenario in presenza di coesione.

A conclusione del lavoro svolto, infine, è bene specificare ancora una volta come i risultati ottenuti siano in generale cautelativi e appaiano, seppur derivati grazie a semplificazioni necessarie all'applicazione del modello, coerenti e veritieri se confrontati tra loro, con la topografia e gli eventi verificatisi in passato.

Le simulazioni svolte e le carte di pericolosità segnalano come eventi simili a quello avvenuto nell'Ottobre del 2020 siano tutt'altro che improbabili e, anzi, potrebbero ripetersi con scale e dimensioni ancor più catastrofiche.

I valori di pioggia critica, inoltre, rappresentano un valido strumento da tenere in considerazione nel progetto di un eventuale piano di protezione civile, in particolare come termine di confronto nella definizione di soglie di allarme o di evacuazione delle frazioni potenzialmente interessate di Corte e Camasco.



---

## CONCLUSIONI

---

La tesi, dedicata al fenomeno delle colate detritiche (*debris flow*), è incentrata principalmente sul bacino del torrente Nono, situato nel Comune di Varallo (VC).

Durante l'evento piovoso del 2/3 Ottobre 2020, infatti, per via dell'apporto idrico eccezionale, il distacco di una massa detritica in zona Alpe Ranghetto ed il successivo catastrofico *debris flow*, hanno provocato la distruzione di tre ponti siti nelle frazioni di Corte e Camasco e dando vita ad un'intensa attività erosiva, che ha interessato le sponde del torrente, creando notevoli problemi in termini di viabilità e servizi.

Fatta una prima classificazione dei principali eventi franosi, pertanto, la prima parte del lavoro è stata incentrata sulla *back analysis* dell'evento di Ottobre 2020, ovvero un'analisi a ritroso volta a determinare i parametri geometrici e reologici che ne descrivono il comportamento e ne consentono una ricostruzione il più fedele e accurata possibile.

Ciò è stato fatto mediante il software RAMMS (Rapid Mass Movements Simulation) e, in particolare, del modulo RAMMS::DEBRISFLOW, sviluppato presso il WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF per lo svolgimento di previsioni accurate nello spazio tridimensionale di velocità, altezze del fluido, pressioni e distanza di propagazione di masse instabilizzate, utili per la realizzazione di mappe di rischio o il progetto di interventi di protezione e mitigazione.

Terminata la *back analysis*, utilizzando i risultati ottenuti tramite la calibrazione dei parametri, ci si è dedicati alla simulazione di possibili scenari futuri di innesco, a partire da potenziali zone sorgente segnalate da professionisti esperti della zona.

Le simulazioni così effettuate mostrano chiaramente il forte impatto che tali eventi potrebbero avere sugli abitati a valle delle eventuali zone di distacco, sia in termini di danni materiali a infrastrutture e abitazioni, sia in termini di vite umane, rendendo pertanto necessari interventi di mitigazione del rischio.

Al fine di completare lo studio dell'area in esame, si è cercato infine di fornire delle indicazioni sulla probabilità di innesco delle frane superficiali su scala medio/grande tramite il modello di Montgomery & Dietrich (1994), approccio che accoppia un modello di stabilità all'equilibrio limite del pendio ad un modello idrologico stazionario e rappresenta una metodologia di valutazione della pericolosità applicabile su larga scala, implementato in ambiente Open GIS (QGIS).

Tale analisi è stata estesa al bacino del torrente Nono, così da poter meglio identificare eventuali zone critiche per scopi di pianificazione territoriale, piani di protezione civile, analisi di pericolosità preliminari del fenomeno.

Una volta caratterizzati i parametri topografici, geotecnici e idrologici dell'area di interesse, grazie a tale modello è stato possibile calcolare la pioggia critica, ovvero la pioggia netta infiltrata in grado di portare in condizioni di incipiente collasso la porzione di versante analizzata.

Sono stati considerati a questo proposito quattro diversi scenari di pioggia, ciascuno associato ad un preciso tempo di ritorno, definito a partire dalle curve di possibilità pluviometriche riferite alla stazione di Sambughetto (VB) e contenute nel rapporto del 2/3 Ottobre 2020 realizzato da Arpa Piemonte.

L'ultimo risultato del metodo consiste nella carta di pericolosità per instabilità dei versanti per il bacino in esame, che riunisce le aree instabili ottenute dal calcolo dei fattori di sicurezza, calcolati per ciascuno scenario di pioggia considerato.

Il risultato ottenuto, pertanto, costituisce una mappatura delle possibili aree di innesco che potrebbero essere movimentate per valori di precipitazione minori o uguali rispetto a quello associato al tempo di ritorno indicato.

Per ognuna della analisi effettuate (pioggia critica, fattori di sicurezza e carta di pericolosità), sono stati considerati due diversi scenari per quanto riguarda il valore di coesione  $c'$  offerto dal terreno, che rappresentano casi limite (inferiore e superiore) per la zona in esame: è stato infatti ipotizzato un primo scenario di totale assenza di coesione (limite inferiore) che, tuttavia, ha mostrato risultati catastrofici e poco realistici, al contrario di quanto ottenuto con il valore di coesione, definito dai risultati di una prova di taglio diretto su campione prelevato in prossimità della zona di distacco della colata detritica, e pari a  $c'=29$  kPa (considerato come limite superiore).

Si ritiene, quindi, che i risultati ottenuti dal secondo scenario siano più attendibili e che lo scenario più realistico possa essere compreso tra i due limiti considerati.

È inoltre necessario evidenziare che le incertezze legate a tali assunzioni sono molto elevate, anche considerando che, come per molte altre variabili coinvolte nel modello, è stata fatta l'ipotesi di valori omogenei sull'intera area del bacino.

La precisione dei risultati è direttamente correlata alle semplificazioni del modello ma, soprattutto, all'accuratezza e quantità di dati disponibili per quanto riguarda la caratterizzazione della geometria, dei materiali, delle condizioni al contorno del problema.

In questo senso, perciò, il primo affinamento del lavoro svolto dovrebbe essere relativo alla raccolta di nuovi dati, per una migliore caratterizzazione dei parametri geotecnici e idrologici del terreno, ed una più precisa definizione delle potenze delle coperture.

Un ulteriore miglioramento dei risultati, inoltre, potrebbe essere ottenuto considerando una porzione di territorio più ampia per le analisi idrologiche, ovvero per

una miglior valutazione dell'area contribuente che non risenta di "effetti di bordo" legati ai confini con il dominio esterno.

I risultati ottenuti, comunque, mostrano come eventi simili a quello verificato siano tutt'altro che da escludere e, anzi, possano avere tempi di ritorno piuttosto ridotti, vista anche la piovosità della zona, dimostrando ancora una volta quanto siano consigliabili interventi di protezione o di mitigazione del rischio.

In conclusione, alla luce dei risultati ottenuti, è possibile osservare come il lavoro svolto e i suoi sviluppi futuri possano fornire un importante contributo alla gestione, protezione e valorizzazione del territorio, con particolare riferimento a:

- realizzazione di piani di protezione civile a scala medio/grande (per esempio a scala comunale o di gruppi di comuni);
- definizione delle soglie di attenzione o allertamento, se integrati con sistemi di monitoraggio dell'area interessata, dati storici e simulazioni numeriche di dettaglio;
- realizzazione di analisi di pericolosità e rischio a scala medio/grande per scopi di pianificazione territoriale.



## Bibliografia

- Arpa Piemonte, D. R. (14/10/2020). *Evento del 2-3 Ottobre 2020*. Torino: Arpa Piemonte.
- Campus, S., Forlati, F., & Nicolò, G. (2005). *Note illustrative della Carta della Pericolosità dei versanti alla scala 1:50.000, foglio 211 Dego*. Arpa Piemonte.
- Charbeneau, R. &. (2001). Backwater effects of bridge piers in subcritical flow. *U.S. Geological Survey*.
- Costa, P. &. (1987). A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. *Reviews in Engineering Geology*, Volume VII.
- Cruden D.M., V. D. (1996). *Landslide Types*. Special Report - National Research Council, Transportation Research Board.
- D.Yarnell. (1934). *Bridge piers as channel obstruction*. Washington D.C., USA: United States Departement of Agriculture.
- David G. Tarboton, P. D. (2015). *Guide to usind the TAUDDEM command line functions*.
- Dietrich, M. &. (1994). *A physically based model for the topographic control on shallow landsliding*. WATER RESOURCES RESEARCH.
- Dine, V. (1996). *Debris flow control structures for forest engineering*. Victoria, British Columbia: B.C. Ministry of Forests.
- F.Nagler. (s.d.). *Obstruction of Bridge Piers to the Flow of Water*. Reston, Virginia, USA: ASCE.
- Frank, F. (2015). *The importance of erosion for debris flow runout modelling from applications to the Swiss Alps*. Gottingen, Germany: Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union.
- Fugazza, M. (2004/2005). *Effetti idraulici prodotti dai ponti nei corsi d'acqua*. Pavia: Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale - UniPV.
- G.Cavagnino. (2016). *Studio geomorfologico del conoide del Torrente Boscarola o Rio della Valle*. Borgosesia, Vercelli: Studio associato di geologia TECNOSESIA.
- Hungr, O. (2021). A Review of the Classification of Landslides of the Flow Type. *Environmental & Engineering Geoscience*.
- Iverson, R. M. (1997). THE PHYSICS OF DEBRIS FLOWS . *Reviews of Geophysics - American Geophysical Union*.
- Lynn M. Highland, P. B. (2008). *The Landslide Handbook - A Guide to Understanding Landslides*. Reston, Virginia : U.S. Geological Survey Circular 1325.
- Marina, P. (2021). *Dispense del corso di Slope Stability*. Torino: Politecnico di Torino.
- Montin, P. (2012). *Acque meteoriche di dilavamento*. Palermo: Dario Flaccovio Editore.
- Nejc Bezak, J. S. (2019). *Impact of a Random Sequence of Debris Flows on*. Faculty of Civil and Geodetic Engineering, University of Ljubljana, Slovenia: Geosciences.
- RAMMS::DEBRISFLOW User Manual*. (2007). Davos, Svizzera: WSL Institute for Snow and Avalanches.

- Rickenmann, D. (1999). Empirical Relationships for Debris Flows. *Natural Hazards*, 47–77.
- S.Al-Nassri. (1996). *Effect of Bridge Pier Shape and Contraction Ratios on Backwater Profile*.  
Renston, Virginia, USA.: ASCE.
- Skempton, A. W., & Delory, F. A. (1954). *Stability of Natural Slopes in London Clay*. International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE).
- Tarboton. (1997). *A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models*. Water Resources Research.
- Varallo, C. d. (2011). *Piano Regolatore Generale Comunale (P.R.G.C.)*. Varallo (VC): Comune di Varallo.
- Varnes, D. (1978). *Slope movement types and processes*. Washington D.C.: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.

---

## RINGRAZIAMENTI

---

Giunti al termine di questo lavoro, credo sia doveroso da parte mia dedicare qualche riga a tutti coloro che mi sono stati accanto durante il percorso che mi ha portato fin qui e senza cui, quasi sicuramente, non sarei riuscito a raggiungere questo risultato.

Vorrei ringraziare la prof.ssa Monica Barbero per aver accettato di seguirmi e avermi proposto di affrontare questo caso studio, per i corsi che, oltre a fornirmi in buona parte gli strumenti necessari a compiere questo lavoro, mi hanno fatto appassionare alla sua materia, e alla prof.ssa Castelli, per la disponibilità che ha dimostrato nel seguirmi durante le fasi che hanno portato allo svolgimento del presente elaborato.

Un ulteriore ringraziamento va al dott. Cavagnino, per i materiali forniti e la collaborazione, e a Chiara per averci accompagnato sul posto, per le lunghe videochiamate e l'aiuto, tutt'altro che scontato e spesso al di sopra di quanto prevedesse il suo ruolo.

Ringrazio i miei compagni e colleghi:

Mattia, Umberto, Giulio, Silvestro, Michele e Chiara, con cui ho condiviso soprattutto i primi anni di questo cammino;

Antissa, Maria Romana, Simone e Marco, incontrati tra una videochiamata e l'altra, lavori di gruppo a distanza o quando la pandemia lo ha permesso; tutte le persone con cui ho avuto la fortuna di lavorare e che sarebbero troppe da nominare e Francesca, per i consigli e il suo aiuto prezioso e indispensabile; con tutti loro ho condiviso ansie, problemi e soprattutto le tante difficoltà che durante questi anni abbiamo dovuto affrontare.

Ringrazio i miei amici Argonauti, per le avventure, i momenti di svago e le tante risate, toccasana nei momenti di debolezza;

gli amici del 9 Charlie, che mi chiedono di questo momento praticamente da quando li ho conosciuti e Paolo, con i suoi viaggi improvvisati, le sue perle musicali e i salvataggi nei momenti di bisogno.

Un ringraziamento speciale va ad Elisa, per la pazienza e il sostegno, che in questi mesi sono stati per me fondamentali oltre che ai miei storici e "magici" coinquilini: Alberto, che da quando ricordi è per me come un fratello, e Ilaria, per avermi sopportato ed essere stati la seconda famiglia migliore che potessi immaginare.

Per finire, vorrei ringraziare la mia famiglia:

i miei nonni, per la loro vicinanza, il loro esempio e tutto ciò che per me rappresentano;

i miei genitori, per avermi sempre lasciato la libertà e avermi aiutato a scegliere consapevolmente la mia strada, per essersi fidati nei momenti di maggior difficoltà e i sacrifici che hanno dovuto sostenere perché io potessi arrivare a questo importante traguardo e tutti i parenti, zii e cugini che hanno fatto il tifo per me.

Sperando di essere riuscito a restituire anche solo in parte quanto ho ricevuto, un grazie di cuore a tutti per ciò che in poche righe non può essere descritto.



---

# ALLEGATI

---

## ELENCO DEGLI ALLEGATI

- **Certificato della prova di taglio.**
- **Tavola 1:** Verifica di stabilità, calcolo dei fattori di sicurezza e della pioggia critica  $q_{cr}$  in assenza di coesione.
- **Tavola 2:** Verifica di stabilità, calcolo dei fattori di sicurezza e della pioggia critica  $q_{cr}$  con coesione  $c'=29$  kPa.
- **Tavola 3:** Carte di pericolosità per instabilità dei pendii per il bacino di Camasco (VC).