

POLITECNICO DI TORINO

I Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



Tesi di Laurea Magistrale

Analisi di rischio da valanghe di neve in un comune in Valsesia

Relatore:

Prof. ^{ssa} Monica Barbero

Correlatori:

Dott. ^{ssa} Margherita Maggioni

Dott. Geol. Giovanni Cavagnino

Ing. Lorenzo Milan

Candidato:

Stefano Vigna

Anno accademico 2020/2021

Sommario

ABSTRACT.....	9
1 INTRODUZIONE	10
2 FORMAZIONE E TIPOLOGIE DI VALANGHE.....	11
2.1 Deformazione nel corpo valanga	12
2.2 Caratteristiche fisico meccaniche	12
2.3 Resistenza alla frattura da taglio.....	16
2.4 Resistenza al taglio della neve	18
3 APPROCCI ALLA MODELLAZIONE FISICA	25
3.1 Modelli empirici	25
3.2 Modelli dinamici.....	29
3.2.1 Modelli a centro di massa	30
3.2.2 Modelli di tipo continuo.....	30
4 TEORIA MATEMATICA ALLA BASE DEL PROBLEMA FISICO	32
4.1 Conservazione della massa	32
4.2 Conservazione della quantità di moto	34
4.3 Conservazione dell'energia	36
4.4 Applicazione al caso valanghe.....	37
4.5 Legge reologica del materiale	43
4.6 Base matematica del codice di calcolo RAMMS	52
4.7 Energia libera di una valanga	53
5 ANALISI DEL RISCHIO.....	58
5.1 Identificazione del pericolo e stima dell'intensità	60
5.2 Valutazione degli elementi a rischio e vulnerabilità	62
5.3 Stima del rischio	63
5.4 Metodo IMIRILAND	66
5.4.1 Valutazione della pericolosità H.....	67
5.4.2 Stima del danno	68
5.4.3 Calcolo del rischio	70
6 IMPOSTAZIONE DELLE ANALISI NUMERICHE E RISULTATI	72
6.1 DATI DI PARTENZA	73
6.2 SETTAGGIO DELLE ANALISI.....	76
6.2.1 Area di distacco	76
6.2.2 Altezze di distacco.....	80

6.2.3	Parametri reologici e foresta.....	84
6.3	ANALISI DEI RISULTATI DELLE ANALISI	92
6.3.1	Eventi con T_{rit} 300	92
6.3.2	Osservazione sui risultati	95
6.3.3	Eventi annuali.....	96
7	CONSIDERAZIONI PRELIMINARI PER LA CARTA DI RISCHIO	99
7.1	Valutazione della stabilità globale del pendio	99
7.1.1	Stabilità del pendio	104
7.2	Effetto sul guardrail.....	106
7.3	Effetto sulle autovetture.....	109
7.4	Sgombero neve	109
7.5	Ulteriori considerazioni.....	112
8	ELABORAZIONE DELLE CARTE DI RISCHIO	113
8.1	Mappa delle Vulnerabilità per eventi con T_{rit} = 300 anni.....	115
8.2	Mappa del Danno per eventi con T_{rit} = 300 anni.....	118
8.2.1	Esposizione.....	118
8.2.2	Danno per T_{rit} = 300 anni.....	120
8.3	Carta di Rischio per T_{rit} = 300 anni	122
8.4	Carte di rischio a tempi di ritorno minori.....	124
8.4.1	Confronti tra eventi di T_{rit} = 300 anni e T_{rit} = 30 anni	124
9	PROPOSTA DI INTERVENTI DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO.....	126
9.1	Eventi annuali.....	126
9.2	Eventi a maggior tempo di ritorno.....	126
10	CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	128
	BIBLIOGRAFIA:.....	130
11	ALLEGATI	133
11.1	Calcolo altezze di distacco per le nicchie 1256, 820-a e 820-b.....	133
11.2	Risultati per eventi con T_{rit} = 100 anni.....	134
11.3	Risultati per eventi con T_{rit} = 30 anni.....	136
11.4	Risultati per eventi con T_{rit} = 10 anni.....	138
11.5	Guardrail N2	141
11.6	Mezzo per sgombero neve in eventi eccezionali	142
12	RINGRAZIAMENTI.....	144
13	CARTE PRODOTTE.....	145

Sommario figure:

Figura 2.1: Illustrazione dei tipi di valanga a debole coesione (a) e lastrone (b). (McClung and Schaerer, 1953)	11
Figura 2.2: Termini per descrivere le superfici di frattura del lastrone. (McClung and Schaerer, 1953)	11
Figura 2.3: I tre tipi di deformazione della neve. (McClung and Schaerer, 1953)	12
Figura 2.4: Ordini di grandezza sulle resistenze e rigidità. (McClung and Schaerer, 1953). (Modificato da Vigna, 2021).....	13
Figura 2.5: Schema del pendio analizzato e dei risultati in forma parametrica (McClung and Schaerer, 1953). (Modificato da Vigna, 2021)	14
Figura 2.6: Componenti di deformazione per scorrimento e scivolamento. Lo scivolamento (lo scivolamento dell'intero manto nevoso su un terreno in pendenza) avviene con interfacce bagnate e lisce, (McClung and Schaerer, 1953). (Modificato da Vigna, 2021).....	15
Figura 2.7: Caso di una nicchia di distacco post-evento, si vede molto bene la linea di frattura lungo cui si è propagata. Fonte: https://www.targatocn.it/2020/12/06/leggi-notizia/argomenti/attualita/articolo/resta-marcato-il-rischio-valanghe-sui-settori-alpini-della-provincia-di-cuneo.html	16
Figura 2.8: Confronto tra metodo tradizionale e metodi sulla frattura per la valutazione della stabilità di una slavina, (McClung and Schaerer, 1953). (Modificato da Vigna, 2021)	17
Figura 2.9: Illustrazione delle componenti della deformazione viscosa (U = irrecuperabile) ed elastica (R = recuperabile) di un campione di neve, (McClung and Schaerer, 1953). (Modificata da Vigna, 2021)	17
Figura 2.10: Schema di apparato di taglio diretto semplice: 1. Comparatori a quadrante per la misurazione dello spostamento orizzontale e verticale 2. Carico verticale applicato a un tappo superiore sul campione. 3. Campione circondato da una membrana di gomma rinforzata. 4. Indicatore di carico per forza orizzontale. 5. Scatola ingranaggi contenente motore servocomando intercambiabile. (McClung, 1977).....	18
Figura 2.11: Curve tipiche della sollecitazione di taglio rispetto allo spostamento orizzontale e dello spostamento verticale rispetto allo spostamento orizzontale per un campione che mostra incrudimento a deformazione (campione numero 33), (McClung, 1977). (Modificato da Vigna, 2021)	20
Figura 2.12: Curve tipiche della sollecitazione di taglio rispetto allo spostamento orizzontale e dello spostamento verticale rispetto allo spostamento orizzontale per un campione che mostra un rammollimento della deformazione (campione numero 30), (McClung, 1977). (Modificato da Vigna, 2021)	20
Figura 2.13: a: rottura per taglio (softening) della neve alpina deformata a 0,1 mm / min. La rottura si ottiene quando viene raggiunto un picco sulla curva. b: Andamento delle emissioni acustiche durante la rottura per taglio. La ripartizione della struttura è progressiva con il maggior tasso di emissioni prima del picco. La temperatura di prova è -2 ° C, (McClung and Schaerer, 1953). (Modificato da Vigna, 2021)	21
Figura 2.14: Curva forza-spostamento durante la frattura da trazione della neve che mostra un softening, (McClung and Schaerer, 1953). (Modificato da Vigna, 2021).....	21
Figura 2.15: Equilibrio analizzato tra due blocchi di neve.	22
Figura 2.16: Risultati della rottura per taglio di cinque provini simili sottoposti a pressione normale diversa. La coesione (forza a pressione normale zero) è di circa 3 kPa; l'attrito aumenta in modo approssimativamente lineare con la pressione normale da zero (a pressione	

normale zero) a 10 kPa (a pressione normale di 6 kPa), (McClung and Schaerer, 1953). (Modificato da Vigna, 2021).....	23
<i>Figura 2.17: Schema delle condizioni di sollecitazione di taglio basale in funzione della distanza per una valanga a lastroni con uno strato debole che mostra un rammollimento da sforzo. Lo sforzo di taglio gravitazionale del corpo, lo sforzo di taglio di picco e lo sforzo di taglio residuo sono indicati con τ_g, τ_p e τ_r. (McClung, 1977).....</i>	24
Uno schema universalmente accettato sugli strumenti modellistici per lo studio della propagazione valanghe è stato fornito da Harbitz nel 1988: tutt'oggi ci sono essenzialmente approcci empirici e approcci dinamici, con numerose varianti, così come indicato in Figura 3.1.	25
Figura 3.2: Schema delle metodologie disponibili per le analisi di propagazione.(Barbolini, 2004)	26
Figura 3.3: Grandezze topografiche-geometriche che entrano nel modello norvegese. (Barbolini, 2004).....	27
Figura 3.4: Sintesi di valori proposti da diversi autori (tra cui Barsanti (1990), Castaldini (1994) e Fellini (1999)) per diverse località montuose. (Barbolini, 2004).....	27
Figura 3.5: Parametri per il metodo “modello del rapporto di arresto”. (Barbolini, 2004).....	29
Figura 3.6: Schema del mezzo continuo equivalente per una valanga densa: ordini di grandezza comuni sono che il rapporto $H/L = 10^{-2}$. (Barbolini, 2004).....	30
Figura 4.1: Elemento di volume considerato. (Soldati, 2008).....	32
Figura 4.2: La topografia $Z(X, Y)$ è data in un quadro cartesiano, dove X e Y sono le coordinate orizzontali. La superficie induce un sistema di coordinate locale x, y, z , ed è discretizzata in modo tale che la sua proiezione sul piano X, Y si traduca in una mesh strutturata. (Christen, Bartelt and Kowalski, 2010)	38
Figura 4.3: Introdotto di flussi granulari (Savage e Hunter, 1989)	38
Figura 4.4: Il modello di erosione a velocità controllata in RAMMS. Ad ogni nodo n il fronte di frammentazione si muove con la velocità della valanga Un . Il tasso di trascinamento effettivo è $kiUn$ dove ki è il coefficiente di trascinamento effettivo per l' i -esimo strato di neve. In questa rappresentazione bidimensionale, la valanga si sta muovendo nella direzione S data dal vettore unitario nU . (Christen, Kowalski and Bartelt, 2010).....	40
Figura 4.5: Fig. 1: Effetto del coefficiente di trascinamento κ sul tasso di rimozione del manto nevoso. Fig. 2: Effetto del coefficiente di trascinamento κ sulla velocità di trascinamento. Fig. 3: Effetto del coefficiente di trascinamento κ sull'altezza del flusso. (Christen, Kowalski and Bartelt, 2010)	42
Figura 4.6: Profilo di velocità in funzione della profondità y . (Fonte Wikipedia)	44
Figura 4.7: Reogrammi di differenti tipi di fluidi del modello Herschel-Bulkley. (Ancey, 2001) 45	
Figura 4.8: Modello assunto all'interfaccia tra suolo e neve che scorre. (Salm, 1993)	46
Figura 4.9: Fluido alla Voellmy. (Salm, 1993).....	49
Figura 4.10: Contributo allo sforzo di taglio dovuto al modello di Voellmy-Salm: (a) attrito di Coulomb (τ_μ , in Pa) in funzione della profondità del flusso (h) e del coefficiente di attrito di Coulomb (μ); (b) Attrito turbolento (τ_ξ , in Pa) in funzione della velocità del flusso (v) e del coefficiente di attrito turbolento (ξ); (c) Una vista ingrandita della regione blu di (b), dove in τ_ξ è limitata a 8.000 Pa. (Sanz-Ramos et al., 2020).....	50
Figura 4.11: Contributo allo sforzo di taglio dovuto alla coesione: (a) Attrito di coesione (τ_C , in Pa) per $C = 250$ Pa in funzione della profondità del flusso (h) e del coefficiente di attrito di Coulomb (μ); (b) Attrito di coesione (τ_C , in Pa) per $C = 2.000$ Pa in funzione della profondità del flusso (h) e del coefficiente di attrito di Coulomb (μ); (c) Rappresentazione del termine $1 -$	

$e - \rho ghC$ funzione della profondità del flusso (h) e della coesione (C). (Sanz-Ramos et al., 2020)	51
Figura 4.12: Relazione tra sollecitazione normale e tangenziale. A sinistra: lo sforzo di snervamento N_0 serve ad aumentare lo sforzo di taglio per pressioni normali più elevate. A basse pressioni normali (piccole altezze di flusso) la sollecitazione di taglio aumenta rapidamente da $S = 0$ a $S = N_0$. La pendenza della relazione "S vs N" rimane μ , quando le pressioni normali sono grandi. A destra: se $\mu = 0$, abbiamo un comportamento visco-plastico. (RAMMS: AVALANCHE User Manual, Bartelt et al., 2017)	52
Figura 4.13: Distribuzione della velocità e sforzo di taglio per una valanga con taglio semplice (senza urti). (Buser and Bartelt, 2009)	53
Figura 4.14: A sinistra: Flusso di energia senza energia cinetica casuale. L'energia potenziale viene convertita in energia cinetica, K ed energia interna (calore), Φ . La reversibilità dell'energia cinetica è rappresentata con una doppia freccia. A destra: Flusso di energia con energia cinetica casuale, R . Il tasso di lavoro di attrito, $Wf \rightarrow E$, è diviso in $\alpha Wf \rightarrow E$ (produzione di energia cinetica casuale) e $(1 - \alpha)Wf \rightarrow E$. L'energia cinetica casuale decade alla velocità βR , (Buser and Bartelt, 2009). (Modificata da Vigna, 2021)	57
Figura 5.1: schematizzazione valutazione del rischio con il metodo IMIRILAND rivolto a grandi frane, (Lacerda et al., 2004). (Modificato da Vigna, 2021)	59
Figura 5.2: Canadian avalanche size classification. (McClung, 2003)	60
Figura 5.3: analisi di inferenza statistica dello studio di McClung. (a) Grafico delle probabilità della frequenza media delle valanghe di Bear Pass. Se la frequenza media delle valanghe obbedisse a una distribuzione gaussiana, i punti cadrebbero sulla linea retta. (b) Grafico della probabilità log-normale per la frequenza media per Bear Pass. Il grafico mostra che la frequenza media è distribuita approssimativamente in modo log-normale, (McClung, 2003). (Modificato da Vigna, 2021).....	61
Figura 5.4: Esempio di diagramma F-N (frequenza-numero di vittime) e le relative soglie. (Couture et al., 2013)	64
Figura 5.5: Riduzione del rischio: strategie e relative scale (Cascini, Fornaro and Peduto, 2009). (Modificato da Vigna, 2021).....	65
Figura 5.6: Esempi di descrittori di pericolo per affrontare potenziali smottamenti a diverse scale di lavoro. (Corominas et al., 2014).....	66
Figura 5.7: Schema di calcolo del rischio matriciale, (Bonnard, Christophe; Forlati, F.; Scavia, 2013). (Modificato da Vigna, 2021)	67
Figura 5.8: Esempio di attribuzione di indici agli elementi soggetti al rischio. (Bonnard, Christophe; Forlati, F.; Scavia, 2013).....	69
Figura 5.9: a) Variazione del costo del traffico impedito in funzione del tempo; (b) Variazione non lineare del costo del soccorso e dell'assistenza medica in funzione del numero di persone. (Crosta et al, 2001).....	70
Figura 5.10: Esempio di valutazione dei valori dei fattori di vulnerabilità per aspetti fisici, sociali, ambientali, economici. (Bonnard, Christophe; Forlati, F.; Scavia, 2013).....	70
Figura 6.1: Testimonianze fotografiche degli eventi con cadenza annuale raccolte nell'inverno del 2009 dal Dott. Geol. Cavagnino.....	73
Figura 6.2: CLPV nella zona SP 82 tra Rassa e Piode rappresentata su QGIS.....	75
Figura 6.3: Dipendenza dall'angolo di inclinazione da studi sulla linea di frattura. (McClung and Schaerer, 1953)	77
Figura 6.4: Distribuzione dello spessore del manto da studi sulla linea di frattura. (McClung and Schaerer, 1953).....	77

Figura 6.5: Distribuzione della larghezza dei lastroni normalizzata rispetto la lunghezza. (McClung and Schaerer, 1953).....	78
Figura 6.6: scelta delle nicchie di distacco con $T_{rit}=300$ e 100 anni sovrapposte all'ortofoto.	79
Figura 6.7: scelta delle nicchie di distacco con $T_{rit}=300$ e 100 sovrapposte alla carta delle pendenze.....	79
Figura 6.8: scelta delle nicchie di distacco con $T_{rit}=30$ e 10 sovrapposte alla carta delle pendenze.....	80
Figura 6.9: Stazione automatica di Bocchetta delle Pisse (2410 m slm): grafico di Gumbel per l'incremento dell'altezza del manto nevoso su tre giorni consecutivi di precipitazione nevosa (DH3gg) e per l'altezza di neve al suolo (HS max). Serie di dati: 1990-2017, 28 anni). (Levera and Maggioni, 2019)	81
Figura 6.10: Formule empiriche per il trasporto eolico. (A. Bianchi, G. Rossotti and C. Sbarufatti, no date).....	82
Figura 6.11: Confronto di formulazioni empiriche. (A. Bianchi, G. Rossotti and C. Sbarufatti, no date)	83
Figura 6.12: Rosa dei venti sulla stazione di Alagna (fonte: https://www.meteoblue.com/it/tempo/historyclimate/climatemodelled/alagna-valesia_italia_3183369).....	83
Figura 6.13: esempio dei parametri suggeriti da RAMMS	85
Figura 6.14: Interfaccia do RAMMS nell'assegnazione dei parametri reologici al modello: si può osservare come per ogni elemento del DTM assegni un valore del coefficiente reologico (μ nell'immagine) in base alla topografia del terreno.....	86
Figura 6.15: immagine che riprende parzialmente il canalone 420 del 20-11-2020. (Cavagnino, 2020)	86
Figura 6.16: immagine ripresa dalla strada del canalone 1256 del 20-11-2020. (Cavagnino, 2020)	87
Figura 6.17: immagine ripresa dalla strada dove riprende il canalone 420 e in parte il 1256 del 14-01-2021	87
Figura 6.18: vista dall'alto di uno dei canali oggetto di studio del 14-01-2021.....	88
Figura 6.19: Da "Selvicolture nelle foreste di protezione" della regione Valle d'Aosta. (Berretti, Caffo and Camerano, 2007)	89
Figura 6.20: Tabella dei parametri reologici assunta	90
Figura 6.21: Tabelle dei parametri reologici per $T_{rit} = 100$, $T_{rit} = 30$ e $T_{rit} = 10$	91
Figura 6.22: Carta delle velocità massime per $T_{rit} = 300$ anni.	93
Figura 6.23: Carta delle pressioni massime per $T_{rit} = 300$ anni.	93
Figura 6.24: Carta delle altezze massime per $T_{rit} = 300$ anni.	94
Figura 6.25: Carta dei depositi per $T_{rit} = 300$ anni.....	94
Figura 6.26: esempio di una sezione sulla strada nel DEM.....	95
Figura 6.27: zoom sulla strada dei depositi per $T_{rit}=300$, in rosso i depositi significativi cioè maggiori di 0,45 m.	96
Figura 6.28: Tratto di strada SP82 in cui è segnata in rosso la zona che normalmente è soggetta agli eventi annuali. (Cavagnino, 2020).....	97
Figura 6.29: Nicchia individuata per gli eventi annuali, si è selezionata le sole zone con roccia affiorante secondo l'ortofoto.	97
Figura 6.30: Nicchia individuata per gli eventi annuali sulla carta delle pendenze.	98
Figura 7.1: Valanga che scorre su terreno nudo a sinistra e valanga che scorre sul tetto innevato a destra. (Willi et al., 2007).....	100

Figura 7.2:Descrizione della geometria del problema. (Actions d ' Avalanches Sur Les Galeries de Protection Impressum, 2007).	100
Figura 7.3: Time plot dell'istante con maggiore energia per $T_{rit} = 300$ anni a sinistra e destra per $T_{rit} = 30$ anni.	103
Figura 7.4: Stereogramma delle famiglie (K1, K2, K3, K4 e K5 in verde) e dei tre fronti relativi le tre zone di invasione (F410, F1256 e F820 in rosso).....	105
Figura 7.5: TGM sulla SP82 Quare-Rassa, fonte BDTRE 2019	107
Figura 7.6: Tabelle per il dimensionamento dei guardrail. (ANAS, 2019).....	107
Figura 7.7: Calcolo costo di morte, fonte: SIMLA, Società Italiana di Medicina Legale e delle Assicurazioni.....	109
Figura 7.8: Sezioni per il calcolo dei volumi di sgombero sulla strada.....	110
Figura 8.1: Inquadramento del territorio oggetto di studio, destinazione d'uso secondo la DBTRE.....	114
Figura 8.2: Carta della vulnerabilità fisica per eventi con $T_{rit}=300$ anni.	117
Figura 8.3: Carta della vulnerabilità sociale per eventi con $T_{rit}=300$ anni.	117
Figura 8.4: Ingrandimento su un tratto di strada al fine di mostrare il guardrail.	118
Figura 8.5: Schema del calcolo dell'esposizione di auto che transita mentre avviene una valanga.	119
Figura 8.6: Carta del danno fisico per eventi con $T_{rit}=300$ anni.	121
Figura 8.7: Carta del danno sociale per eventi con $T_{rit}=300$ anni.....	121
Figura 8.8: Carta del rischio fisico per eventi con $T_{rit}=300$ anni.....	122
Figura 8.9: Carta del rischio sociale per eventi con $T_{rit}=300$ anni.	123
Figura 8.10: Carta del rischio totale per eventi con $T_{rit}=300$ anni.....	123
Figura 8.11: Confronto tra il rischio totale ottenuto per eventi di $T_{rit}=300$ anni e $T_{rit} =30$ anni.	125
Figura 9.1: Zone di realizzazione delle gallerie paravalanghe.....	127
Figura 9.2: Esempio di galleria paravalanghe già realizzata. (Fonte: La Voce di Bolzano).....	127
Figura 10.1: Particolare delle carte di rischio totale prodotte, relativamente alle aree più critiche.....	129
Figura 11.1.....	134
Figura 11.2.....	135
Figura 11.3.....	135
Figura 11.4.....	136
Figura 11.5.....	136
Figura 11.6.....	137
Figura 11.7.....	137
Figura 11.8.....	138
Figura 11.9.....	138
Figura 11.10.....	139
Figura 11.11.....	139
Figura 11.12.....	140
Figura 11.13: Dimensioni geometriche di un guardraild N2	141
Figura 11.14: Caratteristiche della pala caricatrice (Caterpillar, 2015)	142
Figura 11.15: Caratteristiche della pala caricatrice (Caterpillar, 2015)	143

Sommario tabelle:

Tabella 5.1: Variabili che hanno una correlazione altamente significativa con la frequenza media delle valanghe o che sono significative nelle relazioni multivariate con la frequenza delle valanghe.....	62
Tabella 5.2: Lo schema svizzero di zonizzazione delle valanghe basato su materiale in McClung e Schaerer (1993). (Keylock and Barbolini, 2001).....	62
Tabella 5.3: Suddivisione degli elementi a rischio secondo il metodo IMIRILAND.....	69
Tabella 6.1: Valori tipici della letteratura per trasporti eolici.....	84
Tabella 6.2: Calcolo altezze del manto al distacco per i diversi tempi di ritorno della nicchia 410.	84
Tabella 7.1: Calcolo sollecitazioni statiche equivalenti di una valanga. (Actions d ' Avalanches Sur Les Galeries de Protection Impressum, 2007)	100
Tabella 7.2: Risultati delle sollecitazioni statiche equivalenti sulla strada in conformità alle direttive svizzere per eventi trecentennali.	102
Tabella 7.3: Risultati delle sollecitazioni statiche equivalenti sulla strada in conformità alle direttive svizzere per eventi trentennali.....	102
Tabella 7.4: Parametri della roccia intatta trovati.	104
Tabella 7.5: Energie di impatto per barriera N2.	107
Tabella 7.6: Energie di impatto della valanga sul guardrail e costo della loro sostituzione.	108
Tabella 7.7: Calcolo costi di smaltimento neve.....	112
Tabella 8.1: Valore espresso con indici relativi degli elementi a rischio.....	115
Tabella 8.2: Esposizione degli elementi a rischio.....	120
Tabella 8.3: Valori del danno massimo per gli elementi analizzati.....	120
Tabella 11.1: Calcolo altezze del manto al distacco per i diversi tempi di ritorno della nicchia 1256.	133
Tabella 11.2: Calcolo altezze del manto al distacco per i diversi tempi di ritorno delle nicchie in 820.	134

ABSTRACT

The work carried out in this thesis consists in the analysis of the risk associated to snow avalanches in Valsesia, Italy. Here, Dott. Geol. Giovanni Cavagnino, was assigned the design of risk mitigation works above the portion of the provincial road SP82 that connects the municipalities of Piode and Rassa (VC).

As a part of this study, the numerical modelling of snow avalanches and the drafting of risk maps are two fundamental operations, which will be described in the following chapters.

Local evidence shows that almost every time there is a snowfall and a subsequent rise in temperatures, small avalanches involve the road. These are events with a return period of one year, which cause the closure of the road, interrupting the way of communication between the municipalities. Nevertheless, events with higher return periods are interesting to study too, due to their potential consequences. As it will be described, the C.L.P.V. (Probable Avalanche Localization Card) was consulted to highlight possible runout areas involving the street. To include this information in the study, the following assumption is done: the most extreme events, associated at return period of 300 years, have created these signs.

The RAMMS software was used to perform runout analyses and events with different return period were studied: 300, 100, 30 and 10 years.

The runout-output were combined with parameters of hazard in order to draw up a risk map for each return period studied. The IMIRILAND method was chosen to draw the maps, so the damage was divided in physical, social, economic and environmental. The method was applied with relative index of value.

Then, some risk mitigation interventions are proposed. In particular, it is shown that the best work could be an avalanche-protection tunnel. In fact, despite its high cost, this intervention would provide total protection, also from the rockfall phenomena (a minor problem, but also present on the SP82).

In the final part of this work, the conclusions of the study are provided, together with personal considerations about the possible future developments necessary for an in-depth study of the issues addressed.

1 INTRODUZIONE

Il lavoro sviluppato in questa tesi riguarda lo studio del rischio indotto delle valanghe di neve sul tratto di strada provinciale SP82 che collega i comuni di Piode e Rassa in Valsesia (VC) e la progettazione di interventi per la sua mitigazione.

Dal punto di vista geologico i versanti sono costituiti da micascisti eclogitici e gneiss quarziticci, mentre a ridosso del fiume (torrente Sorba) sono presenti depositi terrazzati alluvionali e detritici. (Piana et al., 2017). Più in particolare, secondo uno studio di stabilità svolto proprio in quella zona, si segnalano metagranitoidi e gneiss (Sillano, Benedetti, Tocchio, Zardo).

Le informazioni disponibili derivano essenzialmente da due fonti:

- le testimonianze locali, che riportano come a seguito di nevicate seguite da innalzamento delle temperature, hanno luogo scariche di neve direttamente sulla strada: si tratta di eventi con ricorrenza stimabile annua che causano chiusura per un breve periodo della strada, unica via di comunicazione tra i paesi. Questi fenomeni negli anni hanno portato alla chiusura della strada per alcune settimane non continuative;
- la C.L.P.V. (Carta Localizzazione Probabile Valanghe), che mostra sostanzialmente tre aree prospicienti la strada che in passato hanno probabilmente generato importanti slavine.

Un primo scopo della tesi sarà studiare in dettaglio questo problema, ampliando anche il discorso ad eventi di maggiore entità. In particolare, si analizzerà numericamente con l'ausilio del software di simulazione RAMMS la propagazione dei potenziali eventi valanghivi, considerando diversi scenari differenziati in base al tempo di ritorno. Si considereranno: 300 anni, 100 anni, 30 anni e 10 anni.

I risultati ottenuti delle analisi di propagazione consentiranno di proseguire con la realizzazione di varie carte di rischio, una per ogni tempo di ritorno studiato. Le simulazioni di propagazione forniranno la pericolosità mentre verrà sviluppato uno studio approfondito per assegnare ad ogni elemento a rischio una propria vulnerabilità e un valore. A tale fine si ricorrerà al metodo IMIRILAND, originariamente studiato per problemi di frane, ma ben adattabile al caso di valanghe di neve. Coerentemente con il metodo, si distingueranno quattro categorie di rischio: fisico, sociale, economica e ambientale.

Le mappe di rischio che saranno redatte consentiranno di individuare le aree maggiormente a rischio, sulle quali intervenire per la sua mitigazione.

A conclusione dello studio si suggerirà un'opera per la messa in sicurezza dell'area più critica.

2 FORMAZIONE E TIPOLOGIE DI VALANGHE

Il manto nevoso si forma con la sovrapposizione di più strati di neve depositati in diversi tempi, con differenti proprietà fisiche e meccaniche talvolta modificabili nel tempo. La valutazione della stabilità del manto nevoso è un aspetto importante quanto complesso per l'intervento di prevenzione e mitigazione del rischio naturale in ambiente montano.

Principalmente esistono due tipologie di valanghe chiamate: di neve a debole coesione (loose-snow avalanches) e a lastroni (slab avalanches), le quali sono distinguibili in Figura 2.1: le prime iniziano in una singola area o punto e si espandono mentre scendono lungo il pendio inglobando nuovo materiale, le seconde iniziano in un punto vicino alla superficie e solitamente coinvolgono solo la neve superficiale.

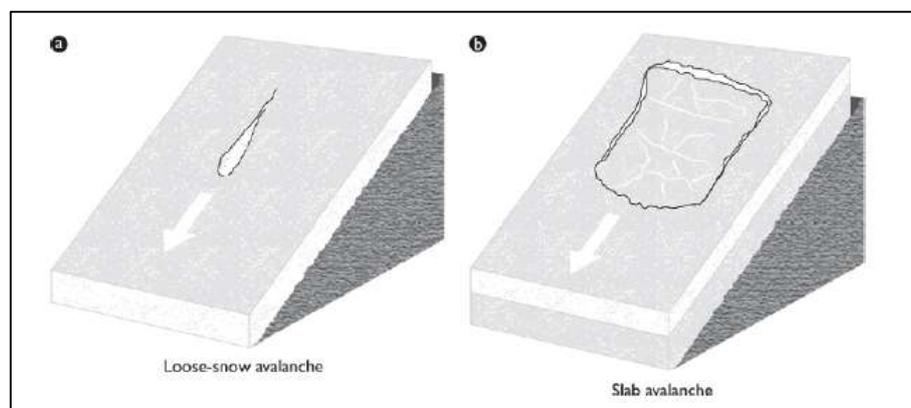


Figura 2.1: Illustrazione dei tipi di valanga a debole coesione (a) e lastrone (b). (McClung and Schaerer, 1953)

Le valanghe a lastroni normalmente sono le più pericolose: si innescano con un meccanismo di frattura che nasce in uno strato di neve più debole e il risultato finale è una forma rettangolare generata dalla propagazione della stessa; si riporta brevemente la nomenclatura di alcune parti del corpo valanga in Figura 2.2.

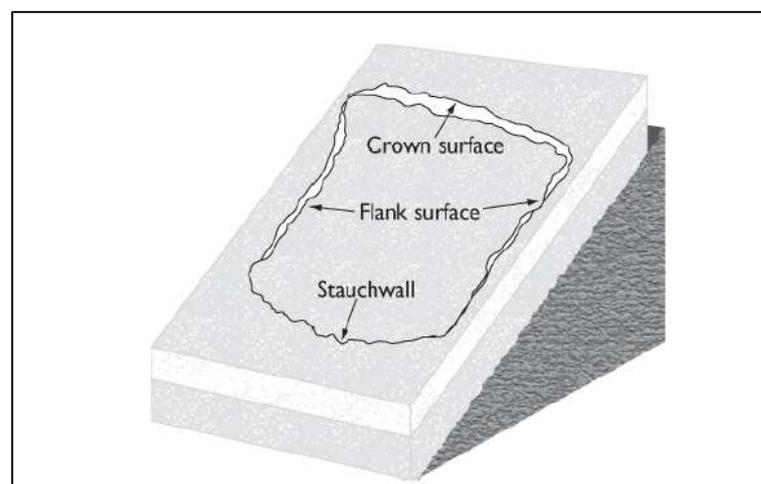


Figura 2.2: Termini per descrivere le superfici di frattura del lastrone. (McClung and Schaerer, 1953)

2.1 Deformazione nel corpo valanga

In un pendio innevato le deformazioni si presentano secondo tre cause (Figura 2.3), solitamente combinate:

- In tensione, cioè i grani di neve tendono ad essere aperti;
- In compressione, i grani di neve tendono a schiacciarsi tra essi;
- In taglio, i grani scorrono reciprocamente.

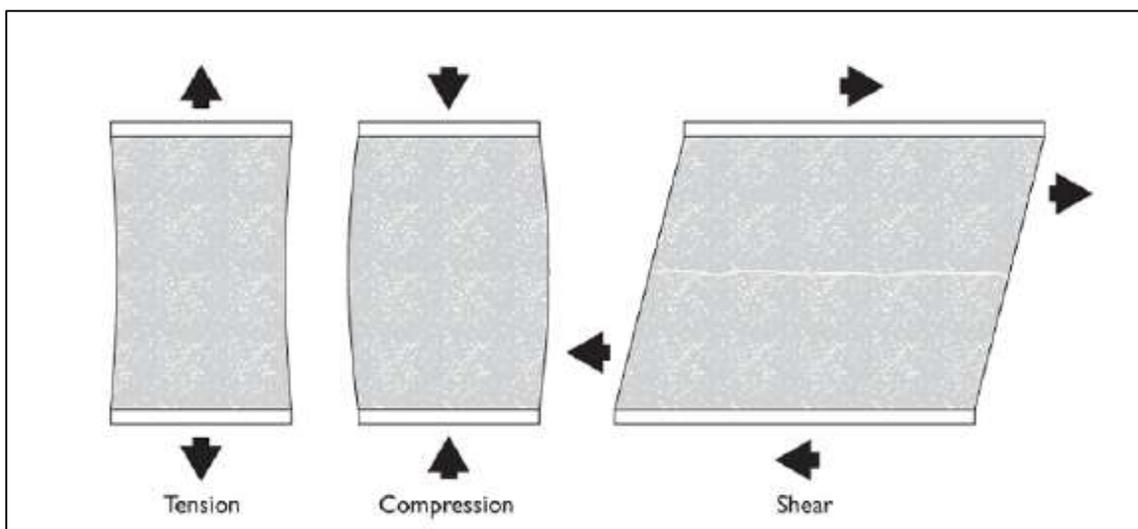


Figura 2.3: I tre tipi di deformazione della neve. (McClung and Schaerer, 1953)

Per ambedue i tipi di valanga il cedimento iniziale è per taglio: la situazione necessaria per la loro formazione è la presenza di uno sforzo maggiore o uguale della resistenza stessa. Specialmente per le valanghe a lastroni è rilevante la resistenza al taglio perché è un parametro fondamentale nella propagazione della frattura. Tuttavia, perché si instauri tale propagazione, lo stato di deformazione deve essere principalmente a taglio e la neve deve essere deformata ad una velocità sufficientemente rapida da provocare fratture.

2.2 Caratteristiche fisico meccaniche

Si definisce porosità la percentuale di aria tra i fiocchi di neve, più essa è alta maggiormente saranno favoriti gli effetti di creep: la neve che normalmente si trova nelle regioni alpine mostra un alto valore di porosità e a questo fattore si associa il fatto che per molto tempo il materiale si trova molto vicino al punto di rammollimento.

Alcune relazioni mostrano come il tasso di creep aumenti esponenzialmente con il reciproco della temperatura: si stima che il 90% dei movimenti sia dato da metamorfismi a gravità mentre solo il 10% da effetti deformativi microscopici come la deformazione del cristallo.

La densità della neve ha un ampio intervallo di valori tra $30 - 600 \text{ Kg/m}^3$, sotto l'effetto della gravità nel tempo può andare ad aumentare il valore di partenza così come anche le proprietà meccaniche. Sapendo che la densità del ghiaccio è 917 Kg/m^3 si può calcolare quale sia la sua frazione in un volume di neve e la percentuale d'aria, ossia la porosità [Eq. 2.2] (chiamata "average porosity").

$$\%_{ghiaccio} = \frac{\rho_{neve}}{\rho_{ghiaccio}} \quad [\text{Eq. 2.1}]$$

$$n = \frac{V_{aria}}{V_{tot}} = 1 - \%_{ghiaccio} \quad [\text{Eq. 2.2}]$$

Densità vicino a 30 Kg/m^3 è molto bassa e corrisponde a neve appena caduta: porosità del 97% più 3% di ghiaccio; valore di 600 Kg/m^3 indica la neve bagnata a cui corrisponde una porosità del 35% e 65% di ghiaccio. Il limite per neve asciutta è circa di 550 Kg/m^3 : rappresenta il valore teorico per perfette sfere di ghiaccio con massimo impacchettamento. L'azione della gravità provoca cedimenti che causano aumento di densità e rigidità: si parla di 10 cm al giorno per neve appena caduta a $\frac{1}{100} \frac{\text{mm}}{\text{giorno}}$ per strati profondi di neve densa. Il tasso di scorrimento generalmente diminuisce con la profondità del manto nevoso perché la densità aumenta con la profondità dato che c'è meno spazio per la riorganizzazione dei grani. Durante la densificazione per l'azione della gravità aumenta la rigidità e si quantifica mediante la resistenza a compressione, inoltre si ha un progressivo aumento di essa con la profondità lungo un deposito nevoso.

Un misuratore di durezza è costituito da una serie di piastre metalliche circolari di area nota che vengono spinte nella neve, la forza registrata quando questa si rompe è una misura della durezza. In Figura 2.4 vengono riportati i valori internazionali standard della ICSI (international commission of snow and ice): secondo tale ente si applicano incrementi di carico pari a 50 N. Tuttavia, evidenze sperimentali mostrano come con strati particolarmente soffici la prova perda di significatività, infatti in Nord-America è più comune usare incrementi di 15 N (Radok, 1997). Un altro parametro riportato nelle ICSI è il "Swiss Rammsonde", misurato con attrezzatura avente un cono di 60° , un diametro di base da 40mm e una pressione di 10 N/m (Colbeck, 1985). Per "Hand test" si intendono prove con vari oggetti di diverse aree vengono spinti delicatamente nella neve con una forza di penetrazione di circa 50 N, che può essere facilmente eseguita con la mano.

ICSI Hardness Classification for Snow				
Condizioni	Penetrometro Swiss Rammsonde (N)	Ordine di grandezza della resistenza (Pa)	Test della mano (hand test)	Simbolo grafico
Molto lento	0–20	0– 10^3	fist	
Lento	20–150	10^3 – 10^4	4 fingers	/
Medio	150–500	10^4 – 10^5	1 finger	X
Alto	500–1,000	10^5 – 10^6	pencil	//
Molto alto	> 1000	> 10^6	knife blade	⊗
Ghiaccio				■

Figura 2.4: Ordini di grandezza sulle resistenze e rigidità. (McClung and Schaerer, 1953). (Modificato da Vigna, 2021)

I valori di resistenza di Figura 2.4 è solo uno dei parametri entranti in un sistema di classificazione della neve molto utilizzato, proposto dall'ICSI, riportato nel lavoro intitolato "The International Classification for Seasonal Snow on the Ground" (Colbeck, 1985), gli altri sono: densità, misura dei grani, contenuto di acqua e temperatura.

Un parametro importante per la stabilità è l'anisotropia per due motivi:

- lo stato è particolarmente predisponente per la propagazione di fratture da taglio che libereranno valanghe;
- la situazione tende a persistere nel tempo finché la compattazione non incrementa sufficientemente la resistenza.

Le valanghe avvengono su pendii con una certa inclinazione in cui già il peso stesso crea sforzi di taglio instabilizzanti, mentre gli sforzi di compressione stabilizzano come mostrato in Figura 2.5a.

Un modello molto semplice sulla stabilità può essere immaginato dal rapporto tra le componenti di taglio e le componenti stabilizzanti. Le valanghe a lastroni avvengono normalmente in pendenze comprese tra 25° - 55°: in Figura 2.5b sono mostrati i risultati di un'analisi parametrica riguardante un pendio omogeneo in cui si valuta sulle ascisse l'inclinazione del pendio e sulle ordinate il rapporto tra sforzo di taglio e sforzo normale. Tale rapporto cresce del 200% tra i 25° e i 55°; analizzando fenomeni a bassa densità, cioè quelli che di solito generano valanghe, a 25° lo sforzo tagliante è circa uguale a quello normale mentre a 55° è circa 3 volte.

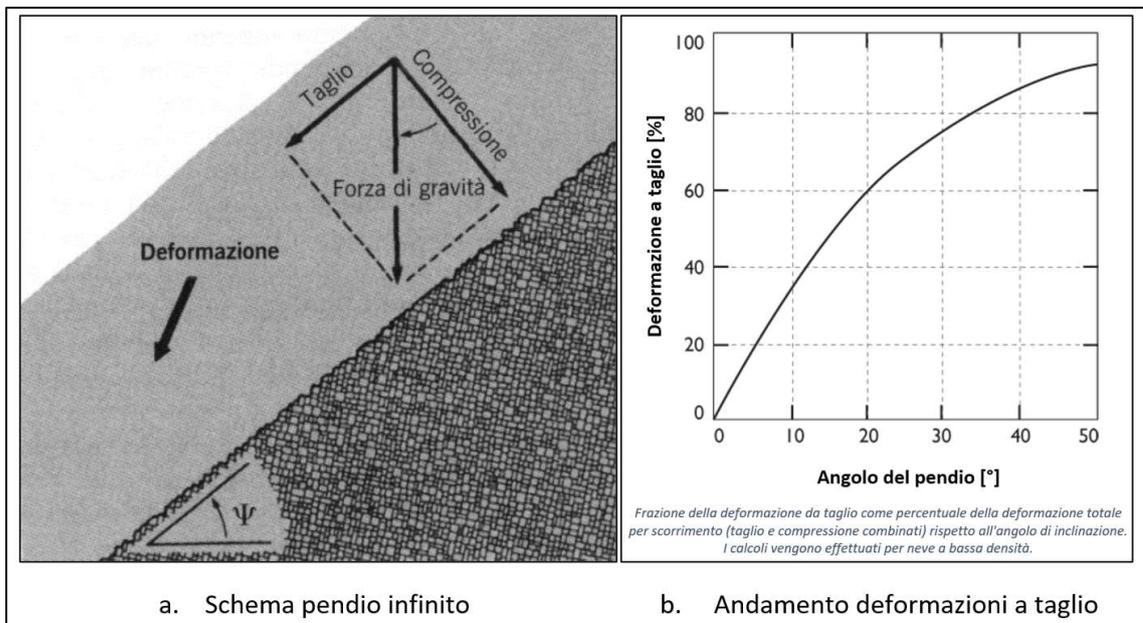


Figura 2.5: Schema del pendio analizzato e dei risultati in forma parametrica (McClung and Schaerer, 1953).
(Modificato da Vigna, 2021)

Oltre i fenomeni tenso-deformativi già descritti va aggiunto lo scivolamento della neve (snow glide), ovvero il moto rigido dello strato instabile sul terreno (Figura 2.6): esso avviene quando esiste una superficie di interfaccia in cui si ha rottura localizzata, per esempio uno strato di ghiaccio o il terreno.

In neve asciutta questo fenomeno è trascurabile perché essa presenta un alto attrito all'interfaccia. Lo scivolamento è importante nella formazione di valanghe a lastroni che coinvolgono l'intera profondità del manto nevoso e può essere responsabile di forze elevate

sulle strutture che incontra. Anche senza che si inneschi una vera e propria valanga un deposito nevoso può mostrare fenomeni di questo tipo pari a 1-100 mm al giorno.

Misurazioni sul campo hanno mostrato che devono sussistere varie condizioni affinché il fenomeno di gliding abbia luogo, schema in Figura 2.6:

- l'interfaccia deve essere abbastanza liscia;
- la temperatura all'interfaccia o al fondo del manto nevoso deve essere di 0°C , questo garantisce la presenza di acqua libera in questa zona;
- l'angolo di inclinazione deve essere di almeno 15° .

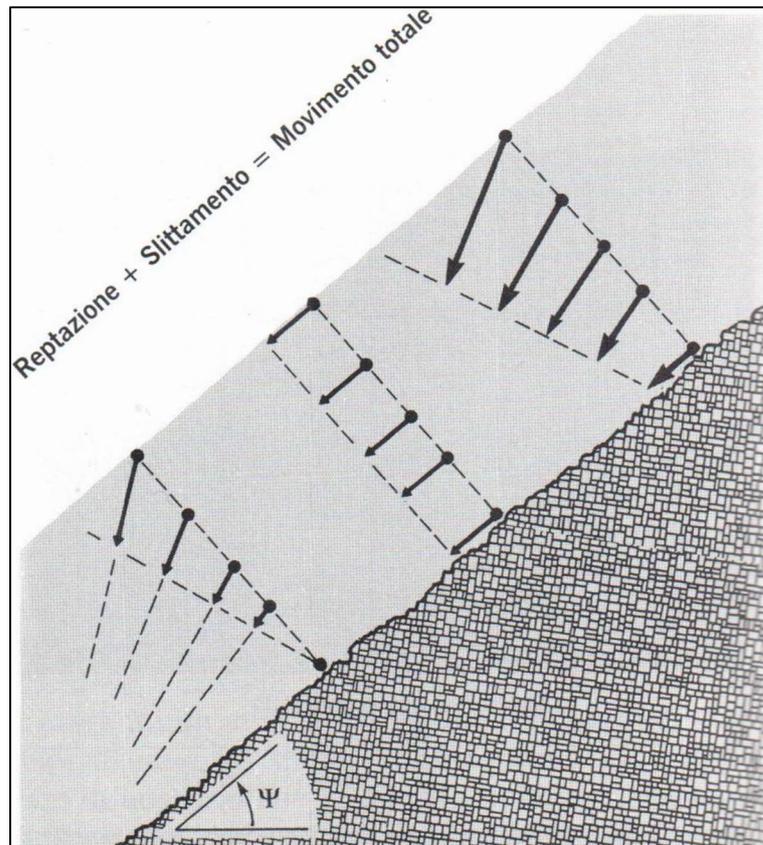


Figura 2.6: Componenti di deformazione per scorrimento e scivolimento. Lo scivolamento (lo scivolamento dell'intero manto nevoso su un terreno in pendenza) avviene con interfacce bagnate e lisce, (McClung and Schaerer, 1953).
(Modificato da Vigna, 2021)

L'aumento della quantità di acqua, solitamente causato da piogge o forte scioglimento della neve durante la stagione calda, causa una riduzione dell'attrito sull'interfaccia neve / terreno aumentando ancor di più questo scivolamento. In più la rigidità della neve decresce all'aumentare del contenuto d'acqua rendendo decisamente più facile lo scivolamento dello strato nevoso sulle asperità del terreno; componenti di glide importanti si hanno anche su superfici erbose o affioramenti rocciosi lisci dove si ha maggiore propensione. In conclusione qualsiasi superficie liscia e con una certa pendenza tende a dare valanghe a lastroni, altro non sono che moti con preponderanza di glide.

2.3 Resistenza alla frattura da taglio

Le valanghe a lastroni si originano perché nella stratigrafia nevosa c'è uno strato meno resistente e coeso degli altri, quindi lì la frattura si potrà propagare con meno energia: questa affermazione è dimostrata da svariate osservazioni sul campo di valanghe alpine in cui è chiaramente visibile una linea di frattura post-evento (Figura 2.7). Questo elemento suggerisce che l'instabilità dei lastroni di neve dipende dall'equilibrio tra la resistenza alla frattura e le sollecitazioni applicate nello strato debole, nel quale viene generata una intensificazione degli sforzi. (McClung and Schaerer, 1953)



Figura 2.7: Caso di una nicchia di distacco post-evento, si vede molto bene la linea di frattura lungo cui si è propagata. Fonte: <https://www.targatocn.it/2020/12/06/leggi-notizia/argomenti/attualita/articolo/resta-marcato-il-rischio-valanghe-sui-settori-alpini-della-provincia-di-cuneo.html>

Storicamente per valutare la stabilità si usava un approccio classico ingegneristico, cioè una sorta di fattore di sicurezza tra resistenza al taglio disponibile e la sollecitazione al taglio dello strato debole. Questo approccio è approssimativo, in realtà, proprio perché andrebbe studiata la propagazione della frattura in tale strato e non addentrandosi nell'ambito della meccanica della frattura ci si limita a dare un'idea del concetto in Figura 2.8. Si vede come l'indice di instabilità passa dal rapporto fra i tagli a quello tra particolari valori di tenacità a frattura.

Contrast in Traditional Slope Stability and Avalanche Shear-Fracture Slope Instability		
Termini	Stabilità del pendio convenzionale	Stabilità della valanga a frattura da taglio
Indice di sforzo da taglio applicato	τ (stress a taglio) [KPa]	K_{II} (fattore di intensificazione stress a taglio) [KPa (m) ^{1/2}]
Indice di sforzo da taglio resistente	τ_s (resistenza al taglio) [KPa]	K_{Ic} (tenacità a frattura da taglio) [KPa (m) ^{1/2}]
Indice di instabilità	$\frac{\tau}{\tau_s} \rightarrow I$	$\frac{K_{II}}{K_{Ic}} \rightarrow I$

Figura 2.8: Confronto tra metodo tradizionale e metodi sulla frattura per la valutazione della stabilità di una slavina, (McClung and Schaerer, 1953). (Modificato da Vigna, 2021)

Un deposito nevoso su un pendio si deforma similmente a un fluido viscoso: subisce una parte viscosa (o da creep) di deformazione irrecuperabile più una parte elastica quindi reversibile, (lo schema di riferimento è mostrato in Figura 2.9). In generale, la porzione di energia elastica immagazzinata aumenta all'aumentare del tasso di deformazione e contemporaneamente la parte viscosa diminuisce. Nelle deformazioni da creep, invece, la componente elastica è trascurabile, ma a velocità di deformazione molto elevate, questa diventa importante e può generarsi una frattura fragile catastrofica.

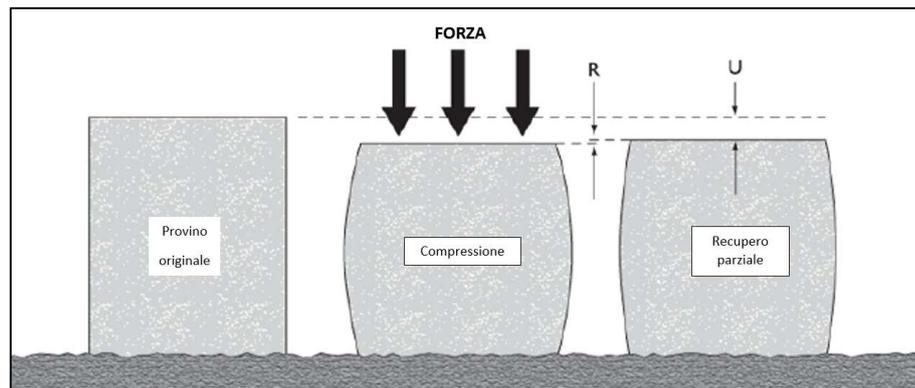


Figura 2.9: Illustrazione delle componenti della deformazione viscosa (U = irrecuperabile) ed elastica (R = recuperabile) di un campione di neve, (McClung and Schaerer, 1953). (Modificata da Vigna, 2021)

Siccome all'aumentare della temperatura la viscosità aumenta la neve bagnata richiede molta più energia affinché ci sia una propagazione della frattura da taglio; infatti il meccanismo che avvia il rilascio di valanghe a lastroni è una fragile propagazione per frattura da taglio (neve asciutta) o una propagazione della frattura da trazione indotta da scivolamento (neve bagnata) (McClung and Schaerer, 1953). Secondo la meccanica della frattura dove ci sono cricche o imperfezioni, si può facilmente arrivare a fattori di concentrazione delle tensioni di 100, tuttavia è fisicamente impossibile individuare tali difetti in un manto nevoso e d'altro canto è fondamentale la loro conoscenza per poter fare stime di stabilità deterministiche. La soluzione plausibile è di passare ad analisi di rischio.

2.4 Resistenza al taglio della neve

Mellor (1974), dal momento che la resistenza al taglio è un fattore mobilitato in una valanga, suggerisce di descrivere il criterio di rottura della neve con il criterio di Mohr-Coulomb. La coesione può essere correlata al grado di sinterizzazione, mentre l'angolo di attrito si lega alla resistenza ancora disponibile superata la medesima.

McClung (1977), nella stazione di ricerca valanghe di Norges Geotekniske Institutt (Norvegia), è stato uno dei primi a studiare la resistenza al taglio della neve e dal momento che, già all'epoca, si era capito come si creasse un meccanismo di rottura concentrato in una sottile banda, egli decise di investigare un piccolo provino per ricreare questa situazione. Viene utilizzata la macchina a taglio diretto (Figura 2.10): essa mira a creare uno stato deformativo piano cercando di concentrare le deformazioni in una banda delimitata da due corpi rigidi. Dentro il campionatore, il provino (115 mm di diametro, altezza 16 mm) è posizionato tra due presse di plastica a superficie ruvida per impedire lo scivolamento. Esso è circondato da una membrana di gomma rinforzata la quale impedisce variazioni di diametro, ma consente variazioni di spessore del campione durante la prova. Inoltre essendo il provino molto fine si può assumere uno stato tensionale costante.

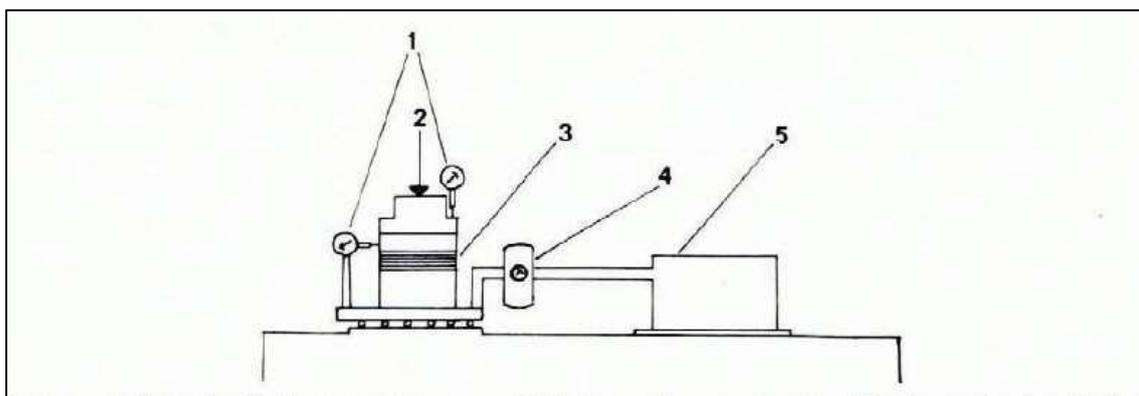


Figura 2.10: Schema di apparato di taglio diretto semplice: 1. Comparatori a quadrante per la misurazione dello spostamento orizzontale e verticale 2. Carico verticale applicato a un tappo superiore sul campione. 3. Campione circondato da una membrana di gomma rinforzata. 4. Indicatore di carico per forza orizzontale. 5. Scatola ingranaggi contenente motore servocomando intercambiabile. (McClung, 1977)

Il provino è posizionato nella macchina con la sua stratificazione naturale parallela alle piastre, in modo da simulare la rottura su uno di questi piani. Successivamente segue una fase di consolidazione tramite carico normale.

Questi test sono stati eseguiti in condizioni prossime a quelle previste per le condizioni sul campo appena prima del rilascio della valanga a lastroni. Di conseguenza, le variabili studiate sono state scelte tra i range mostrati dalle indagini di profilo della linea di frattura nelle valanghe a lastroni asciutte effettuate da Roch (1966) e Perla (non pubblicato). I parametri sono i seguenti:

- densità della neve comprese tra $150 - 400 \text{ Kg/m}^3$;
- tensione verticale $0.01 - 0.1 \text{ bar}$;

- tre incrementi di spostamenti imposti: $8,95 \text{ mm/h}$, $0,73 \text{ mm/h}$ e $0,13 \text{ mm/h}$. Questi tassi di spostamento hanno provocato rottura del campione per tempi dell'ordine rispettivamente di 0,25 ore, 3 ore e 15 ore;
- le temperature delle prove sono nel range -6° e -10° , che corrispondono a valori ordinari per valanghe di neve;
- altri parametri registrati includono la durezza in situ stimata con il metodo svizzero (Schaefer e altri, 1952) e il tipo di cristallo fornito da Sommerfeld e LaChapelle (1970). Il diametro medio del cristallo è stato stimato esaminando il campione su un rettile millimetrico al microscopio.

Furono condotti 34 test dei quali, per semplicità, si riportano solo i dati graficati. Questi risultati sono stati ottenuti pensando allo studio e alla simulazione della rottura per taglio in un sottile strato di neve alla base di una valanga a lastroni, pertanto, sembra che i risultati saranno molto utili in qualsiasi formulazione di condizioni al contorno alla base dei lastroni di neve. (McClung, 1977)

Sussiste il problema dell'aleatorietà delle caratteristiche della neve, quindi, McClung propose di dividere i provini in due categorie:

- campioni sottoposti alle due velocità di deformazioni più basse;
- campioni sottoposti alla velocità maggiore.

Un esempio di un test di categoria 1 è riportato in Figura 2.11: vengono mostrate sollecitazioni taglianti che aumentano continuamente con lo spostamento orizzontale così da non poter definire una vera e propria rottura, contemporaneamente alla compattazione verticale del provino. In letteratura questo comportamento viene denominato "hardening".

Il test di categoria 2 mostra un comportamento definito come "softening". In queste prove lo sforzo di taglio aumenta fino a raggiungere un picco di resistenza con uno spostamento caratteristico. Nei successivi spostamenti si osserva una progressiva perdita di capacità fino ad arrivare a ottenere un plateau orizzontale in cui si ha solamente la resistenza al taglio residua. Sul piano degli spostamenti verticali si osserva una dilatanza per via dell'assestamento iniziale. Il concetto di dilatanza descrive la variazione di volume del materiale durante la prova e come essa influenza lo stato tenso-deformativo dello stesso. Si riporta uno di questi test in Figura 2.12.

I materiali softening prima di arrivare a rottura mostra il formarsi di una zona ad elevata densità di cricche, più il picco di resistenza. Presentando micro-cricche localizzate in una banda di taglio, cioè un luogo dove si creano queste piccole discontinuità di legame e si concentrano le deformazioni; tuttavia questa shear-band non richiede presenza di cricche già esistenti nella medesima zona, ma possono essere originate da uno strato di neve intatta che in seguito allo stato tensionale si fessurerà. In natura, dove si formerà la discontinuità che darà origine alla valanga, le due situazioni coesistono: zone con cricche e zone intatte saranno limitrofe, seguiranno fenomeni di concentrazioni delle tensioni, poi formazione della banda e infine il lastrone di neve

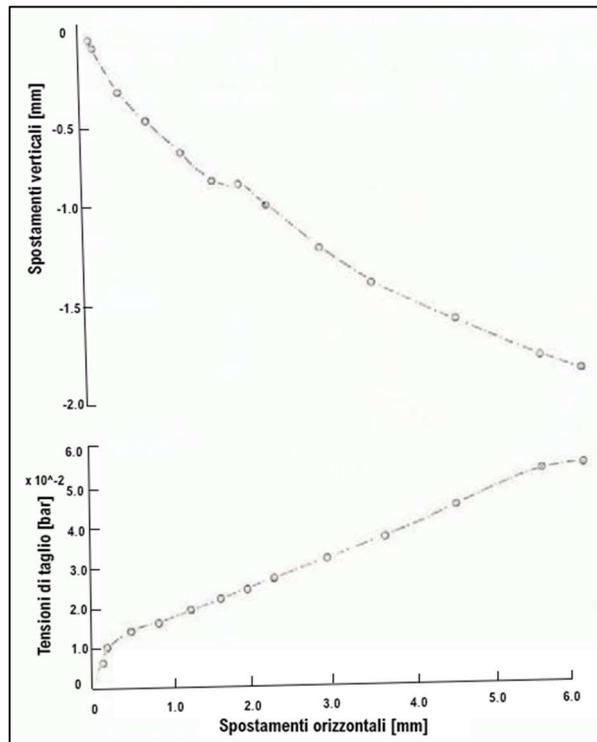


Figura 2.11: Curve tipiche della sollecitazione di taglio rispetto allo spostamento orizzontale e dello spostamento verticale rispetto allo spostamento orizzontale per un campione che mostra incrudimento a deformazione (campione numero 33), (McClung, 1977). (Modificato da Vigna, 2021)

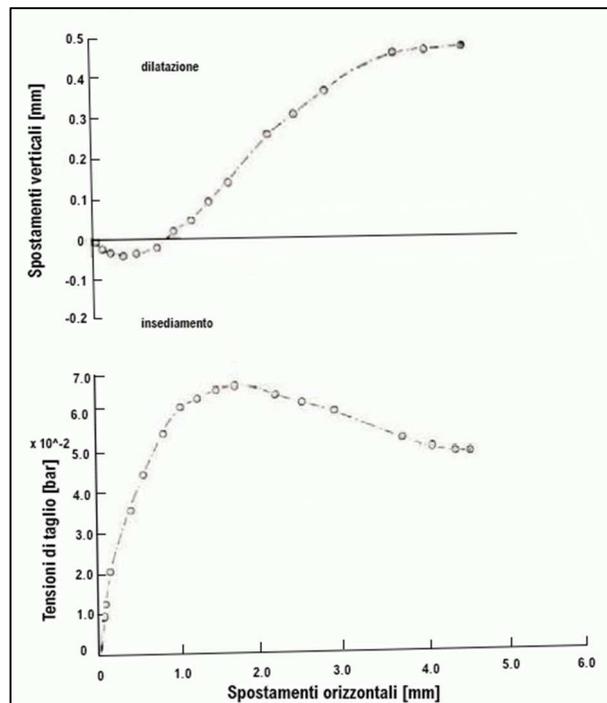


Figura 2.12: Curve tipiche della sollecitazione di taglio rispetto allo spostamento orizzontale e dello spostamento verticale rispetto allo spostamento orizzontale per un campione che mostra un rammollimento della deformazione (campione numero 30), (McClung, 1977). (Modificato da Vigna, 2021)

In Figura 2.13 viene mostrata un'altra prova di taglio in cui si è voluto analizzare nello specifico come si creano queste micro-cricche nella banda con l'emissione di onde sonore. (McClung and Schaerer, 1953)

La formazione di valanghe è determinata, in primo luogo, dalle proprietà meccaniche della neve e dal suo cedimento a causa delle sollecitazioni applicate. La rottura per taglio della neve asciutta consiste in una complessa rottura progressiva dei legami all'interno di essa fino a formare una banda di taglio ove tutti vengono recisi.

Prove sperimentali condotte da C. Sigrist. (McClung and Schaerer, 1953), dell'Istituto Federale Svizzero per la Ricerca sulla Neve e sulle Valanghe, mostrano come anche la cricca ha un comportamento softening e i dati di tale sperimentazione sono riassunti in Figura 2.14.

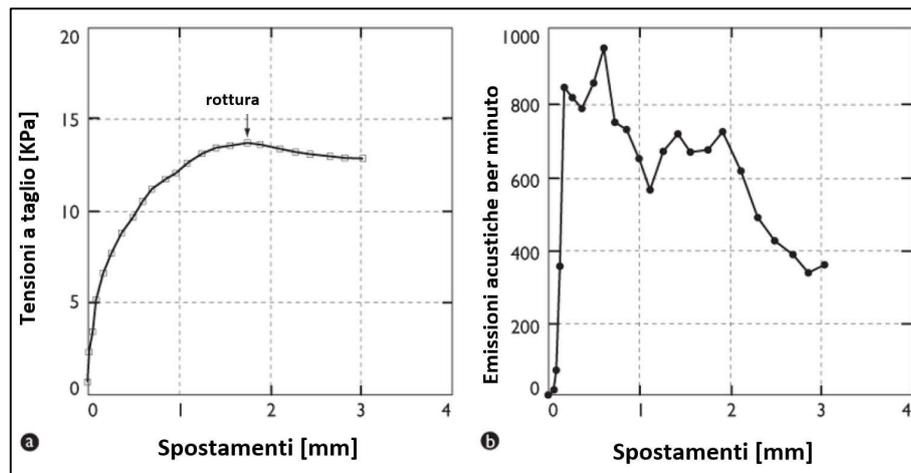


Figura 2.13: a: rottura per taglio (softening) della neve alpina deformata a 0,1 mm / min. La rottura si ottiene quando viene raggiunto un picco sulla curva. b: Andamento delle emissioni acustiche durante la rottura per taglio. La ripartizione della struttura è progressiva con il maggior tasso di emissioni prima del picco. La temperatura di prova è -2 °C, (McClung and Schaerer, 1953). (Modificato da Vigna, 2021)

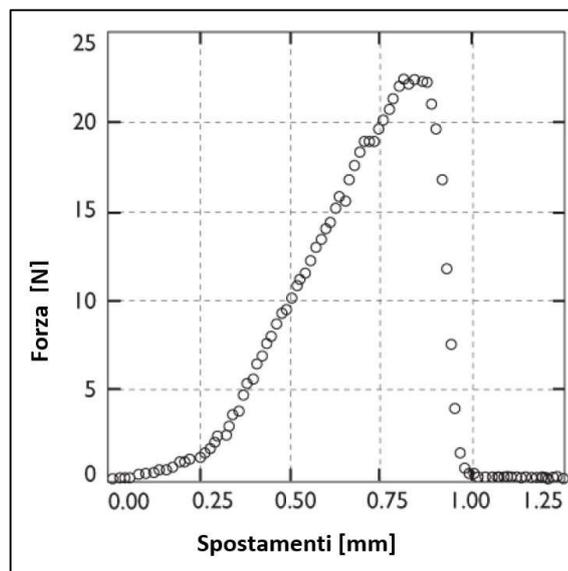


Figura 2.14: Curva forza-spostamento durante la frattura da trazione della neve che mostra un softening, (McClung and Schaerer, 1953). (Modificato da Vigna, 2021)

Se si vuole analizzare il problema dell'instabilità da un punto di vista fisico occorre riferirsi allo schema di Figura 2.15 e analizzare le forze in gioco [Eq. 2.3]:

$$\tau_D = \rho gh \cdot \sin\psi \quad [\text{Eq. 2.3}]$$

condizione di stabilità : $\tau_D \leq \tau_R$

Dove:

- τ_D è lo sforzo di taglio a cui è soggetto il blocco;
- ρgh è il peso del blocco per unità di lunghezza;
- τ_R è la resistenza al taglio della neve.

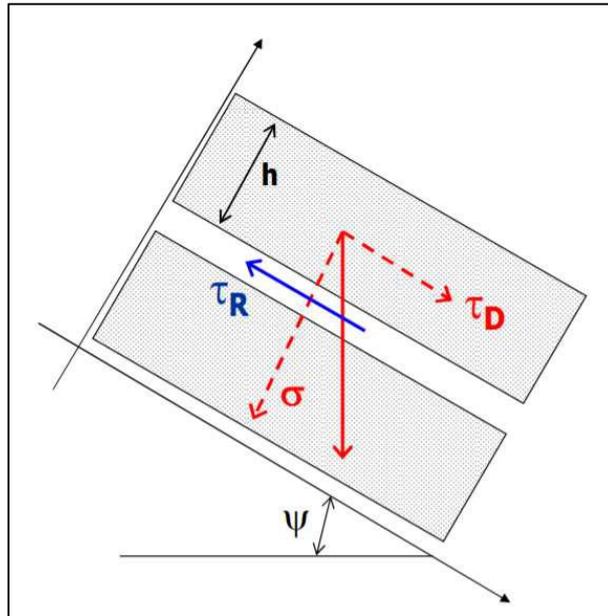


Figura 2.15: Equilibrio analizzato tra due blocchi di neve.

La resistenza al taglio della neve può essere idealizzata come avente due componenti fondamentali: coesione e attrito. Come già menzionato, la coesione è quella caratteristica della resistenza che stabilisce il tipo di valanga: essa dipende da come i granelli di neve sono legati tra loro, cioè dalle loro forze di legame e dalla densità degli stessi (numero di legami per unità volumica), che è correlato alla densità della neve. (McClung and Schaerer, 1953)

Ci sono tre condizioni che favoriscono una bassa coesione, cioè (McClung and Schaerer, 1953):

- temperature fredde, rallentano la formazione dei legami e, allo stesso tempo, temperature troppo alte che tendono a far sciogliere la neve sciolgono anche i legami;
- assenza di vento durante la nevicata, la neve viene poco compattata quindi si creano pochi nuovi legami;
- bassa densità corrisponde a dire basso numero di legami per unità di volume.

L'attrito interno è importante solo per le valanghe a lastroni perché nelle altre, a debole coesione, è praticamente nullo (Schweizer, Jamieson and Schneebeli, 2003). Questa resistenza si svolge come due strati infinitesimi adiacenti che tentano di scivolare reciprocamente, ma nascono forze che tentano di impedire tale movimento: dipende principalmente dalla consistenza (tipo, dimensione e forma dei grani), dal contenuto di acqua e dal peso degli strati

di neve soprastanti (che costringe i grani insieme a resistere al movimento). L'attrito tende ad essere nulla in superficie e aumentare sempre di più con la profondità per svariati fattori, il più rilevante è l'aumento delle tensioni geostatiche.

Eseguendo prove di taglio con differenti sforzi normali si ottiene un involucro di rottura esprimibile alla Mohr-Coulomb di Figura 2.16 e di equazione [Eq. 2.4]:

$$\tau_R = C + \sigma_n \cdot \operatorname{tg}\varphi + (\rho gh \cdot \cos\psi)\operatorname{tg}\varphi \quad [\text{Eq. 2.4}]$$

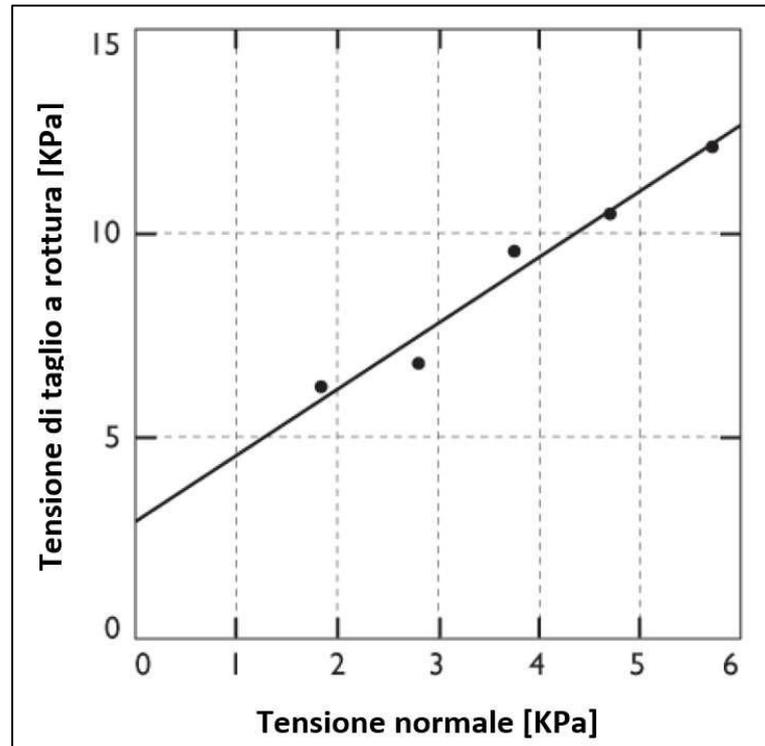


Figura 2.16: Risultati della rottura per taglio di cinque provini simili sottoposti a pressione normale diversa. La coesione (forza a pressione normale zero) è di circa 3 kPa; l'attrito aumenta in modo approssimativamente lineare con la pressione normale da zero (a pressione normale zero) a 10 kPa (a pressione normale di 6 kPa), (McClung and Schaerer, 1953). (Modificato da Vigna, 2021)

In Figura 2.17 si riporta una considerazione fatta da McClug conseguentemente ai suoi esperimenti con le prove di taglio. Si può osservare cosa succede se in uno strato di neve, a seguito di spostamenti e/o tensioni, si ha un comportamento softening: nasce uno sforzo di trazione per due motivi:

- per la concentrazione della sollecitazione dovuta al cambiamento delle condizioni al contorno quando questa scende dal picco al residuo;
- per la riduzione dello sforzo di taglio basale dallo stress gravitazionale del peso proprio al valore residuo, al di fuori della regione in cui si sta verificando il softening.

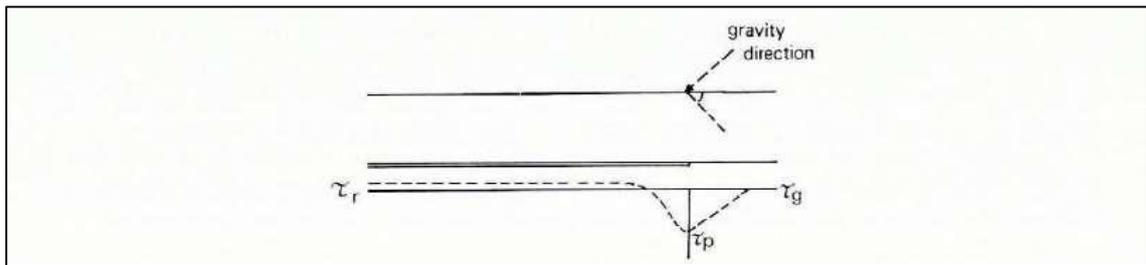


Figura 2.17: Schema delle condizioni di sollecitazione di taglio basale in funzione della distanza per una valanga a lastroni con uno strato debole che mostra un rammollimento da sforzo. Lo sforzo di taglio gravitazionale del corpo, lo sforzo di taglio di picco e lo sforzo di taglio residuo sono indicati con τ_g , τ_p e τ_r . (McClung, 1977)

Entrambi questi effetti, in generale, lavorerebbero per aumentare le sollecitazioni di trazione sul corpo del lastrone e, quindi, promuoverebbero la frattura da trazione. Analisi sulle fratture su circostanze che hanno provocato valanghe (Roch, 1966; Peria, inedito), mostrano cedimenti a sollecitazioni sotto al peso proprio inferiori ai valori di resistenza al taglio misurati sul campo con telai di taglio. Se questi ultimi misurano, vicino alla condizione di picco, il comportamento softening si fornisce solo una spiegazione parziale dei dati in campo misurati sulla linea di frattura perché ci si aspetterebbe che la sollecitazione data dal peso proprio superi la condizione di picco. La spiegazione più plausibile è l'effetto scala, cioè si ha una diminuzione della forza resistente in sito per la maggior presenza di difetti in questo strato rispetto alle ridotte dimensioni di un provino. (McClung, 1977)

3 APPROCCI ALLA MODELLAZIONE FISICA

Uno schema universalmente accettato sugli strumenti modellistici per lo studio della propagazione valanghe è stato fornito da Harbitz nel 1988: tutt'oggi ci sono essenzialmente approcci empirici e approcci dinamici, con numerose varianti, così come indicato in Figura 3.1.

I modelli empirici si basano su eventi storici avvenuti nella zona di studio e la loro trattazione statistica. Lo svantaggio è che servono eventi rappresentativi ben documentati e che comunque si riuscirebbe solo a stimare la distanza di propagazione o "runout": per esempio in questo lavoro di tesi non è stato possibile usufruire di tali dati. Per "ben documentati" si intende avere a disposizione misure effettuate su eventi passati: per esempio la volumetria dell'evento, distanza percorsa, condizioni climatiche, danni causati ecc.

Per modelli dinamici invece si intendono modelli fisico-matematici che tentano di descrivere il fenomeno il più veritieramente possibile, in particolare mirano a descrivere dal momento del distacco all'arresto finale mettendo in gioco tutte le grandezze dinamiche: velocità, altezza di scorrimento, pressioni, interazione con suolo/vegetazione, ecc.

3.1 Modelli empirici

Dalla classificazione mostrata in i modelli empirici si dividono in tre tipologie:

1. I modelli regressivi: sono i primi modelli sviluppati dal *Norwegian Geotechnical Institute* (NGI) (Bovis e Mears, 1976; Lied e Bakkehøi, 1980) e quindi conosciuti come "modelli statistici-topografici norvegesi", si basano su analisi statistiche di distanze di arresto di siti valanghivi ben descritti e si mettono anche in correlazione con le caratteristiche topografiche dei siti originali.

In Figura 3.3 si riporta lo schema sul quale si basa il metodo, sono stati analizzati oltre 200 eventi in Norvegia. I ricercatori proposero di esprimere la massima distanza di arresto con l'angolo α che contiene le principali caratteristiche topografiche del sito:

- ϑ = inclinazione media della zona di distacco misurato sui primi 100 m di dislivello dal punto più in quota;
- β = pendenza media della zona di distacco a dove inizia la deposizione cioè il denominato "punto β ", definito come quel punto sul pendio con pendenza di 10° ;
- H = dislivello totale del sito;
- R = larghezza massima della zona di distacco;
- T = larghezza minima della zona di scorrimento;
- D = larghezza massima della zona di arresto;
- y = grado di concavità del profilo longitudinale del pendio, descritto dalla derivata seconda del polinomio di secondo grado che meglio descrive il profilo longitudinale del pendio.

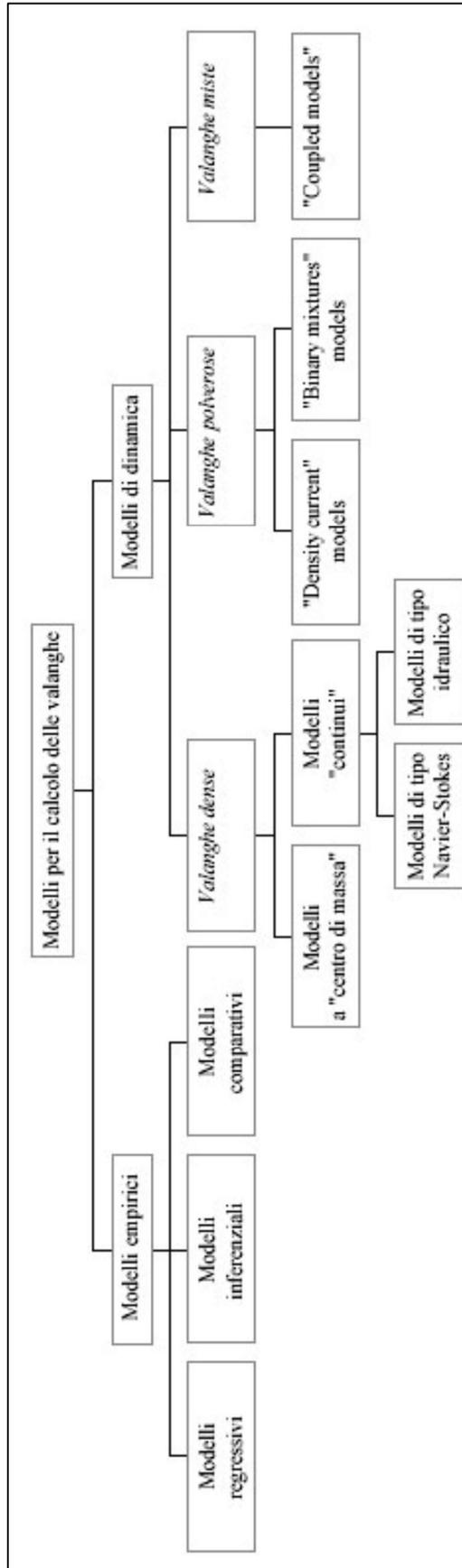


Figura 3.2: Schema delle metodologie disponibili per le analisi di propagazione. (Barbolini, 2004)

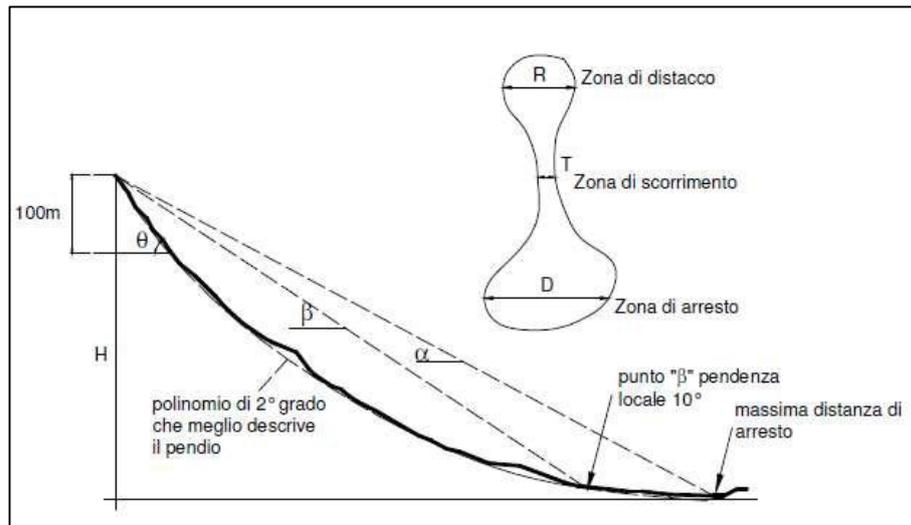


Figura 3.3: Grandezze topografiche-geometriche che entrano nel modello norvegese. (Barbolini, 2004)

Per trovare α si usa una regressione lineare ad un solo parametro cioè β ([Eq. 3.1]):

$$\alpha = A\beta + B \quad [\text{Eq. 3.1}]$$

$A, B = \text{parametri di regressione}$

Questo metodo negli anni fu applicato a molteplici regioni europee, oltre la Norvegia, confermandone la validità del metodo (Barbolini, 2004). Vengono riportate in Figura 3.4 le relazioni predittive elaborate in suddetti studi.

Regioni montuose (Riferimenti)	No. di valanghe	Ipotesi	Equazioni regressive	Accuratezza	
				DS (°)	R ² (-)
Norvegia (Bakkehoi et al., 1983)	206	Tutte le valanghe	$\alpha = 0,96\beta - 1,4$ $\alpha = 0,92\beta - 7,9 \cdot 10^{-4}H + 0,024Hy^0 + 0,04$	2,3 2,28	0,85 0,85
	20	H > 900(m) $\beta \leq 30^\circ$	$\alpha = 0,94\beta + 0,035\theta - 2,6$	1,02	0,81
Italia Bacino del Cordevole (Barsanti, 1990)	53	Tutte le valanghe	$\alpha = 0,89\beta + 0,66$ $\alpha = 0,89\beta - 0,62H\beta y^0 + 27,36Hy^0 - 2,6$	1,62 1,31	0,73 0,82
Canada (McClung&Mears, 1991)	126	Tutte le valanghe	$\alpha = 0,93\beta$	-	0,75
Alaska (McClung&Mears, 1991)	52	Tutte le valanghe	$\alpha = 0,74\beta + 3,67$ ($\alpha = 0,86\beta$)	-	0,58
Sierra Nevada (McClung&Mears, 1991)	90	Tutte le valanghe	$\alpha = 0,67\beta + 2,5$ ($\alpha = 0,76\beta$)	-	0,6
Colorado (McClung&Mears, 1991)	130	Tutte le valanghe	$\alpha = 0,63\beta + 4,68$ ($\alpha = 0,8\beta$)	-	0,5
Giappone (Fujisawa et al., 1993)	66	Tutte le valanghe	$\alpha = 0,5\beta + 0,35\theta - 1,01$	3,8	0,63
	18	Non investono abitazioni L > 100m	$\alpha = 0,92\beta + 490,4y^0 - 1,49$	-	0,98
Italia Val di Rabbi (Castaldini, 1994)	54	Tutte le valanghe	$\alpha = 0,87\beta + 1,71$ $\alpha = 0,94\beta - 0,36H\beta y^0 + 4,36\theta\beta y^0 + 6,89 \cdot 10^{-6}H\beta - 1,77$	1,86 1,45	0,85 0,91
	80	Tutte le valanghe	$\alpha = 0,946\beta - 0,83$ $\alpha = 0,97\beta - 0,6 \cdot 10^{-6}Hy^0 - 0,032y^0 - 0,07\theta + 1,54$	1,5 1,3	0,92 0,94
Francia (Adjel, 1995)	168	Tutte le valanghe	$\alpha = 1,14\beta - 4,66$ $\alpha = 0,82\beta + 2,82$	0,87 2,69	0,77 0,66
	45	Tutte le valanghe	$\alpha = 0,85\beta$	2,3	0,71
Islanda (Johannesson, 1998)	216	Tutte le valanghe	$\alpha = 0,97\beta - 1,2$	1,74	0,87
Pirenei Catalani (Furdada et al., 1998)	64	Profili parabolici	$\alpha = 0,86\beta + 1,05$	1,98	0,75
Valtellina (Fellini, 1999)	94	Tutte le valanghe	$\alpha = 0,943 \beta$	1,4	0,92
	17	Valle di Livigno	$\alpha = 0,882 \beta$	1,93	0,88

Figura 3.4: Sintesi di valori proposti da diversi autori (tra cui Barsanti (1990), Castaldini (1994) e Fellini (1999)) per diverse località montuose. (Barbolini, 2004)

2. Il modello inferenziale detto “modello del rapporto di arresto” sviluppato storicamente per studi regionali (McClung e Lied, 1987). Sfrutta sempre una banca di dati storici noti come nel metodo precedente, però facendo riferimento allo schema di Figura 3.5 si trova un nuovo parametro topografico adimensionale RR (rapporto d’arresto) [Eq. 3.2]:

$$RR = \frac{tg(\beta) - tg(\alpha)}{tg(\alpha) - tg(\delta)} \quad [Eq. 3.2]$$

Dove:

- δ = inclinazione media della zona di arresto;
- X_β = proiezione orizzontale della zona attiva;
- ΔX = proiezione orizzontale della zona d’arresto.

Studi statistici dei casi storici rapportato a differenti aree geografiche hanno mostrato che α è una caratteristica dipendente dal sito mentre RR è una variabile statisticamente indipendente dalla topografia: in generale RR ha una distribuzione alla Gumbel.

Sia P la probabilità di non superamento cioè quella funzione che esprime che la grandezza RR assume un valore non superiore ad una certa soglia:

$$\text{legge cumulata di probabilità: } P(RR) = e^{-e^{\alpha(RR-u)}} \quad [Eq. 3.3]$$

I parametri “a” e “u” sono rispettivamente i parametri di posizione e di scala della Gumbel: si possono ottenere con il “metodo dei momenti” sui dati di RR a disposizione, di seguito si ricordano le relazioni dirette:

$$\alpha = \frac{1.2825}{\sigma[RR]} \quad u = m[RR] - 0.45\sigma[RR] \quad [Eq. 3.4]$$

Mediante passaggi matematici si può ottenere la relazione tra il valore del rapporto di arresto con determinata probabilità di non superamento, la media e la deviazione standard del campione [Eq. 3.5]:

$$RR(P) = m[RR] - \sigma[RR](0.45 + 0.7797 \ln(-\ln(P))) \quad [Eq. 3.6]$$

Il valore di P deve essere fissato in base al rischio accettato, si passa a calcolare RR e infine la distanza di arresto per il sito.

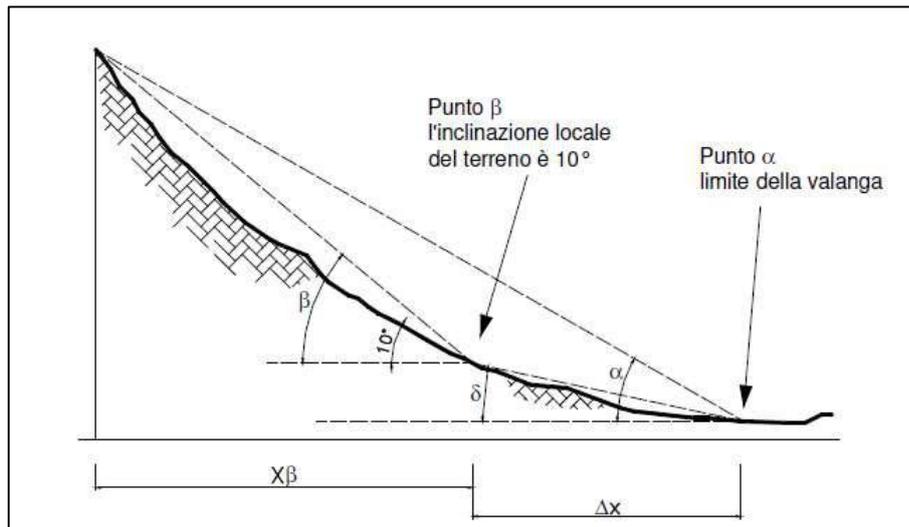


Figura 3.5: Parametri per il metodo "modello del rapporto di arresto". (Barbolini, 2004)

- Il modello inferenziale di analisi statica "sito specifica" (Barbolini e Cappabianca, 2002) dei dati storici: normalmente i metodi empirici permettono di calcolare solo la massima distanza di arresto, mentre questo modello innovativo mira a determinare un legame sito-specifico tra distanza di arresto e tempo di ritorno della valanga. Il metodo prevede di analizzare un campione di dati storici registrati sistematicamente sul sito in un certo intervallo di tempo. Siccome, a differenza di altri metodi, non va a selezionare solo gli eventi massimi è possibile che per alcuni non vi siano eventi o che se ne abbiano molteplici: consegue che non si farà un'analisi dei valori massimi annui ma all'analisi statistica delle serie di durata parziale (in letteratura prendono il nome di "metodo delle eccedenze" o "metodo di tipo PD").

3.2 Modelli dinamici

Dalla si vede come i modelli dinamici si distinguono in base al tipo di valanga da descrivere; le tipologie più frequenti e anche dannose sull'arco alpino italiano sono quelle dense rispetto a quelle di carattere polveroso.

In base all'approccio modellistico esistono due tipi di modellazione:

- modelli "a centro di massa";
- modelli di tipo "continuo".

In letteratura si distinguono vari tipi di modello per le valanghe dense (per le polverose si usano equazioni diverse e il problema è di minor interesse pratico):

- "density current models", sono modelli monofase cioè considerano neve e aria come un continuo equivalente;
- "binary mixture models", sono modelli bifase in cui si trattano separatamente le dinamiche dei due mezzi coinvolti, quindi sarà necessario scrivere le equazioni di conservazione della massa e quantità di moto per ognuno di essi;

- metodo ibrido tra i due precedenti in cui compaiono bilanci di massa separati e un solo bilancio di quantità di moto;
- “coupled models” cioè modelli per le valanghe miste (dense e polverose) sono stati proposti recentemente (Naaim, 1999; Bartelt *et al.*, 2000), ma ancora scarsamente affidabili.

3.2.1 Modelli a centro di massa

Detti anche di “tipo puntuale” sono i primi modelli messi in atto per la modellazione dinamica di questi fenomeni, l’idea è di descriverne il moto solo del baricentro della massa valanghiva lungo una predefinita traiettoria rappresentativa del pendio: si ha un unico grado di libertà cioè l’ascissa curvilinea del baricentro.

L’equazione da risolvere in questo modello è la legge di conservazione della quantità di moto:

$$F_{ext}(t) = \frac{d}{dt} [M(t)v(t)] = v(t) \frac{dM(t)}{dt} + M(t) \frac{dv(t)}{dt} \quad [Eq. 3.7]$$

Dove:

- $M(t)$ = massa complessiva della valanga al variare del tempo, cioè nel suo moto potrà accrescersi erodendo o diminuire nelle fasi di deposito;
- $v(t)$ = velocità del baricentro;
- $F_{ext}(t)$ = risultante delle forze estere agenti sulla massa.
- Se si ipotizza massa della valanga costante il bilancio diviene: $F_{ext}(t) = M \cdot a(t)$.

Tra i modelli “a centro di massa” si distinguono il modello PCM (Perla *et al.*, 1980) ed il modello di “Voellmy” (Voellmy, 1955).

3.2.2 Modelli di tipo continuo

La schematizzazione del mezzo in questi modelli è quella riportata in Figura 3.6. Per descriverne la dinamica vengono tirate in ballo le equazioni di bilancio della dinamica dei continui deformabili (massa e quantità di moto): permettendo di conoscere in ogni istante queste grandezze fisiche.

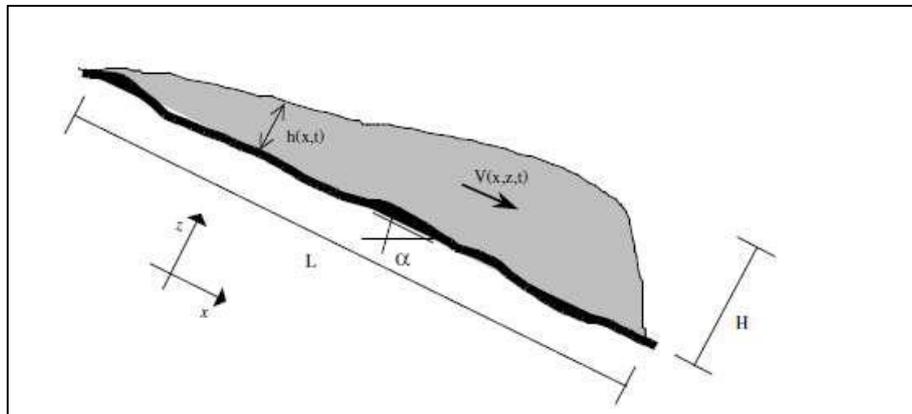


Figura 3.6: Schema del mezzo continuo equivalente per una valanga densa: ordini di grandezza comuni sono che il rapporto $H/L \approx 10^{-2}$. (Barbolini, 2004)

Dal punto di vista matematico serve un sistema di equazioni a cui far riferimento, nel quale sono inserite leggi costitutive per la descrizione ottimale, in letteratura sono così definite:

- modelli basati sulle equazioni di Navier-Stokes che a loro volta si possono suddividere in: modelli newtoniani e modelli viscosi alla Bingham;
- modelli di tipo idraulico (o di tipo integrale) basati sulle equazioni di St. Venant (o delle "acque basse"), anche loro successivamente divisibili in base al modello reologico scelto.

4 TEORIA MATEMATICA ALLA BASE DEL PROBLEMA FISICO

La descrizione matematica in un campo di moto di una valanga, o una colata detritica, passa attraverso un set di equazioni differenziali alle derivate parziali che esprimono la conservazione di grandezze scalari quali massa ed energia e vettoriali, quali la quantità di moto.

In generale, se si considera una parte dello spazio compresa in un volume di controllo, il principio di conservazione di una grandezza Γ può essere espressa come la differenza della portata in ingresso e in uscita. Ai precedenti termini possono affiancarsi quelli di scambio attraverso la superficie che delimita il volume di controllo o sorgenti di generazione all'interno dello stesso. Nella trattazione si farà riferimento all'elemento di volume di Figura 4.1.

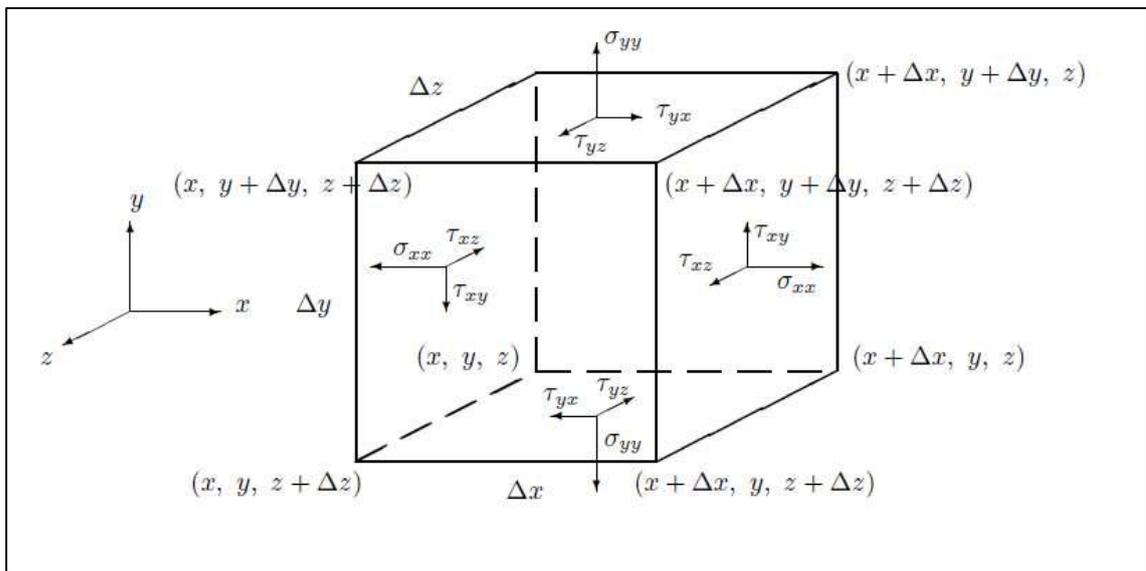


Figura 4.1: Elemento di volume considerato. (Soldati, 2008)

Di seguito sono quindi esplicitate le equazioni necessarie per la descrizione matematica del problema.

4.1 Conservazione della massa

Con riferimento alla Figura 4.1, se si utilizza come volume di controllo ΔV il parallelepipedo di lati Δx , Δy e Δz e come densità $\rho(t)$ allora la massa contenuta in esso sarà:

$$\text{massa istantanea: } m(t) = \rho(t) \cdot \Delta x \Delta y \Delta z \quad [\text{Eq. 4.1}]$$

$$\text{variabile accumulo: } \frac{d\rho}{dt} \cdot \Delta x \Delta y \Delta z \quad [\text{Eq. 4.2}]$$

Analizzando i flussi lungo la direzione x si trova:

$$\text{flusso in ingresso in posizione } x: \left. \frac{d\rho v_x}{dx} \right|_x \cdot \Delta y \Delta z \quad [\text{Eq. 4.3}]$$

$$\text{flusso in uscita in posizione } x + \Delta x: \frac{d\rho v_x}{dx} \Big|_{x+\Delta x} \cdot \Delta y \Delta z \quad [\text{Eq. 4.4}]$$

Analoghi flussi possono essere considerati per le altre facce in modo tale da ottenere un bilancio complessivo di massa pari a

[Eq. 4.5]:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{dt} \cdot \Delta x \Delta y \Delta z = & \left(\frac{d\rho v_x}{dx} \Big|_{x+\Delta x} - \frac{d\rho v_x}{dx} \Big|_x \right) \cdot \Delta y \Delta z + \left(\frac{d\rho v_y}{dy} \Big|_{y+\Delta y} - \frac{d\rho v_y}{dy} \Big|_y \right) \\ & \cdot \Delta x \Delta z + \left(\frac{d\rho v_z}{dz} \Big|_{z+\Delta z} - \frac{d\rho v_z}{dz} \Big|_z \right) \cdot \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad [\text{Eq. 4.5}]$$

Nella [Eq. 4.5] i termini $\frac{d\rho v_x}{dx} \Big|_{x+\Delta x}$, relativi in questo caso al flusso di massa in direzione x valutato in posizione $x + \Delta x$, possono essere espressi fermandosi al primo termine dello sviluppo in serie di Taylor come:

$$\frac{d\rho v_x}{dx} \Big|_{x+\Delta x} = \rho v_x(x) + \frac{d\rho v_x}{dx} \Big|_x \cdot \Delta x$$

Questa approssimazione è valida solo per quantità infinitesime cioè $\Delta x, \Delta y, \Delta z \rightarrow 0$. Sostituendo i termini relativi la variazione di velocità nel precedente bilancio si ottiene la cosiddetta "Equazione di Continuità":

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho v_z}{\partial z} \quad [\text{Eq. 4.6}]$$

Anche scrivibile in forma vettoriale:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \mathbf{v}) = 0 \quad [\text{Eq. 4.7}]$$

Con ipotesi di fluido incomprimibile, come spesso avviene nei modelli, l'equazione di continuità si semplifica notevolmente e diviene:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad [\text{Eq. 4.8}]$$

Osservazione: il numero di Mach (Ma) è il rapporto tra la velocità di un corpo in un fluido e la velocità del suono nello stesso: questo numero permette di stabilire l'importanza degli effetti di comprimibilità. Se il numero è minore di 0,3 l'errore che si commette, considerando la densità costante, è trascurabile. (Stc, 2007)

Un analogo risultato, in forma integrale, può essere ottenuto con un bilancio di massa effettuato su un volume finito V del campo di moto delimitato da una superficie S:

$$\int_V \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \mathbf{v}) \right] dV = 0 \quad [\text{Eq. 4.9}]$$

Se si definisce "l'operatore differenziale sostanziale" come:

$$\frac{D(*)}{Dt} = \frac{\partial(*)}{\partial t} + v_x \frac{\partial(*)}{\partial x} + v_y \frac{\partial(*)}{\partial y} + v_z \frac{\partial(*)}{\partial z} \quad [\text{Eq. 4.10}]$$

Ipotizzando la densità costante, il primo termine del bilancio di massa si può scrivere come:

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v} \quad [\text{Eq. 4.11}]$$

Per capire a fondo il significato dell'operatore $\frac{D(*)}{Dt}$, che in questo ambito prende il nome di "Derivata sostanziale", si considera un elemento di fluido al tempo t in posizione x, y, z e successivamente al tempo $t+dt$, cioè analizzando il moto lungo la direzione x e successivamente estendendone il concetto alle altre direzioni (Soldati, 2008):

$$x(t + dt) = x(t) + \frac{\partial x}{\partial t} \cdot dt = x(t) + v_x \cdot dt \quad [\text{Eq. 4.12}]$$

Sia $\mu(x, y, z, t)$ una proprietà del fluido dipendente dalla posizione e dal tempo:

$$\mu(t + dt) = \mu(t) + \frac{\partial \mu}{\partial t} dt + \frac{\partial \mu}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial \mu}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial \mu}{\partial z} \Delta z \quad [\text{Eq. 4.13}]$$

Essendo $\Delta x = v_x dt, \Delta y = v_y dt, \Delta z = v_z dt$, si avrà che:

$$\mu(t + dt) = \mu(t) + \left(\frac{\partial \mu}{\partial t} + v_x \frac{\partial \mu}{\partial x} + v_y \frac{\partial \mu}{\partial y} + v_z \frac{\partial \mu}{\partial z} \right) dt \quad [\text{Eq. 4.14}]$$

Ma questo risultato è pari alla seguente derivata:

$$\frac{D\mu}{Dt} = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{\mu(t + dt) - \mu(t)}{dt} = \frac{\partial \mu}{\partial t} + v_x \frac{\partial \mu}{\partial x} + v_y \frac{\partial \mu}{\partial y} + v_z \frac{\partial \mu}{\partial z} \quad [\text{Eq. 4.15}]$$

La derivata $\frac{D(*)}{Dt}$ non è nient'altro che una derivata rispetto al tempo presa con riferimento da un osservatore che si muove con la velocità di un elemento di fluido. (Soldati, 2008)

4.2 Conservazione della quantità di moto

Il principio di conservazione della quantità di moto stabilisce che la variazione nel volume di controllo è pari alla differenza tra la quantità di moto in ingresso e quella in uscita più la somma di tutte le forze agenti sul volume di controllo (Lavoisier, 1789); inoltre è una grandezza vettoriale che si conserva nelle tre direzioni dando luogo ad una equazione vettoriale ovvero a tre equazioni scalari.

La quantità di moto lungo x contenuta nel volume di controllo è pari a $q = \rho v_x \cdot \Delta x \Delta y \Delta z$ in cui $\rho v_x \Delta y \Delta z$ e rappresenta il flusso in ingresso dalla medesima faccia; la sua variazione nel tempo è data da:

$$q(t) = \frac{\partial \rho v_x}{\partial t} \cdot \Delta x \Delta y \Delta z \quad [\text{Eq. 4.16}]$$

Il flusso in ingresso da x è $\rho v_x \Delta y \Delta z$, mentre la quantità di moto lungo x associata a questo flusso è: $\rho v_x \Delta y \Delta z v_x(x)$. Analogamente esisterà una quantità di moto lungo y data dai flussi in y e z cioè rispettivamente $\rho v_y \Delta x \Delta z v_y(y)$ e $\rho v_z \Delta x \Delta y v_z(z)$.

Ora occorre considerare i flussi “in” e “out” quindi:

$$\begin{aligned}
 q(t) &= \frac{\partial \rho v_x}{\partial t} \cdot \Delta x \Delta y \Delta z \\
 &= (\rho v_x v_x(x) - \rho v_x v_x(x + \Delta x)) \Delta y \Delta z \\
 &\quad + (\rho v_x v_y(y) - \rho v_x v_y(y + \Delta y)) \Delta x \Delta z \\
 &\quad + (\rho v_x v_z(z) - \rho v_x v_z(z + \Delta z)) \Delta x \Delta y + \sum F_{x,i}
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 4.17}$$

$\sum F_{x,i}$ = risultante delle forze esterne lungo x. Sull’elemento agiscono: forze di volume, forza di gravità (che ha componente secondo x), sforzi normali e tangenziali.

La forza che il fluido esterno esercita sulla faccia normale a x è pari a $\sigma_x \Delta y \Delta z$, ma in generale, ha componenti normali e tangenziali:

$$\sigma_x = \sigma_{xx} \mathbf{i} + \tau_{xy} \mathbf{j} + \tau_{xz} \mathbf{k}
 \tag{Eq. 4.18}$$

Il fluido dal lato della faccia con valore più grande della coordinata esercita uno sforzo di segno positivo su quello che ha valore minore della coordinata; ne consegue che gli sforzi normali positivi mettono in tensione il volume di controllo, mentre quelli negativi lo sottopongono a compressione.

Come calcolato per il bilancio di masse in precedenza, si esegue un bilancio di forze lungo x:

$$\begin{aligned}
 &(\sigma_{xx}(x + \Delta x) - \sigma_{xx}(x)) \Delta y \Delta z + (\tau_{yx}(y + \Delta y) - \tau_{yx}(y)) \Delta x \Delta z \\
 &\quad + (\tau_{yx}(y + \Delta y) - \tau_{yx}(y)) \Delta x \Delta y
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 4.19}$$

Sostituendo nel bilancio di quantità di moto e sviluppando in serie di Taylor al primo ordine, trascurando gli elementi superiori, si ottiene:

$$\frac{\partial \rho v_x}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_x v_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_x v_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho v_x v_z}{\partial z} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho g_x
 \tag{Eq. 4.20}$$

Cambiando i pedici si possono scrivere le medesime equazioni lungo y e z: in notazione vettoriale e ipotizzando densità costante, le tre componenti dell’equazione di conservazione della quantità di moto possono essere espresse come segue:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{v} \mathbf{x} \mathbf{v} \right) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g}
 \tag{Eq. 4.21}$$

$\boldsymbol{\sigma}$ è il tensore degli sforzi che risulta essere simmetrico in virtù della conservazione della quantità di moto angolare, infatti è possibile dimostrare come tale grandezza si conserva lungo ogni direzione.

Considerando il momento delle forze attorno all’asse z:

$$M_z = \frac{1}{2} \left(\tau_{xy}(x) + \tau_{xy}(x + \Delta x) - \tau_{yx}(y + \Delta y) - \tau_{yx}(y) \right) \Delta x \Delta y \Delta z
 \tag{Eq. 4.22}$$

Il momento della quantità di moto sull'elementino di volume è (Soldati, 2008):

$$I_z = \int_{\Delta V} \rho r^2 \Omega dx dy dz = \rho r_g^2 \Omega \Delta x \Delta y \Delta z \quad [\text{Eq. 4.23}]$$

Dove:

- r = distanza dall'asse z ;
- Ω = velocità angolare di rotazione attorno a z ;
- $r_g^2 = \frac{\Delta x \Delta y}{6}$;

La conservazione della quantità di moto angolare impone:

$$\lim_{\Delta x, \Delta y \rightarrow 0} \frac{\rho d\Omega}{6 dt} \Delta x \Delta y = \tau_{xy} - \tau_{yx} = 0 \quad [\text{Eq. 4.24}]$$

Ovviamente, analoghe considerazioni valgono anche per le altre componenti.

4.3 Conservazione dell'energia

Gli elementi che forniscono energia alla massa di un elemento di fluido sono:

- energia interna e ;
- energia cinetica $v^2/2$;
- energia potenziale gh .

Per un flusso il principio di conservazione dell'energia è l'estensione del primo principio della termodinamica: *"La portata di energia in ingresso meno la portata in uscita più il calore ed il lavoro immesso nell'unità di tempo nel volume di controllo sono pari alla variazione nel tempo dell'energia contenuta nel volume di controllo"* (R. Clausius, 1865).

Applicando tale principio all'elemento di volume $\Delta x \Delta y \Delta z$ di Figura 4.1:

$$\text{Accumulo di energia} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \left(e + \frac{v^2}{2} + gh \right) \right) \Delta x \Delta y \Delta z \quad [\text{Eq. 4.25}]$$

$$\text{Bilancio flussi convettivi lungo } x \quad [\text{Eq. 4.26}]$$

$$= \left[v_x \rho \left(e + \frac{v^2}{2} + gh \right) \Big|_x - v_x \rho \left(e + \frac{v^2}{2} + gh \right) \Big|_{x+\Delta x} \right] \Delta y \Delta z$$

$$\text{Ingresso di energia lungo } x \text{ per conduzione termica} \quad [\text{Eq. 4.27}]$$

$$= (q_x|_x - q_x|_{x+\Delta x}) \Delta y \Delta z$$

Dove q_x è la componente del vettore \mathbf{q} cioè il flusso termico per conduzione, questo termine può essere espresso con la legge di Fourier che appunto descrive la trasmissione di calore per conduzione termica:

$$\mathbf{q} = -\overline{\mathbf{k}_y} \nabla T \quad [\text{Eq. 4.28}]$$

in cui $\overline{\mathbf{k}_y}$ è il tensore della conduzione termica (ogni termine è espresso in W/mk) e T la temperatura.

Si può quantificare il lavoro compiuto sull'elemento di volume per unità di tempo, generato dalle forze viscoso e di pressione, come prodotto della forza risultante in una direzione (per esempio $\Delta y \Delta z \sigma_{xx}$) e lo spostamento ($v_x dt$).

Si ricorda dalla meccanica del continuo che $\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + \boldsymbol{\tau}$:

$$\begin{aligned} \Delta y \Delta z [& (\sigma_{xx} v_x + \tau_{xy} v_y + \tau_{xz} v_z)|_{x+\Delta x} - (\sigma_{xx} v_x + \tau_{xy} v_y + \tau_{xz} v_z)|_x] \\ & + \Delta x \Delta z [(\tau_{yx} v_x + \sigma_{yy} v_y + \tau_{yz} v_z)|_{y+\Delta y} \\ & - (\tau_{yx} v_x + \sigma_{yy} v_y + \tau_{yz} v_z)|_y] \\ & + \Delta x \Delta y [(\tau_{zx} v_x + \tau_{zy} v_y + \sigma_{zz} v_z)|_{z+\Delta z} \\ & - (\tau_{zx} v_x + \tau_{zy} v_y + \sigma_{zz} v_z)|_z] \quad e \end{aligned} \quad [Eq. 4.29]$$

Considerando densità costante si può uguagliare l'equazione [Eq. 4.25] con tutti i contributi energetici espressi nelle equazioni [Eq. 4.26], [Eq. 4.27] e [Eq. 4.28] che sono stati sviluppati in serie di Taylor, riscrivendo il tutto in forma compatta:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \left(e + \frac{v^2}{2} + gh \right) = -\nabla \cdot \mathbf{q} - \nabla \cdot p\mathbf{v} + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{v}) \quad [Eq. 4.30]$$

È importante notare che l'energia potenziale Φ viene definita come: $g = -\nabla\Phi$, in cui $\Phi = gh$; si può quindi osservare come il termine $\rho\mathbf{v} \cdot \mathbf{g}$ è il lavoro compiuto dalla forza di gravità perché Φ non è tempo-dipendente:

$$\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \rho\mathbf{v} \cdot \nabla\Phi = -\rho\mathbf{v} \cdot \mathbf{g} \quad [Eq. 4.31]$$

In un sistema flusso come quello che si sta esaminando si conserva "l'energia totale" $e + \frac{v^2}{2} + gh$, ma non "l'energia meccanica" $\frac{v^2}{2} + gh$. (Soldati, 2008)

4.4 Applicazione al caso valanghe

Facendo riferimento alla geometria di Figura 4.2 con i bilanci di massa e quantità di moto sono disponibili 4 equazioni in 12 incognite (9 elementi del tensore degli sforzi, 3 componenti della velocità e l'altezza del flusso):

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial v_x^2}{\partial x} + \frac{\partial v_x v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_x v_z}{\partial z} \right) = - \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \right) + \rho g_x \quad (2) \quad [Eq. 4.32]$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + \frac{\partial v_x v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_y^2}{\partial y} + \frac{\partial v_y v_z}{\partial z} \right) = - \left(\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} \right) + \rho g_y \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{\partial v_x v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_z v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z^2}{\partial z} \right) = - \left(\frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z \quad (4)$$

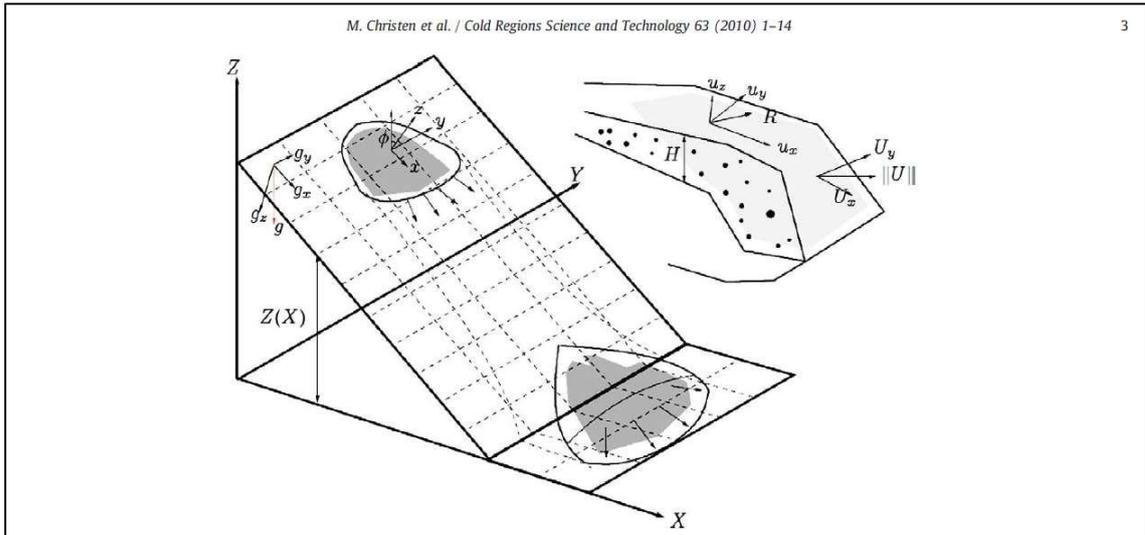


Figura 4.2: La topografia $Z(X, Y)$ è data in un quadro cartesiano, dove X e Y sono le coordinate orizzontali. La superficie induce un sistema di coordinate locale x, y, z , ed è discretizzata in modo tale che la sua proiezione sul piano X, Y si traduca in una mesh strutturata. (Christen, Bartelt and Kowalski, 2010)

Per semplificare la modellazione di valanghe dense come anche di frane sottomarine o colate detritiche, vengono aggiunte delle ipotesi a quella di fluido incomprimibile già messa in atto:

- Moto bidimensionale (Savage-Hutter model, 1989): se il flusso è sufficientemente sottile si può ipotizzare che lungo la direzione z non ci sia variazione di velocità (Figura 4.3), per sottile si intende $H/L \ll 1$;

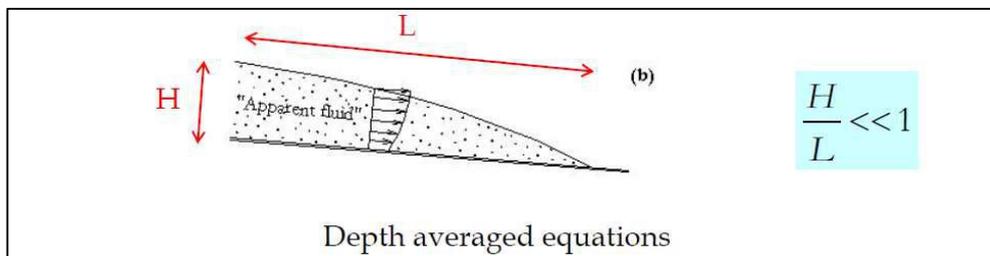


Figura 4.3: Introdotto di flussi granulari (Savage e Hunter, 1989)

- Condizione al contorno per cui: $\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = 0$, cioè il prodotto scalare del vettore velocità per il versore normale alla superficie del fluido deve essere nullo.

Applicando queste ipotesi risulterà utile successivamente aver già definito le “velocità medie sull’altezza” come:

$$\bar{v}_x = \frac{1}{h} \int_0^h v_x dz \quad \bar{v}_y = \frac{1}{h} \int_0^h v_y dz \quad \bar{v}_z = \frac{1}{h} \int_0^h v_z dz = 0 \quad [\text{Eq. 4.33}]$$

Svolgendo l’integrale della equazione (1) di [Eq. 4.32] e applicandone la regola di Leibnitz, sarà possibile semplificare il problema:

$$\int_0^h \frac{\partial v_x}{\partial x} dz + \int_0^h \frac{\partial v_y}{\partial y} dz + \int_0^h \frac{\partial v_z}{\partial z} dz = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^h v_x dz - v_x(0) \frac{\partial v_x(0)}{\partial x} - v_x(h) \frac{\partial v_x(h)}{\partial x} + \dots$$

In cui: $\frac{\partial}{\partial x} \int_0^h v_x dz = \frac{\partial(\bar{v}_x h)}{\partial x}$ e per definizione e $v_x(0) \frac{\partial v_x(0)}{\partial x} = 0$.

Quindi si può scrivere che: $\frac{\partial(\bar{v}_x h)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}_y h)}{\partial y} - v_x(h) \frac{\partial v_x(h)}{\partial x} - v_y(h) \frac{\partial v_y(h)}{\partial y}$ in cui gli ultimi due addendi rappresentano la variazione di altezza del flusso nel tempo (essa è funzione di spazio e tempo). L'equazione così modificata assume la forma:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h \bar{v}_x}{\partial x} + \frac{\partial h \bar{v}_y}{\partial y} = 0 \quad [\text{Eq. 4.34}]$$

Con passaggi simili è possibile applicare le ipotesi anche ai bilanci di quantità di moto, tuttavia quello in direzione z si andrà a perdere dal momento che si è ipotizzato che il flusso lungo questa è nullo.

Con l'applicazione di tali ipotesi si possono arrivare a scrivere le equazioni di continuità (1), di conservazione della quantità di moto (2) (Bartelt e al., 1999) e il bilancio medio di energia (3) (Buser e Bartelt, 2009), il tutto riferito a quantità mediate sull'altezza: (Christen, Kowalski and Bartelt, 2010)

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h \bar{v}_x}{\partial x} + \frac{\partial h \bar{v}_y}{\partial y} = \dot{Q} & (1) \\ \frac{\partial h \bar{v}_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(h \bar{v}_x^2 + g_z k_a \frac{h^2}{p} \cos(\psi) \right) + \frac{\partial h \bar{v}_x \bar{v}_y}{\partial y} = h g_x - S_{fx} & (2) \\ \frac{\partial h \bar{v}_y}{\partial t} + \frac{\partial h \bar{v}_x \bar{v}_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \bar{v}_y^2 + g_z k_a \frac{h^2}{p} \cos(\psi) \right) = h g_y - S_{fy} & (2) \\ \frac{\partial h R}{\partial t} + \frac{\partial h R \bar{v}_x}{\partial x} + \frac{\partial h R \bar{v}_y}{\partial y} = \alpha S_f ||U|| - \beta R & (3) \end{cases} \quad [\text{Eq. 4.35}]$$

Per quanto riguarda la velocità mediata sull'altezza $U(x,y,t)$ si può calcolare:

$$\begin{aligned} \text{modulo della velocità} : ||U|| &= \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \\ \text{versore direzione} : n_U &= \frac{(v_x, v_y)^T}{||U||} \end{aligned} \quad [\text{Eq. 4.36}]$$

Nella (1) della [Eq. 4.35] si è aggiunto il termine $\dot{Q} = \dot{Q}(x, y, t)$ cioè quell'elemento che se positivo tiene in conto l'azione erosiva e conseguente aumento di massa della valanga, e negativo l'azione di deposito e conseguente riduzione di massa. Si tratta di un parametro estremamente importante per un'analisi di rischio perché influenzerà le zone coinvolte; inoltre in questo termine saranno coinvolti materiali trascinati come rocce o alberi. Lo schema che descrive questo complesso fenomeno è quello di

Figura 4.4.

Nella quantificazione di questo parametro, per motivi numerici, viene discretizzato verticalmente il deposito instabile per tenere conto della variazione di densità e rigidezza sulla verticale: (Christen, Kowalski and Bartelt, 2010)

$$\dot{Q}(x, y, t) = \begin{cases} 0 & \text{se } \left[h(x, y, 0) - \int_0^t \dot{Q}(x, y, t) dt \right] = 0 \\ \frac{\rho_i^s}{\rho} k_i U & \text{se } \left[h(x, y, 0) - \int_0^t \dot{Q}(x, y, t) dt \right] > 0 \end{cases} \quad [\text{Eq. 4.37}]$$

In cui:

- $h(x, y, 0)$ è l'altezza del manto nevoso in (x, y) al tempo $t = 0$ s, se nel modello di calcolo lo strato viene discretizzato in più sub-layer occorrerà farne la somma (in RAMMS vengono usati 3 sub-layer):

$$h(x, y, 0) = \sum h_i \quad \text{con } i = 1, \dots, n;$$

- ρ_i^s = densità della neve dell' i -esimo strato, se si ipotizza neve di densità costante il rapporto $\frac{\rho_i^s}{\rho} = 1$.

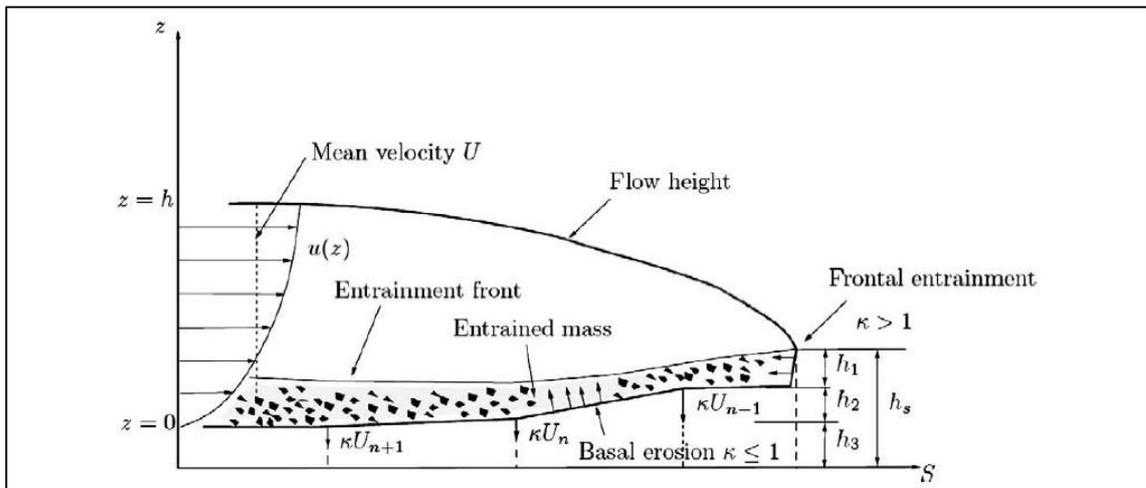


Figura 4.4: Il modello di erosione a velocità controllata in RAMMS. Ad ogni nodo n il fronte di frammentazione si muove con la velocità della valanga U_n . Il tasso di trascinamento effettivo è $k_i U_n$ dove k_i è il coefficiente di trascinamento effettivo per l' i -esimo strato di neve. In questa rappresentazione bidimensionale, la valanga si sta muovendo nella direzione S data dal vettore unitario \mathbf{n}_U . (Christen, Kowalski and Bartelt, 2010)

Quando la valanga in moto impatta nuovo materiale, come prima cosa si ha una fratturazione del manto nevoso con velocità proporzionale alla velocità della valanga; il coefficiente k_i quantifica quanto materiale si sta aggiungendo o fermando in quell'istante alla massa in moto. Il valore di k_i descrive il meccanismo in atto, per esempio se è superiore all'unità si ha un trascinamento e una densificazione quasi istantanei del manto nevoso, mentre se inferiore a 0.5 la neve si sta inglobando, ma molto lentamente.

Nei grafici di Figura 4.5 si osserva meglio l'influenza di k ; tuttavia è un parametro tanto importante quanto difficile da stimare perché richiederebbe una classificazione accurata di

tutti i materiali presenti nella zona di propagazione, dello stato di inerbimento, della tipologia di alberi ecc.

In modellazioni più semplificate le equazioni (2) e (3) di [Eq. 4.35] sono scritte senza il termine $\frac{\partial}{\partial x} g_z k_a \frac{h^2}{p}$, tuttavia alcuni autori (Bartelt e al., 1999), al fine di descrivere meglio la fisica del problema, ragionarono sul fatto i termini legati alla gravità hg_x, hg_y rappresentano l'effettiva accelerazione della valanga. Esiste un contributo di accelerazione dato da g_z normale alla superficie del pendio che viene tenuto in conto con il coefficiente k_a (proposto da Bartelt e altri, 1999) ed esprime le tensioni principali come:

$$\sigma_{xx} = K\sigma_{zz} \quad [Eq. 4.38]$$

in cui K è il coefficiente di spinta a riposo: se unitario si ha stato tensionale isotropo, in caso contrario siamo in anisotropia. Esso è un coefficiente che già di per sé è difficile da stimare, ma ancor più in una valanga in moto. Nel caso in esame si assume come:

$$\text{coeff. di spinta del terreno} : K = k_a \frac{1}{p} = tg^{-1} \left(45^\circ \mp \frac{\varphi}{2} \right) \quad [Eq. 4.39]$$

e descrive l'interazione del flusso con la superficie di scivolamento; φ è l'angolo di attrito interno, definito in funzione del tipo di grani e dimensione.

Questo coefficiente può essere di spinta attiva o passiva in base al comportamento del materiale in quell'istante:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{U} \geq 0 &\rightarrow \text{flusso dilatante} \rightarrow \text{attiva} \\ \nabla \cdot \mathbf{U} < 0 &\rightarrow \text{flusso in contrazione} \rightarrow \text{passiva} \end{aligned} \quad [Eq. 4.40]$$

Inoltre nella [Eq. 4.35] il termine $\cos(\psi)$ sta a indicare la componente lungo il pendio, dove quindi ψ è l'inclinazione locale del letto.

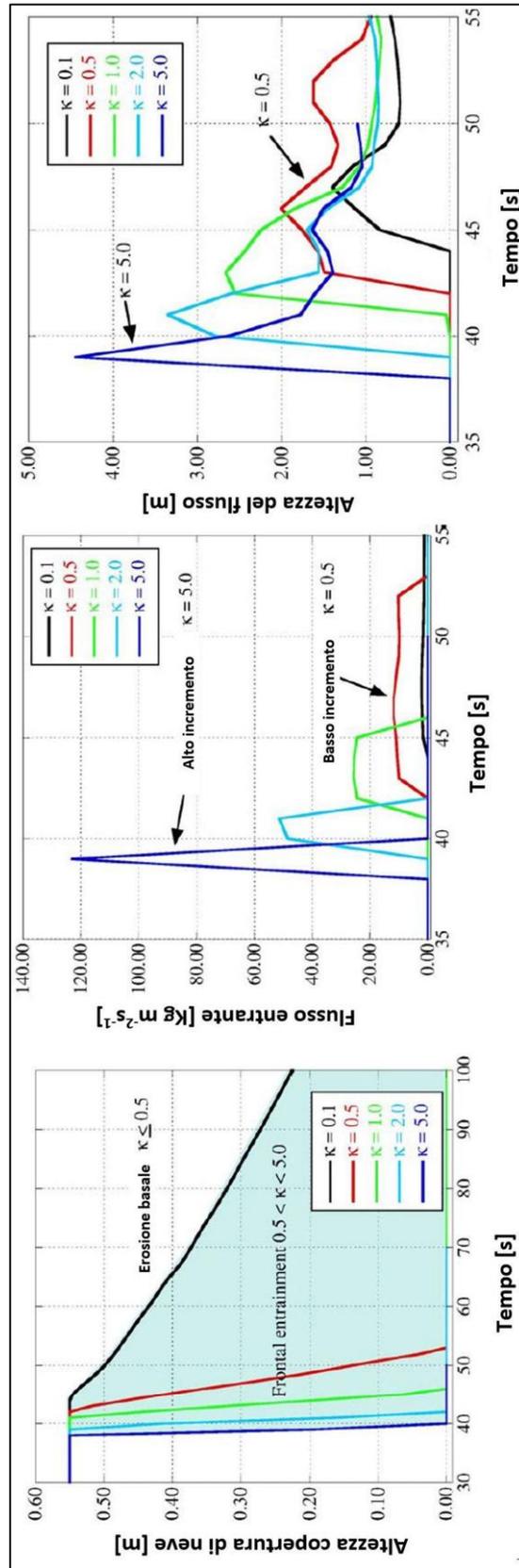


Figura 4.5: Fig. 1: Effetto del coefficiente di trascinamento κ sul tasso di rimozione del manto nevoso. Fig. 2: Effetto del coefficiente di trascinamento κ sulla velocità di trascinamento. Fig. 3: Effetto del coefficiente di trascinamento κ sull'altezza del flusso. (Christen, Kowalski and Bartelt, 2010)

4.5 Legge reologica del materiale

La reologia è quella branca della fisica che studia le correlazioni tra deformazioni e stato tensionale all'interno di un materiale: nel caso specifico si è interessati ai fluidi.

Nello studio dei fluidi un primo caso noto è quello dei fluidi perfetti nei quali, per il Teorema di Pascal, lo stato di sforzo è isotropo cioè il tensore degli sforzi è facilmente scrivibile come:

$$\rho \mathbf{g} + \text{div}[\boldsymbol{\sigma}] = \rho \mathbf{g} + \text{div} \begin{bmatrix} -p & 0 & 0 \\ 0 & -p & 0 \\ 0 & 0 & -p \end{bmatrix} = \rho \mathbf{g} - \begin{bmatrix} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial p}{\partial z} \end{bmatrix} = \rho \mathbf{g} - \nabla p = 0 \quad [\text{Eq. 4.41}]$$

$$\rightarrow \rho \mathbf{g} = \nabla p$$

Nell'Eq. 4.41 si vede che non sono presenti sforzi di taglio quindi un fluido perfetto è anche non dissipativo.

Passando ai fluidi reali, come noto dall'idraulica, una prima distinzione avviene tra fluidi Newtoniani e non-Newtoniani.

Per quanto riguarda quelli Newtoniani gli sforzi di taglio sono direttamente proporzionali alle derivate prime del campo di velocità; se si considera che il moto avviene solo in direzione x, tra due superfici a distanza Δy si ha:

$$\tau_{yx} = \tau_{xy} = \mu \frac{dv_x}{dy} \quad [\text{Eq. 4.42}]$$

Quindi nasce un gradiente delle velocità lungo y cioè $\gamma_{xy} = \frac{dv_x}{dy}$: questo è dovuto al fatto che esistono e valgono i principi di conservazione di massa, di quantità di moto e di energia. La dissipazione energetica che genera questo gradiente causato da attriti interni e da attriti con la superficie, detti generalmente shear stress o sforzo tangenziale. (Bartelt et al, 1999, Kaina, 2006)

La cosa importante da notare è che per i fluidi Newtoniani sussiste una relazione lineare tra lo sforzo di taglio e il gradiente mediante un coefficiente μ : una quantità costante per qualsiasi materiale che rappresenta la viscosità del fluido, cioè quanto resiste allo scorrimento.

In altre parole, μ è un coefficiente di scambio di quantità di moto: microscopicamente è legata all'attrito tra le molecole del fluido. In letteratura esistono due tipologie di questo parametro ossia la viscosità "dinamica" e "cinematica", della quale cambia le condizioni in cui viene definita e le unità di misura. Per definire la prima si pensa ad un'altezza di fluido omogeneo tra due superfici piane orizzontali uguali, una è fissa e l'altra mobile; si genera un moto laminare perché ogni ipotetico strato di fluido infinitesimo più in alto ha velocità leggermente maggiore del suo strato adiacente inferiore. La situazione più generale possibile è mostrata in Figura 4.6, in cui si osserva un andamento non lineare: è proprio questa differenza che porta alla distinzione di fluidi Newtoniani e non-Newtoniani.

Dal punto di vista matematico la viscosità è definita come:

$$\mu = \tau \frac{dy}{dv_x} \quad [Pa \cdot s] \quad [Eq. 4.43]$$

Dove:

- dy variazione infinitesima di altezza;
- dv_x variazione infinitesima di velocità monodirezionale;
- τ sforzo di taglio applicato.

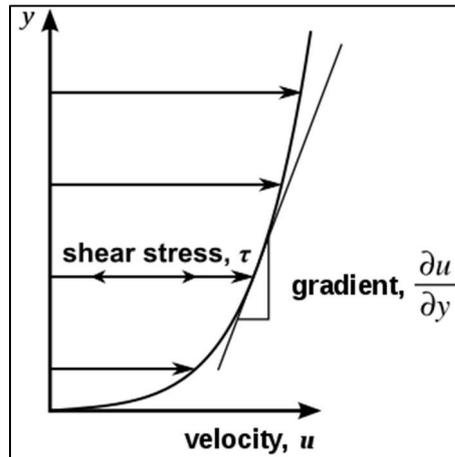


Figura 4.6: Profilo di velocità in funzione della profondità y . (Fonte Wikipedia)

La Figura 4.7 mostra le tipologie di fluidi a seconda della relazione tra viscosità e sforzi: i fluidi non-Newtoniani hanno un comportamento non lineare, quindi di più difficile modellazione tuttavia descrivono meglio molti dei fluidi reali, estendendo l'[Eq. 4.43] a una formulazione più generale si può scrivere:

$$\tau = \mu \cdot \gamma^n \quad [Eq. 4.44]$$

A seconda di n varia il comportamento dei fluidi, quindi per:

- $n = 0$ fluidi Newtoniani;
- $\mu > 1$ fluidi pseudoplastici;
- $\mu < 1$ fluidi dilatanti.

I fluidi alla Bingham presentano uno sforzo tangenziale critico iniziale τ_0 al di sotto del quale si comportano come solidi, sopra tale tensione può presentare un qualsiasi comportamento quindi:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \gamma^n \quad [Eq. 4.45]$$

In generale il moto avviene secondo più direzioni allora l'[Eq. 4.42] diventa:

$$\tau_{ij} = \tau_{ji} = \mu \left(\frac{dv_i}{dx_j} + \frac{dv_j}{dx_i} \right) \quad [Eq. 4.46]$$

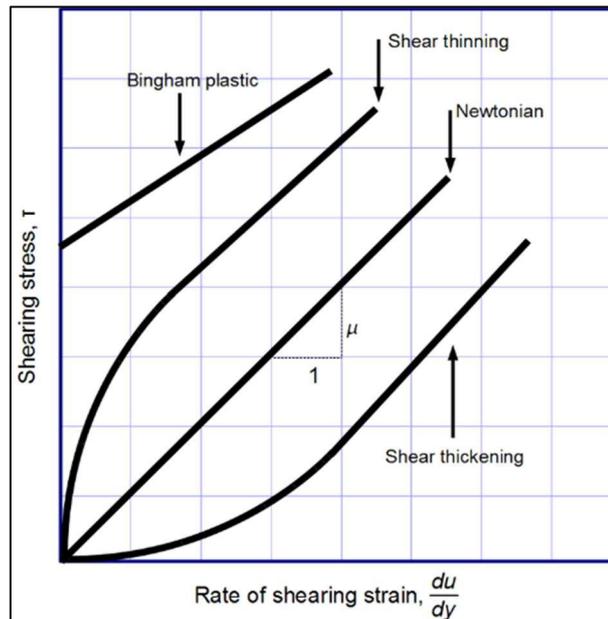


Figura 4.7: Reogrammi di differenti tipi di fluidi del modello Herschel-Bulkley. (Ancey, 2001)

L'applicazione di questi modelli semplificati ad una colata detritica è un problema affrontato con soluzioni molto diverse tra loro. L'approccio monofasico, in cui si considera un fluido unico solitamente integrato nell'altezza del flusso stesso, ha visto accostarsi al modello reologico visco-plastico di Herschel-Bulkley (derivante dal modello di Bingham), gli approcci a modello quadratico ed a modello di Voellmy.

Il modello Voellmy, il più usato nel caso valanghe, serve per descrivere i termini dissipativi nei bilanci di [Eq. 4.35] contenuti nei termini S_{fx}, S_{fy} : modellano la dissipazione come un elemento di attrito dinamico alla Coulomb in condizioni asciutte μ e una dissipazione dipendente dal quadrato della velocità chiamato coefficiente di attrito turbolento ξ . Voellmy ha definito quest'ultimo attrito "turbolento" poiché la formulazione matematica è simile all'equazione di Chezy utilizzata nell'idraulica. (Bartelt, Salm and Gruber, 1999)

Come si è visto le equazioni considerate derivano dall'idraulica che, con le ipotesi fatte, prendono il nome di "2D Saint Venant equations" o "2D depth-averaged SWE": nel fluido monofase tutte le dissipazioni possono essere raggruppate in 5 termini (Julien e León, 2000):

$$\tau = \tau_d + \tau_t + \tau_v + \tau_{mc} + \tau_c \quad [Eq. 4.47]$$

Dove:

- τ_d è un termine di dispersione;
- τ_t è un termine di turbolenza;
- τ_v è un termine di viscosità;
- τ_{mc} è un attrito alla Mohr-Coulomb;
- τ_c è un termine di coesione.

Ognuno dei termini di [Eq. 4.47] può essere espresso mediante le leggi reologiche dei specifici fluidi.

Inizialmente il modello fu proposto (Voellmy, 1955) senza ipotesi sul profilo delle velocità: l'autore sosteneva che ci fossero grandi deformazioni di taglio nel corpo della valanga; in seguito osservazioni su eventi reali (Gubler and others, 1986) dimostrarono che è una buona approssimazione usare un profilo delle velocità rettangolari. Segue che l'ipotesi alla base di questo modello è il profilo delle velocità rettangolare (Figura 4.9): significa dire che lo scivolamento avviene solo lungo un sottile strato tra terreno-valanga all'interno del quale non ci sono sforzi taglianti.

Soffermandosi su ξ (coefficiente di attrito turbolento), secondo Salm (1993), la resistenza è dovuta all'impatto di granuli di neve in movimento con ostacoli sporgenti dal suolo che dissipano continuamente l'energia cinetica. Lo strato in cui avvengono è molto sottile: ciò significa che tanto più la superficie è scabra tanto più questo termine dev'essere importante. Salm, nel 1968, aggiunse che la neve non è un fluido ideale, contrariamente a quanto ipotizzato dal modello Voellmy originario, quindi nascono attriti interni sotto a tensioni: la loro entità dipenderebbe solo dall'angolo di attrito interno come in una sabbia asciutta. Questo concetto è stato applicato aggiungendo il termine con $\frac{K_a}{p}$ nell'Eq. 4.35 rientrante nel tensore degli sforzi. Nel caso di valanghe coesive, anche la coesione contribuisce all'attrito interno; i modelli reologici che di solito vengono usati tengono in conto tutte queste considerazioni e prendono il nome "Voellmy-Salm and cohesion model".

I test sul campo (Schaerer e altri, 1980) mostrano pressioni d'impatto non costanti, ma oscillanti con picchi pronunciati in sequenze rapide. Questo può essere interpretato come un effetto di grumi di neve molto più grandi dei singoli granelli: si può pensare a dimensioni di circa 0.1 m, un angolo di attrito interno φ che, malgrado non fosse stato misurato direttamente, si può stimare di almeno 25° secondo osservazioni su valanghe avvenute (Roch 1966) e un coefficiente di restituzione tra sfere di ghiaccio $e \sim 0$.

Se ψ è l'inclinazione del pendio, allora il movimento è possibile solo se $\psi > \varphi$.

Lo scivolamento vicino al suolo sembra essere il processo decisivo per determinare la velocità delle valanghe. Da quanto detto, per avere una visione qualitativa, si utilizza un semplice modello analogo a quello di Bagnold (1954, 1966) di cui lo schema di riferimento è in Figura 4.8. (Salm, 1993)

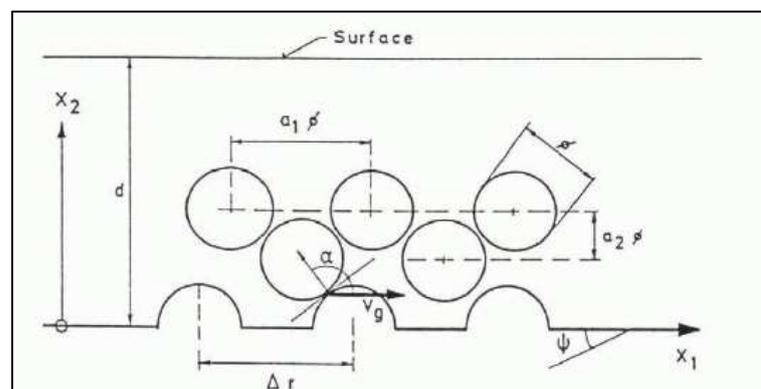


Figura 4.8: Modello assunto all'interfaccia tra suolo e neve che scorre. (Salm, 1993)

Prima si è detto che ξ descrive le perdite di energia cinetica per gli impatti, allora si rappresentano gli ostacoli (cioè la scabrezza) come blocchi di neve a distanza media di Δr , con altezza del flusso h e dimensioni precedentemente esposte.

Sia v_g la velocità rispetto al fondo, cioè in direzione x_1 di propagazione, allora il tempo medio che intercorre tra due collisioni è $v_g/\Delta r$. La variazione di quantità di moto per una sfera, se $e \sim 0$ è: $mv_g \cos^2 \alpha$ con α angolo di impatto, m massa della singola sfera e densità ρ_s . (Salm, 1993)

Il numero di sfere per unità d'area sono: $\frac{a_1}{\phi^2}$, che causano una resistenza al taglio (Salm, 1993):

$$\tau \sim \frac{a_1 v_g}{\phi^2 \Delta r} m v_g \cos^2 \alpha \quad [\text{Eq. 4.48}]$$

Siccome la massa di una sfera è $\frac{\rho_s \pi \phi^3}{6}$ e il numero di sfere per unità di volume è $\frac{1}{a_1 a_2 \phi^3}$ si ottiene una densità media della neve che scorre (Salm, 1993):

$$\frac{\rho_m}{\rho_s} = \frac{\pi}{6} \frac{1}{a_1^2 a_2} \quad [\text{Eq. 4.49}]$$

Quindi la resistenza al taglio per volume è (Salm, 1993):

$$\tau \sim \left(\frac{g \Delta r}{a_2 \phi \cos^2 \alpha} \right)^{-1} \rho_m g v_g^2 = \frac{\rho_m g}{\xi} v_g^2 \quad [\text{Eq. 4.50}]$$

ξ è l'attrito turbolento dichiarato per la prima volta da Vollmy nel 1955. Egli introdusse questo termine con l'analogia alle equazioni dell'idraulica di Chezy, di un canale aperto. Siccome nella [Eq. 4.50] i parametri α , a_1 e a_2 sono funzione della velocità anche ξ lo è; α ($180 > \alpha > 90$) diminuisce all'aumentare della velocità, inoltre le asperità del terreno tenderanno ad essere livellate in una certa misura dalla neve depositata, a seconda dell'altezza degli ostacoli. (Salm, 1993)

Invece il coefficiente di attrito dinamico risulta essere ben minore di $\tan(\varphi)$ e si trova nel range di (Salm, 1993):

$$0.15 \leq \mu \leq 0.35 \quad [\text{Eq. 4.51}]$$

Unendo i due contributi dissipativi e assumendo per buona la distribuzione rettangolare, si può stimare la velocità media come (Salm, 1993):

$$v_g = (\xi h)^{\frac{1}{2}} (\text{sen}(\psi) - \mu \cos(\psi)) \quad [\text{Eq. 4.52}]$$

Si può dire che μ è più collegato alle proprietà della neve, mentre ξ dipende dalla geometria del terreno (scabrezza in particolare) e dalla velocità, nonché dalla turbolenza.

Si riscrivono l'equazione di continuità e di bilancio di quantità di moto unidirezionalmente e sottoforma di portata, come se fosse banalmente un fluido, riferito allo schema di Figura 4.9 (Salm, 1993):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[c(x, t) \frac{Q^2}{A} + K \frac{g}{p} A \cos(\psi) \right] = gA(S_0 - S_f) \quad [\text{Eq. 4.53}]$$

Dove:

- $A(x, t)$ sezione trasversale del flusso;
- $Q(x, t)$ portata del flusso;
- S_0, S_f sono rispettivamente l'accelerazione e attrito causato dallo scorrimento.

Si nota come, per ora, l'[Eq. 4.53] è del tutto generale, cioè non sono state fatte assunzioni sulle equazioni costitutive, condizioni di scivolamento o profilo delle velocità.

$c(x, t)$ è un fattore che descrive il profilo delle velocità, ma per le ipotesi prima fatte si è obbligati ad assumerlo unitario cioè sottoforma di profilo rettangolare: osservazioni sperimentali di Kern e al.(2009) hanno dimostrato che tale assunzione è valida nella coda del fenomeno.

Per tenere conto dell'effettivo gradiente delle deformazioni a taglio e, il fatto che il profilo delle velocità non è propriamente rettangolare, è possibile aggiungere dei coefficienti correttivi alla quantità di moto (Kowalski, 2008; Pudasaini and Hutter, 2007); tuttavia si è anche visto che tale correzione per fini pratici è trascurabile:

$$\frac{\partial h\bar{v}_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(c_x h\bar{v}_x^2 + g_z k \frac{h^2}{p} \right) + \frac{\partial h\bar{v}_x \bar{v}_y}{\partial y} = hg_x - S_{fx}$$

$$\frac{\partial h\bar{v}_y}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}_x \bar{v}_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(c_y h\bar{v}_y^2 + g_z k \frac{h^2}{p} \right) = hg_y - S_{fy}$$

$$\frac{7}{8} \leq c_x, c_y \leq 1$$

[Eq. 4.54]

D'ora in poi si farà riferimento a profilo della velocità rettangolare come in Figura 4.9.

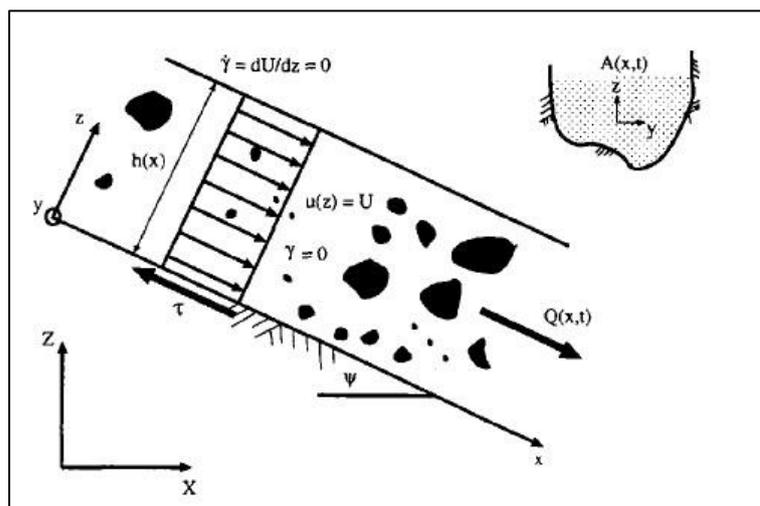


Figura 4.9: Fluido alla Voellmy. (Salm, 1993)

Si definisce S_0 come “accelerazione del pendio”:

$$S_0 = \sin(\psi(x)) \quad [Eq. 4.55]$$

ed S_f , facendo la media della profondità del gradiente di sforzo di taglio, come “attrito del pendio”:

$$\rho g S_f = \frac{1}{h} \int_0^h \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz = \frac{1}{h} [\tau_{zx}(h) - \tau_{zx}(0)] = -\frac{1}{h} \tau_{zx}(0) \quad [Eq. 4.56]$$

avendo ipotizzato che non ci siano deformazioni taglienti γ nel corpo della valanga:

$$\gamma(z) = \tau_{zx}(z) = 0 \quad 0 < z \leq h \quad [Eq. 4.57]$$

Quest’ultima affermazione è la conseguenza diretta del profilo di velocità rettangolare: l’unica deformazione tagliente è concentrata in un sottile strato a $z = 0$. Questa resistenza alla base consiste in una parte attrittiva alla Coulomb e una alla Chezy:

$$\tau_{zx}(0) = \mu \sigma_z + \frac{\rho g U^2}{\xi} \quad [Eq. 4.58]$$

In cui:

- $\sigma_z = \rho g h \cdot \cos(\psi(x))$ cioè la pressione data dall’altezza del fluido, implicitamente in questa definizione si è assunto un regime idrostatico;
- μ coefficiente di attrito dinamico, adimensionale;
- ξ misurato in $[m/s^2]$

Al fine di estendere il concetto al caso reale, modellazione bidimensionale:

$$S_{f_{x,y}} = n v_{x,y} \left[\mu g_z h + \frac{g ||U||^2}{\xi} \right] \quad [Eq. 4.59]$$

La parte Coulombiana di $S_{f_{x,y}}$ è linearmente dipendente all’altezza del flusso h e al coefficiente di attrito μ . Relazionando questi due valori con la corrispondente tensione si ottiene il piano di

Figura 4.10. Il range di valori in cui si trova normalmente μ è tra 0.1 e 0.6 e per neve allo stato naturale l'attrito dato da questo termine difficilmente supera i 4500 Pa. (Sanz-Ramos *et al.*, 2020)

Per quanto riguarda la dissipazione per attrito turbolento τ_ξ dipende dal quadrato della velocità v , inversamente proporzionale, dal coefficiente di turbolenza ξ . Si deve considerare che per problemi reali $v = 0 - 40 \text{ m/s}$ mentre $\xi = 50 - 4000 \text{ m/s}^2$, quindi il loro rapporto raffigurato in Figura 4.10 non sarà più un piano. Basse velocità ($< 10 \text{ m/s}$) e valori moderati di ξ ($> 900 \text{ m/s}^2$) determinano un contributo limitato dei termini di attrito ($< 300 \text{ Pa}$), per questo intervallo di velocità e valori di ξ molto bassi ($> 450 \text{ m/s}^2$), la sollecitazione di taglio è inferiore a 1.700 Pa. I valori di sollecitazione superiori a 10.000 Pa richiedono $\xi < 400 \text{ m/s}^2$ e velocità maggiori di 13 m/s . (Sanz-Ramos *et al.*, 2020)

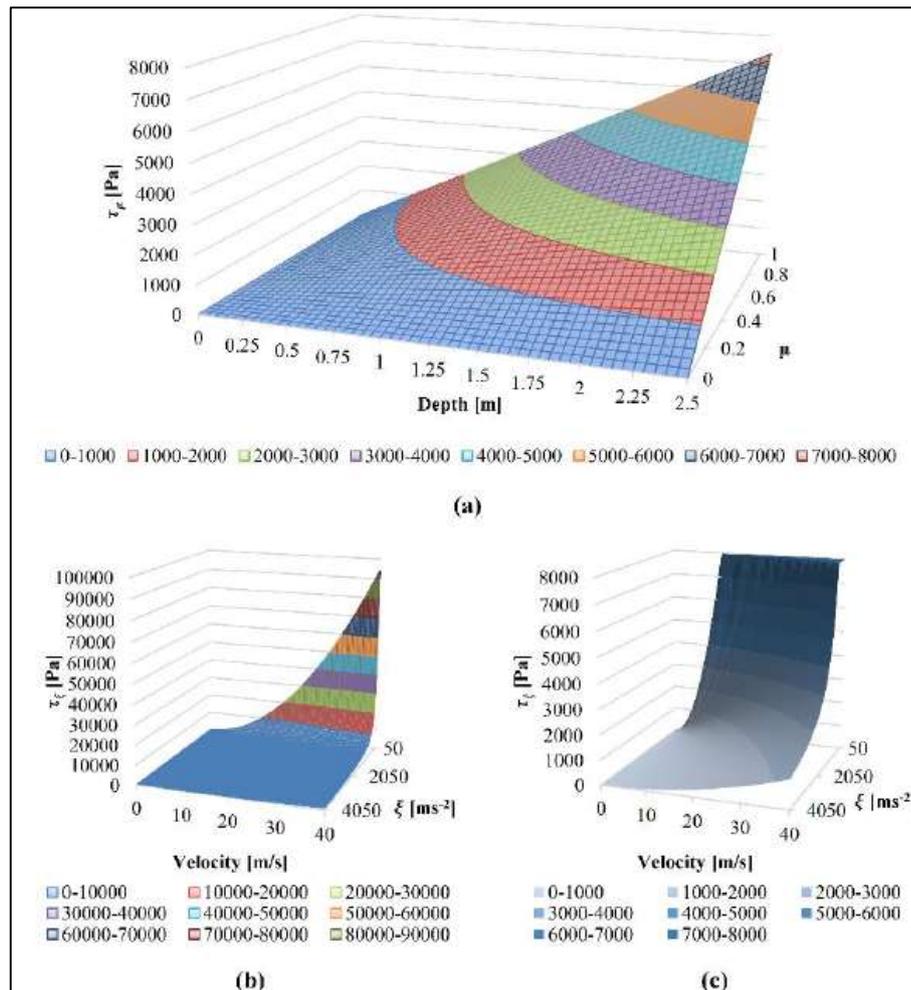


Figura 4.10: Contributo allo sforzo di taglio dovuto al modello di Voellmy-Salm: (a) attrito di Coulomb (τ_μ , in Pa) in funzione della profondità del flusso (h) e del coefficiente di attrito di Coulomb (μ); (b) Attrito turbolento (τ_ξ , in Pa) in funzione della velocità del flusso (v) e del coefficiente di attrito turbolento (ξ); (c) Una vista ingrandita della regione blu di (b), dove in τ_ξ è limitata a 8.000 Pa. (Sanz-Ramos *et al.*, 2020)

La dissipazione per attrito coesivo τ_c dipende da μ e dal parametro coesivo C . Nella formulazione di Voellmy-Salm questo termine non compare, ma molti software di simulazione

permettono di inserire una coesione, tale contributo è espresso mediante la seguente relazione (Platzer et al. 2007):

$$\tau_c = \frac{1}{\rho gh} C(1 - \mu) \left(1 - e^{-\frac{\rho gh}{C}}\right) \quad [\text{Eq. 4.60}]$$

L' [Eq. 4.60] mostra una prima parte linearmente dipendente da μ e una seconda termine esponenzialmente dipendente dall'altezza del fluido, dalla densità e dalla coesione; come questi termini influenzano τ_c è riportato in Figura 4.11. Lo stress di taglio è stato valutato per un intervallo di C compreso tra 50 e 2050 Pa, come suggerito da Bartelt et al. (2015), mentre h varia da 0 a 5 m e μ da 0 a 0,5. Si osserva un accrescimento di τ_c con h , più accentuato per valori inferiori di h e una diminuzione lineare dello sforzo di taglio, indipendentemente dalla profondità del flusso, mentre μ aumenta. Per quanto riguarda il secondo termine, il suo valore è 0 quando h tende a 0 o C tende a ∞ , ed è 1 per valori alti di h o per C che tende a 0. Pertanto, τ_c è un parametro importante solo per valori bassi di h , che interessano le aree di spandimento laterale e coda. (Sanz-Ramos et al., 2020)

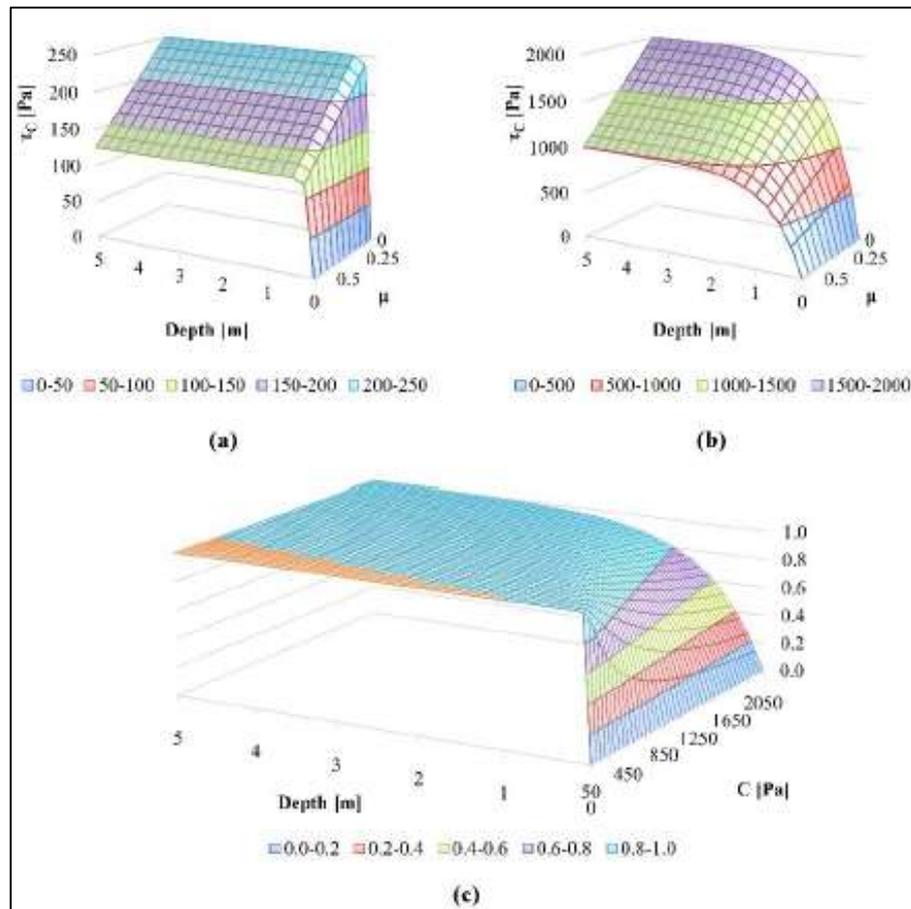


Figura 4.11: Contributo allo sforzo di taglio dovuto alla coesione: (a) Attrito di coesione (τ_c , in Pa) per $C = 250$ Pa in funzione della profondità del flusso (h) e del coefficiente di attrito di Coulomb (μ); (b) Attrito di coesione (τ_c , in Pa) per $C = 2.000$ Pa in funzione della profondità del flusso (h) e del coefficiente di attrito di Coulomb (μ); (c) Rappresentazione del termine $\left(1 - e^{-\frac{\rho g h}{C}}\right)$ funzione della profondità del flusso (h) e della coesione (C). (Sanz-Ramos et al., 2020)

Tuttavia l'uso del modello Voellmy semplifica di molto il problema, infatti non sempre lo scivolamento avviene lungo uno strato sottile ma può avere altezze importanti, come in valanghe lungo un canale che sfocia in un'area più ampia, è un importante strato di dimensioni finite: in questi casi si può ovviare al problema riducendo ξ . (Christen, Bartelt and Kowalski, 2010)

4.6 Base matematica del codice di calcolo RAMMS

Il software che viene utilizzato nella tesi è RAMMS e dalla versione 1.6.20 in poi apporta alcune migliorie al modello Voellmy implementato nel suo codice: (RAMMS: AVALANCHE User Manual, Bartelt et al., 2017)

$$S = \mu N + \frac{\rho g ||U||^2}{\xi} + (1 - \mu)N_0 - (1 - \mu)N_0 e^{-\frac{N}{N_0}}, N = \rho g h \cos(\psi) \quad [Eq. 4.61]$$

Dove:

- ψ = pendenza naturale del pendio;
- N_0 = tensione di snervamento del materiale che fluisce.

Questo approccio innovativo permette di modellare il materiale nevoso con un comportamento perfettamente plastico in cui μ funge da "hardening parameter". Inoltre è possibile aggiungere una coesione del materiale (di solito si aggira tra i 50-100 Pa): si ottiene il comportamento di Figura 4.12.

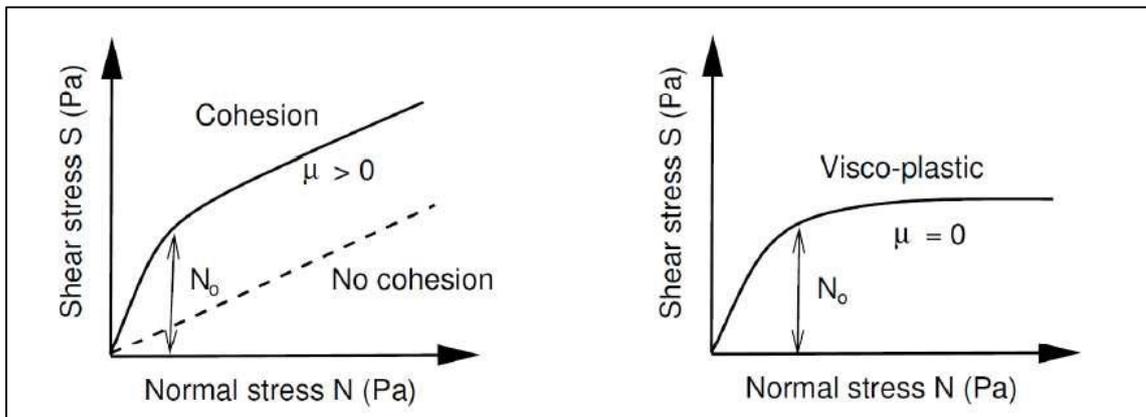


Figura 4.12: Relazione tra sollecitazione normale e tangenziale. A sinistra: lo sforzo di snervamento N_0 serve ad aumentare lo sforzo di taglio per pressioni normali più elevate. A basse pressioni normali (piccole altezze di flusso) la sollecitazione di taglio aumenta rapidamente da $S = 0$ a $S = N_0$. La pendenza della relazione "S vs N" rimane μ , quando le pressioni normali sono grandi. A destra: se $\mu = 0$, abbiamo un comportamento visco-plastico. (RAMMS: AVALANCHE User Manual, Bartelt et al., 2017)

Gli ultimi parametri da illustrare sono α, β della [Eq. 4.35] legati all'aumento o diminuzione dell'energia cinetica media casuale del sistema chiamata R . La spiegazione dei fenomeni energetici nel sistema merita una descrizione più ampia trattata nel paragrafo 4.7. (Buser and Bartelt, 2009)

4.7 Energia libera di una valanga

Il bilancio energetico di [Eq. 4.35] in uno studio dinamico di una valanga è di cruciale interesse, ma altrettanto complesso: vuol dire modellare gli sforzi di taglio e urti che si scambiano reciprocamente le particelle di neve/ghiaccio. Da un punto di vista teorico sarebbe possibile modellare la traiettoria di ogni particella, magari con un modello numerico particellare, ma molto oneroso dal punto di vista computazionale; in questo capitolo si cerca di descrivere il fenomeno ancora una volta dal punto di vista macroscopico.

Si descrive tale problema in un approccio bidimensionale con la sovrapposizione delle velocità random orizzontali e verticali delle particelle (Figura 4.13), (Buser and Bartelt, 2009):

velocità random orizzontale: $u_r(z, t)$

velocità random verticale: $w_r(z, t)$

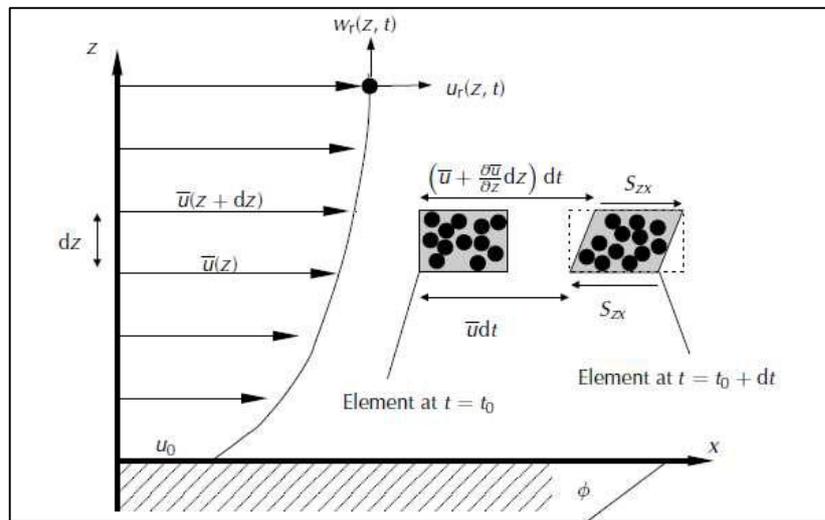


Figura 4.13: Distribuzione della velocità e sforzo di taglio per una valanga con taglio semplice (senza urti). (Buser and Bartelt, 2009)

Si definiscono:

velocità laminare parallela al pendio: $u(z, t) = \bar{u}(z) + u_r(z, t)$ [Eq. 4.62]

velocità media del flusso: $w(z, t) = \bar{w}(z) + w_r(z, t)$

velocità random quadratica media: $f^2(z, t) = u_r^2(z, t) + w_r^2(z, t)$

Conseguentemente a queste grandezze si possono definire:

energia cinetica traslazionale (direzione del flusso): $K(z) = \rho \left(\frac{\bar{u}^2(z)}{2} \right)$ [Eq. 4.63]

energia cinetica random: $R(z) = \rho \left(\frac{f^2(z)}{2} \right)$

energia cinetica totale: $E_k = K(z) + R(z)$

In particolare l'evoluzione di $R(z)$ (energia cinetica random) nel tempo, che contiene al suo interno le velocità random, dipenderà da come queste velocità variano: cioè dal lavoro di taglio viscoso causato sulle particelle (aumento di $R(z)$) e agli urti anelastici sulle stesse (diminuzione di $R(z)$). Possiamo definire questi contributi come flussi di energia entranti o uscenti. Le due energie cinetiche hanno una sostanziale differenza: $K(z)$ è data dalla trasformazione reversibile di energia potenziale verso cinetica traslazionale, mentre $R(z)$ dall'irreversibile trasformazione di energia meccanica interna in calore. È possibile dimostrare l'irreversibilità di $R(z)$ considerando il lavoro meccanico dato dalle forze random causato dal movimento casuale delle particelle di neve (Buser and Bartelt, 2009):

$$W_r = \int F_r(t) dx = 0 \quad [\text{Eq. 4.64}]$$

Essendo $F_r(t)$ la risultante delle forze random collisionali per unità d'area in direzione x , in un intervallo di tempo sufficientemente ampio, deve essere nulla poiché derivano da velocità random quindi l'equilibrio nel suo complesso va mantenuto:

$$\langle F_r(t) \rangle_r = 0 \quad (\text{Langevin, 1908}) \quad [\text{Eq. 4.65}]$$

Quindi siccome il lavoro medio nel tempo è nullo non può dare contributo a $R(z)$ per il teorema dell'energia cinetica.

Il movimento fluttuante dei granuli di neve può decadere solo per processi collisionali producendo calore, tuttavia è necessario che, al contrario di quanto accade al calore, arrivato al momento in cui la valanga si ferma $R(z)$ deve essere per forza nulla. L'obiettivo è di sfruttare i flussi di energia casuale per sviluppare modelli costitutivi per descrivere le dinamiche energetiche di una valanga poiché la produzione di $R(z)$ è il risultato del taglio interno, che è definito dal modello costitutivo: le equazioni costitutive non solo definiscono come l'energia meccanica viene dissipata, ma anche la fonte dell'energia casuale. I due meccanismi interni devono essere duali nel senso che la dissipazione totale deve rimanere costante: la quantità che il processo viscoso non dissipa è lasciata al processo collisionale.

La conservazione dell'energia richiede che la somma del tasso di variazione dell'energia totale all'interno di un elemento di volume sia uguale al tasso di lavoro svolto dalle forze esterne:

$$\frac{d}{dt}(K + E) = \dot{K} + \dot{E} = \dot{W}_g - \dot{W}_f \quad [\text{Eq. 4.66}]$$

Dove:

- \dot{K} = variazione di energia cinetica traslazionale per unità di volume;
- \dot{W}_g = lavoro positivo dato dalla forza di gravità: esso è uguale, in modulo, alla variazione di energia potenziale della valanga, ma cambiato di segno perché perdita di energia potenziale corrisponde a lavoro positivo sulla valanga:

$$\dot{W}_g = -\dot{U}_g \quad [\text{Eq. 4.67}]$$

- \dot{W}_f = lavoro svolto dalle forze di taglio viscoso (attrito), sempre negativo (o tasso di lavoro di attrito);
- \dot{E} = velocità di variazione dell'energia interna, comprende l'aumento di calore $\dot{\Phi}$ e la variazione di energia cinetica casuale \dot{R} , si associano questi due contributi perché sono tutti e due irreversibili e variano l'energia interna:

$$\dot{E} = \dot{\Phi} + \dot{R} \quad [Eq. 4.68]$$

Immettendo i termini appena descritti nella conservazione dell'energia:

$$\frac{d}{dt}(K + U_g + E + W_f) = \frac{d}{dt}(K + U_g + \Phi + R + W_f) = 0 \quad [Eq. 4.69]$$

Il lavoro speso in attrito può essere decomposto in due parti (Davidson, 2004):

$$\dot{W}_f = \dot{W}_{f \rightarrow K} + \dot{W}_{f \rightarrow E} \quad [Eq. 4.70]$$

In cui:

- $\dot{W}_{f \rightarrow K} = -(\dot{K} + \dot{U}_g)$ che rappresenta il tasso di aumento dell'energia meccanica, la somma delle energie cinetiche e potenziali reversibili;
- $\dot{W}_{f \rightarrow E} = -\dot{E}$ cioè la restante parte di lavoro sottoforma di attrito che aumenta l'energia interna \dot{E} , questo lavoro è sempre negativo quindi aumenta l'energia interna per il secondo principio della termodinamica (Glansdorf and Prigogine, 1974);

È noto dalla fisica che in condizioni stazionarie non ci sia variazione di energia cinetica né di energia interna cioè:

$$\dot{K} = 0 \rightarrow \dot{W}_{f \rightarrow K} = -\dot{U}_g \rightarrow \dot{W}_{f \rightarrow K} + \dot{U}_g = 0 \quad [Eq. 4.71]$$

la perdita di energia potenziale è uguale al lavoro svolto dall'attrito (Bartelt and others, 2005); ma per ottenere $\dot{K} = 0$ (velocità traslazionale costante) serve che anche $\dot{E} = 0$, cioè che la temperatura non aumenti. Ricordando che \dot{E} è il risultato della somma del termine irreversibile e dell'energia cinetica traslazionale random lo stato stazionario sarà raggiungibile se e solo se l'energia cinetica random rimane costante:

$$\dot{R} = 0 \quad [Eq. 4.72]$$

Nei momenti in cui non si è in condizioni stazionarie ma c'è una variazione di grandezze in gioco, si ipotizza che l'attrito interno che causa lavoro, aumenti l'energia interna che di conseguenza creerà energia cinetica random:

$$\dot{E} = -\dot{W}_{f \rightarrow E} = \dot{R} + \dot{\Phi} \quad [Eq. 4.73]$$

Essendo difficile misurare l'energia cinetica totale direttamente, ma conoscendo la dissipazione totale (sono disponibili delle relazioni costitutive che si adattano bene ai risultati sperimentali di Buser & Bartelt, 2009) si esprime \dot{R} come segue:

$$\dot{R} = \alpha \dot{E} - \beta R = -\alpha \dot{W}_{f \rightarrow E} - \beta R \quad [Eq. 4.74]$$

In cui:

- $-\alpha W_{f \rightarrow E}$ = parte di lavoro dato dall'attrito che produce energia random;
- βR = decadimento di energia cinetica causato dagli urti anelastici delle particelle di neve (o produzione di calore); l'aumento di energia termica è dato da:

$$\dot{\Phi} = (1 - \alpha)\dot{E} + \beta R = (1 - \alpha)W_{f \rightarrow E} + \beta R \quad [\text{Eq. 4.75}]$$

I parametri α e β determinano rispettivamente la produzione e il decadimento di energia random e quindi la quantità totale della stessa in un dato momento o posizione all'interno della valanga. Questi parametri possono avere valori in un range:

$$\alpha \in [0,1] \quad \beta \geq 0 \quad [\text{Eq. 4.76}]$$

Unendo le equazioni [Eq. 4.73] e [Eq. 4.74] si va a riscrivere l'equazione [Eq. 4.75]. Successivamente si riscrive la conservazione dell'energia ([Eq. 4.69]) e si deduce come la variazione di tutte le forme di energie interne è data dalla somma di due flussi di energie, cioè del lavoro dato dalla gravità e dall'attrito:

$$\frac{d}{dt}(K + \Phi + R) = \dot{W}_g - \dot{W}_f \quad [\text{Eq. 4.77}]$$

La variazione positiva o negativa di energia cinetica alla fine dipende dal segno della relazione:

$$\begin{cases} \dot{W}_g - \dot{W}_{f \rightarrow E} > 0 & \text{accelerazione} \\ \dot{W}_g - \dot{W}_{f \rightarrow E} \geq 0 & \text{stato stazionario} \\ \dot{W}_g - \dot{W}_{f \rightarrow E} < 0 & \text{decelerazione} \end{cases} \quad [\text{Eq. 4.78}]$$

I processi sin ora descritti sono schematizzati nella Figura 4.14, che descrive come si modificano i flussi di energie e la produzione di energia cinetica random.

Il termine $\alpha W_{f \rightarrow E}$ rappresenta la conversione di energia media del flusso ad energia cinetica random, quindi finchè ci sarà movimento nella massa ci sarà produzione di quest'ultima; la rimanente parte $(1 - \alpha)W_{f \rightarrow E}$ è dissipata sottoforma di calore.

L'energia random invece decade con βR per via degli innumerevoli urti particellari. Quindi il bilancio di questi due termini appena citati determina se l'energia cinetica random complessiva sta aumentando o diminuendo. Quando il fenomeno si stopperà questa andrà a zero, mentre se le due quantità sono uguali non ci sarà variazione di energia ($\dot{R} = 0$), cioè condizione stazionaria. La condizione stazionaria sarà stabile se e solo se l'accelerazione impartita dalla gravità alla massa si eguaglia con il lavoro dissipato per attrito $W_{f \rightarrow K}$: siccome la massa in movimento è finita è impossibile che questa condizione si terrà per lungo tempo.

Il fenomeno appena descritto rispecchia quelle valanghe che muoiono su pendii ripidi, cioè al diminuire della velocità della valanga nella zona di run-out il decadimento di R supererà la produzione (Buser and Bartelt, 2009).

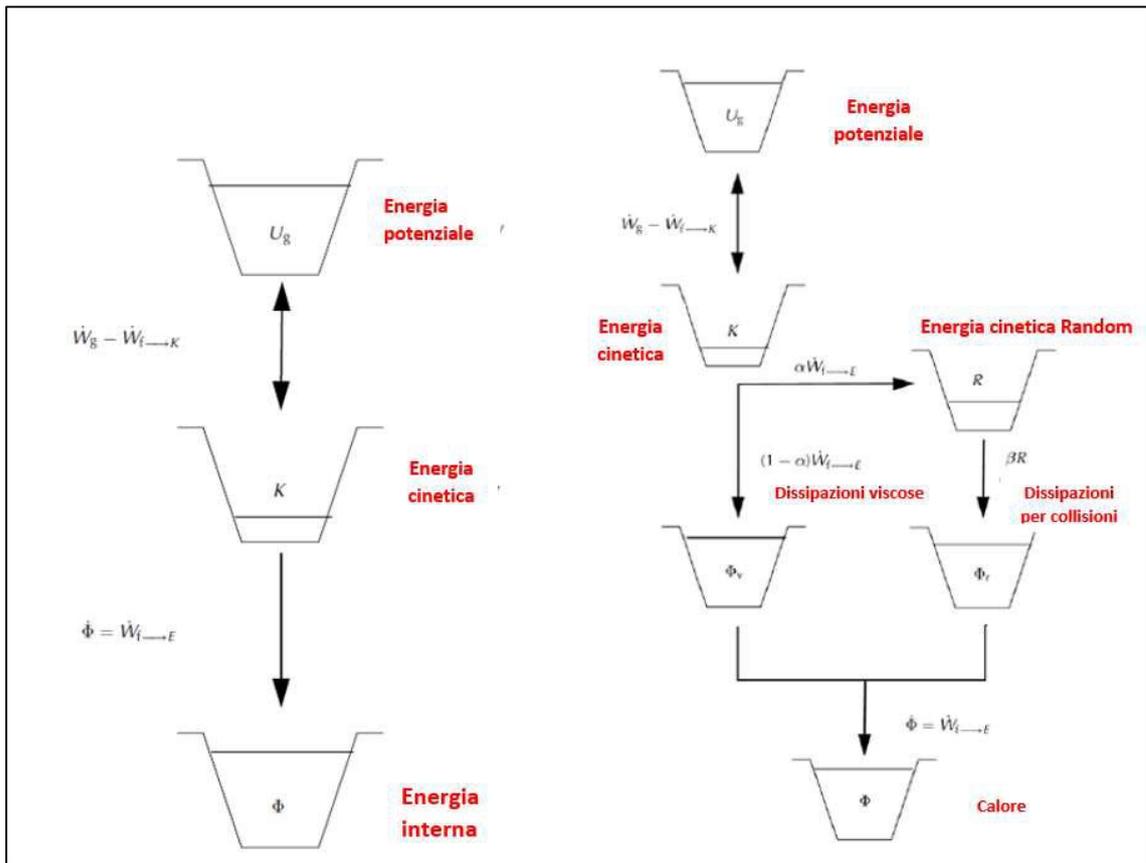


Figura 4.14: A sinistra: Flusso di energia senza energia cinetica casuale. L'energia potenziale viene convertita in energia cinetica, K ed energia interna (calore), Φ . La reversibilità dell'energia cinetica è rappresentata con una doppia freccia. A destra: Flusso di energia con energia cinetica casuale, R . Il tasso di lavoro di attrito, $\dot{W}_{f \rightarrow E}$, è diviso in $\alpha \dot{W}_{f \rightarrow E}$ (produzione di energia cinetica casuale) e $(1 - \alpha) \dot{W}_{f \rightarrow E}$. L'energia cinetica casuale decade alla velocità βR , (Buser and Bartelt, 2009). (Modificata da Vigna, 2021)

5 ANALISI DEL RISCHIO

Il concetto di rischio negli ultimi decenni è cresciuto notevolmente, infatti anche settori come la finanza o il settore tecnico-industriale utilizzano sempre più spesso questo strumento. Segue che il concetto di rischio è applicabile in svariati ambiti come la caduta massi, frana di un pendio, diffusione di un virus, valanghe e molti altri. Questo strumento è comunemente considerato il metodo migliore per calcolare i pericoli per le persone derivanti da particolari rischi naturali (Einstein 1988; Morgan et al.1992; Fell 1994; Cruden e Fell 1997), ma è solo di recente che tali approcci sono emersi per analizzare l'effetto delle valanghe (Keylock et al.1999; Jónasson et al.1999).

Non esiste una definizione univoca di rischio in letteratura ma una che si presti bene a questa applicazione è la seguente: *la probabilità che un fenomeno di una data entità si verifichi in un certo spazio e tempo, producendo un particolare livello di danno agli elementi esposti* (Royal Society, 1992).(Bonnard, Christophe; Forlati, F.; Scavia, 2013)

Il concetto di rischio accettabile è strettamente legato alla soggettività della persona e alle circostanze in cui si vive: per esempio di quest'ultimo è il modo in cui le opinioni su ciò che costituiscono livelli accettabili di rischio per la salute sono cambiate drasticamente in Europa negli ultimi cento anni con l'aumento delle aspettative di salute e sicurezza. (Bonnard, Christophe; Forlati, F.; Scavia, 2013)

Il rischio specifico R_s e il rischio totale R_t si ottengono con le seguenti formulazioni:

$$R_s = H \times V \times E_s \quad [Eq. 5.1]$$

$$R_t = H \times V \times E_s \times W = H \times D \quad [Eq. 5.2]$$

i parametri nelle equazioni verranno spiegati nel seguito.

La pericolosità, Hazard in inglese, è la probabilità che un pericolo (qualunque cosa capace di causare un danno) si verifichi all'interno di una data area e in un dato periodo di tempo. Si vuole precisare che non si sarà mai in grado di stabilire esattamente quando avverrà il fenomeno di instabilità ma si definirà una probabilità di occorrenza di un evento di intensità I nell'intervallo di tempo. Si riporta la relazione tra tempo di ritorno e probabilità di superamento P :

$$T_r = \frac{1}{P} \quad [Eq. 5.3]$$

L'hazard è una quantità che dipende da spazio e tempo: $H(x, y, z, t)$. La componente di maggior difficoltà da stimare in questo parametro è il fattore tempo; qualora non si voglia o non si sia in grado di stimarlo allora la pericolosità prende il nome di "susceptibilità" $S(x, y, z)$.

Un altro parametro che entra in gioco nella definizione di rischio è la vulnerabilità V . Essa è definita come il grado di perdita atteso degli elementi esposti a rischio, dovuto ad un fenomeno di una data intensità I ; il suo valore di solito è compreso tra 0 (nessun danno) e 1 (completa distruzione o perdita di vita umana). Talvolta può risultare laborioso la

determinazione di questo parametro: per esempio se si tratta di una valanga che impatta contro un edificio occorrerebbe quantificare in che misura esso si danneggia. Direttamente collegati a quest'ultimo concetto sono gli "elementi a rischio" E: "tutti gli elementi esposti al rischio in una data area: persone, strutture e infrastrutture, attività economiche e servizi pubblici" (Varnes et al.,1984). E sarà una quantità che dipende dalla posizione degli oggetti sul territorio e talvolta anche del tempo quindi $E(x, y, z, t)$. Per quantificare in modo tangibile gli elementi a rischio si introduce il "valore degli elementi a rischio" W, che spesso equivale al loro valore in denaro. Invece si definisce "esposizione" E_s la probabilità che un dato elemento a rischio E sia esposto al verificarsi di un evento di una data entità, in una data area e periodo di tempo, ossia la probabilità che un elemento sia soggetto a un certo pericolo:

$$E_s = P(E(x, y, z, t)) \quad [Eq. 5.4]$$

Analizzando meglio l'[Eq. 5.2] si vede come il prodotto tra vulnerabilità, il valore degli elementi a rischio e il loro valore dia origine al danno D.

In generale per calcolare il rischio e successivamente mapparli (rappresentarlo su una carta rispettando le regole di cartografia) su una carta di rischio servono sei passi:

- Identificazione del pericolo;
- Stima dell'intensità dell'evento;
- Definizione dell'hazard;
- Censimento degli elementi a rischio;
- Valutazione della vulnerabilità degli elementi a rischio;
- Stima del rischio finale.

Uno schema riassuntivo per il calcolo del rischio è riportato in Figura 5.1: riferendosi a "large landslide" perché il metodo nasce rivolto a frane in roccia o terra ma in questa tesi verrà applicato al caso valanghe, le principali terminologie sono state tradotte in precedenza.

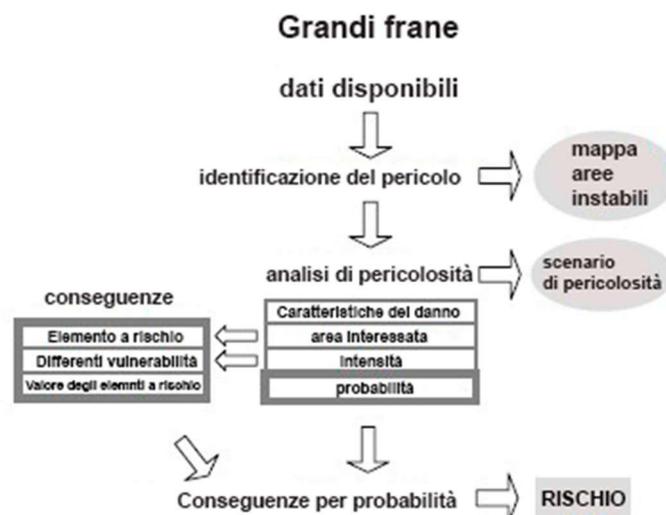


Figura 5.1: schematizzazione valutazione del rischio con il metodo IMIRILAND rivolto a grandi frane, (Lacerda et al., 2004). (Modificato da Vigna, 2021)

5.1 Identificazione del pericolo e stima dell'intensità

L'identificazione del pericolo comprende tutte le attività per capire quali rischi incombono sull'area di studio. In questo lavoro di tesi è ben noto sia da testimonianze che dalla CLPV (Carta di Localizzazione Probabile Valanghe) come sul tratto di strada investigato ci sia il problema consistente di valanghe di neve che la invadono e caduta massi in misura più blanda.

Per definizione dell'intensità dell'evento è una operazione tutt'altro che banale infatti ci sono vari parametri che potrebbero descriverla: area di invasione, i metri cubi di deposito, le velocità, la pressione, l'energia cinetica, la frequenza dell'evento ecc. Per far luce su questo aspetto, e per capire come utilizzare i risultati di simulazione prodotti, si analizzerà lo studio di McClung del 2001 in cui analizza 194 percorsi di valanghe noti per trovare una corrispondenza tra magnitudo degli eventi e frequenza. Il sistema di misurazione per l'intensità di una valanga più diffuso e utilizzato in tale studio prende il nome di "*Canadian avalanche size classification*" di Figura 5.2: basato sullo stesso criterio della scala Mercalli per i terremoti quindi sugli effetti distruttivi dell'evento. Si basa su una scala di 5 classi e tiene in conto massa, distanza di propagazione e pressioni; al crescere dell'evento saranno eventi con minore frequenza.

<i>Canadian avalanche size classification</i>				
Size	Description	Typical Mass	Typical Path Length	Typical Impact Pressures
1	Relatively harmless to people	<10 t	10 m	1 kPa
2	Could bury, injure, or kill a person	10 ² t	100 m	10 kPa
3	Could bury a car, destroy a small building, or break trees	10 ³ t	1000 m	100 kPa
4	Could destroy a railway car, large truck, several buildings, or forest with an area up to 4 ha	10 ⁴ t	2000 m	500 kPa
5	Largest snow avalanches known; could destroy a village or forest up to 40 ha	10 ⁵ t	3000 m	1000 kPa

Figura 5.2: *Canadian avalanche size classification*. (McClung, 2003)

Lo studio di McClung mira a capire come collegare le caratteristiche della valanga con la frequenza di accadimento essendo impossibile prevedere quando esattamente avverrà e quindi stabilire la pericolosità.

Per ciascuna zona soggetta a eventi valanghivi è stata studiata la corrispondenza tra la frequenza media annua e l'intensità misurata con la scala Canadese: il risultato è che le distribuzioni che meglio si adattano ai valori sono la Normale di Gauss e la Log-Normale, un esempio è mostrato in Figura 5.3 e si ricava, nel grafico b, come una distribuzione Log-Normale abbia un'ottima aderenza ai dati.

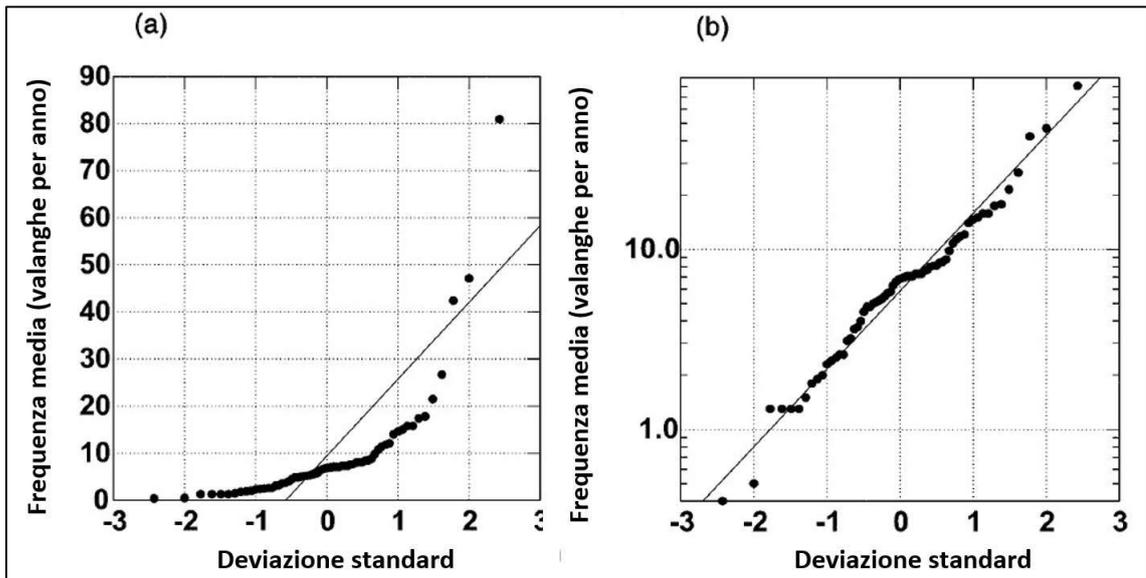


Figura 5.3: analisi di inferenza statistica dello studio di McClung. (a) Grafico delle probabilità della frequenza media delle valanghe di Bear Pass. Se la frequenza media delle valanghe obbedisse a una distribuzione gaussiana, i punti cadrebbero sulla linea retta. (b) Grafico della probabilità log-normale per la frequenza media per Bear Pass. Il grafico mostra che la frequenza media è distribuita approssimativamente in modo log-normale, (McClung, 2003).
(Modificato da Vigna, 2021)

Poiché il sistema canadese è costruito per aumentare approssimativamente in modo logaritmico, ci si aspettava che la dimensione delle valanghe fosse distribuita più o meno normalmente e quindi M e $\ln f$ possono essere approssimati per adattarsi a una normale funzione di densità di probabilità. Sulla base di questi risultati, M e $\ln f$ sono stati usati come variabili di risposta.

La conclusione di questo studio è stata che quasi mai esiste una relazione razionale tra la frequenza media e la magnitudine media per una serie di percorsi.

La spiegazione è stata che non c'erano abbastanza elementi atti a descrivere le valanghe: includendo variabili come tipo della zona di distacco, condizione di vegetazione, condizione di vento, caratteristiche del terreno e molte altre. Dai risultati di questa seconda parte del lavoro risulta che non ci sono relazioni generali tra la frequenza media delle valanghe, le variabili del terreno e della copertura forestale bensì le variabili che sembrano dare riscontri importanti sono riportate in Tabella 5.1. Le più significative sono:

- Altezza di neve accumulata;
- pendenza del terreno e questo forma una possibile corrispondenza con il modello di McClung (2000) in cui il periodo di ritorno nella zona di runout è correlato alla pendenza complessiva del terreno e alla frequenza locale delle valanghe. Una maggiore quantità di neve nella zona di partenza assicura una maggiore probabilità complessiva di valanghe (Salm, 1997) e il terreno più ripido può implicare una maggiore probabilità che le valanghe che si manifestano frequentemente arrivino alla zona di runout con le frequenze effettivamente stimate.

Nel caso specifico in esame non sono disponibili dati storici quindi per associare all'intensità dell'evento un tempo di ritorno si è utilizzata la formulazione presente nella normativa

svizzera, inerente all'altezza di distacco della valanga, spiegata nel capitolo 5. Al suo interno sono applicate le considerazioni emerse dallo studio di McClung: l'altezza di distacco, che intuitivamente causerà eventi proporzionali ad essa, dipende dal dato statistico di neve depositata in 3 giorni consecutivi, l'inclinazione dell'area di distacco e dalla neve trasportata dal vento.

Predictor Variable	Sign of correlation
Wind Index ^a	+
Starting zone ^a roughness or type	-
30-Year Max. Ann. Water Equiv. ^a	+
Starting zone elevation ^a	+
Starting zone incline ^b	+
Trace incline ^b	+
Runout zone incline ^b	+
Runout zone elevation ^c	+

^a Denotes possible relation to snow supply.

^b Denotes possible relation to terrain steepness.

^c Runout zone elevation is likely to have positive correlation with frequency since higher elevations imply shorter distances to start zones so that more avalanches reach the runout zone where frequency is estimated.

Tabella 5.1: Variabili che hanno una correlazione altamente significativa con la frequenza media delle valanghe o che sono significative nelle relazioni multivariate con la frequenza delle valanghe

L'approccio più noto per mappare la pericolosità (H) nella letteratura sulle valanghe è il sistema di zonizzazione svizzero, si basa sulla frequenza delle valanghe e sulla pressione d'impatto previste (Tabella 5.2).

Avalanche hazard zone	Definition
Red (high hazard)	Expected flowing avalanches will have either a return period of 30 years or a return period of up to 300 years and an impact pressure of 30 kPa or more
Blue (moderate hazard)	Flowing avalanches with return periods between 30 and 300 years may occur, but the expected impact pressures are less than 30 kPa; powder avalanches may also occur with return periods of 30 years or less and pressures of less than 3 kPa
Yellow (low hazard)	Flowing avalanches have return periods greater than 300 years, and powder avalanches with return periods of more than 30 years and impact pressures of less than 3 kPa may occur
White (no hazard)	No avalanches are expected

Tabella 5.2: Lo schema svizzero di zonizzazione delle valanghe basato su materiale in McClung e Schaerer (1993). (Keylock and Barbolini, 2001)

5.2 Valutazione degli elementi a rischio e vulnerabilità

Persone, beni (strutture, infrastrutture, servizi pubblici e trasporti), attività economiche, beni culturali, beni ambientali presenti nell'area interessata dal pericolo sono le cinque classi di elementi a rischio. Il valore di un elemento a rischio è solitamente definito da un indice (qualitativamente) o in termini monetari (quantitativamente).

L'esposizione di un elemento a rischio è la probabilità che un elemento a rischio sia presente nell'area interessata dalla frana quando si verifica. Maggiore è il tempo trascorso in quella zona, maggiore è l'esposizione a rischio (ad esempio, un edificio situato in zona instabile ha un'esposizione del 100%).

Il calcolo della vulnerabilità per valanghe e smottamenti richiede un modello accurato del comportamento del flusso, è anche noto che in qualsiasi modello saranno presenti errori e approssimazioni. Per la sua valutazione devono essere note l'entità (contenuto energetico, ad esempio) e le caratteristiche di propagazione (direzione rispetto all'elemento a rischio, ad esempio) del fenomeno, nonché le proprietà geometriche e meccaniche delle strutture e infrastrutture. È necessario uno studio dettagliato e completo dell'interazione tra l'elemento a rischio e la valanga.

In letteratura esistono vari approcci per definire la vulnerabilità di una valanga, si citano due esempi:

- Jónasson et al. (1999) hanno collegato la velocità delle valanghe alla probabilità di sopravvivenza mediante una tecnica di massima verosimiglianza per stimare la vulnerabilità;
- studi che collegano la neve che scorre e le pressioni di impatto. (Mellor 1978; McClung e Schaerer 1985, Kristensen 1997)

5.3 Stima del rischio

Il rischio può essere calcolato combinando la probabilità spaziale e temporale, la vulnerabilità, l'esposizione e il valore dell'elemento a rischio:

$$R_t = H \times V \times E_s \times W = H \times D \quad [Eq. 5.5]$$

Il passo successivo è quello di mappare il rischio con un colore o secondo vari indici definibili, dipende sostanzialmente dall'uso che servirà.

Secondo i metodi usati per la valutazione del rischio può essere espresso in vari modi:

- rischio annuale: costo annuale per la riparazione o ricostruzione degli elementi strutturali a rischio o la probabilità annua che la persona più esposta al rischio perda la vita;
- probabilità-conseguenze per un rischio specifico: probabilità (solitamente annuale) che si possano verificare determinate conseguenze (danni strutturali, perdita di vite umane, ecc.);
- probabilità-conseguenze per il rischio totale: probabilità cumulativa che si possano verificare determinate conseguenze, tenendo conto di tutti i possibili scenari di rischio.

Siccome le stime su cui ci si basa sono affette da aleatorietà e incertezze epistemiche spesso si usano metodi probabilistici: ogni fattore entra nel calcolo del rischio con una propria distribuzione probabilistica e il risultato finale (il rischio) è quindi caratterizzato da una distribuzione di probabilità.

Si possono definire quattro limiti (Couture *et al.*, 2013) di accettazione per il rischio (Figura 5.4):

- UNACCEPTABLE cioè rischio inaccettabile: il rischio è così alto che la società non è disposta ad accettarlo, in questo caso sono necessarie misure di mitigazione per la sicurezza della comunità;
- ALARP (As Low As Reasonably Practicable): il livello di rischio è compreso tra quello accettabile e quello inaccettabile, in questo caso è tollerabile se i costi per la sua riduzione sono maggiori di quelli dei danni;
- BROADLY ACCEPTABLE cioè rischio tollerabile: le persone sono preparate ad affrontare questo livello di rischio, non sono necessarie ulteriori misure di mitigazione a meno che non siano trascurabili in termini di tempo e costi;
- INTENSE SCRUTINY REGION cioè regione di controllo intenso: è legata a eventi rari che possono causare la morte di molte persone, in questo caso sono necessarie valutazioni specifiche.

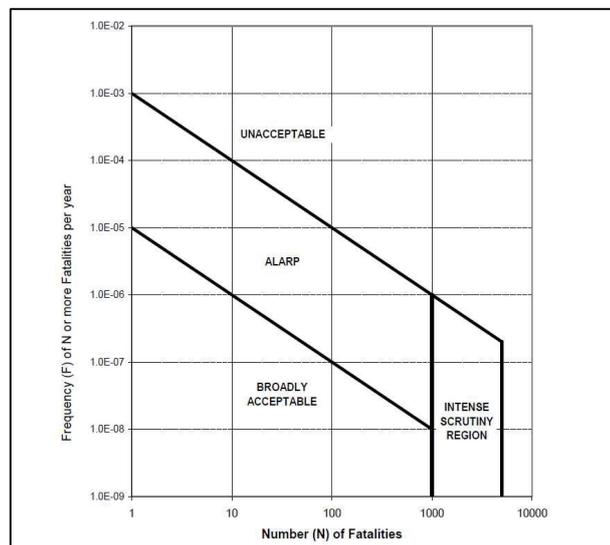


Figura 5.4: Esempio di diagramma F-N (frequenza-numero di vittime) e le relative soglie. (Couture *et al.*, 2013)

Mitigare il rischio significa attuare interventi ingegneristici e non, al fine di abbassare il rischio e definire un rischio residuo R_r :

$$R_r = R_t - \Delta R \quad [Eq. 5.6]$$

ΔR quantifica di quanto questo si è abbassato in seguito alle azioni pensate. A questo punto rimane da confrontare se il rischio residuo è accettabile: le soglie di accettabilità sono una funzione del quadro socio-economico dipendente anche dall'opinione pubblica, per esempio il fatto che in località montane avvengono valanghe è un fatto con cui le persone locali sono abituate a convivere quindi non sarà necessario per forza azzerare il rischio.

Le strategie di mitigazione possono essere raggruppate in due categorie (Pierson L.A. e Vierling M.P., 2012):

- ingegneristiche, che agiscono sulle caratteristiche del fenomeno e sugli elementi a rischio;

- non ingegneristiche, che includono attività gestionali, pianificazione e protezione civile.

La miglior strategia deve essere scelta con un'analisi costi benefici, tuttavia è possibile intervenire su ogni termine che definisce il rischio di [Eq. 5.2]. Intervenire su H e V rientra tra gli interventi ingegneristici: per quanto riguarda la prima si potrebbero posizionare in situ opere atte a impedire che la valanga si inneschi (nella nicchia) e/o opere che impediscono la propagazione, per la seconda attuare rinforzi sugli elementi esposti.

Per quanto riguarda i restanti termini, l'esposizione può essere abbassata diminuendo il tempo trascorso dall'elemento a rischio nell'area (delocalizzazione, interruzioni del transito, monitoraggio dell'area potenzialmente instabile e dei sistemi di usura, ecc.), tuttavia spesso non è possibile tale operazione; mentre il valore degli elementi a rischio, per esempio, cambiando destinazione d'uso dei terreni e strutture.

Le operazioni di mappatura e intervento andrebbero fatte su mappe di scala adeguata all'obiettivo infatti, per esempio, scale con poca risoluzione non si prestano a localizzare un intervento di difesa attivo o passivo; in Figura 5.5 si fornisce un'idea numerica del concetto secondo due autori.

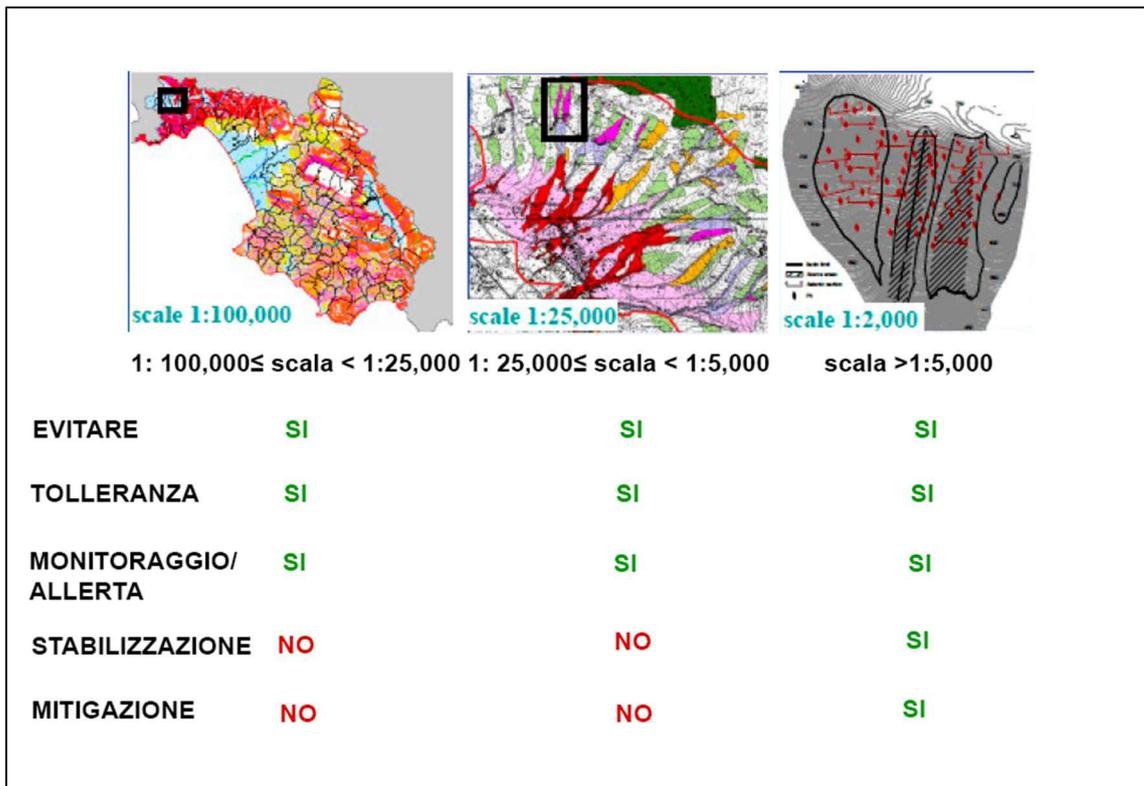


Figura 5.5: Riduzione del rischio: strategie e relative scale (Cascini, Fornaro and Peduto, 2009). (Modificato da Vigna, 2021)

Scale of work	Runout	I(M)/F ²	Hazard descriptor
National <1:250,000	Not included	Not considered	No. of landslides/ administrative unit/year
Regional 1:250,000–1:25,000	Usually not included	Often a fixed (constant) magnitude value	No. of landslides/ km ² /year
Local 1:25,000–1:5,000	Included	Spatially distributed magnitude (intensity)	Annual probability of occurrence (or return period) of a given magnitude or intensity
Site-specific >1:5,000	Included	Spatially distributed intensity	Annual probability of occurrence (or return period) of a given intensity

Figura 5.6: Esempi di descrittori di pericolo per affrontare potenziali smottamenti a diverse scale di lavoro. (Corominas et al., 2014)

5.4 Metodo IMIRILAND

Il Quantitative Risk Assessment (QRA), letteralmente “valutazione quantitativa del rischio”, è un metodo per quantificare il grado di rischio attraverso un esame sistematico dei fattori che contribuiscono al pericolo di frane e la definizione delle probabilità per i singoli fattori; può anche essere utilizzato per ottimizzare dal punto di vista costi-benefici la mitigazione dello stesso. Il QRA deve rispondere ai seguenti quesiti sull’evento oggetto di studio: (Bonnard, Christophe; Forlati, F.; Scavia, 2013)

- Cosa può causare?
- Dove può avvenire?
- Quanto spesso?
- Quanto sarà severo l’impatto?

Il metodo IMIRILAND (Impact of Large Landslides in the Mountain Environment: Identification and Mitigation of Risk) nasce con l’obiettivo di migliorare il metodo QRA in seguito a un progetto sostenuto dall’UE dal 1° marzo 2001 al 31 dicembre 2003, è devoluto per fenomeni franosi ma è già stato collaudato per il caso valanghe.

In questo metodo la definizione di rischio vuole includere tutte le possibili conseguenze che corrispondono a ogni fonte di vulnerabilità: rischio fisico, rischio sociale, rischio ambientale e rischio economico. Sarà necessario definire queste 4 componenti del rischio per la difficoltà di attribuire valori confrontabili a tutte le diverse categorie di beni e persone e, quindi, di ottenere scenari di rischio comparabili.

Per affrontare il problema della valutazione del rischio da un punto di vista quantitativo (QRA) e anche rigoroso occorre che ogni componente del rischio:

- Deve essere espressa numericamente;
- Deve essere rappresentata spazialmente.

Segue che per computare il rischio si useranno semplici prodotti matriciali (Figura 5.6) e una rappresentazione spaziale su un software GIS.

Il metodo segue 3 fasi consequenziali ben distinte:

- Quantificazione della pericolosità;

- Analisi del danno;
- Calcolo del rischio.

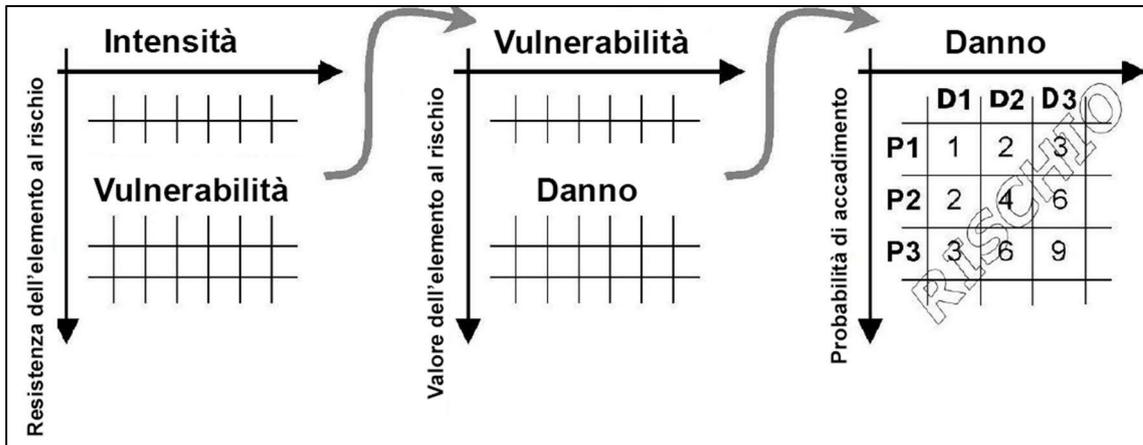


Figura 5.7: Schema di calcolo del rischio matriciale, (Bonnard, Christophe; Forlati, F.; Scavia, 2013). (Modificato da Vigna, 2021)

Nell'ambito del presente lavoro di tesi, in cui la metodologia IMIRILAND è applicata alle valanghe di neve, si può dire che le differenze sostanziali rispetto all'applicazione del metodo alle frane sono legate alla valutazione della pericolosità. Essa risulta differente poiché diverse sono le proprietà delle masse in movimento. Sarà dunque necessario calibrare il metodo opportunamente al fine di individuare un corretto valore di rischio per il fenomeno delle valanghe di neve.

5.4.1 Valutazione della pericolosità H

Il metodo IMIRILAND segue un approccio multidisciplinare per la valutazione della pericolosità e quindi si useranno differenti tipi di analisi (Bonnard, Christophe; Forlati, F.; Scavia, 2013):

1. Analisi geomorfologica: si intende l'identificazione del pericolo cioè comprende il meccanismo di innesco, le possibili evoluzioni del fenomeno in base a dati storici e la necessità o meno di definire sistemi di allerta. In altre parole, la caratterizzazione del pericolo fornisce una prima schematizzazione del fenomeno studiato, finalizzata ad orientare e supportare la modellazione numerica;
2. Analisi dei dati storici: se si è in possesso di documentazione di eventi passati, possono fornire da base alla conoscenza delle sue conseguenze e di come si sviluppa in quell'area
3. Analisi geomeccanica: l'indagine delle proprietà meccaniche del mezzo instabile in sito al fine di determinare la probabilità che si verifichi un evento; operazione estremamente difficile nei pendii e ancora di più, se non impossibile, per le valanghe. L'unica operazione possibile è trattare dati storici ma si perde la valutazione in termini deterministici;
4. Modellazione geomeccanica: modelli di run-out numerici per simulare le sue conseguenze sul territorio

L'analisi dei rischi richiede la valutazione della probabilità di accadimento nel tempo; tuttavia il tempo è di grande incertezza nell'analisi della pericolosità per rischio frane/valanghe.

Una procedura che si adatta al caso in esame presente in letteratura è quella proposta da Mayoraz et al., 1997: tiene conto della relazione tra l'intensità degli eventi scatenanti, come piogge o terremoti, e il verificarsi di frane, attraverso l'uso di correlazioni empiriche o metodi più sofisticati. Per esempio, assumendo di riuscire ad avere un modello numerico congruo con la realtà, si può calcolare quale magnitudo delle forzanti esterne naturali porti ad alla condizione limite. Successivamente, sarà lecito assumere che l'evento modellato abbia il tempo di ritorno della causa esterna, tuttavia è un processo che richiede molta sensibilità del progettista e numerose incertezze da considerare.

5.4.2 Stima del danno

Una volta individuati gli scenari di pericolosità, ciascuno caratterizzato da un'area in cui si conosce la distribuzione dell'intensità dell'evento, nonché la corrispondente probabilità di accadimento, è possibile procedere con l'analisi delle conseguenze reali. I passaggi necessari per consentire la definizione delle conseguenze sono i a seguire:

- identificazione degli elementi a rischio;
- quantificazione del valore degli elementi a rischio;
- valutazione della vulnerabilità;
- conseguenza = valore elementi a rischio per la vulnerabilità.

Il primo passo del precedente elenco si ottiene sovrapponendo le simulazioni di run-out con una mappa del territorio. Si potrebbe anche sovrapporre con dati territoriali (uso del suolo secondo pianificazione urbanistica e territoriale, distribuzione della popolazione secondo studi demografici statistici, elementi strategici definiti ad es. ecc.).

Gli elementi a rischio saranno quantificati monetariamente o valutati con indici relativi al fine di ottenere un calcolo delle conseguenze (impatto atteso).

Nell'ambito della metodologia IMIRILAND sono state individuate quattro categorie di valore, a partire dalle quali vengono condotte distinte analisi di rischio che permettono di mantenere separati i beni dalle persone. Le tipologie, come si andrà a valutarne il valore economico e la loro vulnerabilità sono riportate in Tabella 5.3.

<i>Danno $D = W \times V$</i>		
Tipologia di elementi:	Valore W	Vulnerabilità V
Fisico	Legato al valore in sé del bene o dell'area d'interesse, in considerazione anche della loro tipologia e di eventuali costi di ricostruzione	Relativo alle strutture, tiene conto dell'entità dell'evento e delle caratteristiche di resistenza e delle condizioni manutentive della struttura
sociale	Legato alla presenza dell'uomo	Relativo alle persone, tiene conto

	ed alla utilità sociale di un bene (ad esempio di un ospedale); in esso possono rientrare eventualmente anche i danni psicologici che un evento calamitoso può causare nelle persone colpite	dell'entità dell'evento e della capacità delle persone di prendere coscienza del fenomeno e di allontanarsi dall'area interessata (tempo di preavviso)
Economico	Legato alle attività produttive o commerciali (fatturato, guadagni, introiti, ecc.) e in generale alla loro interruzione	Relativo all'interruzione di attività economiche, tiene conto dell'entità dell'evento, del tipo di attività coinvolta e della possibilità di evitare disagi
Ambientale	Legato alle caratteristiche florofaunistiche e paesaggistiche (storico-culturale architettonico) di un'area	Relativo ai beni ambientali, tiene conto dell'entità dell'evento, della tipologia dei beni ambientali, della capacità di ripopolamento delle specie naturali

Tabella 5.3: Suddivisione degli elementi a rischio secondo il metodo IMIRILAND.

La modalità operativa per determinare il valore dei beni mediante indici è del tutto soggettivo a chi redige la carta, un esempio è riportato in Figura 5.8: per ogni elemento a rischio è stato indicato un "indice di valore relativo". Quando elementi (beni e attività economiche) possono essere valutati monetariamente, gli indici rappresentano un costo relativo. In queste tabelle, i valori relativi sono stati valutati in modo arbitrario (utilizzando gli indici da 1 a 4) e, quindi, hanno solo un significato relativo in ciascuna delle categorie considerate.

Element at risk	Assets value	Relative value of interruption of economic activity	Environmental relative value
Densely built modern cities (with high-rise buildings)	4	4	1
Historical city centers	4	2	4
Residential areas	4	1	1
Productive or industrial areas	4	4	1
Strategic services and facilities	4	4	2
Extra-municipal infrastructures and plants	4	4	2
Valuable buildings or valuable rural centers (historical, architectural, artistic and/or cultural value)	3	1	3

Figura 5.8: Esempio di attribuzione di indici agli elementi soggetti al rischio. (Bonnard, Christophe; Forlati, F.; Scavia, 2013)

Esistono due procedure di calcolo della vulnerabilità:

1. A ciascuna categoria di vulnerabilità sono state applicate 5 classi di perdita percentuale (0, 0,25, 0,5, 0,75, 1). Attraverso studi dettagliati si potrebbe, invece, attribuire vari pesi a varie classi percentuali in base a “curve di utilità”. Ad esempio, nel caso di interruzione stradale per la vulnerabilità economica alcuni studi hanno evidenziato una curva di tipo logaritmico Figura 5.9a, poiché la vulnerabilità diminuisce con il passare del tempo per l'apertura delle strade alternative (es: indici variabili – 0, 0,5, 0,8, 0,95, 1 – in funzione del tempo trascorso).

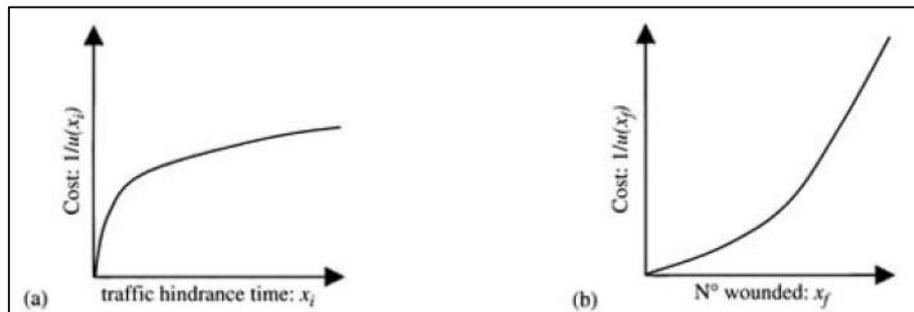


Figura 5.9: a) Variazione del costo del traffico impedito in funzione del tempo; (b) Variazione non lineare del costo del soccorso e dell'assistenza medica in funzione del numero di persone. (Crosta et al, 2001)

2. Ci si basa sull'entità dell'evento con stime energetiche date dalle simulazioni. Quindi si possono applicare i coefficienti di vulnerabilità proposti in Figura 5.10.

Physical vulnerability		Social vulnerability		
Vulnerability description	Loss range	Index	Vulnerability description	Index
Intact structures	0	0	Non-affected persons	0
Local damage	1+25%	0.25	No physical damage, evacuated persons	0.25
Serious damage (possible to repair)	26+50%	0.5	Physical damage (persons may continue their activities)	0.5
Mostly destroyed structures (difficult to repair)	51+75%	0.75	Seriously wounded persons (up to 50% disability)	0.75
Total destruction (out of use; e.g. >5% inclination)	76+100%	1	Fatalities, 51–100% disability	1
Environmental vulnerability		Economic vulnerability		
Vulnerability description	Loss range	Index	Vulnerability description	Index
Intact element	0	0	No interruption	0
Local loss	1+25%	0.25	Short temporary interruption (hours to day)	0.25
Serious damage (possible to repair)	26+50%	0.5	Average temporary interruption (days to week)	0.5
Mostly destroyed elements (difficult to repair)	51+75%	0.75	Long temporary interruption (weeks to months)	0.75
Total destruction	76+100%	1	Permanent interruption	1

Figura 5.10: Esempio di valutazione dei valori dei fattori di vulnerabilità per aspetti fisici, sociali, ambientali, economici. (Bonnard, Christophe; Forlati, F.; Scavia, 2013)

Siccome nell'esempio esposto il valore è in una scala relativa tra 1 – 4 e la vulnerabilità un coefficiente compreso tra 0 – 1 quattro classi di danno si ricaveranno.

5.4.3 Calcolo del rischio

Grazie alla metodologia analizzata, il pericolo (H) è stato definito dalle sue tre componenti: area interessata, intensità del processo e probabilità di accadimento. L'area interessata (utilizzata per l'identificazione degli elementi a rischio) e l'intensità del processo (necessaria

per l'identificazione delle vulnerabilità) sono già state utilizzate e incluse nelle conseguenze. Quindi, il rischio è il risultato del prodotto della probabilità di accadimento (P) e delle sue conseguenze (C):

$$R = P \times C \quad [Eq. 5.7]$$

Analogamente al calcolo delle conseguenze, l'approccio matriciale utilizzato nella valutazione del rischio prevede una semplice moltiplicazione tra due classi di valore il cui risultato è l'indice di rischio definito per ciascuna categoria di vulnerabilità, ottenendo così il valore fisico, sociale, ambientale ed economico rischi. Questa operazione deve essere ripetuta anche in questo caso per ogni scenario di pericolo, o comunque per ogni specifica probabilità di accadimento considerata. In questo modo, vengono derivate quattro mappe di rischio per ogni scenario.

6 IMPOSTAZIONE DELLE ANALISI NUMERICHE E RISULTATI

Eseguire analisi numeriche dinamiche di una valanga significa in sostanza risolvere il sistema di [Eq. 4.35], al di là dei problemi numerici che sussistono nella risoluzione numerica di equazioni differenziali alle derivate parziali è necessario definire diversi aspetti descrittivi del contesto in cui si opera. In questo lavoro di tesi ci si concentra su analisi di propagazione cioè non si studia se avviene o meno l'innesco della valanga ma lo si considera come avvenuto.

In questo lavoro di tesi si è deciso di utilizzare la versione commerciale di RAMMS v1.7.0 (Rapid Mass Movements Simulation) sviluppato da ricercatori svizzeri dell'Istituto Federale Svizzero per lo Studio della Neve e delle Valanghe di Davos (SLF). (Bartelt *et al.*, 2017) RAMMS è un software bidimensionale sviluppato per simulare la propagazione di valanghe su un terreno tridimensionale. E bene specificare sin da subito quali semplificazioni assume rispetto alla trattazione completa proposta:

- $\dot{Q} = 0$ cioè non si possono tenere in considerazione fenomeni di erosione quindi la massa della valanga è costante, non sarà nemmeno necessario eseguire la suddivisione in strati di cui si è parlato;
- $k_{\frac{a}{p}} = 1$ quindi stato tensionale isotropo nel corpo della valanga;
- Si trascura la variazione di energia cinetica random nel corpo valanga, se così non fosse i parametri reologici del modello Voellmy-Salm sarebbero funzione della velocità, la densità non sarebbe lecito assumerla costante, profilo delle velocità non rettangolare ed entrerebbero in campo anche le grandezze di temperatura e umidità;
- Come già trattato si farà riferimento al modello reologico di Voellmy-Salm con coesione nel quale si assumerà profilo delle velocità rettangolare.

In definitiva le equazioni che RAMMS risolverà saranno:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}_x}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}_y}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial h\bar{v}_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(h\bar{v}_x^2 + g_z \frac{h^2}{2} \cos(\psi) \right) + \frac{\partial h\bar{v}_x\bar{v}_y}{\partial y} = hg_x - S_{fx} \\ \frac{\partial h\bar{v}_y}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}_x\bar{v}_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(h\bar{v}_y^2 + g_z \frac{h^2}{2} \cos(\psi) \right) = hg_y - S_{fy} \end{array} \right. \quad [Eq. 6.1]$$

Questo software utilizza per le integrazioni delle suddette equazioni il metodo ENO (Essentially Non-Oscillatory) del secondo ordine: rispetto il metodo originale, adottato nelle versioni precedenti, integra su una griglia quadrilatera generale e non più ortogonale migliorandone la stabilità numerica; un altro pregio di questa modifica è che permettere di controllare l'algoritmo con un valore altezza di flusso di cutoff (valore soglia) minore cioè di 0,000001 m, così facendo si riduce al minimo la perdita di massa durante i calcoli.

Nel seguito di questo capito si analizzeranno tutte le scelte effettuate nei modelli sviluppati per l'elaborazione della carta di rischio.

6.1 DATI DI PARTENZA

L'approccio più corretto sarebbe quello di analizzare eventi passati ben documentati e cercare di riprodurli al meglio con analisi numeriche, cioè eseguire una "back-analysis". Per la ricerca di eventi storici ci si è affidati al Dott. Geol. Cavagnino, professionista a cui originariamente è stato affidato l'incarico e che conosce molto bene la zona.

Precedentemente è già stato svolto uno studio di pericolosità denominato "Piano di Gestione del Rischio Valanghe (P.G.R.V.) della Valsesia" (Stefanini and Barbolini, 2011): volto solo a conoscere i potenziali scenari, infatti riguarda un'area molto ampia, circa 64000 ettari, quindi non si è potuto scendere nel dettaglio dei singoli siti. Nel lavoro appena menzionato è stato utilizzato come dato di partenza l'"Archivio Valanghe della Valsesia" (c.d. Fontana) ossia un archivio svolto negli anni '70 in cui sono raggruppati tutti gli eventi di cui si è riuscito ad avere qualche informazione: alcuni solo con testimonianze orali, altri con rilevamenti svolti dallo stesso. Tuttavia è un documento ancora cartaceo e non si è potuto consultare vista l'irraggiungibilità del Sign. Fontana.

L'unica informazione specifica sul sito oggetto di studio raccolta dal dott. Cavagnino è la seguente: è risaputo dagli abitanti del posto che la strada SP82 è frequentemente soggetta a piccoli eventi valanghivi. Praticamente dopo ogni nevicata che provochi un minimo accumulo, sono sufficienti 10-20 cm, quando si innalzeranno le temperature, volumi anche modesti di neve scivoleranno sulla strada impedendone la circolazione, per ripristinare la viabilità occorre uno sgombero con appositi mezzi. Sono eventi stimabili con tempo di ritorno annuale, non è mai stato possibile misurare la volumetria ma si ha a disposizione solo della documentazione fotografica (Figura 6.1). Simulare numericamente tali fenomeni non è possibile per la modesta quantità di neve messa in moto, si parla di pochi metri cubi; in aggiunta l'area di distacco è qualche metro a monte della strada quindi calcolare traiettorie così brevi e ovvie perde di significato, è palese come un volume siffatto si fermerà sulla strada e arriverà con basse pressioni. Inoltre occorrerebbe una conoscenza molto dettagliata della topografia non raggiungibile con il modello digitale del terreno disponibile.



Figura 6.1: Testimonianze fotografiche degli eventi con cadenza annuale raccolte nell'inverno del 2009 dal Dott. Geol. Cavagnino.

L'ultimo elemento a disposizione è la CLPV (Carta di Localizzazione Probabile delle Valanghe), desumibile dal sito del SIVA (Sistema Informativo Valanghe a cura di Arpa Piemonte) grazie allo strumento di "GEOVIEWER".

Il SIVA è un mezzo consultabile liberamente che raggruppa dati cartografici, dati alfanumerici, fotografie e documenti storici di eventi valanghivi del Piemonte e non solo. Viene regolarmente aggiornato reperendo i nuovi eventi e in esso sono già inglobati i primi dati di istituzione del Servizio Nivologico della Regione Piemonte, ora di Arpa Piemonte. Oltre alla CLPV comprende la Carta dei Siti Valanghivi (CSV), ambedue redatte in scala 1:25000 e sono ricavate dallo studio foto-interpretativo di immagini aeree estive: persone esperte in materia confrontando foto aeree, o di altra natura, riescono a individuare dove in passato sono avvenute valanghe significative da segni lasciati dalle stesse sul territorio.

Il SIVA, nella zona di interesse, mostra varie aree riportate in Figura 6.2. Nella zona interessata dallo studio se ne vedono sei: essendo ricavate da fotointerpretazioni estive non si ha a disposizione una descrizione degli eventi che hanno creato i marcatori usati alla loro definizione, in particolare proprio per queste aree appare la dicitura "scheda in allestimento" quindi non si hanno informazioni più precise.

Non avendo documentazione a supporto si supporrà che le tracce a disposizione siano causate da eventi estremi tali da lasciare segni significativi anche temporalmente lontano dagli stessi, per quantificarli si attribuisce a tali eventi un tempo di ritorno pari a 300 anni.

La prima parte delle analisi corrisponderà nel cercare di simulare al meglio eventi estremi con $T_{rit} = 300 \text{ anni}$ al fine di riprodurre le tracce riportate dalla CLPV; in un secondo tempo si estenderanno i risultati a tempi di ritorno pari a 100 anni, 30 anni e 10 anni. Potrebbe sembrare una ipotesi un po' forzata ma in mancanza di dati più accurati è la miglior soluzione possibile.

Siccome lo studio ha come obiettivo capire l'agibilità della strada e i pericoli che incorrono sulla stessa gli eventi denominati sulla CLPV come 1878, 465 e 824 (Figura 6.2) sono trascurabili. Non sarebbe un motivo sufficiente il fatto che in pianta le aree di invasione non interessano la strada, bensì il dislivello che intercorre tra il fiume (azzurro) e la strada (arancione) oltrepassa in tutti i punti gli 8-10 m quindi è impossibile che le valanghe di queste aree raggiungano la carreggiata, posto sul versante opposto.

Sul Geo-portale della Regione Piemonte (<http://www.geoportale.piemonte.it/geocatalogorp/>) è consentito scaricare un DTM della zona, la maggior risoluzione disponibile è di 5 m quindi si userà come base per le analisi numeriche. Sarebbe stato interessante abbinare dei voli con droni per creare un modello del terreno di maggiore risoluzione, ma i fondi a disposizione per questa zona sono limitati.

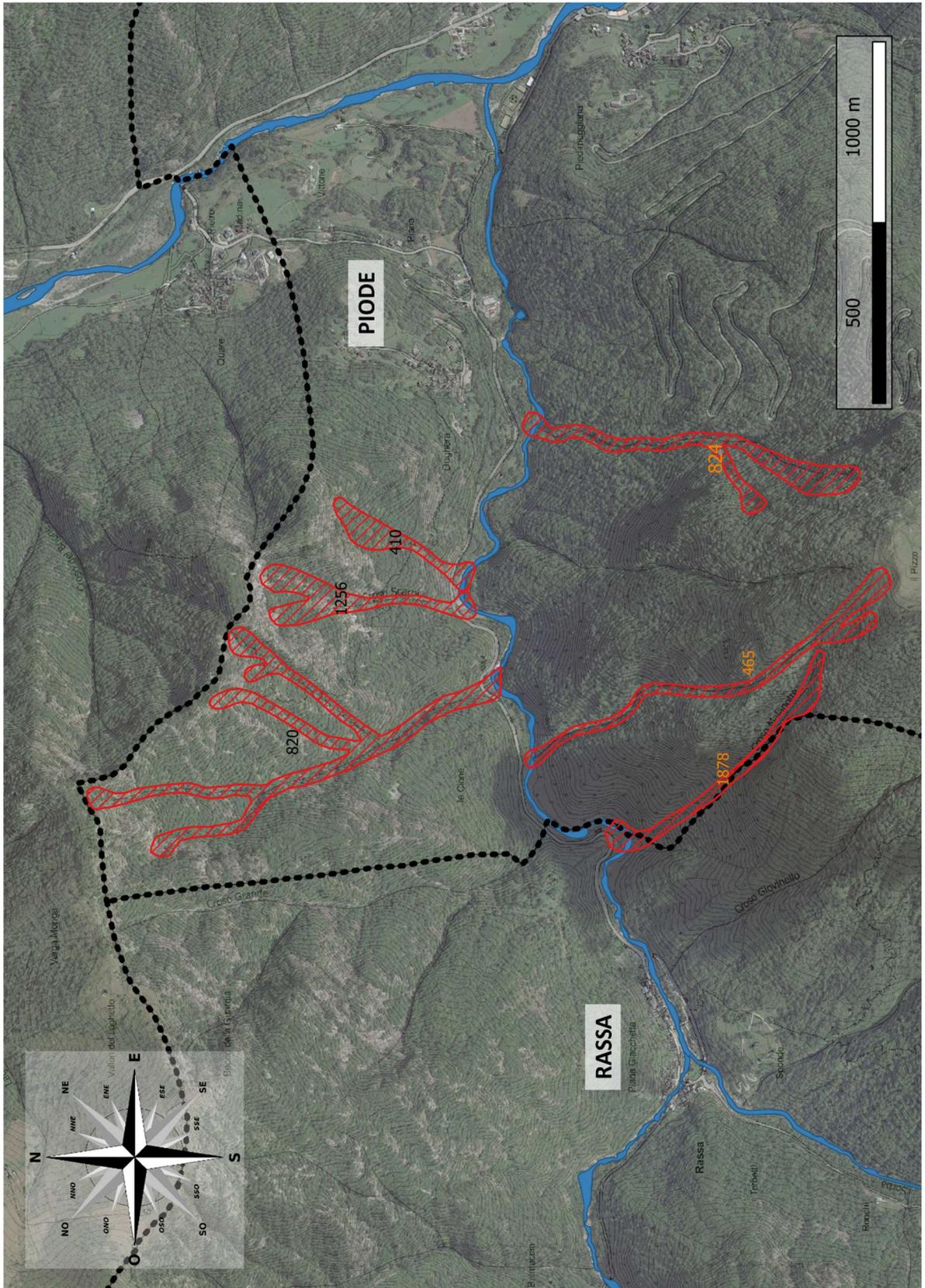


Figura 6.2: CLPV nella zona SP 82 tra Rassa e Piode rappresentata su QGIS.

6.2 SETTAGGIO DELLE ANALISI

6.2.1 Area di distacco

Per area di distacco si intende quella zona in cui la neve instabile inizia il movimento, come spiegato nel primo capitolo il meccanismo inizia in seguito a una linea di frattura che è preceduta dalla sua propagazione. Questo elemento, nel caso valanghe, è il parametro che maggiormente influenza il risultato dell'analisi pertanto sarà il parametro con il quale si presterà più attenzione, inoltre non è ben quantificabile come per altri fenomeni.

Come esistono principalmente due tipologie di valanghe esistono anche le analoghe e distinte aree di distacco (McClung and Schaerer, 1953):

- le valanghe a debole coesione iniziano in un volume molto piccolo quasi puntuale, l'ordine di grandezza è il metro cubo, in uno strato superficiale con bassa o nulla coesione;
- le valanghe a lastroni si generano in un'area dove esiste uno strato in profondità più debole. Osservazioni (Perla, 1980) fanno emergere come il rapporto tra larghezza e spessore del lastrone vari tra 10 – 1000, tuttavia altezze ordinarie dello stesso sono sull'ordine del metro.

Nonostante i modelli trattino la sola parte di dinamica della valanga in movimento è comunque necessario fornire l'area di distacco; in queste analisi solitamente non si eseguono calcoli di propagazione della frattura per definirla, ma viene contemplata l'esperienza del modellatore e si seguono alcune linee guida presenti in letteratura. Ci si allontana dal concetto di manto nevoso dove nella realtà avviene un cedimento, poi una frattura e quindi il distacco di un lastrone, ma si considera semplicemente che un volume di neve si metta in moto. Il volume di neve è caratterizzato solo dall'area di distacco e dallo spessore di distacco

Le misurazioni su aree di distacco di eventi avvenuti in passato forniscono indicazioni per la loro definizione nei modelli. Si analizzano le conclusioni riportate sul testo "The Avalanche Handbook" (McClung and Schaerer, 1953) riguardanti 200 osservazioni di casi studio:

- le pendenze ordinarie del terreno delle nicchie variano tra 25° – 50° . Per i pendii con inclinazioni inferiori a 25° , lo sforzo di taglio e la deformazione di taglio non sono sufficienti per la propagazione della frattura; per pendii al di sopra di 55° il distacco di valanghe a debole coesione precede quella a lastroni. Il diagramma in Figura 6.3 conferma quanto appena detto, circa i due terzi dei casi rientrano tra 30° – 45° .

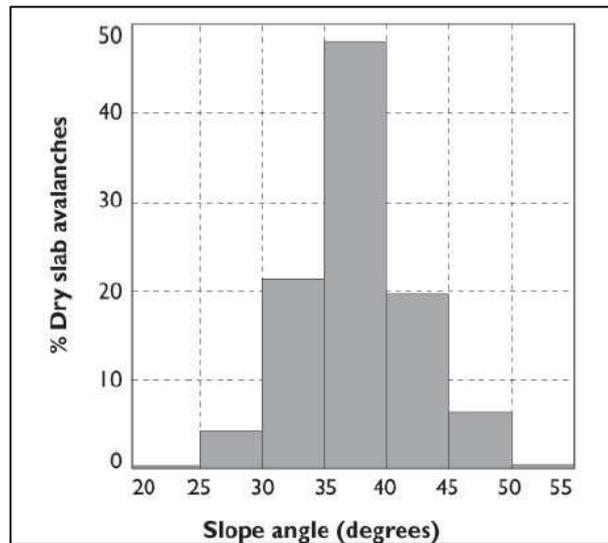


Figura 6.3: Dipendenza dall'angolo di inclinazione da studi sulla linea di frattura. (McClung and Schaerer, 1953)

- gli spessori della corona mostrano in Figura 6.4 che si hanno range tra 10 cm a 2 m con un massimo attorno a 50 cm. Lastroni con spessori maggiori di 2 m si possono avere per cause artificiali come esplosioni;

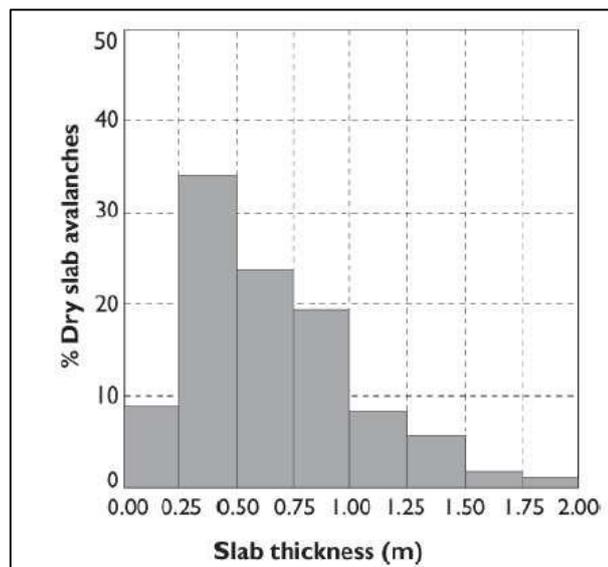


Figura 6.4: Distribuzione dello spessore del manto da studi sulla linea di frattura. (McClung and Schaerer, 1953)

- la stratigrafia del lastrone e la forma della superficie di scorrimento si possono presentare in una tale varietà che risulta impossibile classificarli;
- La larghezza del lastrone dipende molto dalla geometria del terreno. Nell'85% dei casi il rapporto tra larghezze e lunghezza è tra 2-6, mentre non esiste un limite superiore perché è noto che le fratture per taglio si possono propagare per più di 1 km. Le dimensioni tipiche da fianco a fianco sono da 10 a diverse centinaia di volte lo spessore della lastra, in una regione ristretta come un burrone la lunghezza può superare la larghezza. Risultati in Figura 6.5.

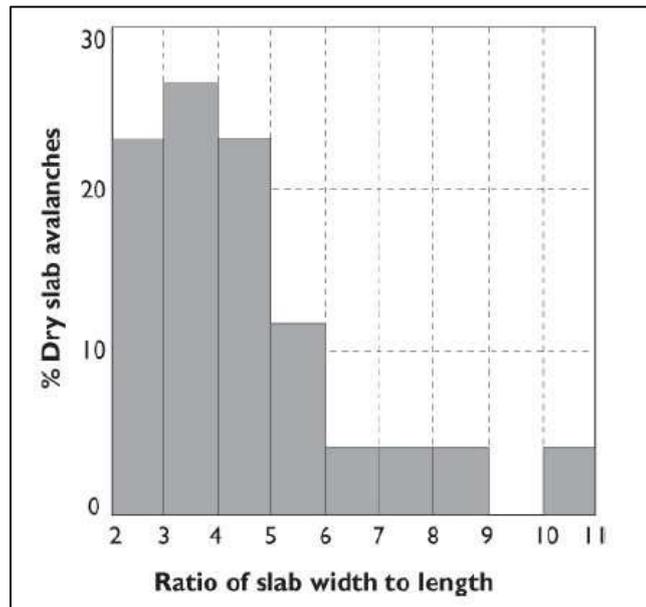


Figura 6.5: Distribuzione della larghezza dei lastroni normalizzata rispetto la lunghezza. (McClung and Schaerer, 1953)

- Le osservazioni sul campo mostrano che la maggior parte delle lastre asciutte si verifica su un pendio planare (piuttosto che convesso o concavo). L'esperienza mostra, tuttavia, che l'inizio della placca è molto più facile nella parte superiore: ciò è probabilmente dovuto a un aumento della facilità di propagazione della frattura da taglio all'aumentare dell'angolo di inclinazione nella direzione della scarpata.
- da esperienze sul campo si evince che un'area di distacco spesso viene delimitata da un cambio di pendenza, una zona a pendenza costante che si imbatte in un cambiamento non per forza brusco di pendenza delimiterà l'area cercata.

Siccome si stanno analizzando scenari con 4 tempi di ritorno è anche ragionevole pensare che oltre i volumi in gioco possano cambiare le aree di distacco. Intuitivamente eventi a tempi di ritorno minori avvengono su superfici più pendenti e più estese perché sarà più difficile che tale configurazione resista ad un innesco, infatti gli corrisponderà una probabilità maggiore. L'ultimo, ma non di minore importanza, elemento che influenza la definizione dell'area di distacco è la presenza o meno della vegetazione: dove le ortofoto mostrano una fitta vegetazione sarà impossibile che si depositi neve. Nelle scelte delle nicchie è capitato svariate volte che proprio nelle zone più in quota delle tracce sulla CLPV, dove quindi ci si aspetta una parte della nicchia, sia presente foresta dovendo a priori escludere tale zona, seppure limitata, dall'analisi. In definitiva i fattori più determinanti per le nicchie sono state le pendenze e la presenza o meno di vegetazione. Un altro fattore che spesso si è tenuto in conto per definire una estremità è la presenza di una rottura di pendenza: zona in cui si passa da una pendenza medio-alta a un tratto pseudo-orizzontale, si può immaginare come in questa corrispondenza ci sia una discontinuità del lastrone di neve.

Si mostra in Figura 6.6 e Figura 6.7 le aree di distacco scelte in conseguenza dei criteri descritti per i due tempi di ritorno maggiori.

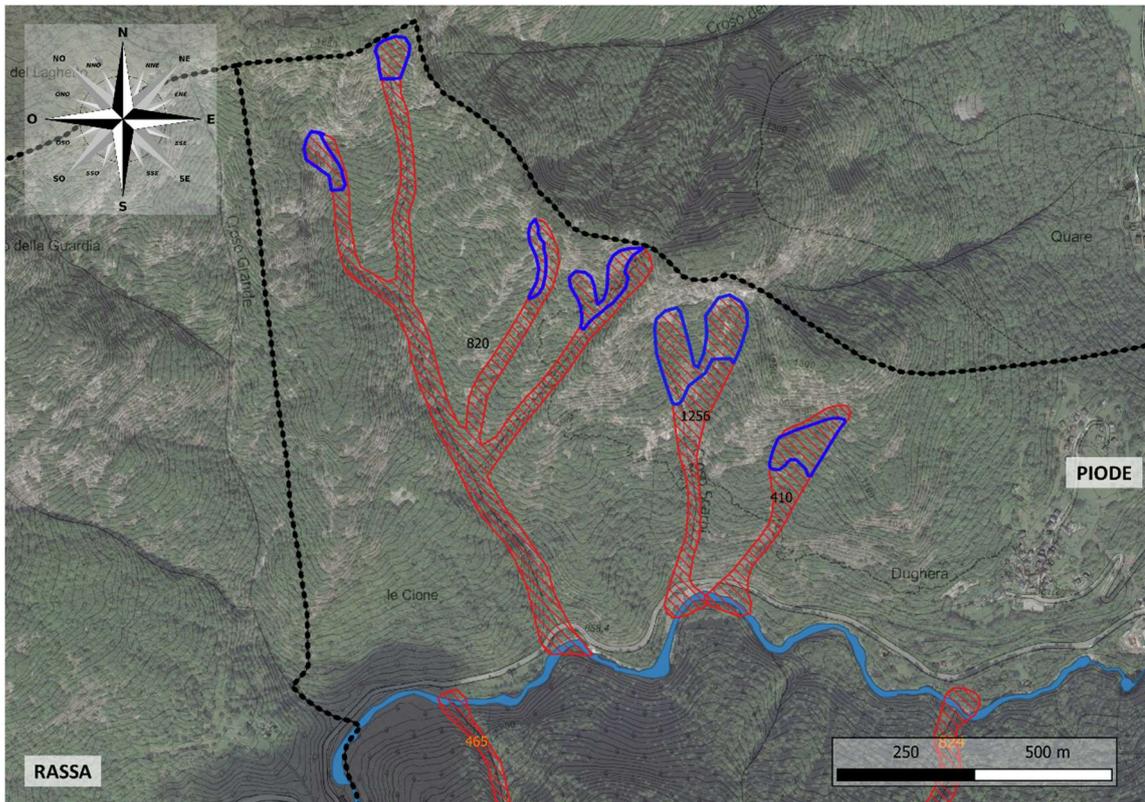


Figura 6.6: scelta delle nicchie di distacco con $T_{rit}=300$ e 100 anni sovrapposte all'ortofoto.

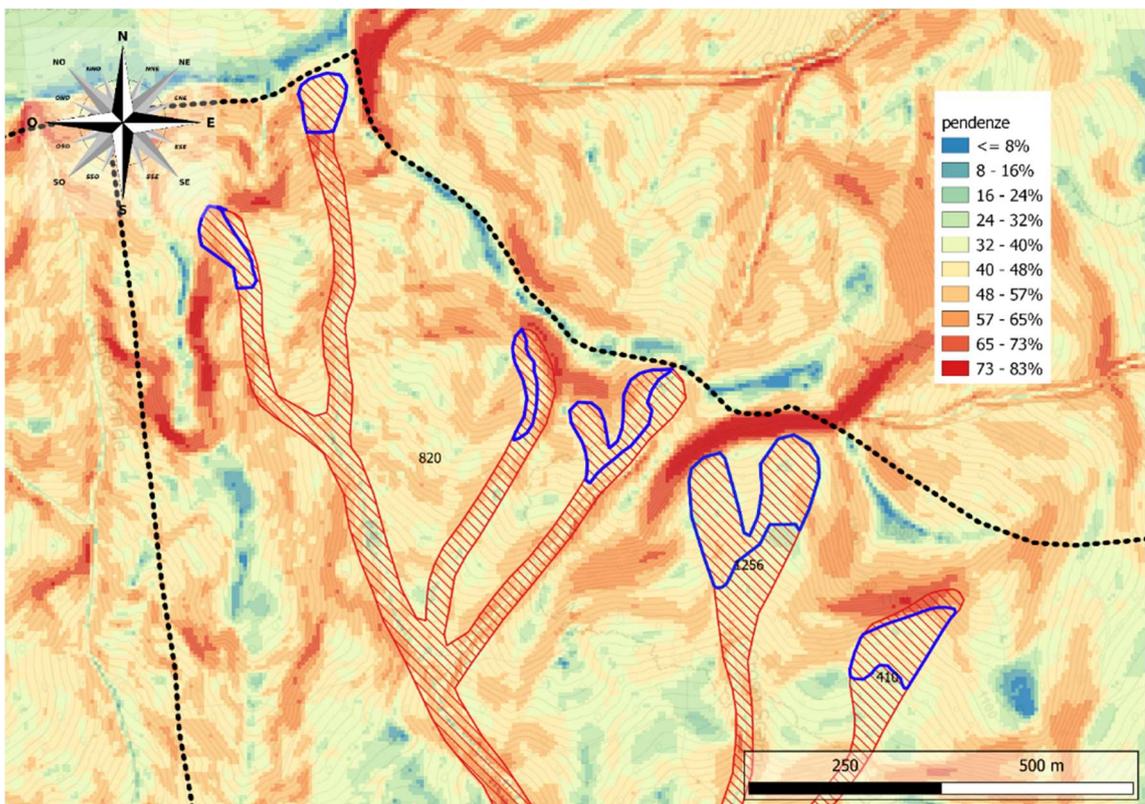


Figura 6.7: scelta delle nicchie di distacco con $T_{rit}=300$ e 100 sovrapposte alla carta delle pendenze.

Talvolta non è stato possibile seguire alla lettera ogni prescrizione: per esempio le zone delle nicchie 810b risultano completamente forestate, dunque si è adottato il solo criterio delle pendenze essendo, consapevoli che i dati a disposizione non godono di alto grado di dettaglio e che trascurare completamente quella zona sarebbe andato a sfavore di sicurezza.

Allo stesso modo si sono valutate le aree di distacco per tempi di ritorno di 30 e 10 anni. Le nicchie 1256 e 410 sono state rimpicciolite leggermente considerando solo la parte più pendente, questo marca il fatto che tempi di ritorno minori hanno maggiore probabilità di accadimento. In Figura 6.8 si riportano le aree scelte.

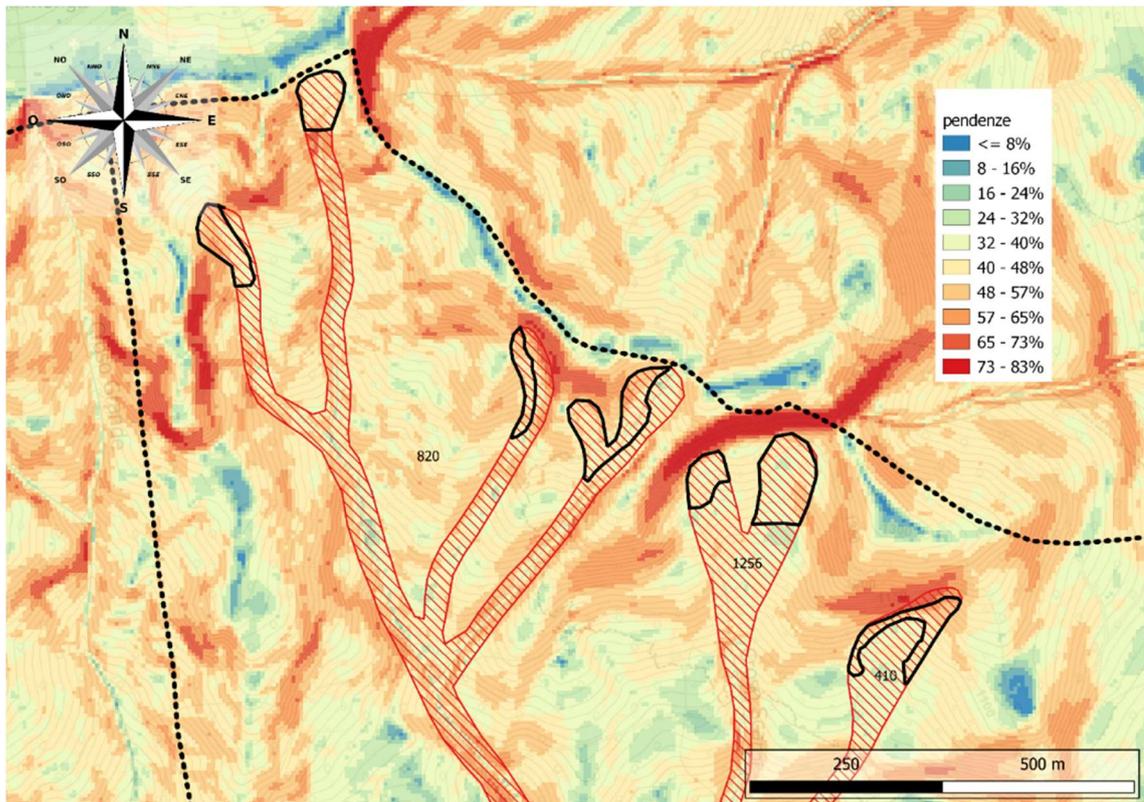


Figura 6.8: scelta delle nicchie di distacco con $T_{rit}=30$ e 10 sovrapposte alla carta delle pendenze.

Si precisa che queste aree sono state definite dopo innumerevoli tentativi: non avendo volumetrie di eventi passati da cui partire si è dovuta variare queste aree finché non si ottenessero stime accettabili. Questa operazione di variazione sulle nicchie è stata abbinata ad una sui parametri reologici successivamente spiegata, sono state necessarie decine di simulazioni prima di ottenere il riscontro desiderato.

6.2.2 Altezze di distacco

Definite le aree dove si staccherà il lastrone di neve occorre definire l'altezza dello stesso per definirne una volumetria. Si utilizza l'approccio delle Direttive Svizzere (Salm et al., 1990), riprese anche dall'AINEVA (Barbolini, 2005): "il calcolo dell'altezza di distacco di una valanga, indicata con H_d è rappresentativa dello spessore misurato perpendicolarmente al pendio della massa nevosa instabile (lastrone), utilizza la seguente relazione":

$$H_d(T, z) = [DH_{3gg}(T, z) + H_{sd}] \cdot \cos(28^\circ) \cdot f(\vartheta) \quad [\text{Eq. 6.2}]$$

Dove:

- $DH_{3gg}(T, z)$ è l'incremento di altezza del manto nevoso (misurato sulla verticale) su tre giorni consecutivi di precipitazione, funzione della zona considerata (ovvero del Comune), del tempo di ritorno T e della quota media della zona di distacco z ;
- H_{sd} è l'altezza (misurata sulla verticale) di neve trasportata dal vento;
- $f(\vartheta)$ è una funzione decrescente della pendenza media della zona di distacco, q , avente la seguente espressione:

$$f(\vartheta) = \frac{0.291}{\sin(\vartheta) - 0.202\cos(\vartheta)} \quad \text{con } \vartheta \geq 28^\circ$$

La dott.ssa Margherita Maggioni, correlatrice della presente tesi ed esperta di dinamica delle valanghe, ha supervisionato la parte numerica dell'elaborato. Inoltre ha fornito un suo lavoro, svolto qualche anno addietro, riguardante la trattazione ai valori estremi delle precipitazioni nevose su una stazione poco distante dalla zona oggetto di studio, circa 15 Km in linea d'aria. I dati tendono ad adattarsi bene ad una distribuzione alla Gumbel (Levera and Maggioni, 2019) e non essendo in possesso di tali dati, in altre stazioni, non si eseguono interpolazioni spaziali, ma solamente correzioni in funzione della quota. Una convenzione universalmente accettata in letteratura è un gradiente di 5 cm ogni 100 m di dislivello sulle altezze nivologiche.

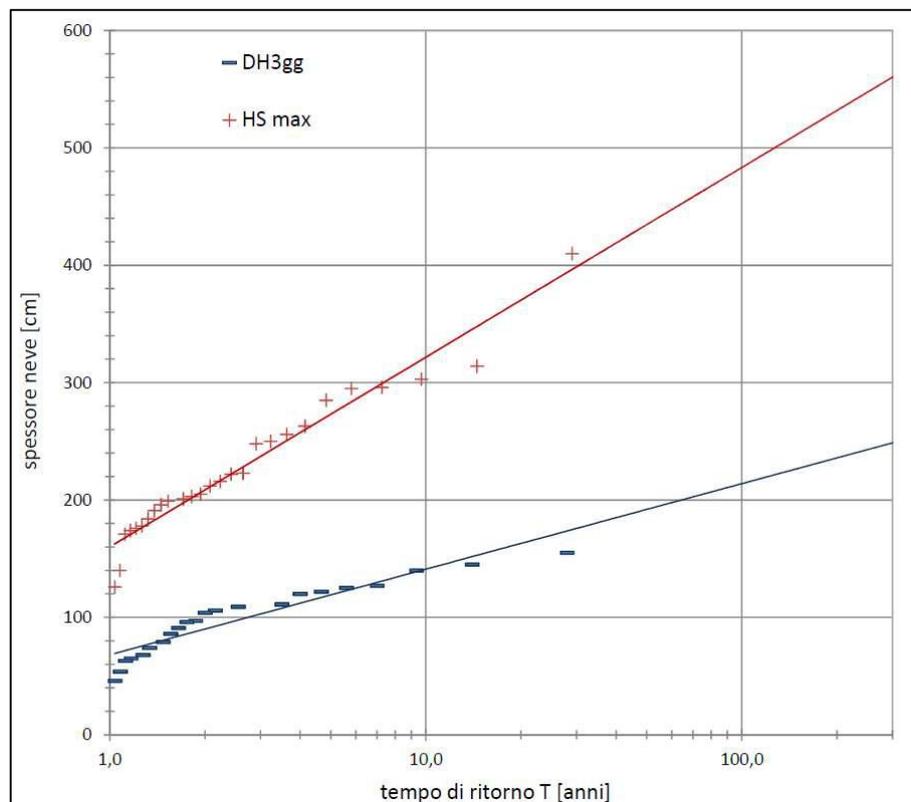


Figura 6.9: Stazione automatica di Bocchetta delle Pisse (2410 m slm): grafico di Gumbel per l'incremento dell'altezza del manto nevoso su tre giorni consecutivi di precipitazione nevosa (DH_{3gg}) e per l'altezza di neve al suolo (HS_{max}). Serie di dati: 1990-2017, 28 anni). (Levera and Maggioni, 2019)

L'altro parametro entrante nella formulazione è H_{sd} : fattore molto importante infatti venti nelle direzioni del versante possono sovraccaricare una zona e creare una nicchia. Il fenomeno, detto snowdrift, tende a formare lastroni nelle zone sottovento altamente instabili: sono caratterizzati da una più rapida velocità di propagazione della frattura. Esistono numerose formulazioni per quantificare il trasporto eolico, principalmente coinvolgono velocità e grado di saturazione; se ne riportano alcune in Figura 6.10. Si tende a precisare che, come mostrato in Figura 6.11 le formulazioni presentano una notevole dispersione e talvolta anche i dati misurati.

Per ovviare a questo deficit di conoscenza si è utilizzata la rosa dei venti del comune più vicino disponibile, cioè di Alagna (VC) riportata in Figura 6.12. I dati utilizzati per la sua costruzione hanno una durata di circa 30 anni e seguono il modello meteorologico globale NEMS (NOAA Environmental Modelling System) a circa 30 Km di risoluzione.

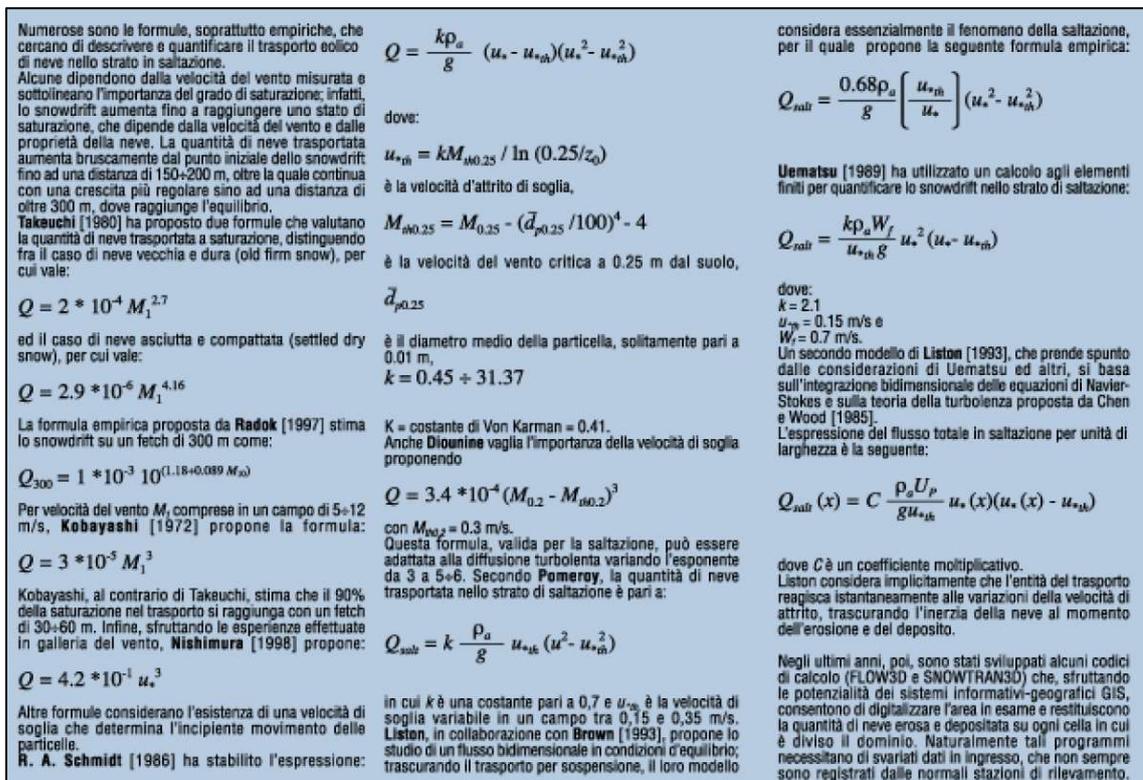


Figura 6.10: Formule empiriche per il trasporto eolico. (A. Bianchi, G. Rossotti and C. Sbarufatti, no date)

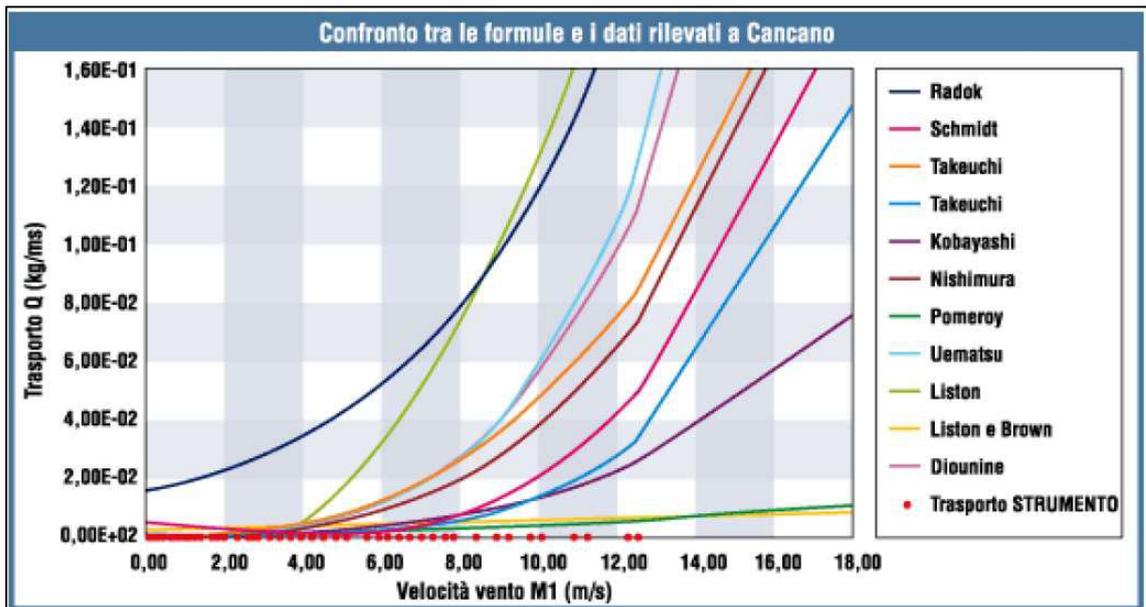


Figura 6.11: Confronto di formulazioni empiriche. (A. Bianchi, G. Rossotti and C. Sbarufatti, no date)

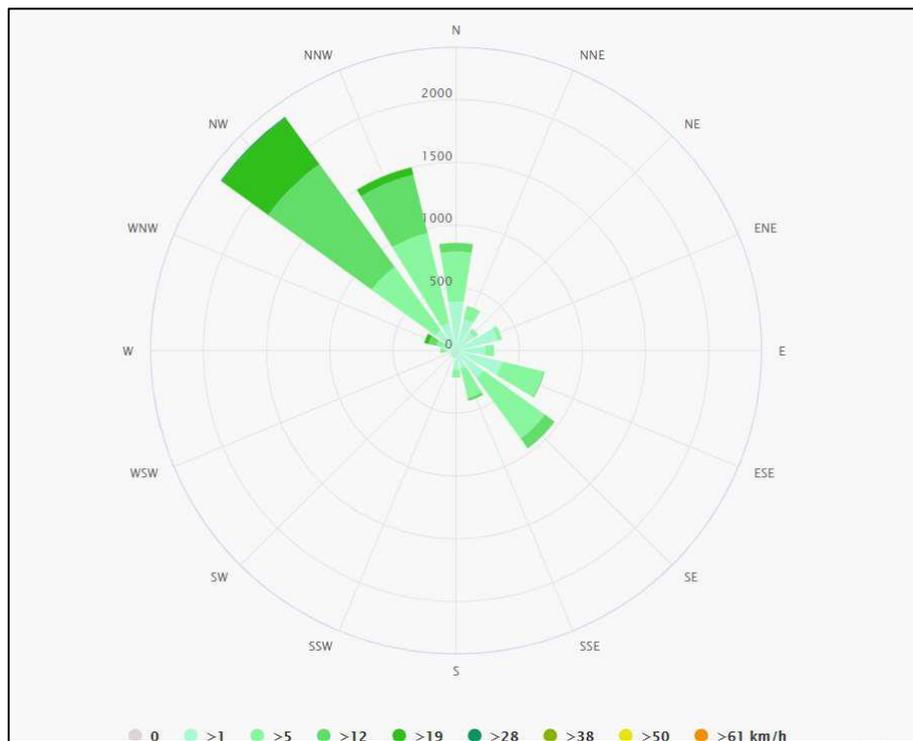


Figura 6.12: Rosa dei venti sulla stazione di Alagna (fonte: https://www.meteoblue.com/it/tempo/historyclimate/climatemodelled/alagna-vallesia_italia_3183369)

Dalla rosa dei venti si nota come la direzione preponderante delle correnti sia Nord-Ovest che corrisponde a circa l'orientazione delle zone oggetto di studio, si può constatare che ci potrà essere una fase di accumulo. Valori tipici assunti in questi casi, si possono trovare in letteratura, e sono i seguenti che verranno inseriti nelle analisi:

T_{rit}	H_{sd} [cm]
300	50
100	40
30	30
10	20

Tabella 6.1: Valori tipici della letteratura per trasporti eolici

Sono stati svolti i calcoli appena descritti per ogni zona di distacco, in Tabella 6.2 sono riportati gli esiti per l'area denominata 420, per le restanti si rimanda in allegato 11.1.

area 410	$Z_{medio,nicchia}$ [m]				1110			
	Tr = 10 anni		Tr = 30 anni		Tr = 100 anni		Tr = 300 anni	
	DH_{3gg} [cm]	H_{sd} [cm]	DH_{3gg} [cm]	H_{sd} [cm]	DH_{3gg} [cm]	H_{sd} [cm]	DH_{3gg} [cm]	H_{sd} [cm]
valore corretto secondo z	75	20	105	30	145	40	184	50
pendenza medi nicchia	45		45		42		42	
$f(\theta)$	0.5157		0.5157		0.5607		0.5607	
altezza di distacco a $Z_{distacco}$ m [cm]	43		61		92		116	
Volume [m ³]	1959.57		2779.85		9241.5		11652.32	

Tabella 6.2: Calcolo altezze del manto al distacco per i diversi tempi di ritorno della nicchia 410.

6.2.3 Parametri reologici e foresta

I parametri reologici sono il coefficiente di attrito e il coefficiente di turbolenza del modello Voellmy-Salm di [Eq. 4.59].

Il software utilizzato propone già dei valori di default in base al tempo di ritorno e alle dimensioni della valanga calibrati in base a numerose simulazioni sul territorio svizzero. Esso divide le valanghe in base alla volumetria come segue:

- Grandi valanghe > 60000 m³;
- Medie valanghe 25000 – 60000 m³;
- Piccole valanghe 5000 – 25000 m³;
- Minuscole valanghe < 5000 m³;

al diminuire della quantità di materiale in moto aumenta la severità dei parametri reologici cioè μ aumenta mentre ξ diminuisce, il che equivale a maggiore dissipazione.

μ e ξ sono dipendenti dal tempo di ritorno cioè all'aumentare di esso i parametri si fanno meno severi, questo serve per descrivere in qualche modo che per probabilità di accadimento minori corrispondono eventi più catastrofici.

Un altro stratagemma che utilizza RAMMS per meglio descrivere i parametri in funzione del territorio è quello di adattarli in funzione della morfologia: infatti fissato le volumetrie e il tempo di ritorno i parametri variano ancora in funzione se si è in un'area piatta e aperta, non incanalata, incanalata o se si è in un canale; per capire in quale di queste quattro conformazioni si è il software abbina le informazioni di pendenza e curvatura. Si riporta in Figura 6.13 un breve stralcio dei parametri elaborati dalla compagnia di RAMMS.

Large avalanches (> 60'000 m ³)		300-Year		100-Year		30-Year		10-Year	
	Altitude (m.a.s.l.)	μ	ξ	μ	ξ	μ	ξ	μ	ξ
unchannelled	above 1500	0.155	3000	0.165	3000	0.17	3000	0.18	3000
	1000 - 1500	0.17	2500	0.18	2500	0.19	2500	0.2	2500
	below 1000	0.19	2000	0.2	2000	0.21	2000	0.22	2000
channelled	above 1500	0.21	2000	0.22	2000	0.225	2000	0.235	2000
	1000 - 1500	0.22	1750	0.23	1750	0.24	1750	0.25	1750
	below 1000	0.24	1500	0.25	1500	0.26	1500	0.27	1500
gully	above 1500	0.27	1500	0.28	1500	0.29	1500	0.3	1500
	1000 - 1500	0.285	1350	0.3	1350	0.31	1350	0.325	1350
	below 1000	0.3	1200	0.315	1200	0.33	1200	0.345	1200
flat	above 1500	0.14	4000	0.15	4000	0.155	4000	0.16	4000
	1000 - 1500	0.15	3500	0.16	3500	0.17	3500	0.18	3500
	below 1000	0.17	3000	0.18	3000	0.19	3000	0.2	3000

Figura 6.13: esempio dei parametri suggeriti da RAMMS

Come mostrato nell'interfaccia di RAMMS in Figura 6.14 è possibile impostare l'analisi con parametri costanti o variabili, in questa elaborazione proposta si userà sempre l'opzione "variabile" in modo da tenere in considerazione la diversificazione in funzione della morfologia prima spiegata; nell'immagine si vede come automaticamente, secondo le caratteristiche morfologiche del suolo, assegna un diverso valore. Ne seguirà una mappa di μ e un'altra di ξ in cui viene graficato tale concetto. In tutte le analisi si è deciso di usare una coesione di 100 Pa, questa scelta perché dalla letteratura la neve può avere una coesione molto variabile tra 0 e 1000 Pa, ma da lavori di dinamica delle valanghe gli stessi sviluppatori del modello RAMMS suggeriscono di considerare valori di coesione nel range 0 – 200 Pa. Quest'ultimo parametro influenza l'analisi di runout specialmente nella coda e nella fase di deposito quindi dopo numerose simulazioni si è visto come 100 Pa si adatta bene ai casi in esame.

Un altro problema non indifferente nella taratura dei parametri risiede nella presenza di vegetazione importabile nel software mediante un "forest file". La vegetazione può rallentare l'evento e aumentare enormemente la dissipazione energetica in condizioni standard. Da "Selviculture nelle foreste di protezione" (Berretti, Caffo and Camerano, 2007) della regione Valle d'Aosta si trovano alcune indicazioni sull'interazione vegetazione-valanga, in particolare si riporta la tabella in Figura 6.19 alcune specifiche.

Per quanto riguarda la condizione in sito sono stati effettuati dei sopralluoghi: si riportano nelle figure a seguire alcune fotografie realizzate e si può vedere come direttamente dentro ai canali la presenza di vegetazione sia scarsa e comunque molto giovane. Ciò fa pensare che si

verifichino eventi periodici che distruggono la vegetazione, in prima approssimazione si può assumere che le piante di maggiore anzianità abbiano circa una decina di anni.

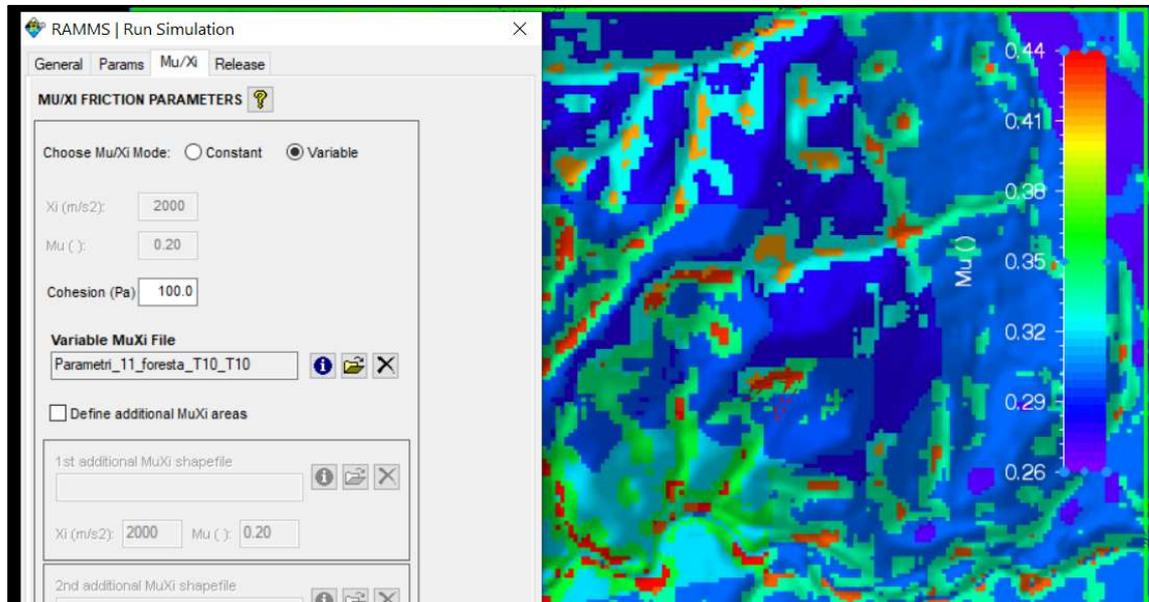


Figura 6.14: Interfaccia do RAMMS nell'assegnazione dei parametri reologici al modello: si può osservare come per ogni elemento del DTM assegni un valore del coefficiente reologico (μ nell'immagine) in base alla topografia del terreno.

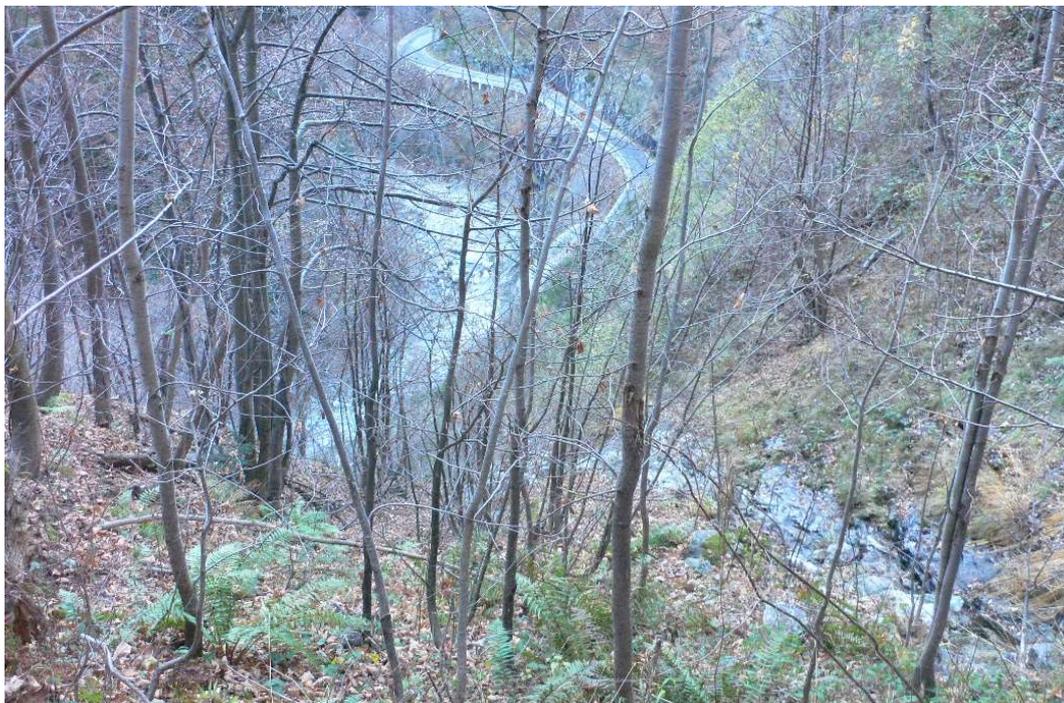


Figura 6.15: immagine che riprende parzialmente il canalone 420 del 20-11-2020. (Cavagnino, 2020)



Figura 6.16: immagine ripresa dalla strada del canalone 1256 del 20-11-2020. (Cavagnino, 2020)

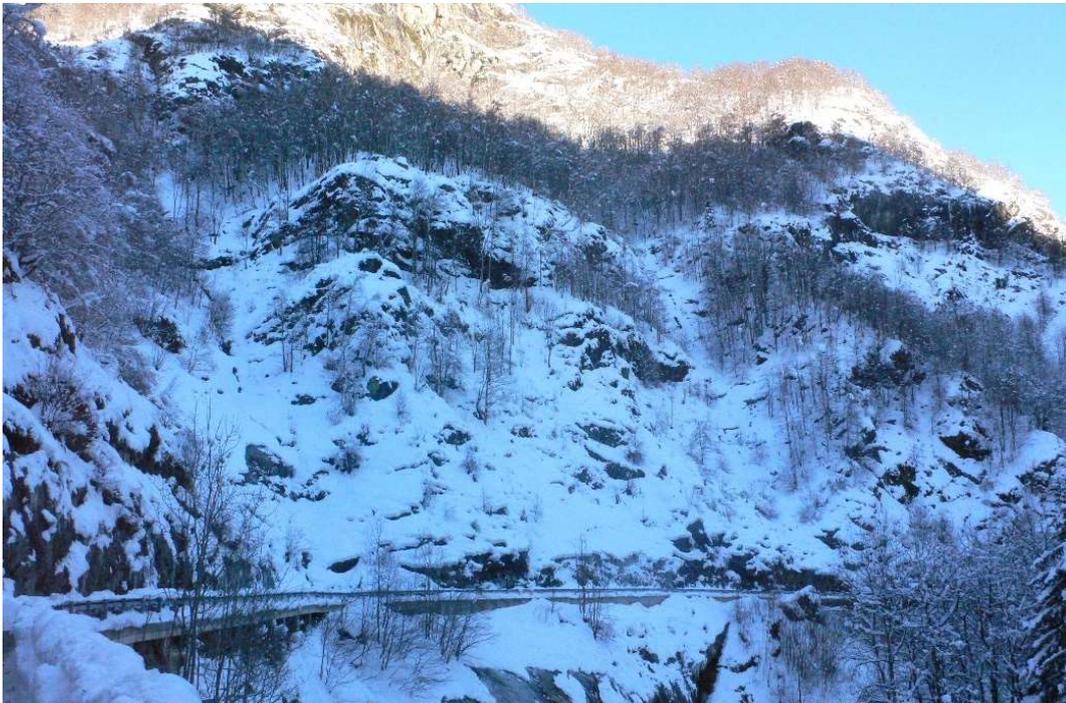


Figura 6.17: immagine ripresa dalla strada dove riprende il canalone 420 e in parte il 1256 del 14-01-2021



Figura 6.18: vista dall'alto di uno dei canali oggetto di studio del 14-01-2021

Sulla base di queste considerazioni, si è assunto che per eventi importanti, quali quelli con tempi di ritorno di 300 e 100 anni, la presente vegetazione è trascurata ossia si assume che le pressioni in gioco siano abbondantemente capaci di distruggere la vegetazione presente; per tempo di ritorno minori invece è considerata, viste le minori pressioni in gioco.

Valanghe in bosco: esigenze di stabilità				
Zone	Parametri		Esigenze minime	Esigenze ideali
Zone di distacco	Composizione (in funzione della pendenza)		la tabella prende in considerazione: - i Lariceti a partire da 30° (58%) di pendenza - le foreste di conifere ad aghi persistenti a partire da 35° (70%) di pendenza - le foreste di latifoglie e miste (con conifere) del piano montano superiore ed inferiore a partire da 35° (70%) di pendenza	
	Densità	N° piante/ha	indifferente purché sia rispettata la % di copertura	Ø > 8 cm - pendenza tra 30° (58%) e 40° (84%): almeno 500 piante/ha * - pendenze > 40° (84%): almeno 1.000 piante/ha * - rispettando il parametro % di copertura
		% di copertura		> 50%
	Struttura	Aperture ** (lungo la linea di massima pendenza)	≥ 30° (58%) → < 60 m	≥ 30° (58%) → < 50 m o 2 altezze d'albero
			≥ 35° (70%) → < 50 m ≥ 40° (84%) → < 40 m ≥ 45° (100%) → < 30 m	≥ 35° (70%) → < 40 m ≥ 40° (84%) → < 30 m ≥ 45° (100%) → < 25 m o 1 altezza d'albero
Se la lunghezza delle aperture supera le indicazioni, la larghezza deve essere < 15 m				
Elementi di stabilità	Ancoraggio		> 80% piante con buona radicazione evidente	> 90% piante con buona radicazione evidente
Note: * definite al fine di assicurare una struttura paragonabile a quella di un paravalanghe. ** aperture: misurate tra le proiezioni delle chiome (esclusi gli stadi giovanili) ** favorendo la rugosità del terreno (ad esempio con ceppaie tagliate alte, legname al suolo) nelle aperture e sui limiti dei canali di scorrimento delle valanghe, si può ridurre il rischio di distacco delle stesse. ** nel caso in cui la rugosità nelle aperture sia sufficiente, si possono utilizzare come riferimento i valori indicati nelle "esigenze minime" anche per la colonna delle "esigenze ideali"				

Figura 6.19: Da "Selviculture nelle foreste di protezione" della regione Valle d'Aosta. (Berretti, Caffo and Camerano, 2007)

Non è stata possibile eseguire una vera e propria back-analysis al fine di tarare i parametri reologici al sito oggetto di studio, perché non esistono eventi ben documentati ma conosciamo solamente le tracce di eventi estremi. Per ovviare a ciò si è ipotizzato che quelle tracce evidenziate nella CLPV siano degli eventi più estremi accadibili, quindi, in base ai tempi di ritorno che vorremo analizzare pari a 300 anni.

L'obbiettivo sarà quindi simulare al meglio l'evento estremo variando i parametri reologici, visto che area di distacco e altezza di distacco sono noti, ed estenderli per i tempi di ritorno minori.

Il maggior problema che si è riscontrato nelle simulazioni è la distanza di arresto: usando i parametri di default suggeriti da RAMMS gli eventi tendevano a "scappare" lungo il fiume per la sua naturale inclinazione. Si è ragionato sul fatto che probabilmente anche un grosso accumulo nel fiume tende a non lasciare tracce evidenti perché quando si fonde non ha la possibilità di creare segni distintivi; tuttavia si è cercata una condizione che non implicasse troppa differenza sull'area interessata dalla simulazione e l'area riportata dalla carta. Per ottenere ciò si sono fatti variare i due parametri reologici suggeriti dal software di $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ e $\pm 15\%$ considerando tutte le combinazioni a esse legate. La migliore

compatibilità si è trovata decrementando ambedue i coefficienti del 10%, in particolare si riporta in Figura 6.20 la tabella dei parametri.

Volume = SMALL Return period = 300 Cancel OK

(Optional: if empty -> default name)
 Mu/Xi name:

Altitude Limits (m.a.s.l.): 1: 2:

Above Altitude Limit 1

Open Slope - Mu:	<input type="text" value="0.212"/>	Xi:	<input type="text" value="1800"/>
Channelled Slope - Mu:	<input type="text" value="0.252"/>	Xi:	<input type="text" value="1350"/>
Gully Slope - Mu:	<input type="text" value="0.333"/>	Xi:	<input type="text" value="1080"/>
Flat Area Slope - Mu:	<input type="text" value="0.194"/>	Xi:	<input type="text" value="2250"/>
Forested Area (mu=delta, xi=fix) - Mu:	<input type="text" value="0.018"/>	Xi:	<input type="text" value="360"/>

Below Altitude Limit 1

Open Slope - Mu:	<input type="text" value="0.225"/>	Xi:	<input type="text" value="1575"/>
Channelled Slope - Mu:	<input type="text" value="0.270"/>	Xi:	<input type="text" value="1215"/>
Gully Slope - Mu:	<input type="text" value="0.342"/>	Xi:	<input type="text" value="990"/>
Flat Area Slope - Mu:	<input type="text" value="0.207"/>	Xi:	<input type="text" value="2025"/>
Forested Area (mu=delta, xi=fix) - Mu:	<input type="text" value="0.018"/>	Xi:	<input type="text" value="360"/>

Below Altitude Limit 2

Open Slope - Mu:	<input type="text" value="0.265"/>	Xi:	<input type="text" value="1350"/>
Channelled Slope - Mu:	<input type="text" value="0.310"/>	Xi:	<input type="text" value="1080"/>
Gully Slope - Mu:	<input type="text" value="0.400"/>	Xi:	<input type="text" value="900"/>
Flat Area Slope - Mu:	<input type="text" value="0.245"/>	Xi:	<input type="text" value="1800"/>
Forested Area (mu=delta, xi=fix) - Mu:	<input type="text" value="0.020"/>	Xi:	<input type="text" value="360"/>

Figura 6.20: Tabella dei parametri reologici assunta

Una volta stabilito quale correzione apportare ai parametri reologici, sulla base di analisi sull'area 420, si è assunto di poter estendere tale risultato a tutte le aree analizzate vista la vicinanza e la molto simile morfologia; inoltre, si è anche estesa la correzione ai tempi di ritorno minori rispetto i valori suggeriti di default. Si riportano in Figura 6.21 le tabelle con i valori utilizzati.

Per risolvere il problema riscontrato nelle simulazioni, cioè il deposito troppo lungo, intuitivamente andrebbe aumentato il parametro μ e diminuito ξ (perché al denominatore): questo tipo di approccio, tuttavia, non fornisce risultati accettabili per il caso in esame. Si può spiegare questo fenomeno per le alte velocità in gioco e soprattutto per la morfologia e topografia complicati, infatti i percorsi finiscono in una gola trovando una sorta di ostacolo verticale infinitamente rigido corrispondente al versante opposto. Modellare una situazione di impatto così repentina comporta problemi numerici, in più la versione di RAMMS utilizzata non tiene conto della terza equazione di [Eq. 4.35] (il bilancio di energetico) quindi in quell'impatto ci saranno sicuramente variazioni di energia cinetica interna che non vengono modellati. Oltre a questo importante urto vengono trascurati tutte le variazioni energia cinetica interna random nell'intero percorso della valanga, quindi urti tra le particelle e urti tra la vegetazione sradicata.

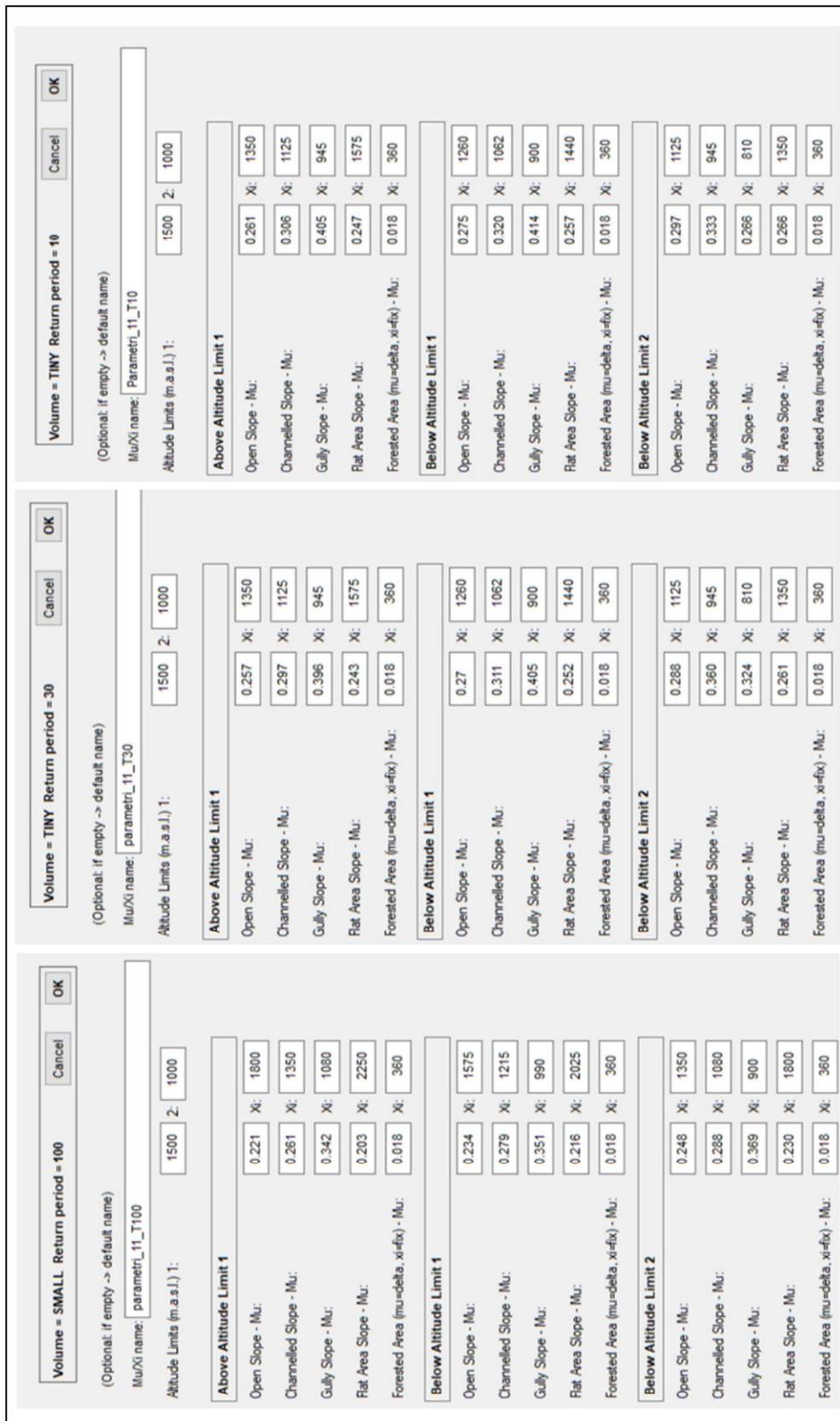


Figura 6.21: Tabelle dei parametri reologici per $T_{rit} = 100$, $T_{rit} = 30$ e $T_{rit} = 10$.

6.3 ANALISI DEI RISULTATI DELLE ANALISI

Si riportano in questo capitolo gli output in formato grafico ottenuti alla fine delle simulazioni per gli eventi trecentennali, per i restanti eventi si rimanda a 0, per i restanti eventi si rimanda a 11.2, 11.3 e 11.4.

6.3.1 Eventi con T_{rit} 300

Si può notare come l'obiettivo di simulare le tracce della CLPV sia avvenuto. Specialmente nella parte a monte del fiume la sovrapposizione è quasi perfetta; a primo impatto potrebbe sembrare che non sia altrettanto per le zone in prossimità del torrente Sorba: va ragionato sul fatto che un accumulo, seppur di svariati metri, in quella zona tenderà a fondere e ad incanalarsi nello stesso quindi a non creare danni o segni evidenti. Inoltre dal sopralluogo effettuato si è visto come sia un torrente a velocità elevate e con larghezza di circa 4-5 m, quindi si immagina che l'acqua tenda a scavare quasi istantaneamente sotto il volume senza creare interruzioni del flusso. Siccome le ricostruzioni della CLPV si basano su segni lasciati a lungo termine si può pensare che questi accumuli non ne creino o siano trascurabili.

Uno dei principali problemi riscontrato nella modellazione è che le simulazioni tendevano a "scappare" lungo la pendenza del fiume, lavorando sui parametri si è riusciti ad accorciare la fine della simulazione fino al risultato mostrato. Ci si sarebbe potuti spingere ancora oltre aumentando la coesione della neve, elemento che influisce soprattutto sulla coda, ma sarebbe stato non realistico. I parametri decisivi che hanno dato modo di approvare le simulazioni sono le pressioni e velocità, se la CLPV è tracciata in base a marcatori lasciati da eventi passati ci si aspetta che in quelle zone sia passato un flusso ad alta energia. Infatti le zone indicate dalla carta sono quelle dove, specialmente le velocità, sono rosso-arancioni.

Come tutti i modelli sono da ritenersi approssimazioni della realtà, parte delle approssimazioni che esegue il software sono già state spiegate e ulteriori considerazioni sono riportate nel capitolo 6.3.2.

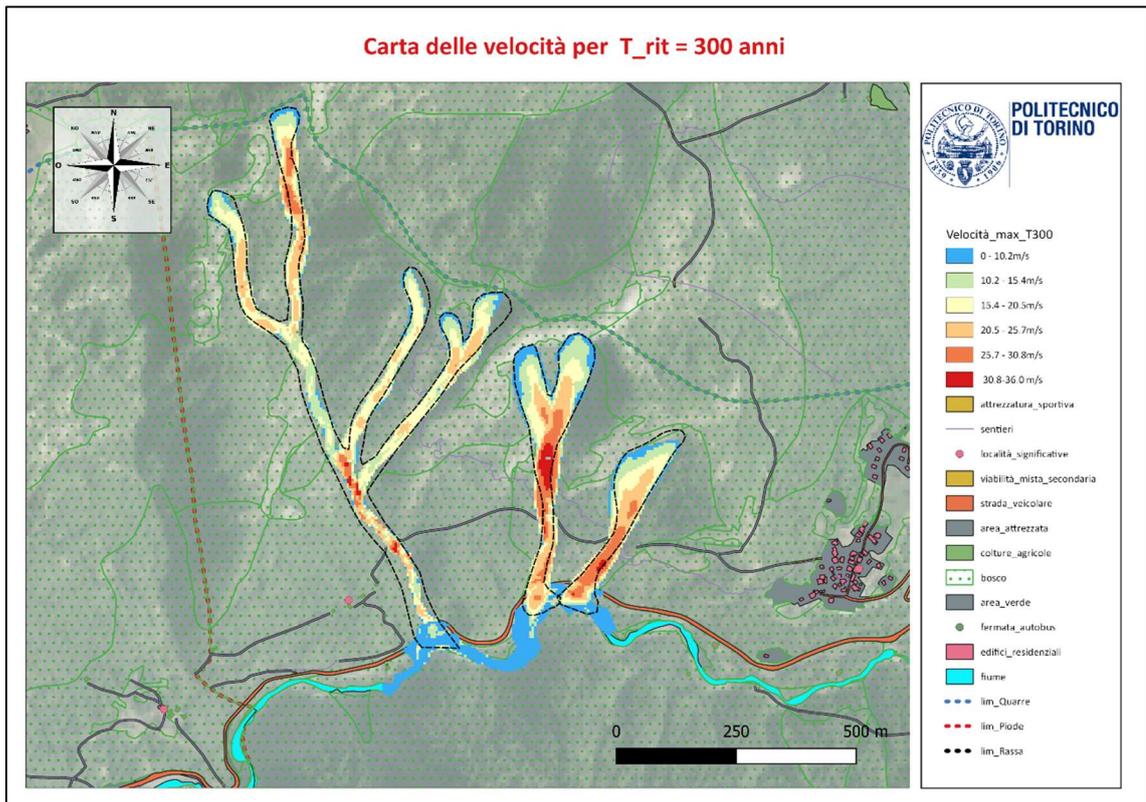


Figura 6.22: Carta delle velocità massime per $T_{rit} = 300$ anni.

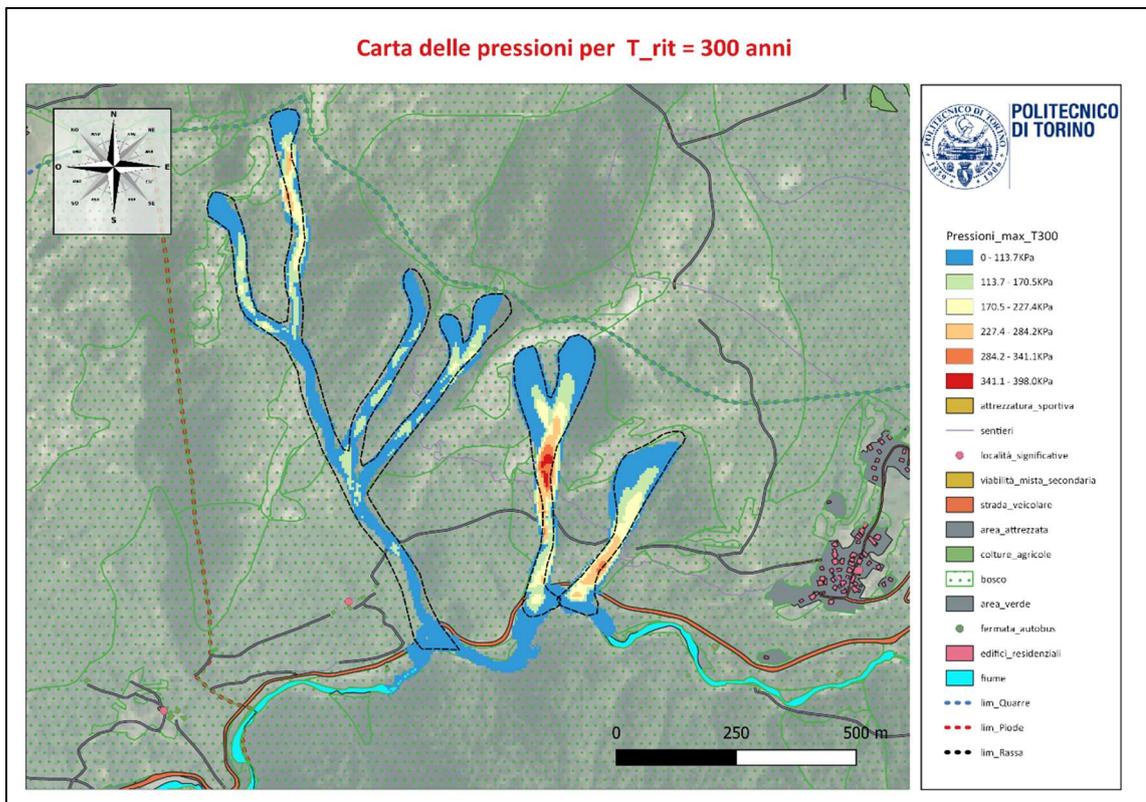


Figura 6.23: Carta delle pressioni massime per $T_{rit} = 300$ anni.

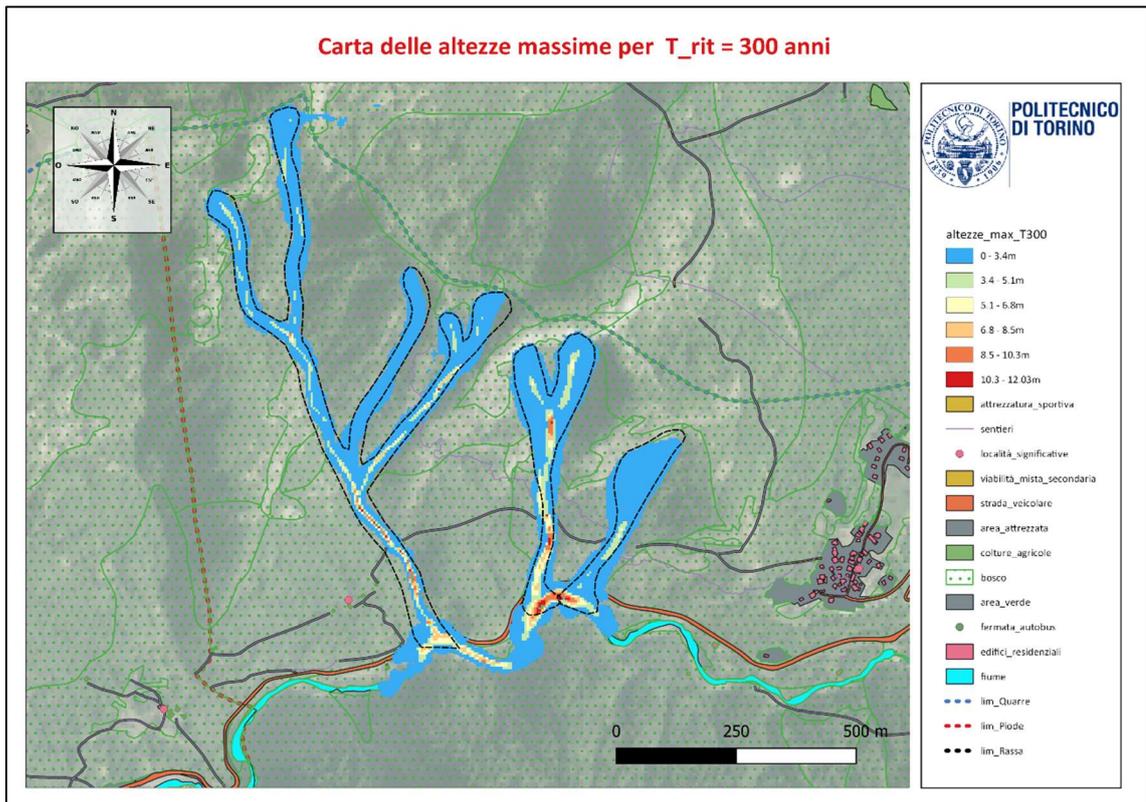


Figura 6.24: Carta delle altezze massime per $T_{rit} = 300$ anni.

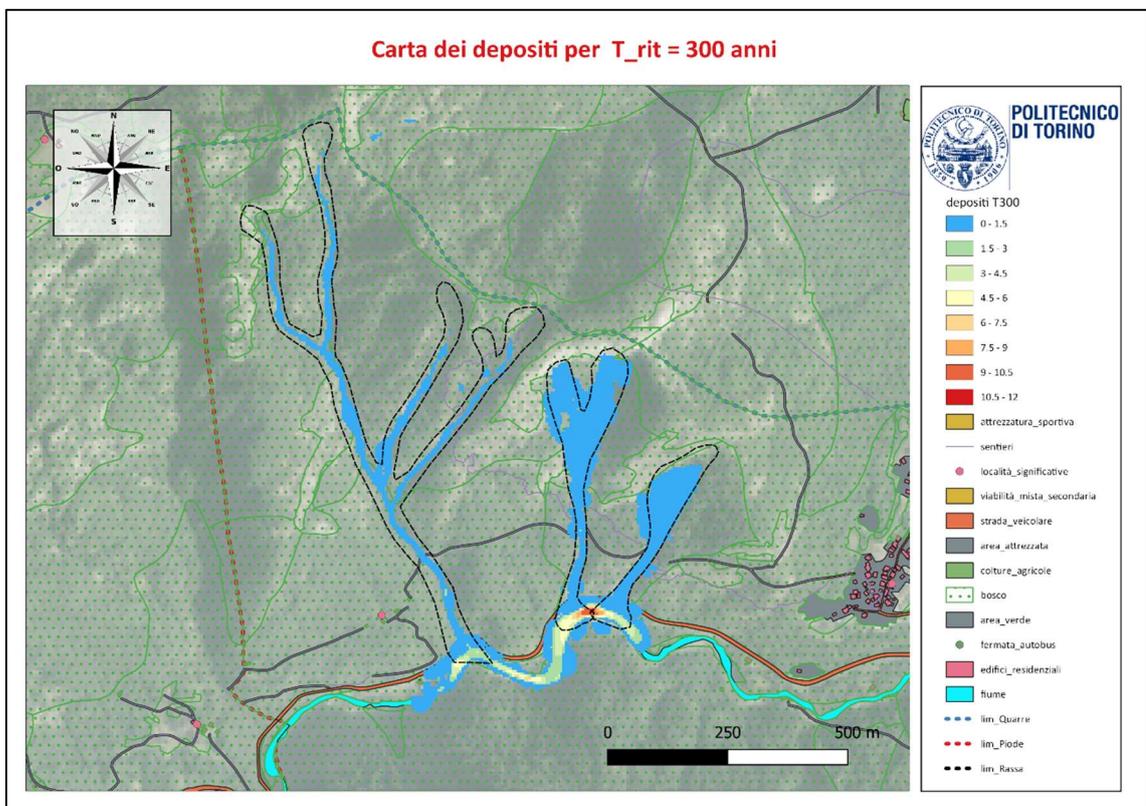


Figura 6.25: Carta dei depositi per $T_{rit} = 300$ anni.

6.3.2 Osservazione sui risultati

Le analisi di simulazione hanno l'obiettivo di entrare in una carta di rischio atta a descrivere il problema di chiusura del traffico, il pericolo per le autovetture e l'isolamento degli abitanti di Rassa nei periodi invernali. Segue che, in seguito all'illustrazione sulla struttura di una carta di rischio, occorre scegliere un parametro di pericolosità rappresentativo del fenomeno: intuitivamente quello che si presta meglio sono le altezze residue a fine evento. Tuttavia, il tipo di modellazione eseguita, vincolata dal software a disposizione, non è in grado di restituire risultati affidabili su questo parametro proprio perché i modelli 2D sono tarati su velocità e pressioni; infatti come elemento discriminante per cessare la simulazione viene usata la velocità nei singoli elementi del DEM, se inferiori a una certa soglia il corpo è fermo. Seguono risultati sulle altezze residue, oltre che poco robuste per definizione, prive di senso infatti per ogni evento risultano valori pressoché nulli di neve sulla strada: esito che intuitivamente non ha senso perché una massa che incontra la carreggiata incontrerà una rottura di pendenza con un ostacolo sull'estremità di valle cioè il guardrail. Quest'ultimo anche con gli eventi più estremi tenderà a deformarsi ma senza mai una rottura fragile, segue che si formerà almeno un deposito che in sezione risulterà pseudo-trapezoidale con inclinazione pari all'angolo di resistenza al taglio della neve.

Un altro fattore che è andato a discapito delle altezze residue è la risoluzione del modello digitale del terreno, quest'ultima (5 m) risulta essere dello stesso ordine di grandezza della strada quindi non in ogni sezione risulta descrivere bene la rottura di pendenza prima menzionata. In Figura 6.26 si porta un esempio di quanto appena detto: si ha un dislivello sulla sezione trasversale della strada di 1.72 m in uno sviluppo di 5.387 m quindi una pendenza del 32%.

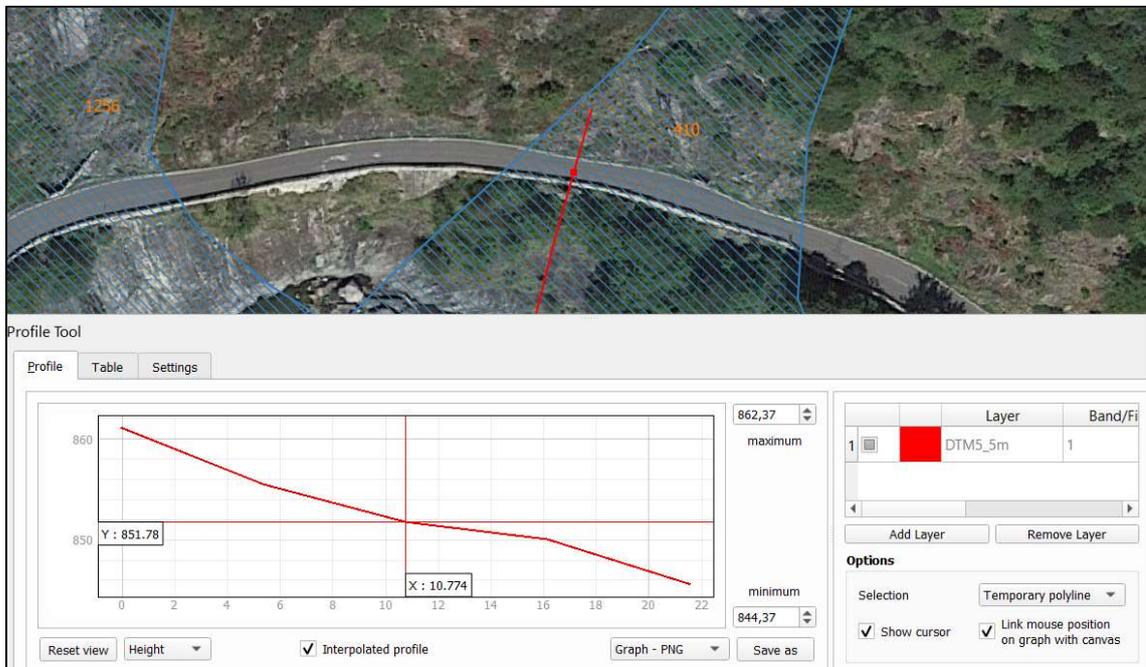


Figura 6.26: esempio di una sezione sulla strada nel DEM.

La mancata capacità di descrivere con esattezza la strada si ha anche sui parametri reologici, ossia sarebbe opportuno fornirli specifici di un conglomerato bituminoso ma sarebbe forviante vista la scarsa discretizzazione sulla strada.

Si vuole dimostrare quanto appena detto con un ingrandimento dei risultati, relative le altezze di deposito, dell'evento più estremo. La Figura 6.27 è un ingrandimento delle altezze di deposito in prossimità della coda degli eventi: si vede come proprio sulla strada prevalgono, per la maggior parte delle zone, altezze sotto i 20 cm cioè quantità tranquillamente gestibili con le ordinarie operazioni di sgombero da neve su strada. Quasi tutta la volumetria di materiale fluisce nella gola del fiume senza lasciare particolari volumi sulla strada.

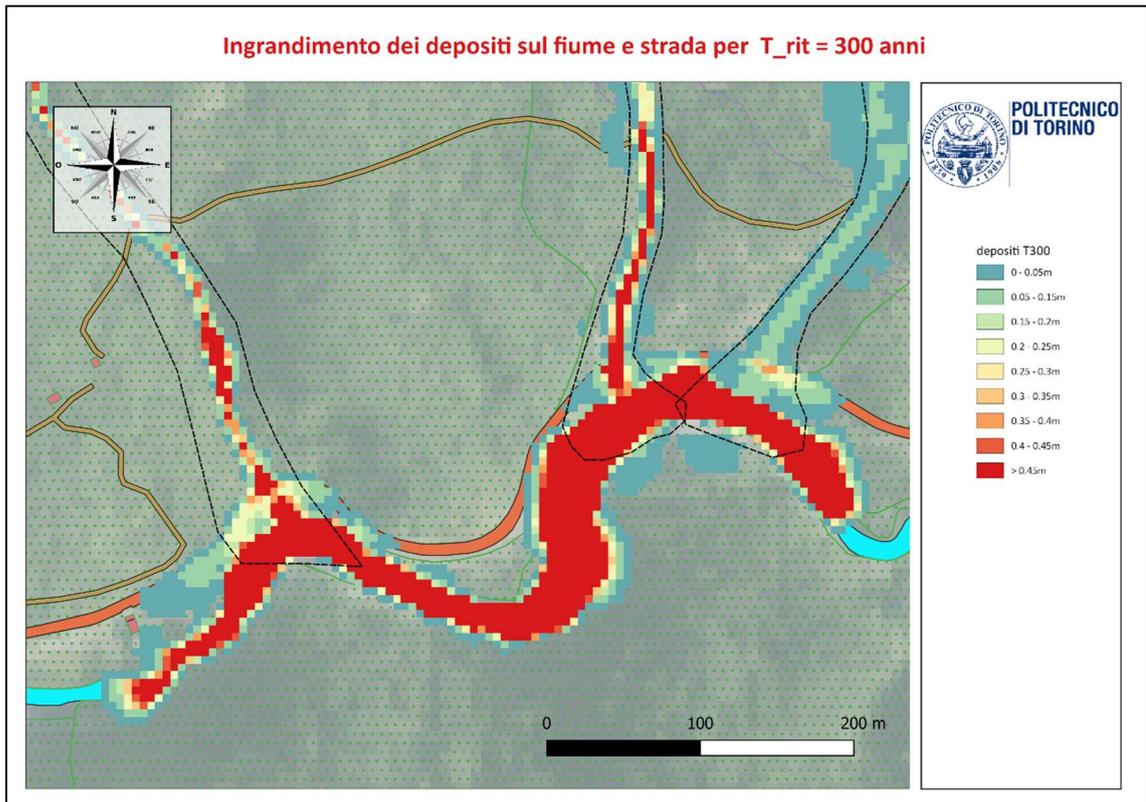


Figura 6.27: zoom sulla strada dei depositi per $T_{rit}=300$, in rosso i depositi significativi cioè maggiori di 0,45 m.

In conclusione non si è in possesso di risultati sulle altezze residue considerabili attendibili quindi per la carta di pericolosità si decide di usare il parametro delle velocità e pressioni, risultati che insieme possono essere utilizzato con sicurezza.

6.3.3 Eventi annuali

La zona oggetto di studio, come si è detto, presenta eventi di entità minore rispetto a quelli simulati cioè quelli riportati in Figura 6.1. Risulta difficile simulare con attendibilità tali eventi per la risoluzione del DEM a disposizione di 5 m. In assenza della possibilità di simularsi si è individuata la zona che normalmente è attaccata da questi eventi in Figura 6.28. Siccome le autorità locali hanno già manifestato la volontà di installare ombrelli para-vanghe solo in

quella zona (per i limitati fondi), informazioni di carattere dinamico avrebbero scarsa utilità visto che queste opere sono volte ad evitare il distacco e non ad assorbirne l'impatto. Si è cercato di individuare una nicchia di distacco seguendo le prescrizioni applicate agli eventi maggiori, l'area complessiva è di circa 785 m² e mostra una pendenza costante del 55 %. Nelle Figura 6.29 e Figura 6.30 viene mostrata sovrapposta ad una ortofoto e alla carta delle pendenze.



Figura 6.28: Tratto di strada SP82 in cui è segnata in rosso la zona che normalmente è soggetta agli eventi annuali. (Cavagnino, 2020)

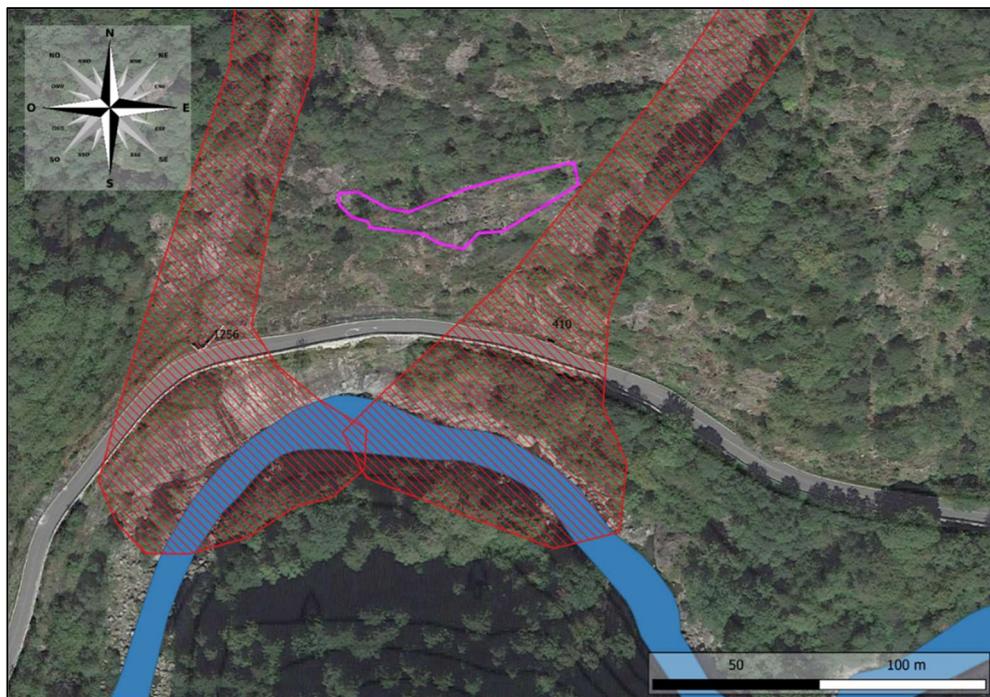


Figura 6.29: Nicchia individuata per gli eventi annuali, si è selezionata le sole zone con roccia affiorante secondo l'ortofoto.

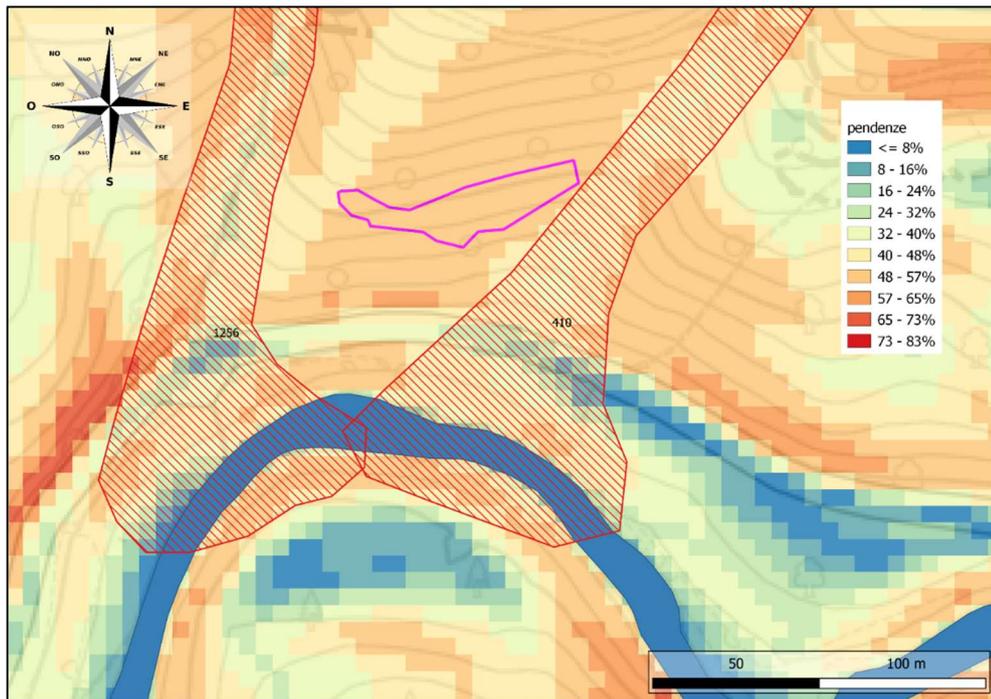


Figura 6.30: Nicchia individuata per gli eventi annuali sulla carta delle pendenze.

7 CONSIDERAZIONI PRELIMINARI PER LA CARTA DI RISCHIO

In ottica dell'applicazione del metodo IMMIRILAD si è passati ad analizzare ogni elemento suscettibile di rischio presente sul territorio. Essi saranno suddivisi secondo le quattro categorie del metodo e sono:

- considerazione degli eventuali danni che le forze messe in gioco dalla valanga possono causare sulla carreggiata e sul guardrail;
- possibilità che autovetture transitanti possano scontrarsi con uno degli eventi presi in causa e le eventuali conseguenze;
- disagio psico-sociale per le persone della zona: tra gli abitanti dei comuni limitrofi è una cosa ben nota il fatto che questo tratto di SP92 è frequentemente interessato da eventi valanghivi;
- in caso di eventi importanti ci si aspetta un forte accumulo di neve sulla strada che dovrà essere rimossa, nel più breve tempo possibile, per ripristinare la circolazione;
- danni arrecati agli abitanti di Rassa che potrebbero rimanere isolati per giorni;
- le attività economiche di Rassa potrebbero essere costrette a non poter esercitare in caso di strada chiusa.

7.1 Valutazione della stabilità globale del pendio

In questa voce si intende capire se le sollecitazioni create da una valanga possano compromettere la stabilità globale del pendio nelle varie posizioni. Il primo passo è stato quello di determinare valori rappresentativi che le forze dinamiche delle valanghe impartiscono alla strada. Le forze statiche equivalenti si computano applicando la direttiva svizzera relativa al progetto delle gallerie paravanghe: "actions d'avalanche sur les galeries de protection" del "Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC Office Fédéral des routes OFROU" edizione del 2007. In particolare la suddetta norma considera 8 diverse tipologie di casi di carico:

- valanga che scorre su terreno nudo;
- valanga che scorre sul tetto innevato;
- valanga che scorre su un deposito di valanghe;
- deposito di valanghe a riposo;
- pressione statica della neve contro la parete a valle della galleria;
- spinta di valanga contro la parete a valle della galleria;
- pressioni striscianti sul tetto della galleria;
- impatto da caduta di valanga sul tetto di una galleria.

Adattando la norma al caso in esame della strada, quelli che sembrano essere significativi sono: il primo, il secondo e il quarto (quest'ultimo è assimilabile al fenomeno di "gliding" quindi richiederebbe una lunga giacenza della neve sulla strada). Anche il terzo non si adatta bene perché risulta inverosimile che un evento trovi la strada con un deposito creato precedentemente da una valanga. I restanti sono inapplicabili al fenomeno di una strada; inoltre la norma stessa specifica che queste tipologie sono spesso le meno severe. In definitiva

le tipologie considerate sono quelle di Figura 7.1: l'azione della valanga è costituita dal peso della neve in movimento e dalle forze di deflessione, il manto nevoso naturale può ridurre l'angolo di rottura del pendio β e quindi la forza di deflessione. Per la loro quantificazione entrerà anche in gioco il coefficiente di attrito, funzione del materiale.

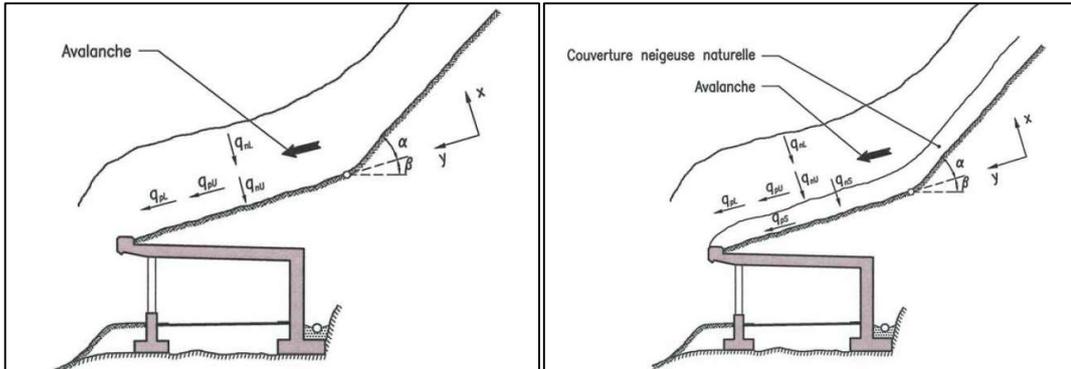


Figura 7.1: Valanga che scorre su terreno nudo a sinistra e valanga che scorre sul tetto innevato a destra. (Willi et al., 2007)

La geometria e i parametri entranti nelle varie formulazioni sono riportati in Figura 7.2, mentre le procedure di calcolo delle sollecitazioni sottoforma di valori caratteristici sono in tabella di Tabella 7.1

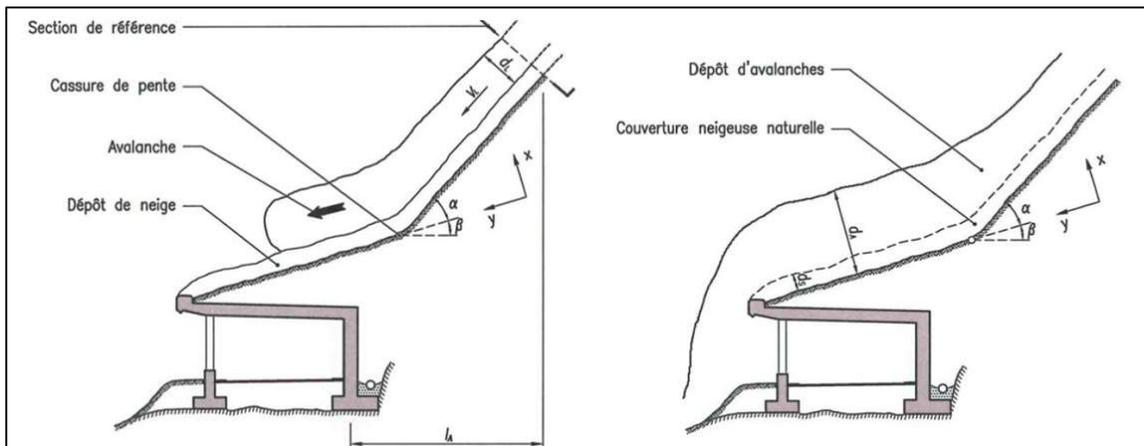


Figura 7.2:Descrizione della geometria del problema. (Actions d' Avalanches Sur Les Galeries de Protection Impressum, 2007).

Action	Perpendiculaire à la surface du terrain	Parallèle à la surface du terrain	
Couverture neigeuse naturelle	$q_{nS} = \gamma \cdot d_S \cdot \cos\beta$	$q_{pS} = q_{nS} \cdot \tan\beta$	[kN/m ²]
Dépôt d'avalanches	$q_{nA} = \gamma \cdot d_A \cdot \cos\beta$	$q_{pA} = q_{nA} \cdot \tan\beta$	[kN/m ²]
Avalanche coulante	$q_{nL} = \gamma \cdot d_L \cdot \cos\beta$	$q_{pL} = \mu \cdot q_{nL}$	[kN/m ²]
Forces de déviation (cf. fig. 8.4)	$q_{nU} = \frac{\gamma \cdot d_L \cdot v_L^2 \cdot \sin\alpha}{6 \cdot d_L \cdot g}$ $g = 9,81 \text{ m/s}^2$	$q_{pU} = \mu \cdot q_{nU}$	[kN/m ²]

Tabella 7.1: Calcolo sollecitazioni statico equivalenti di una valanga. (Actions d' Avalanches Sur Les Galeries de Protection Impressum, 2007)

Sempre la medesima norma suggerisce vari valori di densità della neve, in particolare si è scelto di adottare $\gamma = 5,0 \text{ KN/m}^3$: valore più alto possibile assunto proprio perché partendo a considerare gli eventi più estremi oltre alla neve, saranno presenti arbusti e pietrame vari. Inoltre sono indicati due coefficienti di attrito per diverse tipologie di superfici, sull'asciutto e sul bagnato. Per porsi in ragione di sicurezza si è deciso di assumere quello maggiore, ossia sul bagnato che per valanga fluente su una superficie piana (ad es. cemento, prato) vale 0,45.

È stata considerata una sezione, sottoposta a verifica, per ogni area oggetto di studio applicando come forzanti statiche equivalenti le massime ricavabili dall'istante di maggiore altezza e di maggiore velocità per l'evento più estremo studiato. Le situazioni appena descritte sono raffigurate in

Si è provveduto a svolgere i calcoli, sintetizzando i risultati in Tabella 7.2 e considerando un metro di deposito pre-esistente per porsi a favore di sicurezza.

DATI INIZIALI	Area:	410	1256	820a	820b
spessore della valanga	d_L [m]	7	6	8.5	10.5
velocità della valanga	v_L [m/s]	25	26	17	15
angolo di rottura del pendio	α [°]	20.56	44.68	25.97	25.97
pendenza del terreno sulla galleria	β [°]	19.48	0.00	6.92	6.92
spessore del manto nevoso naturale	d_s [m]	1	1	1	1
spessore totale dei depositi di neve	d_A [m]	8	7	9.5	11.5
larghezza della valanga	b_L [m]	25	35	30	35

		T300			
CALCOLO PRESSIONI	Area:	410	1256	820a	820b
pressione perpendicolari al terreno data dal peso della neve naturale	q_{ns} [KN/m ²]	4.71	5.00	4.96	4.96
	[KN/m]	117.85	175.00	148.91	173.73
pressione parallele al terreno data dal peso della neve naturale	q_{ps} [KN/m ²]	1.67	0.00	0.60	0.60
	[KN/m]	41.68	0.00	18.06	21.08
pressione perpendicolari al terreno data dal peso della neve da valanga	q_{nA} [KN/m ²]	37.71	35.00	47.15	57.08
	[KN/m]	942.78	1225.00	1414.63	1997.85
pressione parallele al terreno data dal peso della neve da valanga	q_{pA} [KN/m ²]	13.34	0.00	5.72	6.92
	[KN/m]	333.42	0.00	171.61	242.36
pressione normali per la neve in movimento	q_{nU} [KN/m ²]	18.65	40.38	10.75	8.37
	[KN/m]	466.15	1413.13	322.48	292.91
pressione strisciante per la neve in movimento	q_{pU} [KN/m ²]	8.39	18.17	4.84	3.77

	[KN/m]	209.77	635.91	145.11	131.81
--	--------	--------	--------	--------	--------

Tabella 7.2: Risultati delle sollecitazioni statiche equivalenti sulla strada in conformità alle direttive svizzere per eventi trecentennali.

Analogamente si eseguono i calcoli per gli eventi trentennali, quindi si riportano i time plot in Figura 7.4 e i valori delle sollecitazioni in Tabella 7.3.

DATI INIZIALI	Area:	410	1256	820a	820b
spessore della valanga	d_L [m]	1.5	5.8	5	5.2
velocità della valanga	v_L [m/s]	8.2	14.2	9.3	12.5
angolo di rottura del pendio	α [°]	20.56	44.68	25.97	25.97
pendenza del terreno sulla galleria	β [°]	19.48	0.00	6.92	6.92
spessore del manto nevoso naturale	d_S [m]	1	1	1	1
spessore totale dei depositi di neve	d_A [m]	2.5	6.8	6	6.2
larghezza della valanga	b_L [m]	25	35	30	35

		T300			
CALCOLO PRESSIONI	Area:	410	1256	820a	820b
pressione perpendicolari al terreno data dal peso della neve naturale	q_{ns} [KN/m ²]	4.71	5.00	4.96	4.96
	[KN/m]	117.85	175.00	148.91	173.73
pressione parallele al terreno data dal peso della neve naturale	q_{ps} [KN/m ²]	1.67	0.00	0.60	0.60
	[KN/m]	41.68	0.00	18.06	21.08
pressione perpendicolari al terreno data dal peso della neve da valanga	q_{na} [KN/m ²]	11.78	34.00	29.78	30.77
	[KN/m]	294.62	1190.00	893.45	1077.10
pressione parallele al terreno data dal peso della neve da valanga	q_{pa} [KN/m ²]	4.17	0.00	3.61	3.73
	[KN/m]	104.20	0.00	108.39	130.67
pressione normali per la neve in movimento	q_{nu} [KN/m ²]	2.01	12.04	3.22	5.81
	[KN/m]	50.15	421.52	96.51	203.41
pressione strisciante per la neve in movimento	q_{pu} [KN/m ²]	0.90	5.42	1.45	2.62
	[KN/m]	22.57	189.68	43.43	91.53

Tabella 7.3: Risultati delle sollecitazioni statiche equivalenti sulla strada in conformità alle direttive svizzere per eventi trentennali.

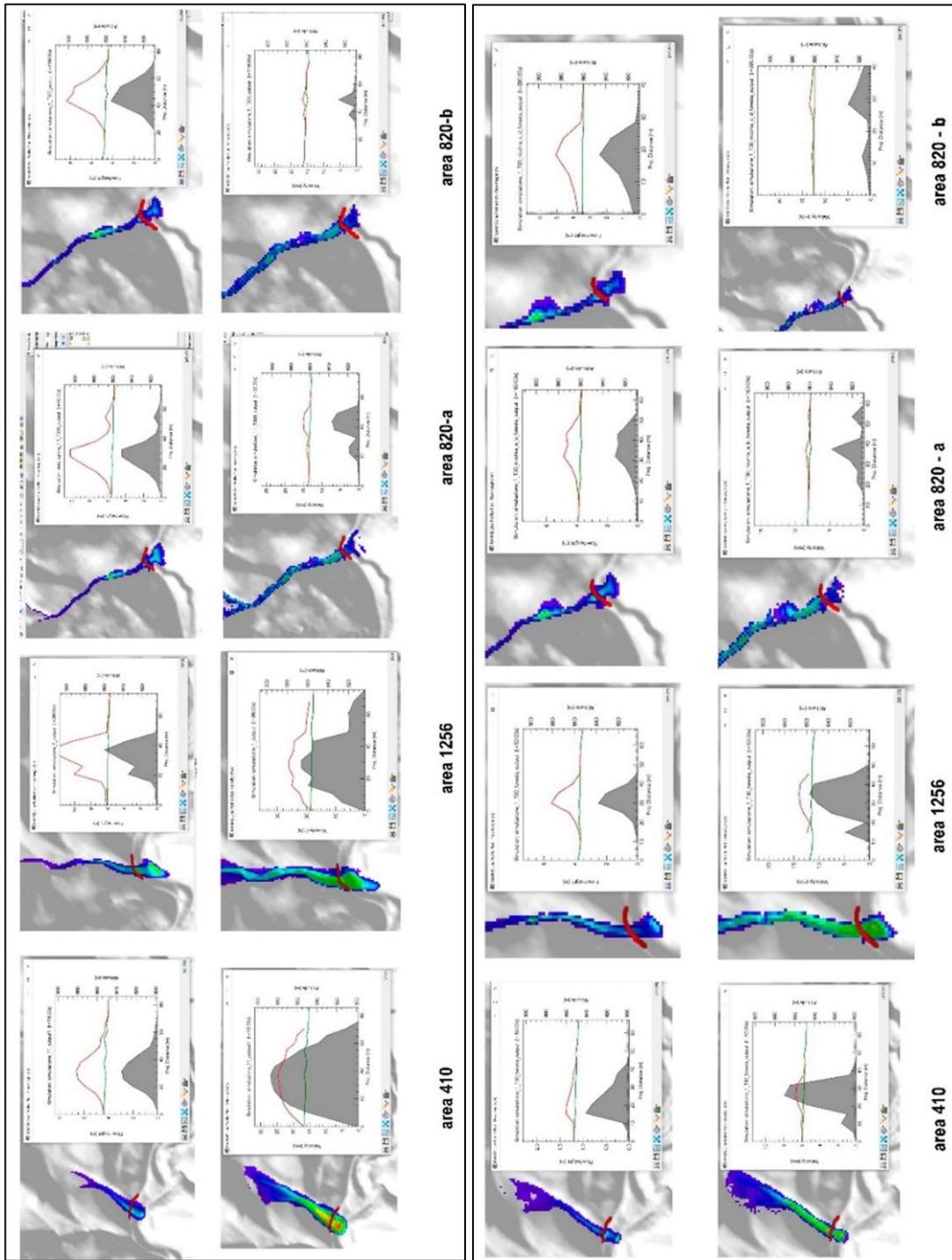


Figura 7.3: Time plot dell'istante con maggiore energia per $T_{rit} = 300$ anni a sinistra e destra per $T_{rit} = 30$ anni.

I motivi per cui si sono presi in considerazione proprio questi due tempi di ritorno sono i seguenti:

- $T_{rit} = 300 \text{ anni}$ risulta l'evento più gravoso che si può verificare, quindi le sollecitazioni da assumere per eventuali opere di mitigazione del rischio sono queste;
- $T_{rit} = 30 \text{ anni}$ si assume che il pendio sia stabile;

Quest'ultima affermazione deriva della scarsità di dati a disposizione per eseguire un'analisi di stabilità rigorosa. La strada è costruita da un tempo ben maggiore di 30 anni, ma probabilmente minore di 100 e se in tale lasso di tempo non ha avuto problemi di stabilità si può assumere che la domanda esercitata sulla stessa da eventi trentennali sia soddisfatta in prima approssimazione. Le forze impresse per le due categorie di eventi differiscono di circa un ordine di grandezza: sostenere quindi che non si presentino problemi di stabilità per eventi centennali o trecentennali sembra essere una affermazione forzata e inaffidabile.

7.1.1 Stabilità del pendio

I fondi a disposizione non hanno permesso caratterizzazioni geo-meccaniche della matrice rocciosa e delle discontinuità, né un rilievo geo-strutturale per l'individuazione delle famiglie proprio nelle zone di interesse. Si dispone di un lavoro svolto su quel tratto di strada volto a studiare la stabilità di alcune zone (Sillano, Benedetti, Tocchio, Zardo, 2006), in questo caso sono state individuate 5 famiglie di discontinuità e i parametri del criterio di Mohr-Coulomb delle stesse. I valori sono:

$$\varphi' = 29^\circ \quad c' = 0 \text{ KPa}$$

Nella relazione si riporta come la maggior parte dei cinematismi sono cunei e assegnando una coesione nulla si trovano coefficienti di sicurezza senza agenti esterni minori dell'unità quindi irrealistici. Segue che l'angolo di resistenza al taglio si assume veritiero mentre sicuramente le discontinuità posseggono una coesione. Il materiale presente in situ viene classificato come gneiss ed ha un'evidente scistosità. Ad esso vengono forniti diversi valori di resistenza a compressione semplice dei quali si considera una media pari a 128 MPa; volendo caratterizzare il materiale intatto si attribuisce un GSI pari a 100. Inserendo questi dati nelle formule ordinarie di criteri di resistenza classici in meccanica delle rocce quindi Hoek&Brown e Mohr-Coulomb si sono trovati i risultati sintetizzati in Tabella 7.4.

Criterio di Hoek & Brown	
m_b	10
s	1
a	0.5
Criterio di Mohr – Coulomb	
φ'	52°.69
c'	22.73 MPa

Tabella 7.4: Parametri della roccia intatta trovati.

La maggior parte dei cinematismi segnalati nella relazione sono piccoli cunei dell'ordine del metro cubo più uno di circa 10 m³: sono tutte volumetrie che non possono dare problemi di

instabilità globale del fronte, per tanto vengono trascurati a priori perché difforni dal fenomeno ricercato. Invece, a pagina 4 del report, viene dato un cenno riguardante la possibilità di formazione di uno scivolamento planare di circa 900 m³: tale volumetria potrebbe inglobare fronte e carreggiata quindi si è deciso di soffermare l'analisi solo su meccanismi di questo carattere.

L'operazione preliminare è capire se le famiglie trovate possono dare cinematismi con i fronti studiati che si assume di misurarli nella posizione centrale delle tracce riportate sulla CLPV: l'angolo di immersione è stato misurato su QGIS rispetto al nord mentre l'inclinazione è stata ricavata da una sezione linearizzata. Risulta una semplificazione della geometria reale, ma si è consapevoli di non star eseguendo uno studio di stabilità preciso. Si mostra, infine, la rappresentazione su uno stereogramma utilizzando il software "Dips" in Figura 7.4 dove in rosso sono riportati i fronti e in verde le discontinuità. L'analisi cinematica rigorosa non creerebbe scivolamenti planari, nella pratica è comune dare una tolleranza di $\pm 20^\circ$ sulla immersione quindi il fronte F1256 può dare questo tipo di meccanismo con la famiglia K3; tuttavia si considera anche il fronte F410 con la suddetta famiglia per ragioni di sicurezza, anche per la poca precisione con cui questi sono stati misurati.

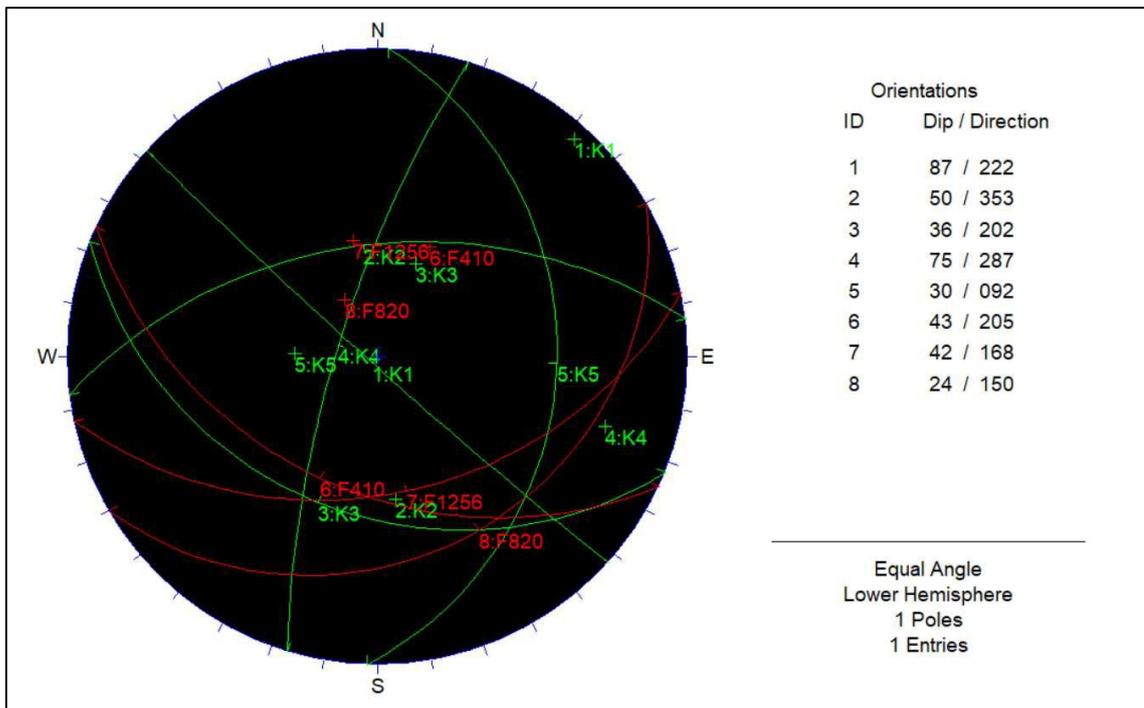


Figura 7.4: Stereogramma delle famiglie (K1, K2, K3, K4 e K5 in verde) e dei tre fronti relativi le tre zone di invasione (F410, F1256 e F820 in rosso)

Al netto di queste considerazioni, spesso senza una base solida, si è tentato di eseguire uno studio di stabilità all'equilibrio limite ipotizzando alcuni valori di persistenza ragionevoli per la zona suggeriti dal Dott. Cavagnino. Purtroppo il non poter investire in indagini in sito e sul materiale ha pagato fornendo risultati che paiono fuorvianti: fattori di sicurezza troppo elevati rispetto a quanto ci si aspettava causati dall'alto valore della coesione trovato. Inoltre è emerso che la strada è stata realizzata con ingenti quantità di esplosivo quindi meriterebbe

uno studio più approfondito sul grado di danneggiamento e sulla effettiva integrità dei ponti di roccia, specialmente della loro conformazione spaziale e geometrica.

Non ci si sente di fornire valori numerici precisi, quindi la conclusione dello studio sulla stabilità del pendio nei confronti delle azioni da valanghe è la seguente: vista l'eccessiva incertezza nei parametri possiamo dire che ci basiamo esclusivamente sull'osservazione che con un T_{rit} di 30 anni i cinematismi sarebbero stabili e, molto cautelativamente, consideriamo che con tempi di ritorno maggiori si possa avere un collasso. L'azione massima sviluppata da questo evento è caratterizzata dalla velocità secondo la normativa di riferimento, quindi si assume che il pendio resiste fino a $v_{lim} = 14.2 \text{ m/s}$ e oltre la sicurezza non è più garantita.

Tuttavia è un giudizio da non considerarsi definitivo, si lascia aperto questo studio qual ora gli enti locali volessero approfondire il problema e ci fossero fondi per le indagini necessarie.

7.2 Effetto sul guardrail

Il guardrail, seppur possa passare inosservato, è un elemento molto importante perché garantisce la sicurezza per i veicoli transitanti e può comportare un alto costo di sostituzione se da sostituire. Si è fatta una ricerca per capire quale fosse la tipologia necessaria per il tipo di strada: per la suddetta analisi ci si è riferiti alla normativa competente italiana in vigore "Decreto Ministeriale n. 223 del 18 febbraio 1992" (Trasporti, 1992) e i "quaderni tecnici per la salvaguardia delle infrastrutture dell'ANAS".

Ambedue i documenti classificano il guardrail necessario per una strada in funzione del TGM (traffico giornaliero medio), all'ubicazione sulla carreggiata, al materiale e al tipo di strade. La Quare-Rassa SP82 per la sua conformazione richiede barriere a bordo laterale, attualmente il materiale utilizzato è l'acciaio e presenta un TGM complessivo tra veicoli pesanti e leggeri di 300 unità giornaliere. Quest'ultimo dato è ricavato sulla DBTRE del 2019, l'estratto di interesse è in Figura 7.5: con la sigla "mfwl_sum" indica la somma in entrambe le direzioni dei veicoli sotto le 3,5t, mentre con "mfwp_sum" sono i veicoli pesanti sopra le 3,5t.

Seguendo le tabelle di Figura 7.6 è necessario prevedere barriere N2, che secondo l'ANAS, capaci di assorbire una energia di 82 KJ: valore riferito a crash-test di un'auto da 900 Kg che impatta a 100 Km/h e un angolo di 20°. L'obbiettivo è di verificare se resiste o meno all'impatto delle valanghe modellate, il test non è propriamente rappresentativo del caso esaminato tuttavia considerato valido ai fini ricercati.

Per stimare l'energia cinetica assorbibile si utilizza l'approccio utilizzato per il calcolo del livello di contenimento: consiste nello scomporre la velocità di impatto in una componente parallela e una perpendicolare al guardrail. In Tabella 7.5 si sono calcolate le energie assorbibili dalla barriera perpendicolarmente ad essa nei due casi previsti.

str_nom	tp_str_loc	tp_str_aln	mfwl_dir_a	mfwl_dir_b	mfwl_sum	mfwp_dir_a	mfwp_dir_b
ta Rolandi	MONTA'	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
time di K...	GALLIATE	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
striere	GATTINARA	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
ne San Vito	SAN VITO	NULL	1571	1574	3145	349	159
ffis	MEANA DI SUSA	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
I Corpus...	MAGLIANO ALF...	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
Quare - R...	PIODE	NULL	144	144	288	6	6
Camillo B...	TORTONA	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
mfwp_sum	mfw_sum	capa_sum	sped_med	aspd_med	lunghezza	ista	
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	71,84	004133	
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	23,477	003068	
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	262,226	002061	
508	3653	8000	68	66,865	137,237	005013	
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	5,401	001149	
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	140,828	004113	
12	300	4000	33	32,5	1609,041	002097	
NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	57,893	006174	

Figura 7.5: TGM sulla SP82 Quare-Rassa, fonte BDTRE 2019

TIPO DI TRAFFICO	TGM	% VEICOLI CON MASSA > 3,5 T
I	≤ 1000	QUALSIASI
I	> 1000	≤ 5
II	> 1000	5 < N ≤ 15
III	> 1000	> 15

TIPO DI STRADA	TIPO DI TRAFFICO	BARRIERE SPARTITRAFFICO	BARRIERE BORDO LATERALE	BARRIERE BORDO PONTE(1)	ATTENUATORI
AUTOSTRAD E STRADE EXTRAURBANE PRINCIPALI (B)	I	H2	H1	H2	P50, P80, P100
	II	H3	H2	H3	
	III	H3-H4 (2)	H2-H3 (2)	H3-H4 (2)	
STRADE EXTRAURBANE	I	H1	N2	H2	
SECONDARIE (C) E STRADE URBANE DI SCORRIMENTO (D)	II	H2	H1	H2	
	III	H2	H2	H3	
STRADE URBANE DI QUARTIERE (E) E STRADE LOCALI (F).	I	N2	N1	H2	
	II	H1	N2	H2	
	III	H1	H1	H2	

(1) Per ponti o viadotti si intendono opere di luce superiore a 10 metri; per luci minori sono equiparate al bordo laterale
(2) La scelta tra le due classi sarà determinata dal progettista

Figura 7.6: Tabelle per il dimensionamento dei guardrail. (ANAS, 2019)

Tipologia N2						
Velocità	100	Km/h		Energia cinetica E _k	347.22	KJ
Massa	900	Kg		E _{k,perpendicolare}	40.6	KJ
Angolo	20	°		E _{k,parallela}	306.6	KJ
Velocità	110	Km/h		Energia cinetica E _k	700.23	KJ
massa	1500	Kg		E _{k,perpendicolare}	81.9	KJ
angolo	20	°		E _{k,parallela}	618.3	KJ

Tabella 7.5: Energie di impatto per barriera N2.

L'allegato 11.5 mostra le dimensioni di un guardrail N2, utili per stimare la spinta che la valanga imprime. Anche a fini cautelativi si può pensare che la neve probabilmente, carica di detriti, non scorra nella parte vuota dell'elemento ma esercitando una pressione, supposta uniforme, su tutti i 75 cm. È comune assumere una densità della neve pari a 300 Kg/m^3 tuttavia si preferisce assumere 500 Kg/m^3 per tenere in conto la presenza di altri materiali nel flusso, tale approccio è utilizzato anche nelle direttive svizzere relative delle gallerie. Si è quindi stimata la massima energia di impatto della valanga per ogni zona e per ogni tempo di ritorno riferita ad 1 m di profondità: calcolata considerando la velocità massima sulla strada per ogni simulazione e applicando la formula dell'energia cinetica, valori riportati in Tabella 7.6.

Note le energie in gioco si può stimare un costo di sostituzione dell'elemento se necessario. Premesso che sarebbe necessario eseguire una analisi dinamica non lineare per accertare l'effettivo stato di degrado dopo un evento, si assume che se la domanda di energia superi il 30% degli 82 KJ i danni subiti dal guardrail sia sufficienti a richiedere una totale sostituzione. Tale rapporto indicherà la vulnerabilità dell'elemento a rischio, il quale sarà un elemento necessario inseguito. Invertendo la formula dell'energia cinetica si ricava la velocità limite che darà la totale sostituzione dell'elemento:

$$v_{\text{lim}} = \sqrt{\frac{0.3 \cdot E_{k,\text{max}}}{0.5 \cdot m}} = \sqrt{\frac{0.3 \cdot 82000 \text{ J}}{0.5 \cdot 500 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.75\text{m} \cdot 1\text{m} \cdot 1\text{m}}} = 11.45 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Come tratto da sostituire si considera l'intero sviluppo lineare della strada interessata dall'evento, per il costo ci si riferisce al prezzario regionale (Regione Piemonte, 2020); in particolare per fornitura e posa in opera l'ammontare è di 113,38 €/m.

	Area 410				Area 1256			
T_{ritorno} [anni]	300	100	30	10	300	100	30	10
v_{max} [m/s]	26.05	25.5	10.69	7.45	26.16	21.43	12.86	11.73
$E_{k,\text{valanga}}$ [KJ/m]	127.2	121.9	21.4	10.4	128.3	86.1	31.0	25.8
Sviluppo [m]	90				96			
V [%]	100	100	26.2	12.7	100	100	37.9	31.5
costo [€]	10204.20	10204.20	0.00	0.00	10884.48	10884.48	10884.48	10884.48
	Area 820-a				Area 820-b			
T_{ritorno}	300	100	30	10	300	100	30	10
v_{max} [m/s]	9.21	8.5	5.83	5.31	10.38	9.86	6.11	5.57
$E_{k,\text{valanga}}$ [KJ/m]	15.9	13.5	6.4	5.3	20.2	18.2	7.0	5.8
Sviluppo [m]	147				147			
V [%]	19.4	16.5	7.8	6.5	24.7	22.3	8.5	7.1
costo [€]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabella 7.6: Energie di impatto della valanga sul guardrail e costo della loro sostituzione.

7.3 Effetto sulle autovetture

Un altro rischio incombente sulla strada è la concomitanza del passaggio di autoveicoli con l'arrivo della valanga. Siccome le velocità di percorrenza sono modeste si può assumere che il rischio sussista solo se un veicolo transita nell'istante in cui arriva il fronte della valanga sulla strada, se l'evento è già avvenuto o si sta sviluppando il resto della propagazione (diversa dal fronte sulla strada) i veicoli hanno il tempo di fermarsi.

Per capire se un veicolo si ribalta nell'impatto si considera l'equazione di equilibrio di uno stesso in curva:

$$m \frac{V^2}{Rg} = m \frac{t}{2h} \quad [Eq. 7.1]$$

Dove:

- $m \frac{V^2}{Rg}$: forza centrifuga a cui è soggetta l'auto;
- t : distanza tra le gomme frontalmente;
- h : altezza del baricentro.

Sostituendo casi di veicoli reali si ottiene una pressione limite di ribaltamento di circa 3 KPa.

Calcolare il costo che tale rischio è al quanto complesso perché dipenderebbe dal valore dell'autoveicolo (molto variabile da mezzo a mezzo) e dal numero di utenti presenti a bordo. È usuale in questi casi assumere due persone che, se la macchina ribaltasse, andrebbero contro morte certa visto il dislivello con il fiume. Per dare un'idea del costo che potrebbe portare si mostra in Figura 7.7 una tabella assicurativa inerente le morti su congiunti.

Danno non patrimoniale per la morte del congiunto		
Rapporto di parentela	da	a
<i>A favore di ciascun genitore per morte di un figlio</i>	€ 165.960,00	€ 331.920,00
<i>A favore del figlio per morte di un genitore</i>	€ 165.960,00	€ 331.920,00
<i>A favore del coniuge (non-separato), della parte dell'unione civile o del convivente di fatto sopravvissuto</i>	€ 165.960,00	€ 331.920,00
<i>A favore del fratello per morte di un fratello</i>	€ 24.020,00	€ 144.130,00
<i>A favore del nonno per morte di un nipote</i>	€ 24.020,00	€ 144.130,00

Figura 7.7: Calcolo costo di morte, fonte: SIMLA, Società Italiana di Medicina Legale e delle Assicurazioni

7.4 Sgombero neve

Per eventi valanghivi come quelli studiati ci si aspetta un deposito importante sulla strada, tuttavia ribadendo il fatto che i risultati sulle altezze residue sono poco affidabili, non si può considerare che assuma valori di alcuni centimetri come le stesse simulazioni mostrano (vedere 6.3.2). A sostenere tale tesi è la presenza del guardrail: essendo un elemento molto duttile, anche per eventi importanti, non subirà una rottura netta ma tenderà a fermare dei volumi sulla strada. Si pensi che già gli eventi frequenti lasciano importanti accumuli (Figura

6.1.

Al seguito di queste considerazioni, si è deciso di considerare un volume residuo formato tracciando un segmento dall'estremità superiore della barriera fino al pendio verso monte, con una inclinazione pari all'angolo di resistenza al taglio della neve. Quest'ultimo parametro potrebbe rivelarsi difficile da stimare ma per semplicità ci si riferisce ancora una volta alla [Eq. 6.2]: vale per inclinazioni $\vartheta \geq 28^\circ$ assumendo tale valore come discriminante perché si verifichi una valanga. In definitiva l'angolo di resistenza al taglio della neve in questo caso è assunto pari a:

$$\varphi'_{neve} = 28^\circ$$

Ponendosi a favore di sicurezza si trascura la deflessione del guardrail ma si considera la sua altezza massima. L'accumulo appena descritto non è rimovibile con le ordinarie misure di sgombero neve, proprio per questo si computa un costo differito rispetto a quello già previsto dalle autorità locali per gli ordinari sgomberi invernali.

Il calcolo del volume per ogni zona è stato eseguito con il metodo delle sezioni raggugliate, ricavando i profili del terreno su più sezioni con il software QGIS. Si riporta uno schema della loro ubicazione in Figura 7.8.

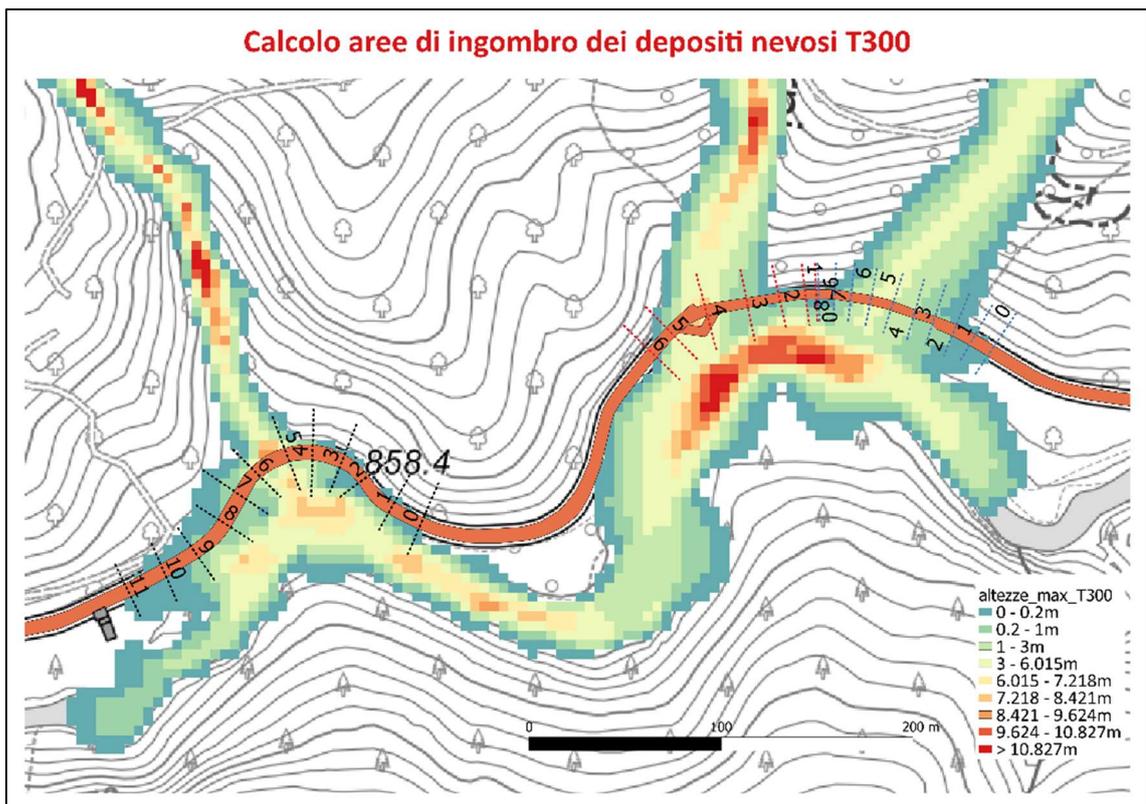


Figura 7.8: Sezioni per il calcolo dei volumi di sgombero sulla strada.

I cumuli da rimuovere si suppone che vengono spostati da una pala caricatrice e scaricati direttamente nel fiume, si prevede quindi un mezzo medio (924H Standard VersaLink Pin On/Hook On della Caterpillar). La produzione oraria della pala è data dalla seguente relazione: (Santagata, 2016)

$$P_{0,pala} = \frac{Q_e}{t_c} \cdot \eta \quad [Eq. 7.2]$$

Dove:

- Q_e : capacità effettiva della benna allo stato sciolto in m³;
- t_c : tempo medio di ogni ciclo in h;
- H : efficienza della pala;

La capacità effettiva della pala può essere ricavata solo conoscendo qual è la capacità effettiva della

benna pari a 6,9 m³ come riportato dalla Figura 11.15. Inoltre va tenuto conto delle caratteristiche del terreno apportando un coefficiente correttivo medio del 90%. Si ottiene quindi:

$$Q_e = 1.8 \cdot 0.9 = 1,62 \text{ m}^3 \quad [Eq. 7.3]$$

Ora è necessario calcolare il tempo di ciclo necessario al caricamento del terreno:

$$t_c = t_{cb} + t_f + t_t = 0.5 \text{ minuti} \quad [Eq. 7.4]$$

Dove:

- t_{cb} : è il tempo ciclo base (tempo di carico, tempo di scarico e tempo per effettuare i 4 spostamenti del ciclo all'interno dello spazio minimo, desunto dal manuale del mezzo: $t_{cb} = 0.5 \text{ minuti}$;
- t_f : è il fattore correttivo del t_{cb} ;
- t_t : tempo aggiuntivo per spostamenti di carico e scarico al di fuori dello spazio minimo (in questo caso è nullo);

È ancora necessario considerare il rendimento del ciclo di lavoro, assumendo valori medi si ottiene:

$$\eta = \eta_h \eta_{cl} \eta_c = 0.75 \quad [Eq. 7.5]$$

- η_h è il rendimento orario della macchina, percentuale di tempo in cui la macchina lavora effettivamente;
- η_{cl} rendimento climatico;
- η_c rendimento di cantiere;

Si può ricavare la produzione oraria della pala:

$$P_{0,pala} = \frac{1}{t_c} \cdot Q_e \cdot \eta = \frac{1}{\frac{0.5}{60} \text{ s}} \cdot 1.62 \cdot 0.75 = 145.8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad [Eq. 7.6]$$

Per calcolare il costo complessivo si fa riferimento al prezziario della Regione Piemonte. Sotto la voce "01.P24.A60" nolo di pala meccanica gommata di potenza oltre 75 - fino a 150 HP, compreso autista, carburante, lubrificante, trasporto in loco ed ogni onere connesso per il tempo di effettivo impiego: 66,87 €/h.

	Area 410	Area 1256	Area 820
$V_{\text{neve}} [\text{m}^3]$	966.62	362.53	1755.09
$t_{\text{lavoro}} [\text{h}]$	6.63	2.49	12.04
Costo [€]	443.33	166.27	804.96

Tabella 7.7: Calcolo costi di smaltimento neve

7.5 Ulteriori considerazioni

Ci sarebbero tre ulteriori fattori da tenere in considerazione per redigere al meglio la carta di rischio: disagio psico-sociale, perdita per le attività produttive di Rassa e l'isolamento delle persone. Per quanto riguarda le attività produttive si potrebbe costruire una "curva di utilità" ma non si è in possesso di sufficienti dati; inoltre Rassa non è considerata una località turistica invernale quindi le perdite economiche sono trascurabili. Non è stato possibile attribuire una valutazione economica nemmeno alle restanti due voci per via della loro poca oggettività, tuttavia non verranno trascurati ma trattati con una trattazione a indici.

Rimarrebbe un ultimo pericolo da considerare cioè, analogamente all'autovettura sulla strada, potrebbero capitare persone transanti. Stimare la loro concomitanza con una valanga risulta impossibile per mancanza di dati, intuitivamente sarebbe una probabilità talmente bassa che è trascurabile. I sopralluoghi svolti sul posto hanno fatto capire come sia estremamente rara la presenza di passanti a piedi.

8 ELABORAZIONE DELLE CARTE DI RISCHIO

La carta di rischio è stata redatta con il software open-source QGIS, il quale permette di rappresentare e effettuare molte operazioni matriciali tra file raster. È necessario avere ogni elemento presente sul territorio in formato digitale al fine di poter eseguire le operazioni necessarie per la costruzione della carta. Oltre al DTM, del quale si è già parlato ampiamente nel capitolo 6, sono stati necessari la CTR (carta tecnica regionale) disponibile in scala 1:10000 e gli shapefile di ogni elemento del territorio (scaricabili gratuitamente sul sito delle Ragione Piemonte). Questi ultimi si sono ricavati dalla BDTRE: è una cartografia tecnica del territorio piemontese costruita dalla regione Piemonte, rappresenta il territorio secondo la propria destinazione d'uso ed è scaricabile sul suo portale: <https://www.geoportale.piemonte.it/cms/>. Gli elementi utili alla rappresentazione, considerati nella zona oggetto di studio, sono i seguenti (Figura 8.1):

- edifici residenziali di Piode;
- edifici residenziali di Rassa;
- bosco;
- fiume;
- strada veicolare;
- limite Quare;
- limite Piode;
- limite Rassa;
- strade secondarie.
- culture agricole;
- area attrezzata.

Tra questi quelli che sono elementi a rischio, come per esempio la strada, dovranno essere convertiti in file raster per poter successivamente eseguire le operazioni di moltiplicazione che il calcolo del rischio richiede. Talvolta è stato necessario crearne di nuovi: per esempio il guardrail non era presente nella BDTRE ma è un oggetto cruciale per la sicurezza della strada, quindi è stato creato. Un file raster deve essere definito imponendo una certa precisione ossia una dimensione della cella, per i nuovi è stato imposto un passo di 0,5 m affinché si potessero rappresentare bene elementi piccoli. Segue che per poter utilizzare il “calcolatore raster” anche gli output di pericolosità devono avere la stessa risoluzione, con il tool “Resampling” di “SAGA” si sono infittite le celle da 5m x 5m a 0,5m x 0,5m. Viene richiesto un metodo di interpolazione e consci del fatto che non si può aumentare la risoluzione effettiva dei risultati si è utilizzato “Nearest Neighbor”.

Nel capitolo 7 vengono elencati quali sono gli elementi che si considereranno, siccome non a tutti è stato possibile attribuire un valore monetario in euro si è optato per una trattazione a indici. Sono mostrati in Tabella 8.1: utilizzando il metodo IMIRILAND sono stati divisi in fisico, sociale ed economico, mentre l'ambientale in questo caso non è presente.

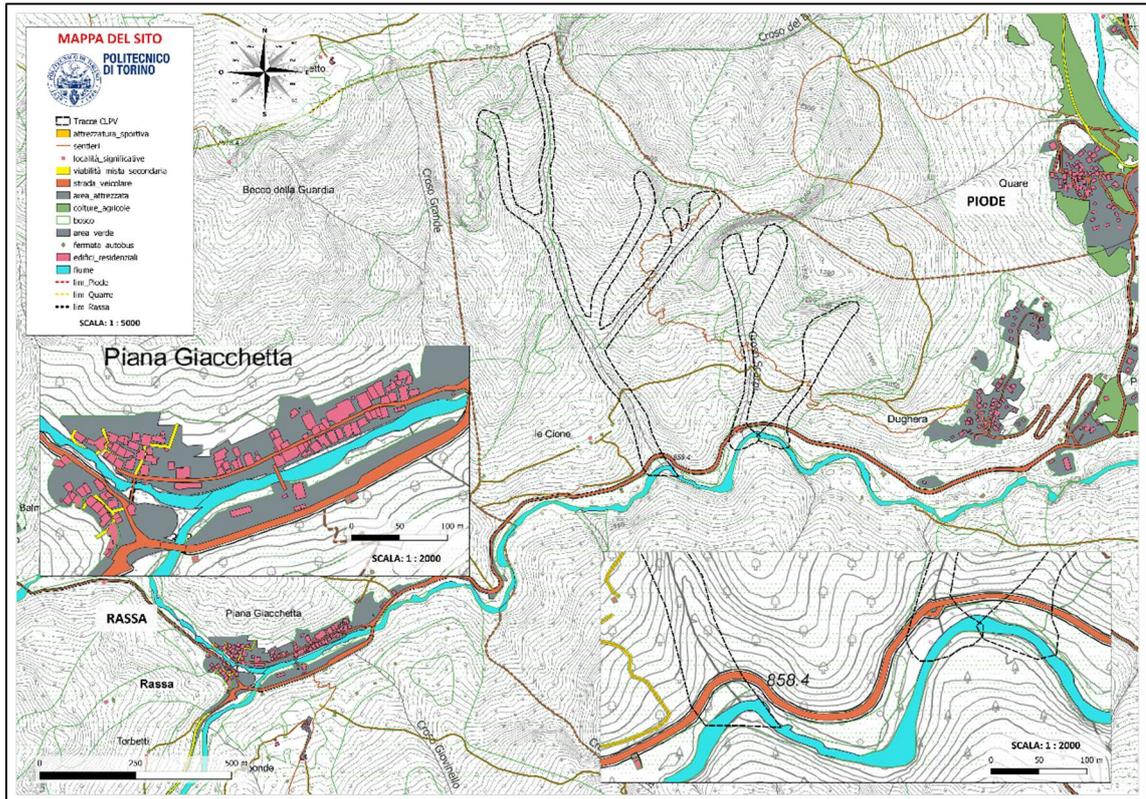


Figura 8.1: Inquadramento del territorio oggetto di studio, destinazione d'uso secondo la DBTRE.

Per tutte le categorie di elementi i valori hanno la medesima scala cioè il valore massimo possibile è 10, questo permetterà di eseguire operazioni combinando linearmente le tre categorie di rischio che si otterranno. La massima gravità, 10, è attribuita alla perdita della vita umana infatti se si trovasse una persona sulla carreggiata o un'auto nel momento dell'impattato seguirebbe la perdita di uno o più individui. Indice importante di 8 è assegnato alla carreggiata e alla stabilità del pendio perché comporterebbe un grande lavoro di ricostruzione, quindi gli abitanti di Rassa sarebbero isolati per settimane e il costo di rifacimento sicuramente molto alto. Anche il guardrail è un elemento importante perché garantisce la sicurezza per la circolazione quindi gli viene attribuito un 5. Gli elementi considerati meno importanti sono la rimozione della neve perché comporta un costo molto basso rispetto le altre voci e le attività produttive di Rassa, queste ultime risultano essere quattro ristoranti ma visto che il paese non è meta turistica invernale le perdite che subirebbero si stimano essere minime.

ELEMENTI	CATEGORIA	VALORE
Carreggiata e stabilità del pendio globale	fisico	8
Guardrail		5
Rimozione neve		1

Ribaltamento autovetture e persone a bordo	sociale	10
Persone sulla carreggiata		10
Disagio psico-sociale per le persone pendolari		3
Isolamento degli abitanti di Rassa		3
Attività produttive di Rassa	economico	1

Tabella 8.1: Valore espresso con indici relativi degli elementi a rischio.

Il valore degli elementi è indipendente dagli eventi, infatti è stata definita a posteriori. Seguiranno la realizzazione delle carte di vulnerabilità e infine di rischio.

8.1 Mappa delle Vulnerabilità per eventi con $T_{rit} = 300$ anni

Nel metodo IMIRILAND la carta di vulnerabilità viene eseguita a partire dalle pericolosità, dopodiché queste ultime potranno essere accantonate. Per la realizzazione ci si baserà sui risultati del capitolo 7. Ricapitolando di seguito cosa si è ottenuto in questo capitolo.

Per la carreggiata, il pendio e il guardrail viene quantificata la loro suscettibilità tramite la velocità perché è questo il parametro che determina le forze impresse. Per il primo il valore soglia che si è assunto innescare il cinematismo al pendio è $14.2 m/s$ quindi nei punti dove la velocità massima supera questo valore limite la vulnerabilità è massima; per il secondo la velocità limite è di $11.45 m/s$;

La rimozione neve interessa le zone in cui effettivamente passa la valanga quindi si assume che le aree interessate dall'elemento pericolosità "altezze massime" siano quelle assoggettate dal deposito eccezionale;

Per il ribaltamento delle autovetture e la presenza di persone sulla strada l'elemento che ne stabilisce la vulnerabilità sono le pressioni. Nel capitolo 7.3 si è dimostrato come $3 KPa$ sia il valore limite per creare ribaltamento di un'auto. Per quanto riguarda le persone si assume come un qualsiasi valore maggiore di zero sia sufficiente per la perdita della vita umana;

Il disagio psico-sociale non è strettamente legato ad un parametro di pericolosità né di un tratto specifico della SP82 perché le persone comuni (individui non competenti in materia di analisi del rischio) non sono a conoscenza di dove e in quale misura si presenterà l'evento, quindi si assegnerà all'intero tratto di strada vulnerabilità unitaria;

L'isolamento degli abitanti dovrebbe dipendere esclusivamente dagli accumuli sulla carreggiata, tuttavia non disponendo di tale informazione in modo sicuro si assume che se l'evento si manifesta allora anche il problema esisterà (come è ragionevole pensare). Si indicherà direttamente sulle zone residenziali di Rassa con vulnerabilità massima;

Le perdite economiche delle attività produttive di Rassa, essendo il turismo invernale assente, vengono inglobate nel raster dell'elemento precedente.

Al netto di queste considerazioni si sono tracciate le carte di pericolosità fisica e sociale, la economica non presenta elementi interessanti per lo studio. Per questa prima parte si è scelta una rappresentazione con la modalità "banda singola falso colore" di QGIS in 5 classi: 0, 0.25, 0.5, 0.75 e 1. Esprimere questo parametro in un range tra 0-1 permetterà di evitare la normalizzazione successivamente, inoltre risulta essere più intuitiva con il significato fisico di vulnerabilità.

In Figura 8.2 e Figura 8.3 sono mostrate le mappature della vulnerabilità sugli elementi interessati, rispettivamente, fisica e sociale. Si vuole far notare che per poter rappresentare tutto il territorio, nella carta di rischio finale, si è dovuto adottare una scala di 1:5000, che rende poco apprezzabile il guardrail, il quale però rappresenta un elemento fondamentale per la sicurezza stradale. La Figura 8.3 mostra un ingrandimento di questo, si può anche apprezzare la sua rasterizzazione. Un altro aspetto che merita una spiegazione è la vulnerabilità fisica del pendio: il tratto presente nell'area 820 della CLPV (la più a sinistra di Figura 8.2) presenta una colorazione maculata rispetto le altre. Questo perché solo in pochi elementi del raster si raggiunge 14.2 m/s , quindi si è preferito lasciare la vulnerabilità calcolata analiticamente senza imporre una distinzione netta tra 0 e 1: i valori intermedi rappresentano una specie di "danneggiamento parziale", che visto la scarsa mole di dati a disposizione per lo studio di stabilità si è preferito non trascurare ponendosi a favore di sicurezza. Anche nella periferia delle altre due aree ci sono elementi con valori compresi tra 0 e 1 proprio perché non si è potuto fare uno studio approfondito e la volumetria non è stata individuata in modo preciso.

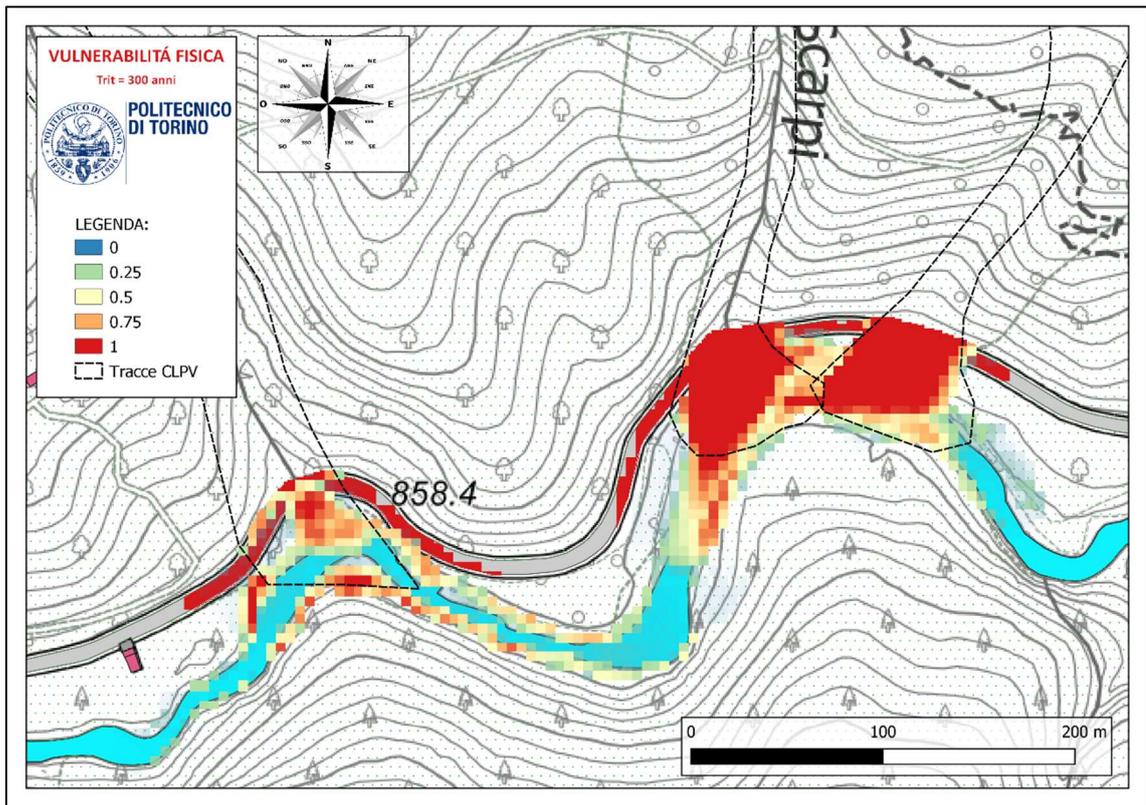


Figura 8.2: Carta della vulnerabilità fisica per eventi con Trit=300 anni.

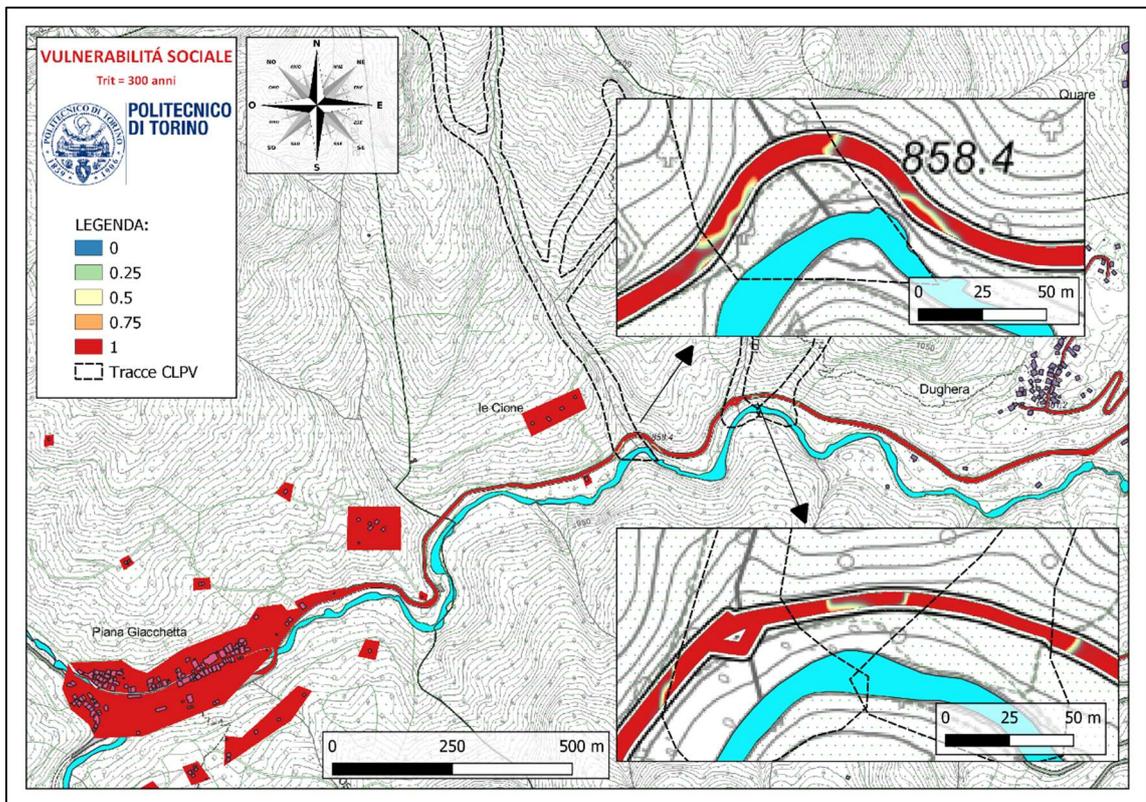


Figura 8.3: Carta della vulnerabilità sociale per eventi con Trit=300 anni.

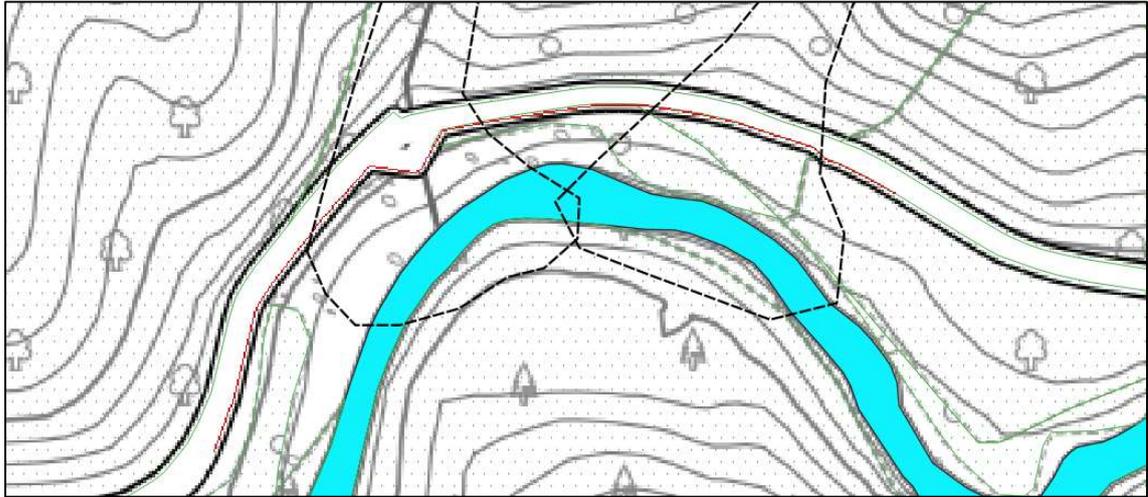


Figura 8.4: Ingrandimento su un tratto di strada al fine di mostrare il guardrail.

8.2 Mappa del Danno per eventi con $T_{rit} = 300$ anni

L'operazione successiva è stata moltiplicare la vulnerabilità per il valore assegnato per l'esposizione a ogni singolo elemento, per ottenere il danno. Siccome il valore è in un range tra 0-10 mentre gli altri parametri variano tra 0-1, quindi il danno avrà un intervallo di valori possibili tra 0-10.

8.2.1 Esposizione

L'esposizione è legata alla probabilità che se l'evento si verifici l'oggetto sia interessato, cioè legato alla sua posizione territoriale. La strada, il pendio, il guardrail, la rimozione della neve, il disagio psico-sociale e gli abitanti di Rassa hanno esposizione del 100% perché la loro posizione è fissa nel tempo e, qualora la valanga avvenisse, le conseguenze ci sarebbero sicuramente. All'esposizione delle attività produttive si decide di attribuire 0: come già accennato Rassa non è una meta di turismo invernale, quindi si suppone che in tale periodo si possano considerare come assenti. La presenza o meno dell'evento non influisce sul loro tornaconto.

L'esposizione associata al ribaltamento di un'autovettura richiede il calcolo della probabilità congiunta del fatto che un veicolo transiti sulla strada nello stesso momento in cui il fronte della valanga attraversi la carreggiata. Si suppone che, se un'auto sta viaggiando mentre il fenomeno è in corso e il fronte ha già attraversato la strada, le velocità di percorrenza sono sufficientemente moderate da permettergli di fermarsi e non subire danni. Dalla Figura 7.5 si ricava:

- TGM = 300 veicoli al giorno;
- Velocità media 33 Km/h: la quale ha spinto a effettuare l'ipotesi precedente.

Si calcola il t_a cioè il tempo di attraversamento che un'auto impiega a passare il tratto denominato con "a" in Figura 8.5, tale lunghezza è stimata come al massimo pari a 90 m quindi nota la velocità media:

$$t_a = \frac{100 \text{ m}}{\frac{33}{3.6} \text{ m/s}} = 10.91 \text{ s}$$

Valutando la probabilità come rapporto tra casi favorevoli e casi totali, considerando che il numero di veicoli al giorno medio è di 300 e i secondi in un giorno 86400, l'esposizione di questa voce è:

$$P = \frac{300 \cdot t_a}{86400} = 3.8 \%$$

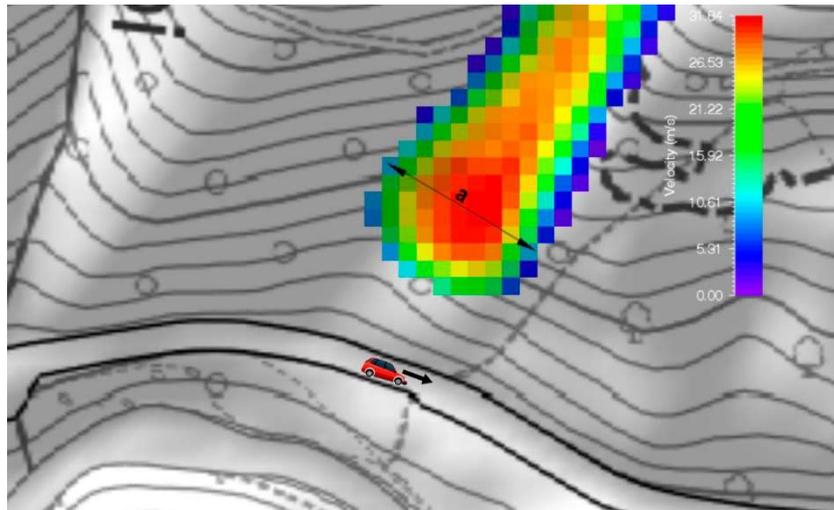


Figura 8.5: Schema del calcolo dell'esposizione di auto che transita mentre avviene una valanga.

Si sintetizzano le esposizioni in Tabella 8.2: questi valori sono indipendenti dagli eventi quindi valgono per ogni tempo di ritorno analizzato.

ELEMENTI	CATEGORIA	ESPOSIZIONE [%]
Carreggiata e stabilità del pendio globale	fisico	100
Guardrail		100
Rimozione neve		100
Ribaltamento autovetture e persone a bordo	sociale	3.4
Persone sulla carreggiata		0
Disagio psico-sociale per le persone pendolari		100
Isolamento degli abitanti di Rassa		100

Attività produttive di Rassa	economico	0
---------------------------------	-----------	---

Tabella 8.2: Esposizione degli elementi a rischio.

8.2.2 Danno per $T_{rit} = 300$ anni

Tramite il calcolatore raster di QGIS si sono eseguite le operazioni matriciali tra i raster, per trovare il danno è stato necessario moltiplicare il raster della vulnerabilità per il valore per l'esposizione. Successivamente si sono accorpati in un unico file di danno fisico e sociale, su scala da 0-10. La rappresentazione grafica è la stessa utilizzata per la vulnerabilità a meno dei valori: 0, 2.5, 5, 7.5 e 10. In Tabella 8.3 sono riportati i valori analitici del danno, gli elementi che mostrano più valori dello stesso al variare della posizione si indica quello massimo.

ELEMENTI	CATEGORIA	DANNO _{max}
Carreggiata e stabilità del pendio globale	fisico	8
Guardrail		5
Rimozione neve		1
Ribaltamento autovetture e persone a bordo	sociale	3.4
Persone sulla carreggiata		0
Disagio psico-sociale per le persone pendolari		3
Isolamento degli abitanti di Rassa		3
Attività produttive di Rassa	economico	0

Tabella 8.3: Valori del danno massimo per gli elementi analizzati

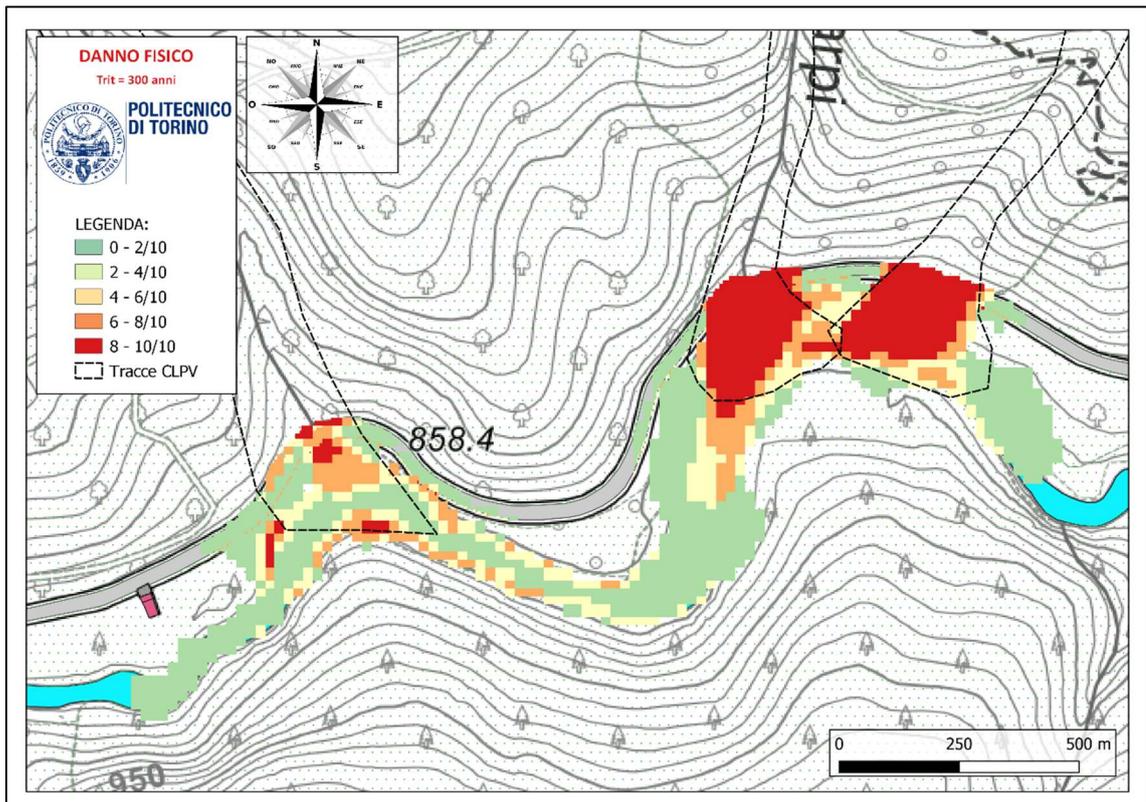


Figura 8.6: Carta del danno fisico per eventi con $T_{rit}=300$ anni.

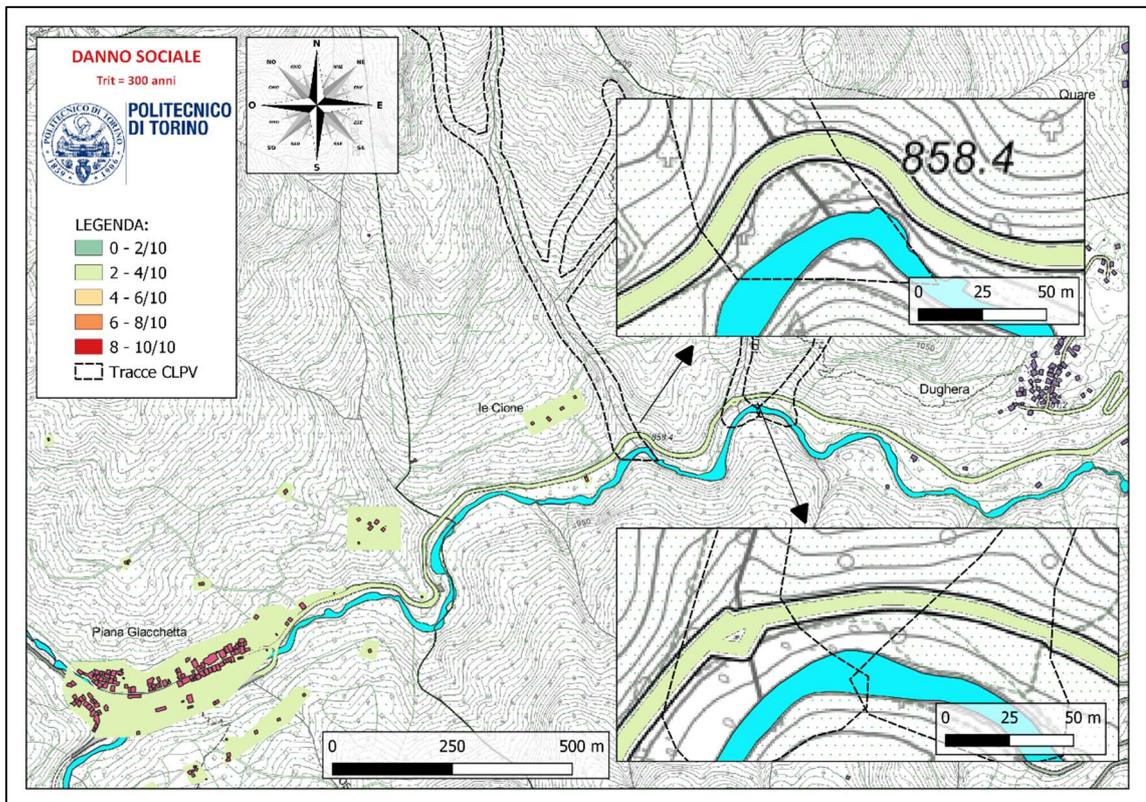


Figura 8.7: Carta del danno sociale per eventi con $T_{rit}=300$ anni.

8.3 Carta di Rischio per $T_{rit} = 300$ anni

Siccome in questo lavoro si vuole proporre un rischio per ogni tempo di ritorno studiato, il passaggio da danno a rischio mediante la probabilità non viene effettuato in quanto si svilupperà una carta con fissato tempo di ritorno (o probabilità di accadimento). Inoltre si vuole fornire il valore del rischio in percentuale, ossia in un range tra 0-100: si porterà il rischio fisico ed economico in una scala tra 0-100 e successivamente, siccome sono stati sviluppati con una stessa scala, si potranno sommare linearmente per ottenere un rischio complessivo. In questo modo è possibile avere punti che superano il tetto massimo, quindi si provvederà a effettuare una normalizzazione e riportare i valori sulla scala scelta

In Figura 8.8 e Figura 8.9 sono raffigurati stralci delle carte di rischio fisico e sociale mettendo insieme tutte le considerazioni prima effettuate; successivamente, in Figura 8.10, sono stati assemblati per ottenere un rischio totale della zona oggetto di studio. Come è ragionevole aspettarsi il rischio maggiore si manifesta nell'intersezione tra la strada e il percorso delle valanghe, arrivando a sfiorare il valore massimo. Questa considerazione potrebbe essere la base per studiare interventi di mitigazione del rischio. Le carte in scala adeguata sono visionabili nella sezione "Carte prodotte" da pagina 144.

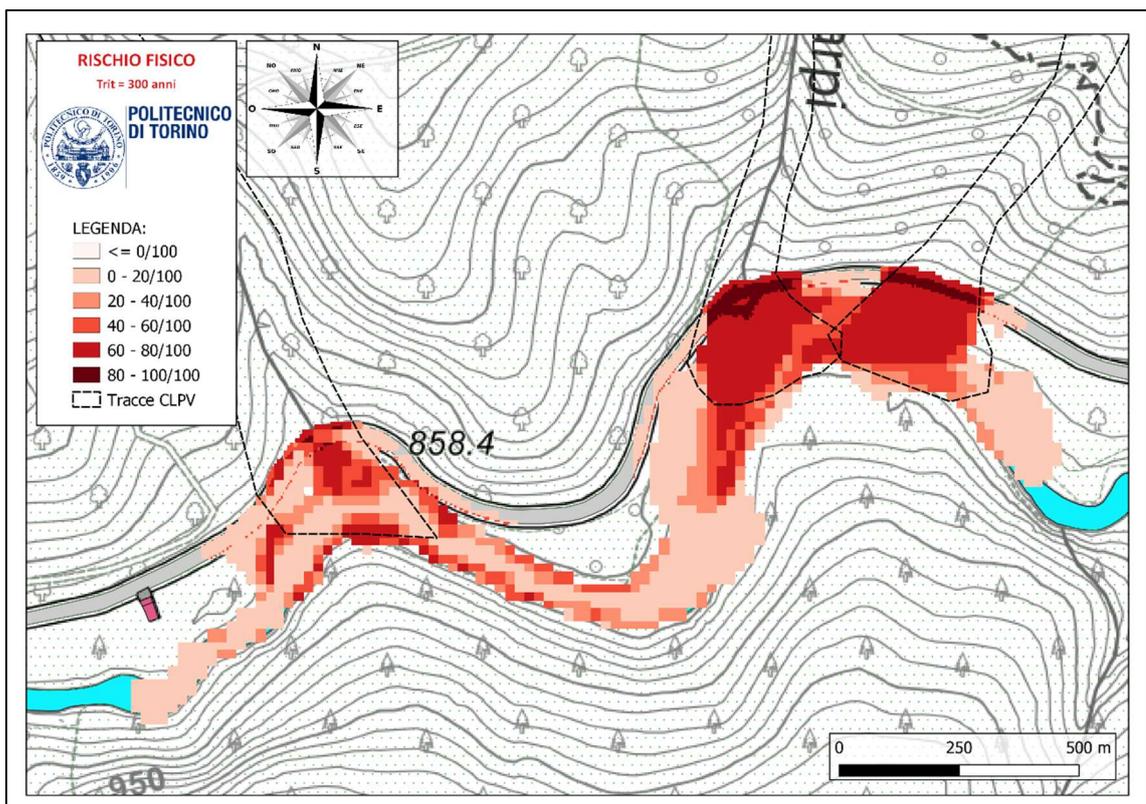


Figura 8.8: Carta del rischio fisico per eventi con $T_{rit}=300$ anni.

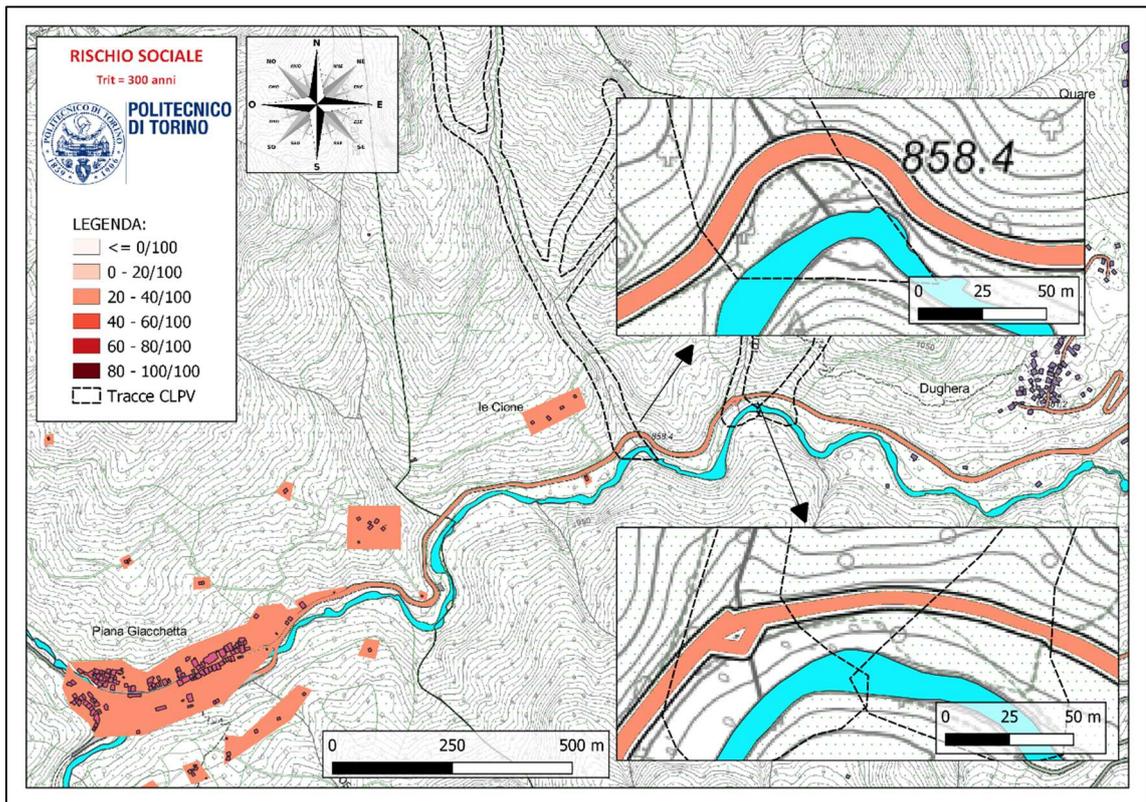


Figura 8.9: Carta del rischio sociale per eventi con $T_{rit}=300$ anni.

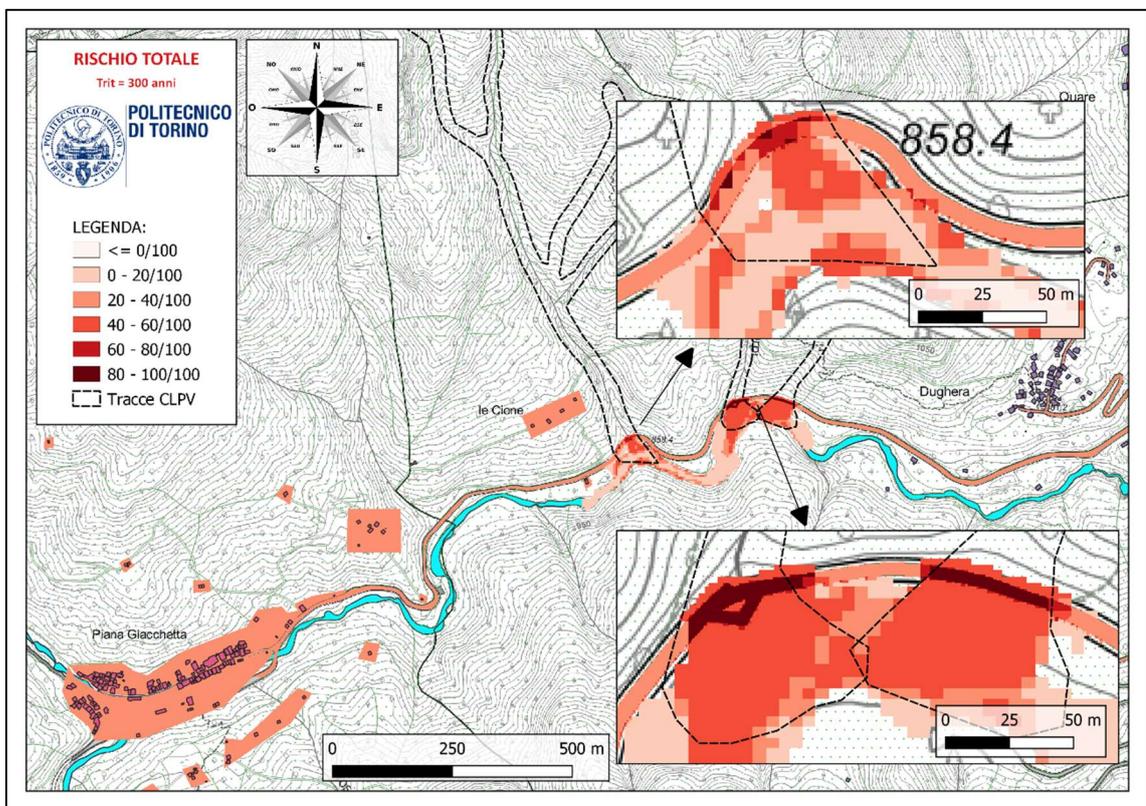


Figura 8.10: Carta del rischio totale per eventi con $T_{rit}=300$ anni.

8.4 Carte di rischio a tempi di ritorno minori

Per elaborare le carte di rischio a tempi di ritorno 100, 30 e 10 anni la procedura sarà la medesima adottata alle precedenti. Il parametro che di volta in volta farà variare il risultato finale è la carta di vulnerabilità di partenza: al diminuire dei tempi di ritorno i parametri di pericolosità diminuiscono quindi anche la vulnerabilità. L'unica voce che non risente dell'evento stesso è il disagio psico-sociale delle persone infatti esse sono ignare di quali fenomeni aspettarsi.

Si riportano le carte dall'allegato "Carte prodotte" da pagina 144.

8.4.1 Confronti tra eventi di $T_{rit} = 300$ anni e $T_{rit} = 30$ anni

Si esegue un confronto sulle carte ottenute per tempi di ritorno di 300 e 30 anni sovrapponendo i rischi totali in Figura 8.11 e vengono riportate solo le zone dove ci sono grandi differenze dato che l'isolamento degli abitanti di Rassa e il disagio psico-sociale percepito dalle persone sono indipendenti dall'evento. L'estensione areale delle aree a rischio non è notevolmente diversa come sarebbe consueto aspettarsi in altri casi: questo è dovuto dal forte incanalamento delle valanghe che, obbligate della morfologia, scorrono in canali. Seppur non facile da vedere per problemi grafici le zone a maggior rischio, coincidenti con parte delle carreggiate, per eventi trecentennali sono più del doppio rispetto a quelli trentennali nei due tratti più a sinistra, mentre per il restante sono addirittura quasi assenti. In particolare, anche in vista dell'intervento che si proporrà, le zone a rischio massimo si sovrappongono per circa 20 m sulla strada per gli eventi in 420 e di circa 36 m in 1256; potrebbe essere una indicazione per l'ubicazione di specifici interventi se si volesse progettare per eventi trentennali e non anche per gli estremi.

L'elemento a cui si è deciso di dare maggior valore, l'incolumità della vita umana, perde un po' di importanza alla fine dell'analisi infatti non si riescono quasi a distinguere le fasce in cui le pressioni possono ribaltare un'automobile. Questo avviene per la bassa esposizione che moltiplicata al valore abbatte il danno e di conseguenza il rischio.

Gli elementi fisici influenzano in modo più importante la carta, infatti la stabilità del pendio la fa da padrona sulla rappresentazione cartografica: tuttavia un suo collasso porterebbe a conseguenze molto gravi, per esempio occorrerebbe intervenire con interventi straordinari di rifacimento per ripristinare la viabilità con Rassa.

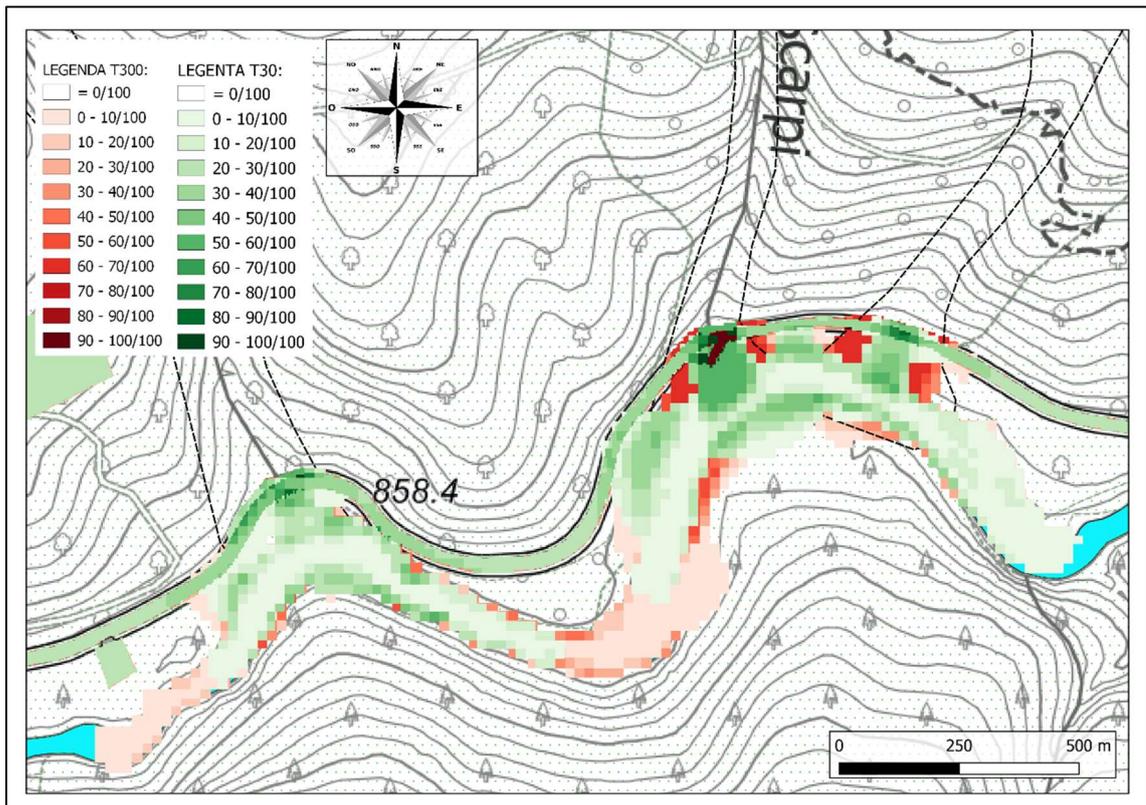


Figura 8.11: Confronto tra il rischio totale ottenuto per eventi di $T_{rit}=300$ anni e $T_{rit}=30$ anni.

9 PROPOSTA DI INTERVENTI DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO

Per apportare beneficio sulla tratta di SP82 studiata occorre differenziare ancora una volta due categorie:

- Eventi ricorrenti annualmente di piccolo magnitudo ma molto frequenti;
- Eventi di ricorrenza maggiore ma che possono avere intensità molto maggiore dei precedenti.

Anche le zone interessate dalle due categorie sono diverse quindi nel seguito si proporranno due tipologie di interventi del rischio differenti.

9.1 Eventi annuali

Per questa tipologia di slavine molto frequenti il dott. Cavagnino, responsabile dello studio, si è già mosso interpellando la ditta “betonform” per studiare un sistema di ombrelli paravalanghe efficaci. Allo stato attuale le autorità locali dispongono dei fondi solamente per mettere in sicurezza la zona verso questi eventi a bassa intensità. Questo tipo di opera funge da difesa attiva con lo scopo di impedire l'innescò della valanga quindi di non assorbire l'impatto. Per ulteriori specifiche si rimanda alla relazione di calcolo svolta dai suddetti professionisti (Vialli, 2020).

9.2 Eventi a maggior tempo di ritorno

La proposta di mitigazione del rischio viene svolta sulla base della carta di rischio totale a tempo di ritorno 300 anni di Figura 8.10, sicuramente sarà efficace anche per gli eventi minori. Si nota come le zone a maggior suscettibilità sono le carreggiate in corrispondenza dell'intersezione con le tracce della CLPV in 1256 e 410, quindi si propone la realizzazione di una galleria paravalanghe nei due tratti più a rischio. Per maggior chiarezza si riporta in Figura 9.1 dove si pensa di collocarle spazialmente. Questi interventi andrebbero a influire su tutti gli elementi presi in considerazione nel rischio, inoltre si presterebbe bene a estendere la sua progettazione alla problematica di caduta massi anch'essa presente nella zona. Quest'ultima tematica sarà sviluppata in uno studio a parte e andrà verificato se effettivamente le zone più a rischio delle due problematiche coincidano, sarebbe impensabile realizzare un'unica opera continua su tutto lo sviluppo della strada.

Le sollecitazioni a cui sarebbero sottoposte le gallerie nei confronti della sole valanghe sono già state calcolate in parte in Tabella 7.2.

Si riporta in Figura 9.2 a titolo di esempio una galleria paravanghe costruita sulla strada statale poco sotto passo Giovo sul lato di San Leonardo in Passiria, l'idea è un'opera simile che riesca anche ad inserirsi bene nel contesto naturale che la circonda.

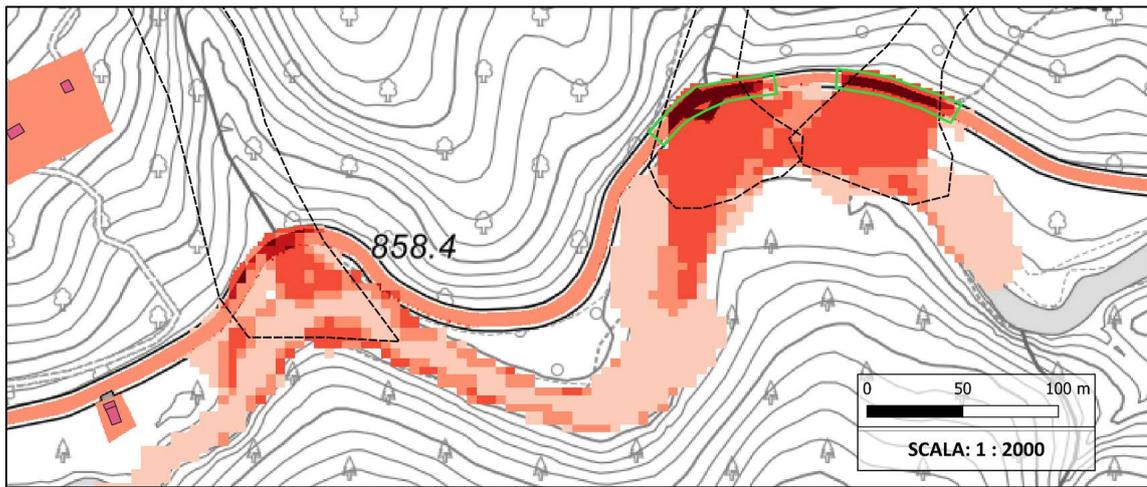


Figura 9.1: Zone di realizzazione delle gallerie paravalanghe



Figura 9.2: Esempio di galleria paravalanghe già realizzata. (Fonte: La Voce di Bolzano)

10 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Il presente lavoro di tesi è dedicato allo studio del rischio indotto dalle valanghe di neve in un tratto della strada provinciale SP82 in Valsesia. L'analisi di pericolosità è stata condotta mediante il software RAMMS utilizzando un modello reologico alla Voellmy-Salm ed il rischio valutato secondo la procedura proposta nel metodo IMIRILAND. I risultati ottenuti hanno fornito delle mappe di rischio, differenziate in base alla tipologia di rischio (fisico, sociale, economico, ambientale e totale) e per diversi scenari di magnitudo dell'evento valanghivo, differenziati in base al suo tempo di ritorno.

Si riassumono brevemente in Figura 10.1 i risultati riportando le aree più critiche ottenute dalle mappe di rischio totale. Si nota una graduale diminuzione dell'estensione di alcune zone a rischio massimo (rosso scuro), passando da eventi più rari (tempi di ritorno maggiori) a eventi di maggior probabilità temporale (tempi di ritorno minore), mentre gran parte della strada mostra un livello di rischio costante per ogni tempo di ritorno. Quest'ultimo risultato è dovuto al fatto che alcuni danni sono indipendenti dalla magnitudo dell'evento ma esistono per il semplice fatto che è presente il pericolo valanga sulla strada: per esempio, il disagio psico-sociale per le persone che conoscono l'esistenza del problema e devono percorrere la medesima.

A conclusione del lavoro di tesi si è definito un intervento di difesa per la messa in sicurezza della strada. Si tratta di una galleria paravalanghe, della quale si è fornita indicazione sulla quantificazione delle azioni statiche equivalenti. Essa sarebbe la soluzione che permette di mitigare il rischio riducendo l'esposizione degli elementi a rischio. Lo svantaggio di questa soluzione è l'elevato costo di costruzione. Non sarebbe tuttavia necessario proteggere l'intera tratta stradale ma si potrebbe limitare la protezione ai tratti a maggior rischio, come mostrato in Figura 9.1.

Ulteriori approfondimenti potrebbero essere interessanti per affinare i risultati:

- Procurare alcune informazioni aggiuntive circa la situazione strutturale e le caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso a valle della strada, al fine di analizzare in modo più quantitativo il livello di stabilità a seguito dell'impatto dinamico della valanga;
- Procurare un modello digitale del terreno con un passo inferiore ai 5 m (utilizzato nel presente lavoro), che permetterebbe di considerare in modo più dettagliato la strada e quindi la rottura di pendenza nelle simulazioni numeriche;
- Verificare i risultati delle simulazioni con un altro software, magari con prestazioni più elevate che quindi non trascuri le equazioni di bilancio energetico e/o utilizzi un approccio tridimensionale.

Lo studio svolto in questa tesi potrebbe essere infine integrato con un analogo riguardante il problema di caduta massi, da cui è afflitta l'area di studio. Infatti una zona denominata "Parete Calva", una parete rocciosa a monte del SP82, potrebbe scaricare blocchi sulla strada. Sarebbe interessante redare una cartografia specifica per il tema e successivamente integrarla con quella già svolta per il problema valanghe così da ottenere una mappa multi-rischio.

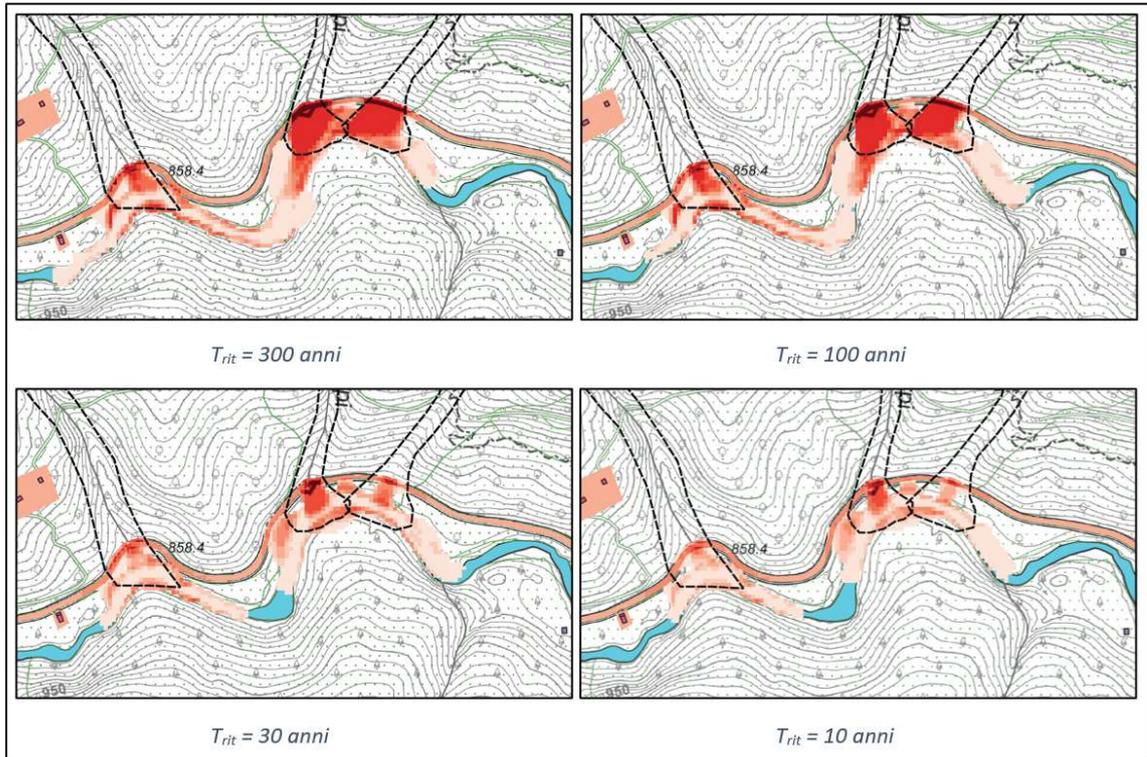


Figura 10.1: Particolare delle carte di rischio totale prodotte, relativamente alle aree più critiche.

BIBLIOGRAFIA:

- F.Moro (2009). Snow Avalanches: Hazard maps and passive defence structures. Tesi di dottorato, Università degli Studi di Padova.
- Barbolini, M., Natale, L. and Dipartimento, P. (2013) *LINEE DI INDIRIZZO OPERATIVE PER L' ATTIVITA' DELLE*.
- Delparte, D., Jamieson, J. B. and Waters, N. (2007) 'Statistical runout modeling of snow avalanches using GIS in Glacier National Park, Canada'.
- Keylock, C. J. and Barbolini, M. (2001) 'Snow avalanche impact pressure - Vulnerability relations for use in risk assessment', *Canadian Geotechnical Journal*, 38(2), pp. 227–238. doi: 10.1139/t00-100.
- Lee, E. M. and Jones, D. K. C. (2004) *Landslide Risk Assessment, Landslide Risk Assessment*. doi: 10.1680/lra.31715.
- QGIS (2020) *QGIS User Guide 3.4*. Available at: <http://docs.qgis.org/2.6/pdf/en/QGIS-2.6-UserGuide-en.pdf>
- S. Corrao (2019). Studio del comportamento meccanico della neve tramite un'apparecchiatura per prove di taglio diretto. Tesi specialistica. Politecnico di Torino
- A. Bianchi, G. Rossotti and C. Sbarufatti (no date) *MISURE DI TRASPORTO EOLICO DI NEVE, dati strumentali e formule*.
- ANAS (2019) *I Quaderni tecnici - dispositivi di ritenuta stradale - VI*.
- Barbolini, M. (2004) 'Modelli per il calcolo delle valanghe'.
- Bartelt, P. et al. (2017) 'RAMMS: Avalanche User Manual', p. 104. Available at: https://ramms.slf.ch/ramms/downloads/RAMMS_AVAL_Manual.pdf.
- Bartelt, P., Salm, B. and Gruber, U. (1999) 'Calculating dense-snow avalanche runout using a Voellmy-fluid model with active/passive longitudinal straining', *Journal of Glaciology*, 45(150), pp. 242–254. doi: 10.3189/s002214300000174x.
- Berretti, R., Caffo, L. and Camerano, P. (2007) *Selvicoltura nelle foreste di protezione, Sherwood*. Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Selvicoltura+nelle+foreste+di+protezione#2>.
- Bonnard, Christophe; Forlati, F.; Scavia, C. (2013) *Identification and Mitigation of Large Landslide Risks in Europe : Advances in Risk Assessment, Journal of Chemical Information and Modeling*.
- Buser, O. and Bartelt, P. (2009) 'Production and decay of random kinetic energy in granular snow avalanches', *Journal of Glaciology*, 55(189), pp. 3–12. doi: 10.3189/002214309788608859.
- Cascini, L., Fornaro, G. and Peduto, D. (2009) 'Analysis at medium scale of low-resolution DInSAR data in slow-moving landslide-affected areas', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, pp. 598–611. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2009.05.003.

- Caterpillar (2015) 'Caterpillar Performance Handbook', *Caterpillar Inc.*, p. 2264.
- Christen, M., Bartelt, P. and Kowalski, J. (2010) 'Back calculation of the In den Arelen avalanche with RAMMS: Interpretation of model results', *Annals of Glaciology*, 51(54), pp. 161–168. doi: 10.3189/172756410791386553.
- Christen, M., Kowalski, J. and Bartelt, P. (2010) 'RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain', *Cold Regions Science and Technology*, 63(1–2), pp. 1–14. doi: 10.1016/j.coldregions.2010.04.005.
- Colbeck, S. et al. (1985) 'The International Classification for Seasonal Snow on the Ground'.
- Corominas, J. et al. (2014) 'Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk', *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), pp. 209–263. doi: 10.1007/s10064-013-0538-8.
- Couture, R. et al. (2013) 'Canadian technical guidelines and best practices related to landslides: A national initiative for loss reduction', *Landslides: Global Risk Preparedness*, (July), pp. 315–322. doi: 10.1007/978-3-642-22087-6_22.
- Keylock, C. J. and Barbolini, M. (2001) 'Snow avalanche impact pressure - Vulnerability relations for use in risk assessment', *Canadian Geotechnical Journal*, 38(2), pp. 227–238. doi: 10.1139/t00-100.
- Lacerda, W. et al. (2004) 'The IMIRILAND methodology: proposal for a multidisciplinary risk assessment procedure with respect to large landslides', *Landslides: Evaluation and Stabilization/Glisement de Terrain: Evaluation et Stabilisation, Set of 2 Volumes*, (June), pp. 229–235. doi: 10.1201/b16816-31.
- Levera, E. and Maggioni, M. (2019) *Comune di Alagna Valsesia Provincia di Vercelli*.
- McClung, D. M. (1977) 'Direct Simple Shear Tests on Snow and Their', *Journal of Glaciology*, 19(81), pp. 101–109.
- McClung, D. M. (2003) 'Magnitude and frequency of avalanches in relation to terrain and forest cover', *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 35(1), pp. 82–90. doi: 10.1657/1523-0430(2003)035[0082:MAFOAI]2.0.CO;2.
- McClung, D. and Schaerer, P. (1953) *THE AVALANCHE HANDBOOK*. The Mountaineers Books.
- Radok, U. (1997) 'The international commission on snow and ice (ICSI) and its precursors, 1894–1994', *Hydrological Sciences Journal*, pp. 131–140. doi: 10.1080/02626669709492015.
- Regione Piemonte (2020) 'Prezzi di riferimento per Opere e Lavori Pubblici nella Regione Piemonte', pp. 1–27. Available at: http://www.sistemapiemonte.it/eXoRisorse/dwd/servizi/OperePubbliche/prezzario/2020/pdf/PREZZARIO_REGIONALE_2020.pdf.
- Salm, B. (1993) 'Flow, flow transition and runout distances of flowing avalanches', *Annals of Glaciology*, 18, pp. 221–226. doi: 10.3189/s0260305500011551.
- Santagata, F. A. et al. (2016) *TEORIA E TECNICA DELLE COSTRUZIONI STRADALI*.
- Sanz-Ramos, M. et al. (2020) *Role of friction terms in two-dimensional modelling of dense snow avalanches, Natural hazards and earth system sciences*. doi: 10.5194/nhess-2019-423.
- Schweizer, J., Jamieson, J. B. and Schneebeli, M. (2003) 'Snow avalanche formation', *Reviews*

of Geophysics, 41(4). doi: 10.1029/2002RG000123.

Sillano, Benedetti, Tocchio, Zardo, T. (2006) *Rel.GeologicaSP82_Pdefinitivo_30-10-2006.pdf*.

Soldati, A. (2008) *Corso di Fluidodinamica e Turbolenza*.

Stc, L. F. (2007) *I fluidi*.

Stefanini, F. and Barbolini, M. (2011) *Piano di Gestione del Rischio Valanghe (P.G.R.V.) della Valsesia ANALISI DEGLI SCENARI*.

Trasporti, I. M. delle I. e dei (1992) *Il ministro dei lavori pubblici*.

Viali, S. tecnico B. e (2020) *Relazione di calcolo*.

Willi, S. *et al.* (2007) *Actions d'avalanches sur les galeries de protection Impressum*.

11 ALLEGATI

11.1 Calcolo altezze di distacco per le nicchie 1256, 820-a e 820-b

area 1256		$Z_{\text{medio,nicchia}}$ [m]		1198				
	Tr = 10 anni		Tr = 30 anni		Tr = 100 anni		Tr = 300 anni	
	DH_{3gg} [cm]	H_{sd} [cm]	DH_{3gg} [cm]	H_{sd} [cm]	DH_{3gg} [cm]	H_{sd} [cm]	DH_{3gg} [cm]	H_{sd} [cm]
valore corretto secondo z	80	20	110	30	150	40	189	50
pendenza medi nicchia	39		40		42		42	
$f(\Theta)$	0.6161		0.5963		0.5607		0.5607	
altezza di distacco a z_{distacco} m [cm]	54		74		94		118	
Volume [m ³]	7407.91		10151.99		21206.94		26621.48	

Tabella 11.1: Calcolo altezze del manto al distacco per i diversi tempi di ritorno della nicchia 1256.

area 820c+820d		$Z_{\text{medio,nicchia}}$ [m]		1516				
	Tr = 10 anni		Tr = 30 anni		Tr = 100 anni		Tr = 300 anni	
	DH_{3gg} [cm]	H_{sd} [cm]	DH_{3gg} [cm]	H_{sd} [cm]	DH_{3gg} [cm]	H_{sd} [cm]	DH_{3gg} [cm]	H_{sd} [cm]
valore corretto secondo z	100	20	130	30	170	40	209	50
pendenza medi nicchia	39		40		42		47	
$f(\Theta)$	0.6161		0.5963		0.5607		0.4902	
altezza di distacco a z_{distacco} m [cm]	65		84		104		112	
Volume [m ³]	7525.46		9725.21		12040.73		12966.95	

area 820a+820b	Zmedio,nicchia [m]				1350			
	Tr = 10 anni		Tr = 30 anni		Tr = 100 anni		Tr = 300 anni	
	DH _{3gg} [cm]	H _{sd} [cm]						
valore corretto secondo z	90	20	120	30	160	40	199	50
pendenza medi nicchia	39		40		42		46	
f(Θ)	0.6161		0.5963		0.5607		0.5026	
altezza di distacco a z_distacco m [cm]	60		79		99		110	
Volume [m ³]	7975.55		10441.89		13085		14539.34	

Tabella 11.2: Calcolo altezze del manto al distacco per i diversi tempi di ritorno delle nicchie in 820.

11.2 Risultati per eventi con T_{rit} = 100 anni

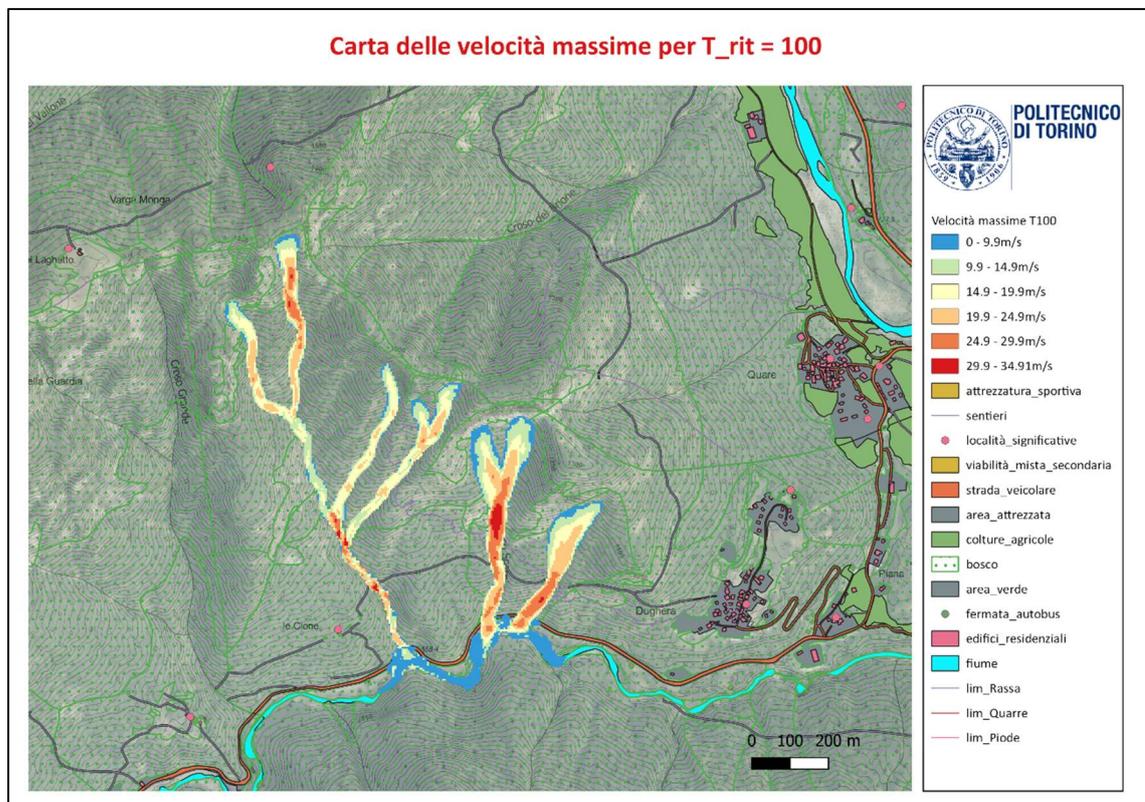


Figura 11.1

Carta delle pressioni massime per $T_{rit} = 100$

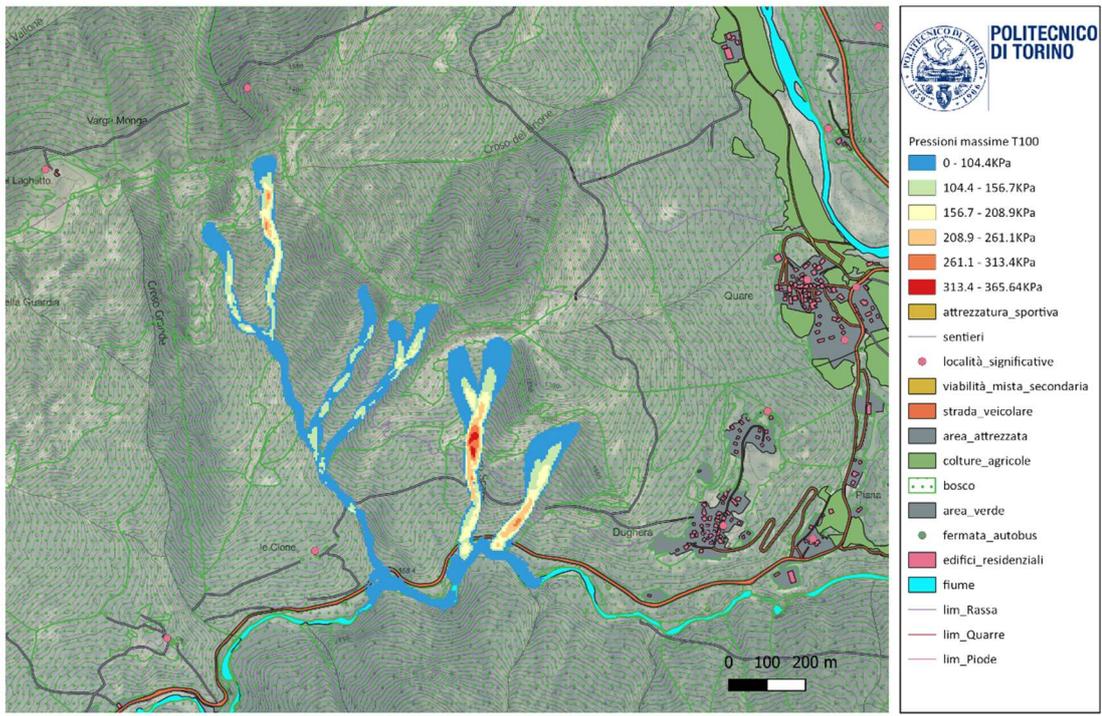


Figura 11.2

Carta delle altezze massime per $T_{rit} = 100$

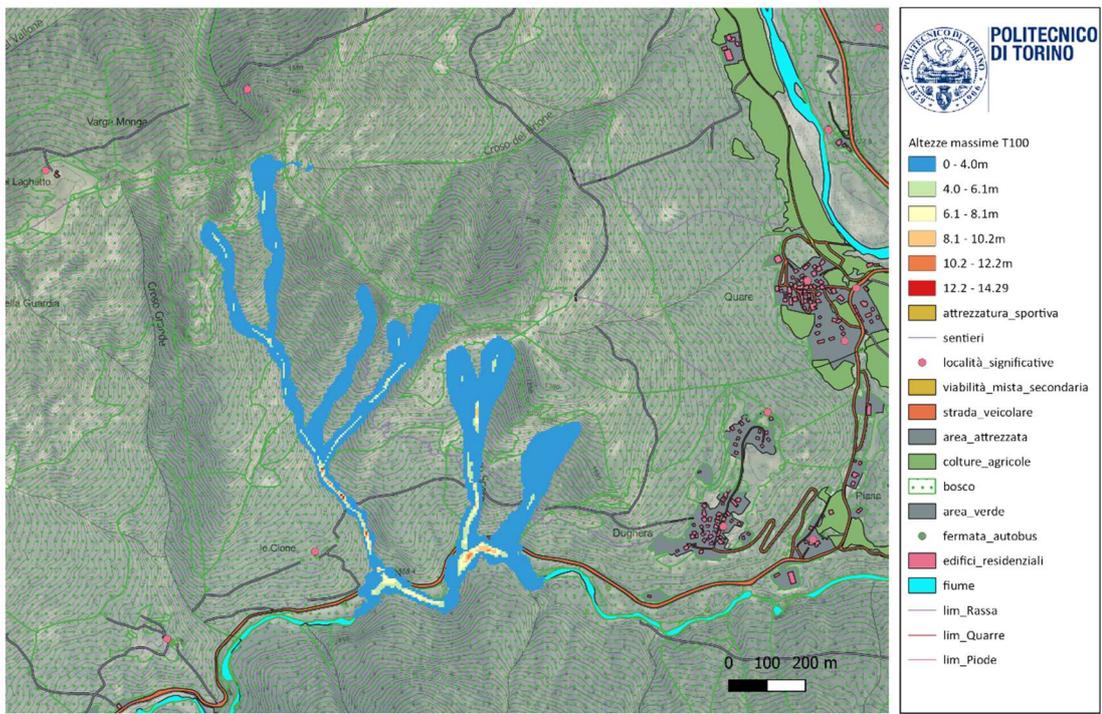


Figura 11.3

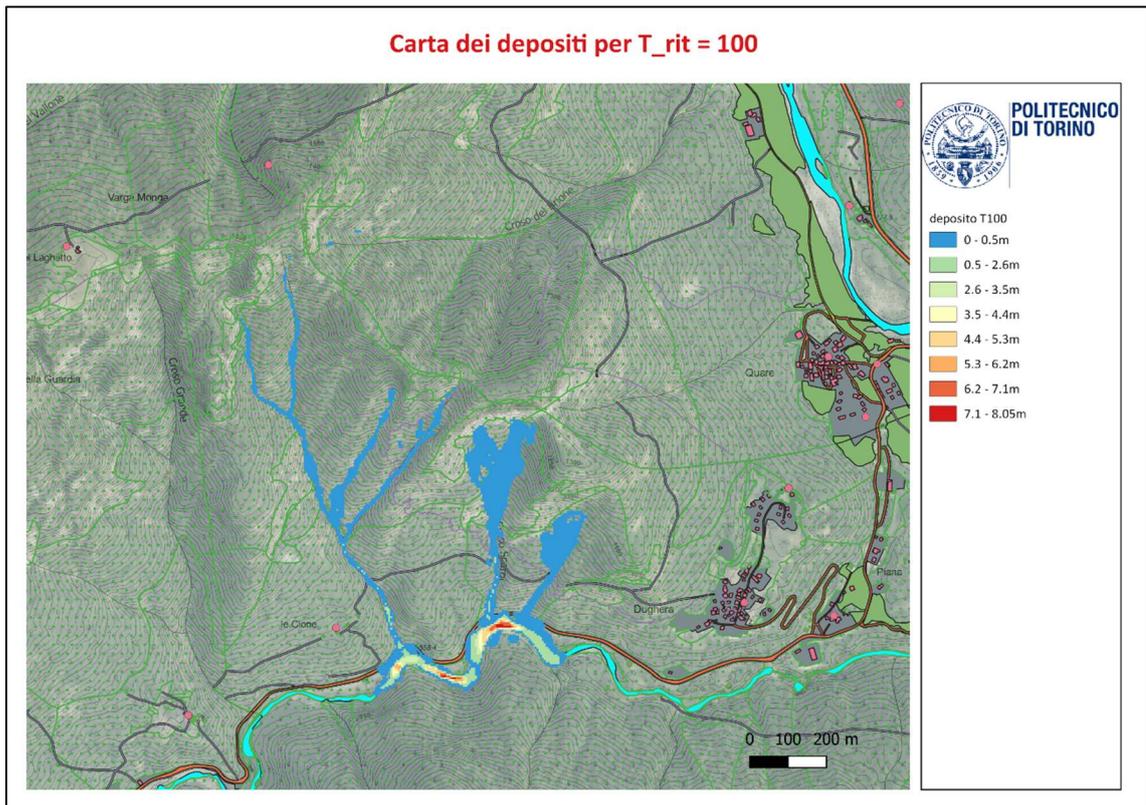


Figura 11.4

11.3 Risultati per eventi con $T_{rit} = 30$ anni

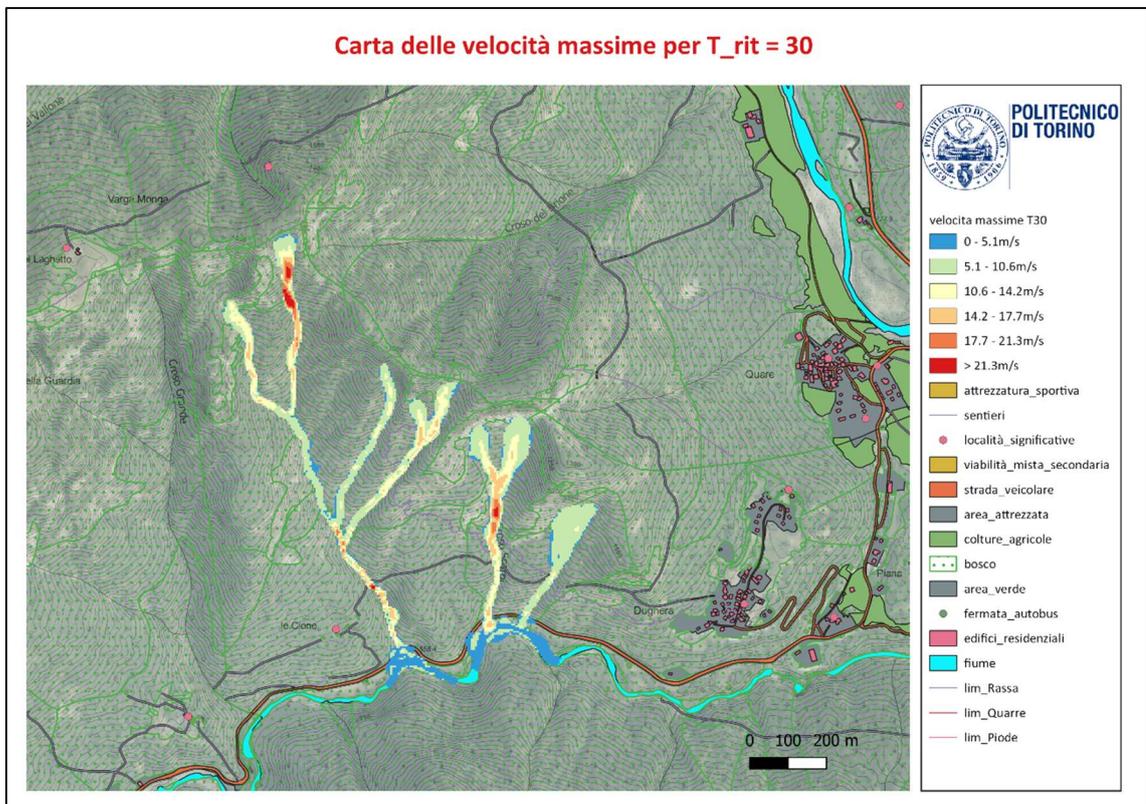


Figura 11.5

Carta delle pressioni massime per $T_{rit} = 30$

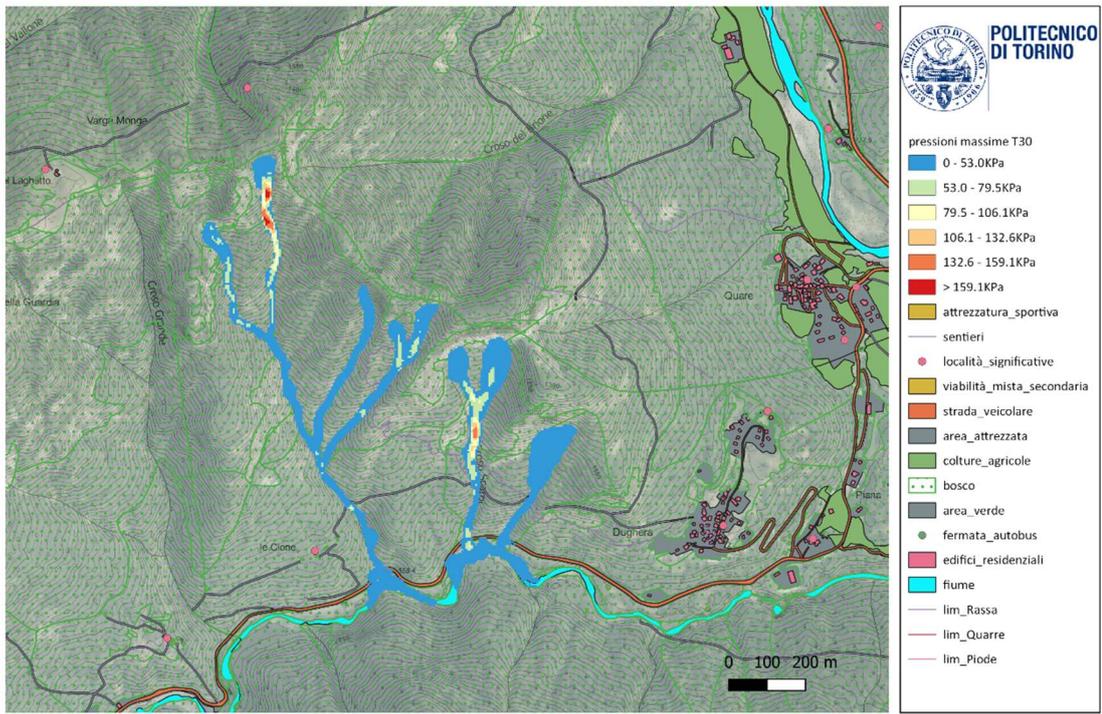


Figura 11.6

Carta delle altezze massime per $T_{rit} = 30$

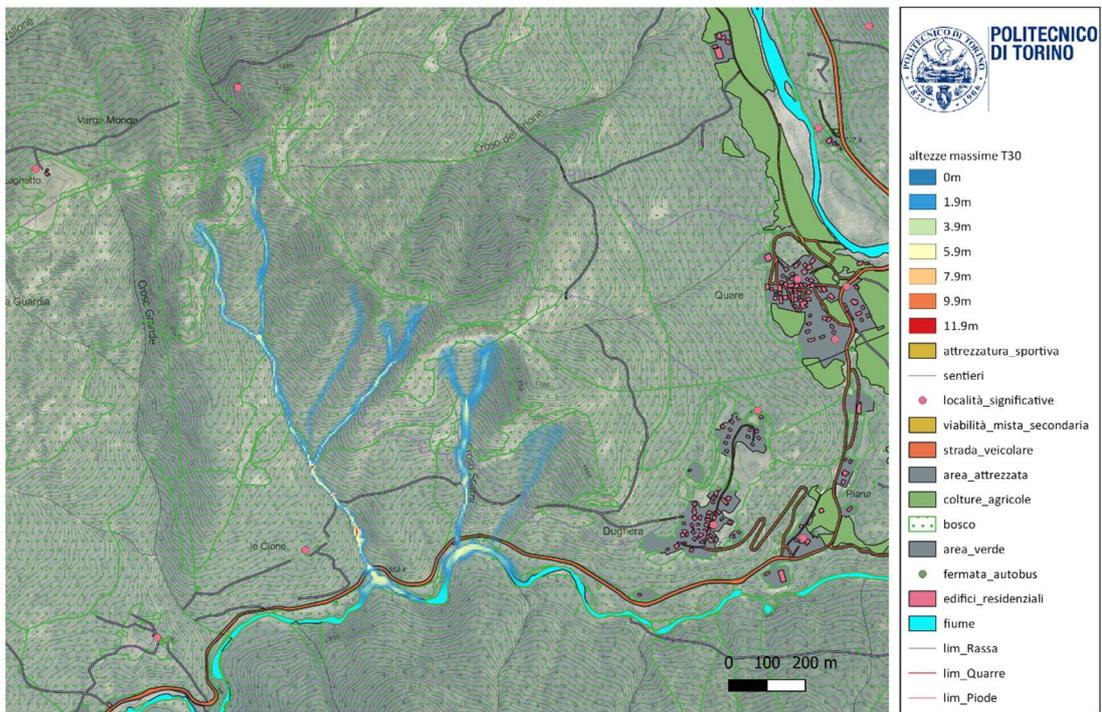


Figura 11.7

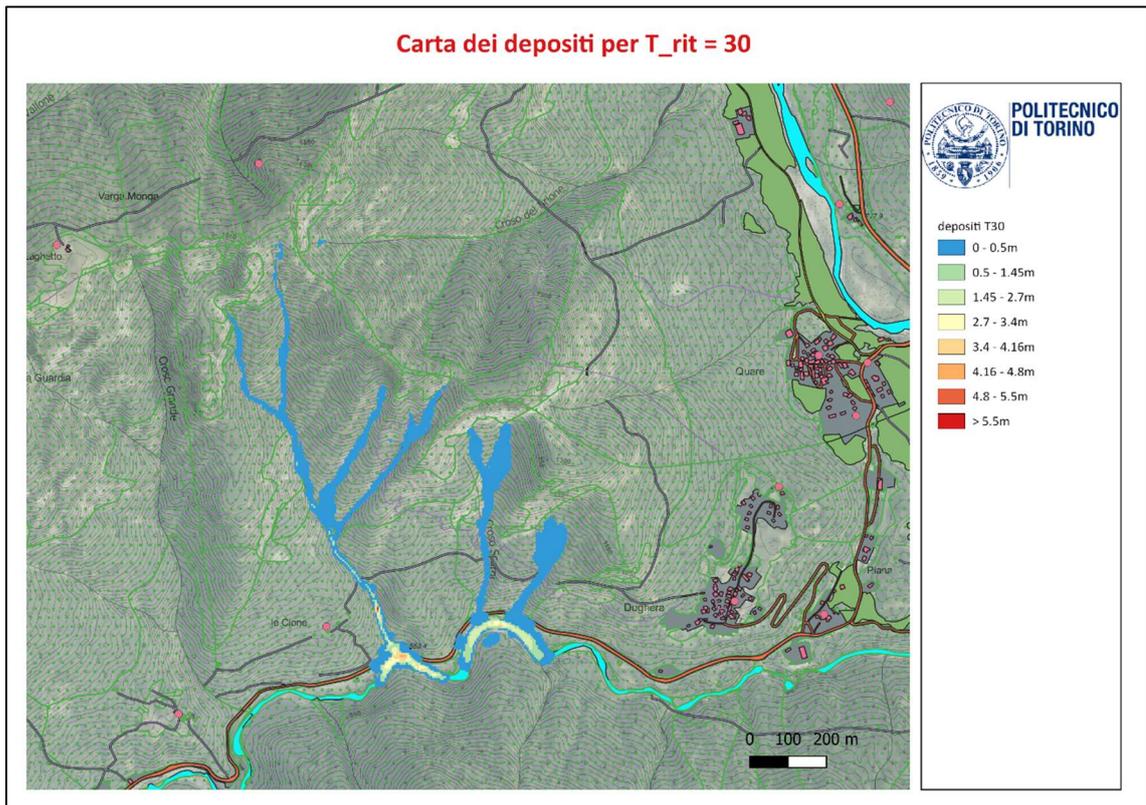


Figura 11.8

11.4 Risultati per eventi con $T_{rit} = 10$ anni

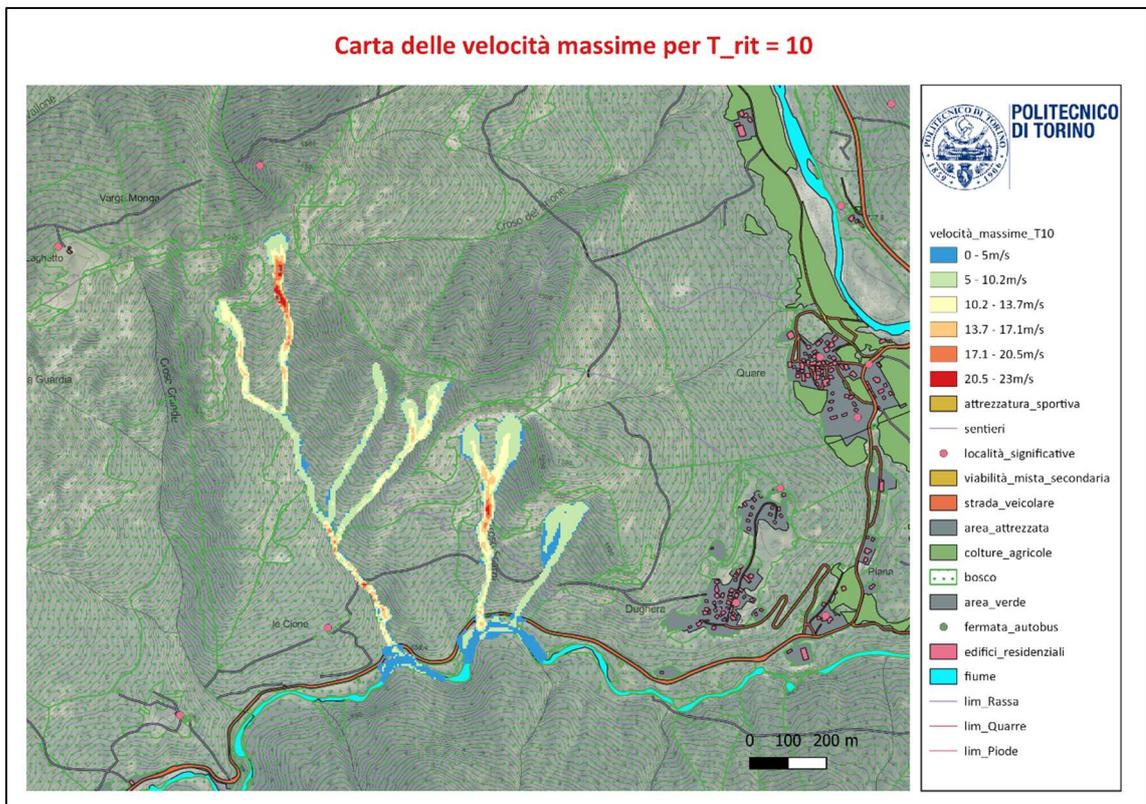


Figura 11.9

Carta delle pressioni massime per $T_{rit} = 10$

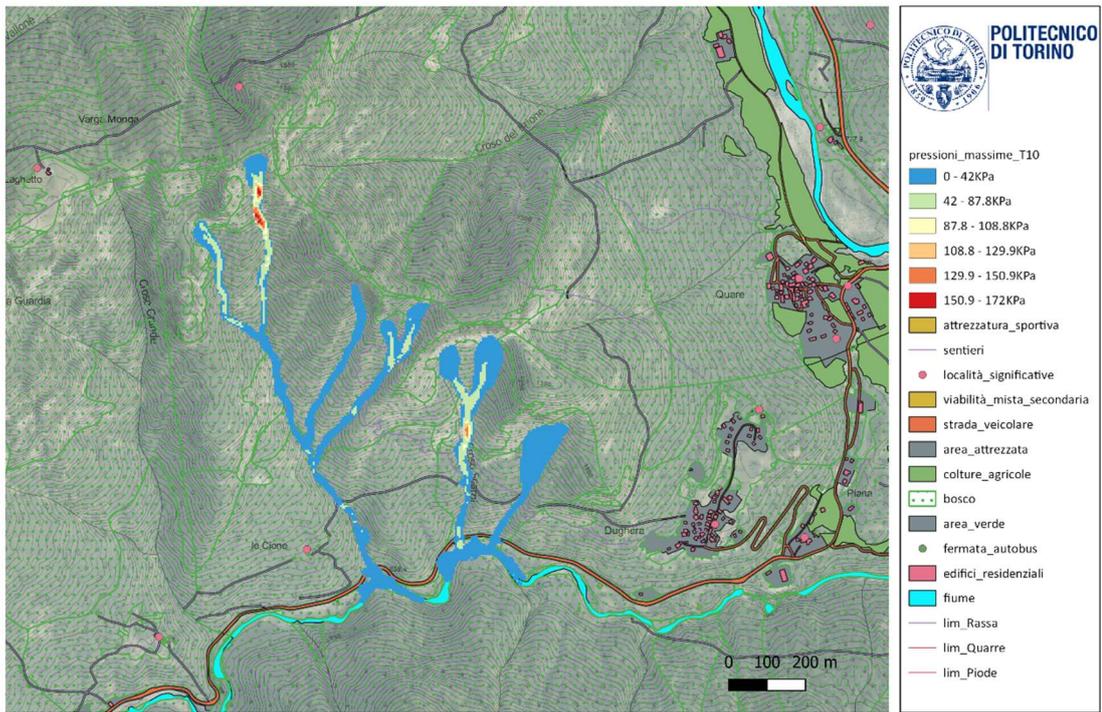


Figura 11.10

Carta delle altezze massime per $T_{rit} = 10$

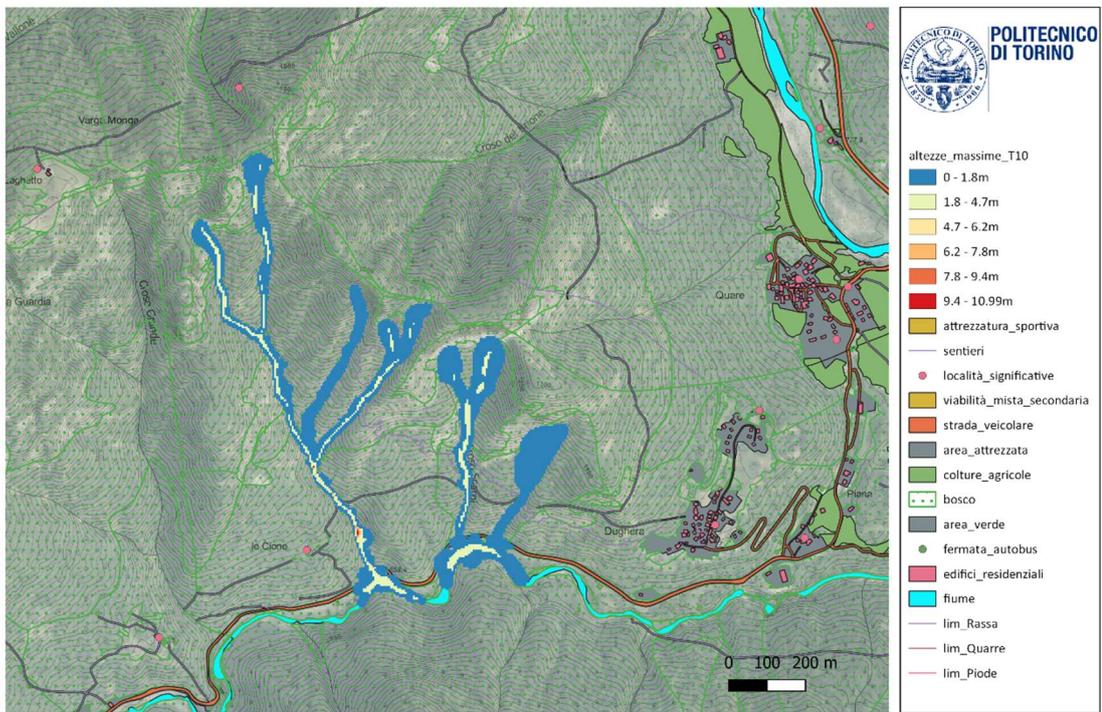


Figura 11.11

Carta dei depositi per $T_{rit} = 10$

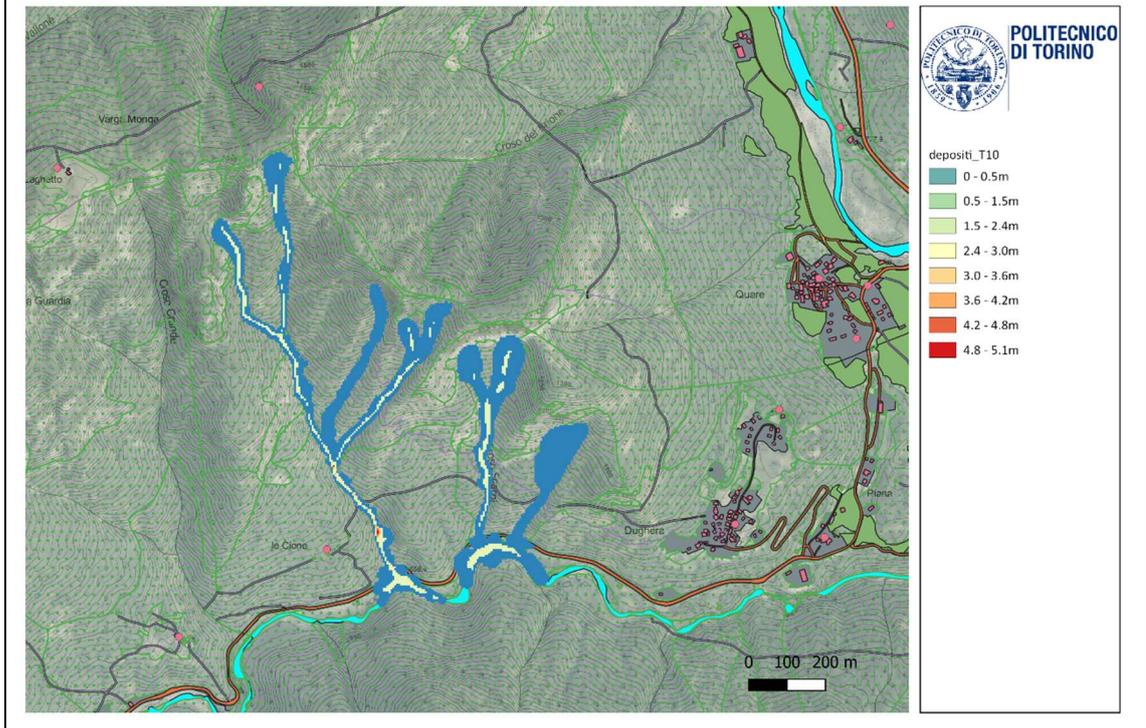


Figura 11.12

11.5 Guardrail N2

Classe N2 Bordo Laterale - Barriera 2 onde singola su rilevato W2

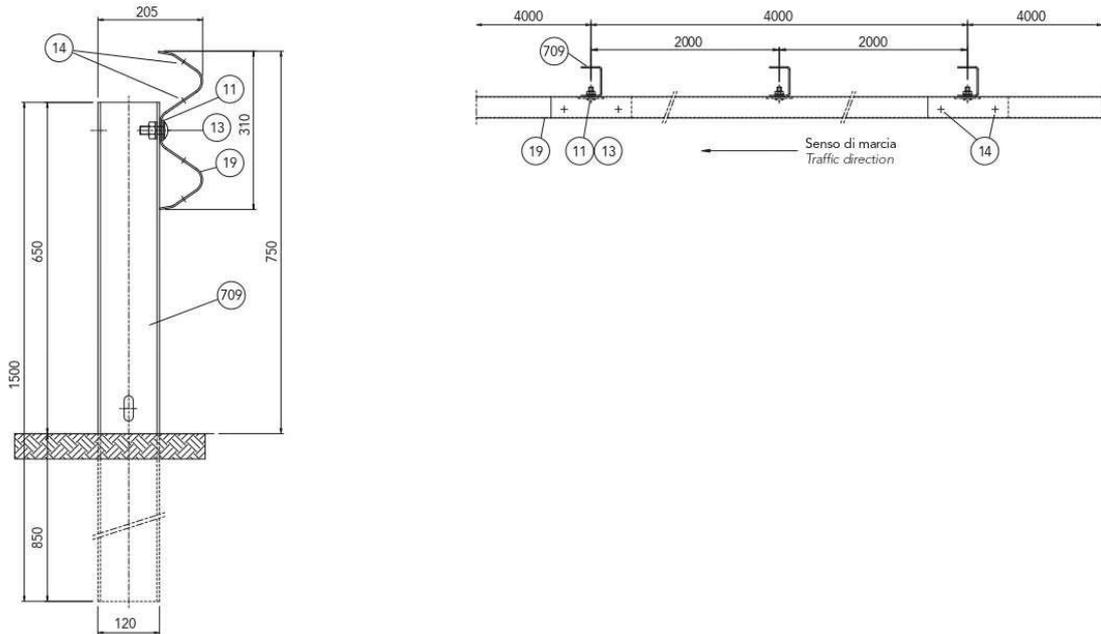
Class N2 Roadside - 2-waves single sided guardrail W2

Aufhaltstufe N2 für rammfähige Böden - 2-welliges Rückhaltesystem W2

Classe N2 Bord latéral - Glissière 2 crosses simple sur remblai W2

Clase N2 Borde lateral - Barrera de doble onda simple sobre base terreno W2

CE n. AISICO
230/2131/CPD/2012



Caratteristiche Characteristics, Eigenschaften, Caractéristiques, Características	
Altezza fuori terra Height above ground level, Höhe über Grundboden, Hauteur hors sol, Altura sobre el suelo	750 ± 25 mm
Profondità d'infissione Depth of penetration, Rammtiefe, Profondeur de piling du poteau, Longitud hincada	850 mm
Ingombro trasversale Overall width, Gesamtbreite, Grosseur hors tout, Anchura total	205 mm
Interasse pali Post spacing, Steherabstand, Distance entre poteaux, Distancia entre postes	2000 mm

Rapporti di prova Crash test reports, Testberichte, Comptes rendus d'essais, Relaciones de pruebas										
Test n.	Facility	Test	Type	Barrier length m	Mass kg	Speed km/h	ASI max 1.4	THIV max 33 km/h	D m	W m
PROVA 391	Aisico	TB32	Laterale 20°	84	1.500	110	1=A		0,7	0,8=W2
PROVA 388	Aisico	TB11	Laterale 20°	84	900	100	0,9=A	27,2	0,6	0,7=W2

Figura 11.13: Dimensioni geometriche di un guardrail N2

11.6 Mezzo per sgombero neve in eventi eccezionali



MODEL	914G/IT14G		924Hz		924H Standard VersaLink Pin On/Hook On		924H High Lift VersaLink Pin On/Hook On	
Flywheel Power: Net	72 kW	96 hp	97 kW	130 hp	97 kW	130 hp	97 kW	130 hp
Gross	75 kW	101 hp	98 kW	132 hp	98 kW	132 hp	98 kW	132 hp
Engine Model	Cat 3054C DIT		C6.6		C6.6		C6.6	
Rated Engine RPM	2200		2300		2300		2300	
Bore	100 mm	3.94"	105 mm	4.13"	105 mm	4.13"	105 mm	4.13"
Stroke	127 mm	5"	127 mm	5"	127 mm	5"	127 mm	5"
No. Cylinders	4		6		6		6	
Displacement	4 L	243 in ³	6.6 L	403 in ³	6.6 L	403 in ³	6.6 L	403 in ³
Speeds Forward	km/h mph		km/h mph		km/h mph		km/h mph	
1st	9 Lo	5.6	6.9	4.3	6.9	4.3	6.9	4.3
2nd	35 Hi	22	12.9	8.0	12.9	8.0	12.9	8.0
3rd	—	—	22.9	14.2	22.9	14.2	22.9	14.2
4th	—	—	39.7	24.7	39.7	24.7	39.7	24.7
Speeds Reverse	km/h mph		km/h mph		km/h mph		km/h mph	
1st	9 Lo	5.6	6.9	4.3	6.9	4.3	6.9	4.3
2nd	35 Hi	22	12.9	8.0	12.9	8.0	12.9	8.0
3rd	—	—	22.9	14.2	22.9	14.2	22.9	14.2
Hydraulic Cycle Time, Rated Load in Bucket:	Seconds		Seconds		Seconds		Seconds	
Raise	914G	IT14G	Seconds		Seconds		Seconds	
	5.6	6.9	5.2		5.2		5.2	
Dump	2.1	2.5	1.2		1.6		1.9	
Lower (Empty, Float Down)	3.2	3.1	3.0		2.7		2.4	
Total	10.9	12.5	9.4		9.5		9.5	
Tread Width	1.80 m	5'11"	1.88 m	6'2"	1.88 m	6'2"	1.88 m	6'2"
Width Over Tires	2.26 m	7'5"	2.49 m	8'2"	2.49 m	8'2"	2.49 m	8'2"
Ground Clearance	456 mm	18"	436 mm	17"	436 mm	17"	436 mm	17"
Fuel Tank Capacity	150 L	39.6 U.S. gal	225 L	59.4 U.S. gal	225 L	59.4 U.S. gal	225 L	59.4 U.S. gal
Hydraulic Tank Capacity	70 L	18.5 U.S. gal	70 L	18.5 U.S. gal	70 L	18.5 U.S. gal	70 L	18.5 U.S. gal
Hydraulic System Capacity (includes tank)	100 L	26.4 U.S. gal	148 L	39 U.S. gal	148 L	39 U.S. gal	148 L	39 U.S. gal

Figura 11.14: Caratteristiche della pala caricatrice (Caterpillar, 2015)

Bucket Type		General Purpose						Waste/Ag Bolt-on Cutting Edge
		Bolt-on Cutting Edges		Bolt-on Teeth & Segments		Bolt-on Teeth		
Ground Engaging Type	m ²	1.8	2.1	1.8	2.1	1.7	2.0	2.8
	yd ²	2.3	2.7	2.3	2.7	2.2	2.6	3.6
Struck capacity	m ³	1.5	1.7	1.5	1.7	1.4	1.6	2.3
	yd ³	2.0	2.2	2.0	2.2	1.8	2.1	3.0
Bucket width	mm	2550	2550	2620	2620	2620	2620	2550
	ft/in	8'4"	8'4"	8'7"	8'7"	8'7"	8'7"	8'4"
Dump clearance at full lift and 45° discharge (§)	mm	2918	2849	2814	2745	2814	2745	2712
	ft/in	9'7"	9'4"	9'3"	9'0"	9'3"	9'0"	8'11"
Reach at full tilt and 45° discharge (§)	mm	885	957	988	1060	988	1060	1091
	ft/in	2'11"	3'2"	3'3"	3'6"	3'3"	3'6"	3'7"
Reach at 45° discharge and 2130 mm (7'0") clearance (§)	mm	1453	1491	1505	1539	1505	1539	1551
	ft/in	4'9"	4'11"	4'11"	5'1"	4'11"	5'1"	5'1"
Reach with lift arms horizontal and bucket level	mm	2156	2255	2302	2401	2302	2401	2446
	ft/in	7'1"	7'5"	7'7"	7'11"	7'7"	7'11"	8'0"
Digging depth (§)	mm	64	70	77	83	77	83	89
	in	2.5	2.8	3.0	3.3	3.0	3.3	3.5
Overall length	mm	7007	7112	7153	7258	7130	7235	7320
	ft/in	23'0"	23'4"	23'6"	23'10"	23'5"	23'9"	24'0"
Overall height with bucket at full raise (§)	mm	4966	5095	4966	5095	4966	5095	5216
	ft/in	16'4"	16'9"	16'4"	16'9"	16'4"	16'9"	17'1"
Loader clearance radius with bucket in carry position (§)	mm	5530	5558	5605	5634	5605	5634	5693
	ft/in	18'3"	18'3"	18'3"	18'3"	18'3"	18'3"	18'3"
Static tipping load straight (§)	kg	8738	8557	8577	8393	8679	8497	7459
	lb	19,265	18,866	18,909	18,503	19,135	18,733	16,444
Static tipping load with 40° turn (§)	kg	7666	7490	7504	7325	7607	7430	6520
	lb	16,900	16,512	16,544	16,149	16,770	16,379	14,374
Breakout force (§)	kg	11 336	10 250	11 215	10 129	12 118	10 878	7389
	lb	24,992	22,597	24,725	22,331	26,716	23,982	16,290
Operating weight	kg	11 379	11 515	11 514	11 650	11 429	11 565	11 472
	lb	25,087	25,386	25,384	25,684	25,197	25,497	25,292

NOTE: Specifications and ratings conform to all applicable standards recommended by the Society of Automotive Engineers (SAE). SAE Standards J732 JUN92 and J742 FEB85 govern loader rating, denoted in the text by (§).

Figura 11.15: Caratteristiche della pala caricatrice (Caterpillar, 2015)

12 RINGRAZIAMENTI

Arrivato alla conclusione del mio lavoro di tesi mi sento in dovere di ringraziare coloro che hanno dedicato tempo supportandomi nella stesura e guidandomi nello svolgimento di una problematica reale, nella quale c'è stata l'esigenza di affrontare innumerevoli tematiche non trattate durante i corsi di studio.

Desidero ringraziare innanzitutto i miei relatori e correlatori che hanno reso tutto questo possibile: a partire dalla Proff.ssa Monica Barbero che mi ha affidato questo importante lavoro mostrandosi sempre disponibile e preparata durante l'intera stesura. Il Dott. Geol. Giovanni Cavagnino, commissionario del lavoro e, essendo esperto dell'area presa in riferimento, ha fornito il riscontro e le informazioni sul territorio. Con lui vorrei anche ricordare l'intera Unione Montana dei Comuni della Valsesia e in particolare il Sig. Marco Godio.

Ringrazio la Dott.ssa Margherita Maggioni che in maniera molto professionale mi ha avvicinato allo studio, per la prima volta, sulle valanghe di neve densa in tutti i loro aspetti: dall'approccio teorico, all'uso del software e all'analisi critica dei risultati.

Ci tengo a ringraziare particolarmente l'Ing. Lorenzo Milan con il quale abbiamo un rapporto anche extra-scolastico che, con i suoi consigli, mi ha guidato nella realizzazione dell'elaborato in modo corretto oltre ad avermi affiancato durante tutto lo svolgimento. Un ringraziamento va inoltre alla Prof.ssa Marta Castelli per le sue consulenze sul metodo IMIRILAND e per aver revisionato i risultati.

Nonostante le innumerevoli difficoltà riscontrate nello svolgimento vi ringrazio per avermi appoggiato in ogni momento, mi ha permesso di aumentare il mio bagaglio di conoscenze in nuovi campi e ad affrontare nuove tematiche.

In ultimo, ma non meno importanti, ringrazio la mia famiglia e Francesca per avermi affiancato in tutto il mio percorso di studi, senza il vostro supporto probabilmente non sarei arrivato a questo punto.

13 CARTE PRODOTTE

VULNERABILITÀ FISICA

Trit = 300 anni

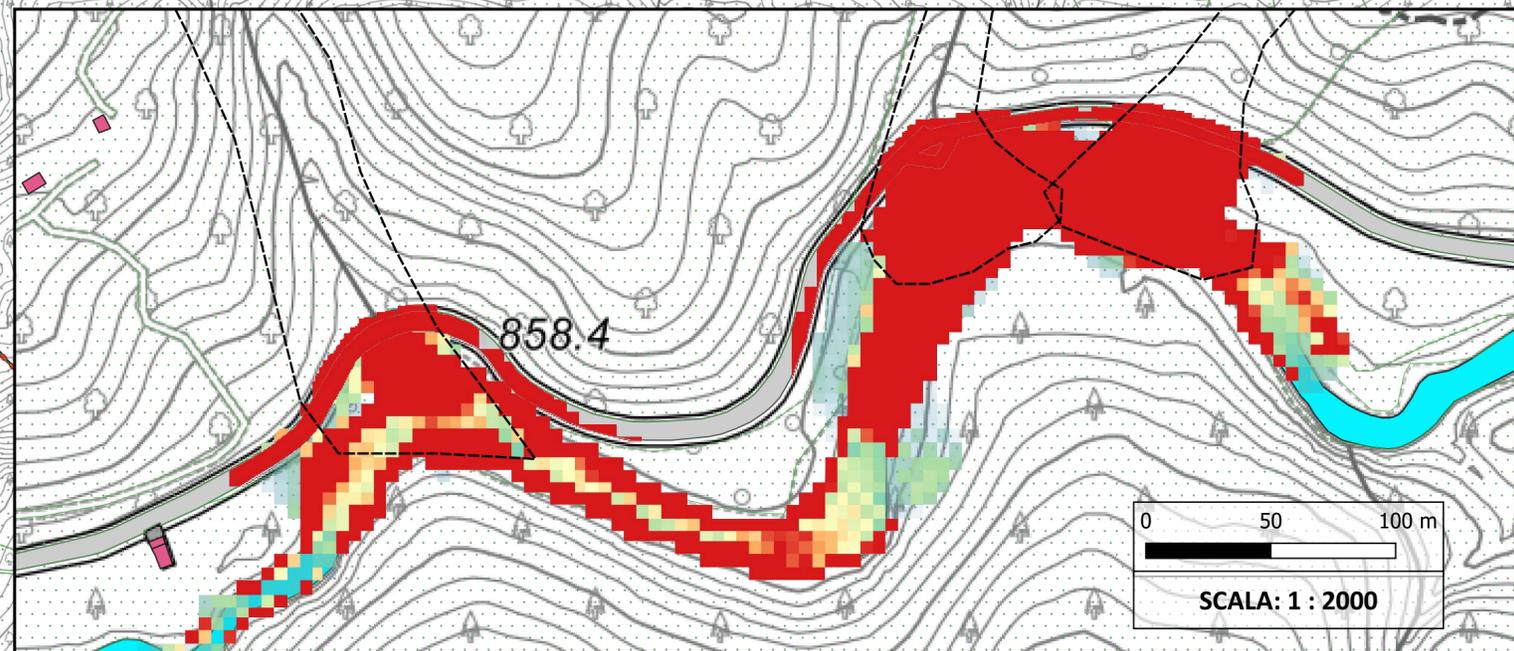
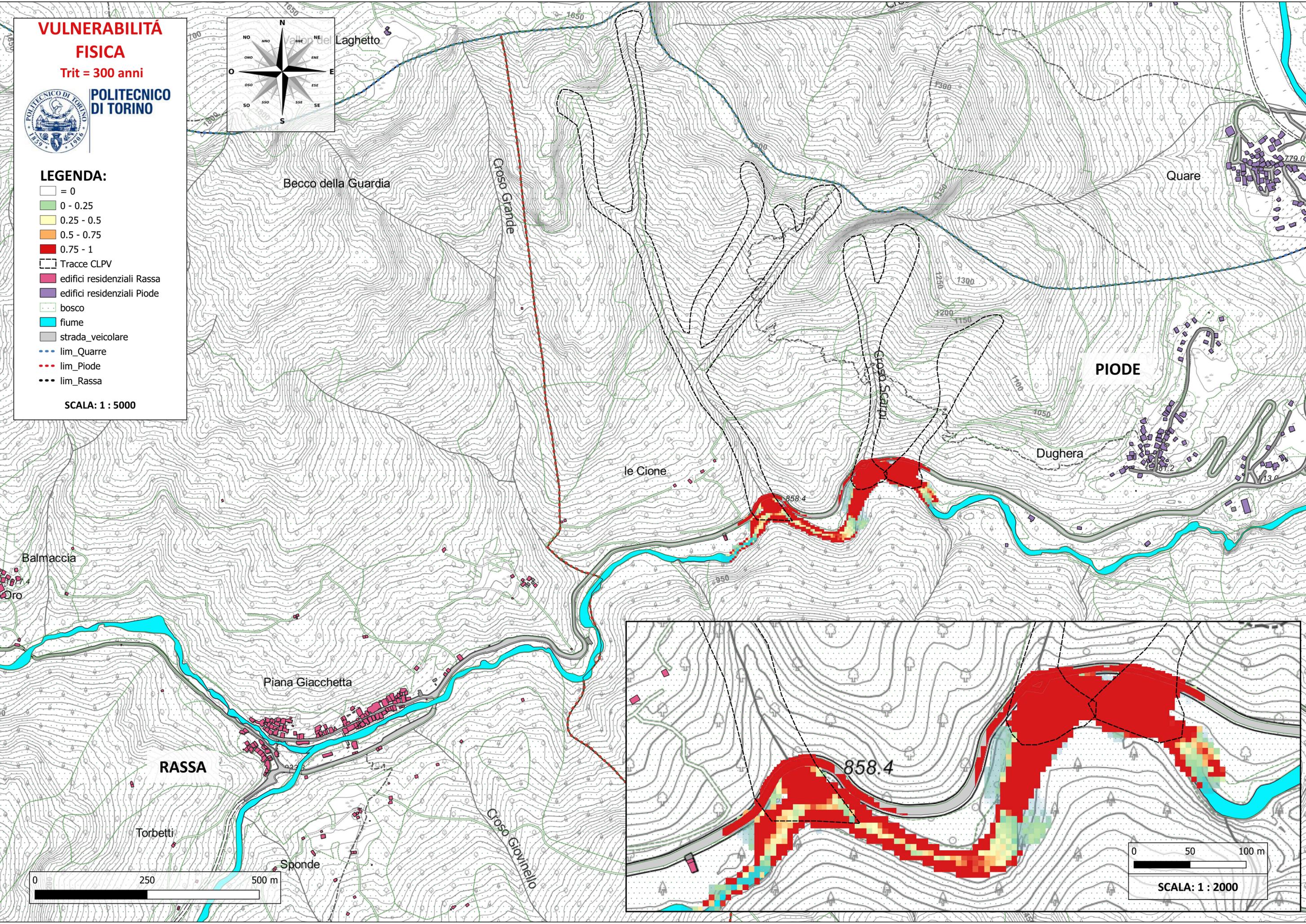
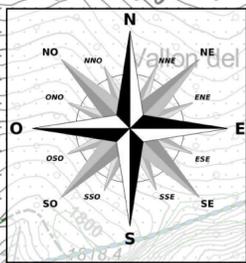


POLITECNICO DI TORINO

LEGENDA:

- = 0
- 0 - 0.25
- 0.25 - 0.5
- 0.5 - 0.75
- 0.75 - 1
- Tracce CLPV
- edifici residenziali Rassa
- edifici residenziali Piode
- bosco
- fiume
- strada_veicolare
- lim_Quarre
- lim_Piode
- lim_Rassa

SCALA: 1 : 5000



VULNERABILITÀ SOCIALE

Trit = 300 anni

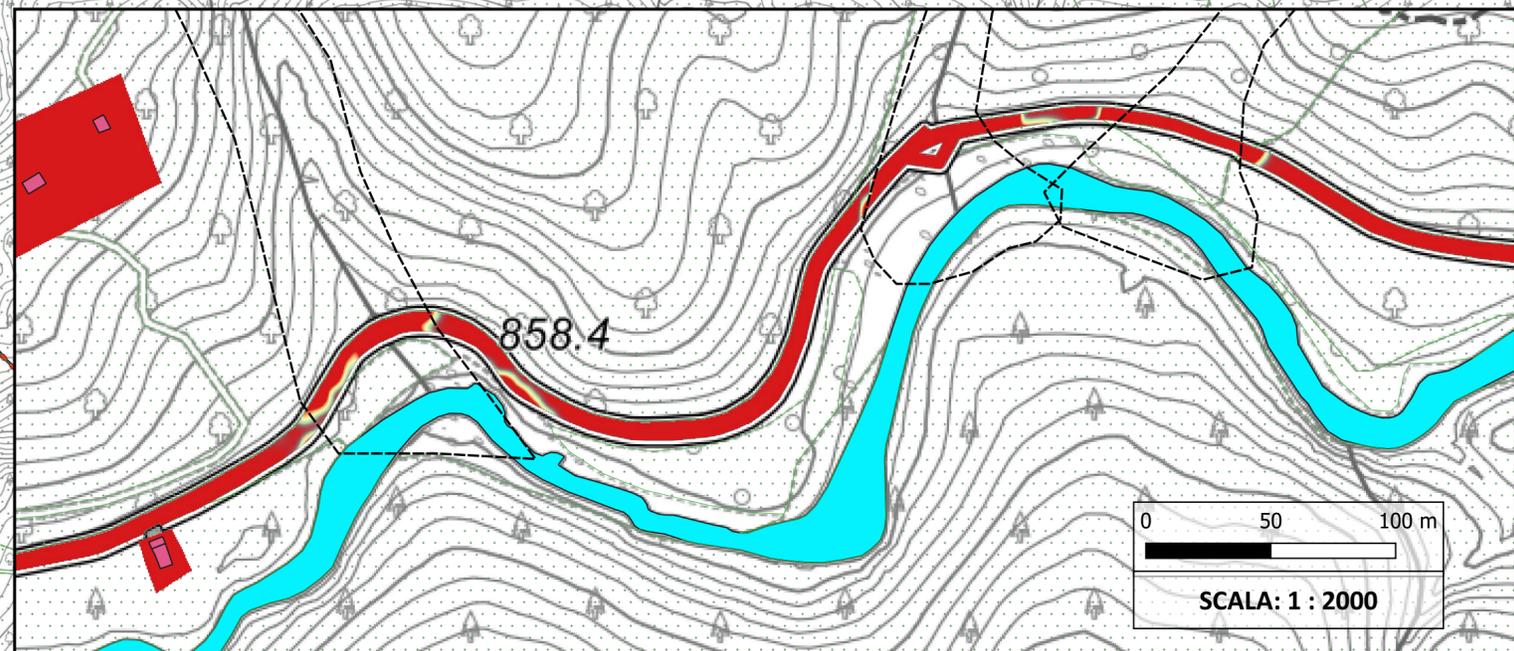
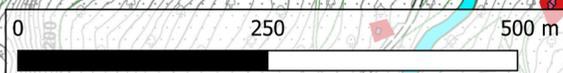
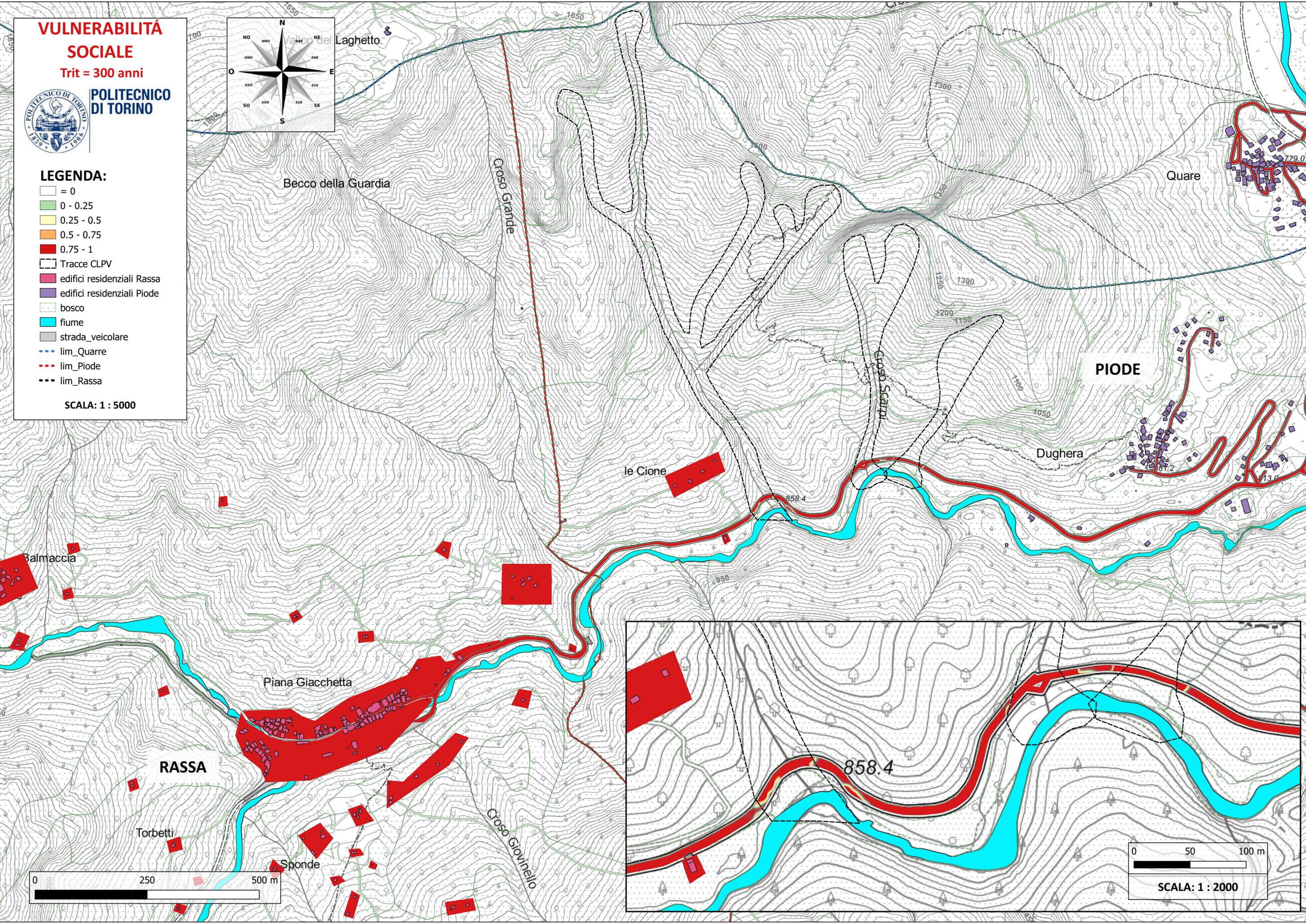
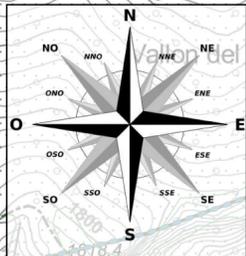


POLITECNICO DI TORINO

LEGENDA:

- = 0
- 0 - 0.25
- 0.25 - 0.5
- 0.5 - 0.75
- 0.75 - 1
- Tracce CLPV
- edifici residenziali Rassa
- edifici residenziali Piode
- bosco
- fiume
- strada_veicolare
- lim_Quarre
- lim_Piode
- lim_Rassa

SCALA: 1 : 5000



0 50 100 m
SCALA: 1 : 2000

DANNO FISICO

Trit = 300 anni

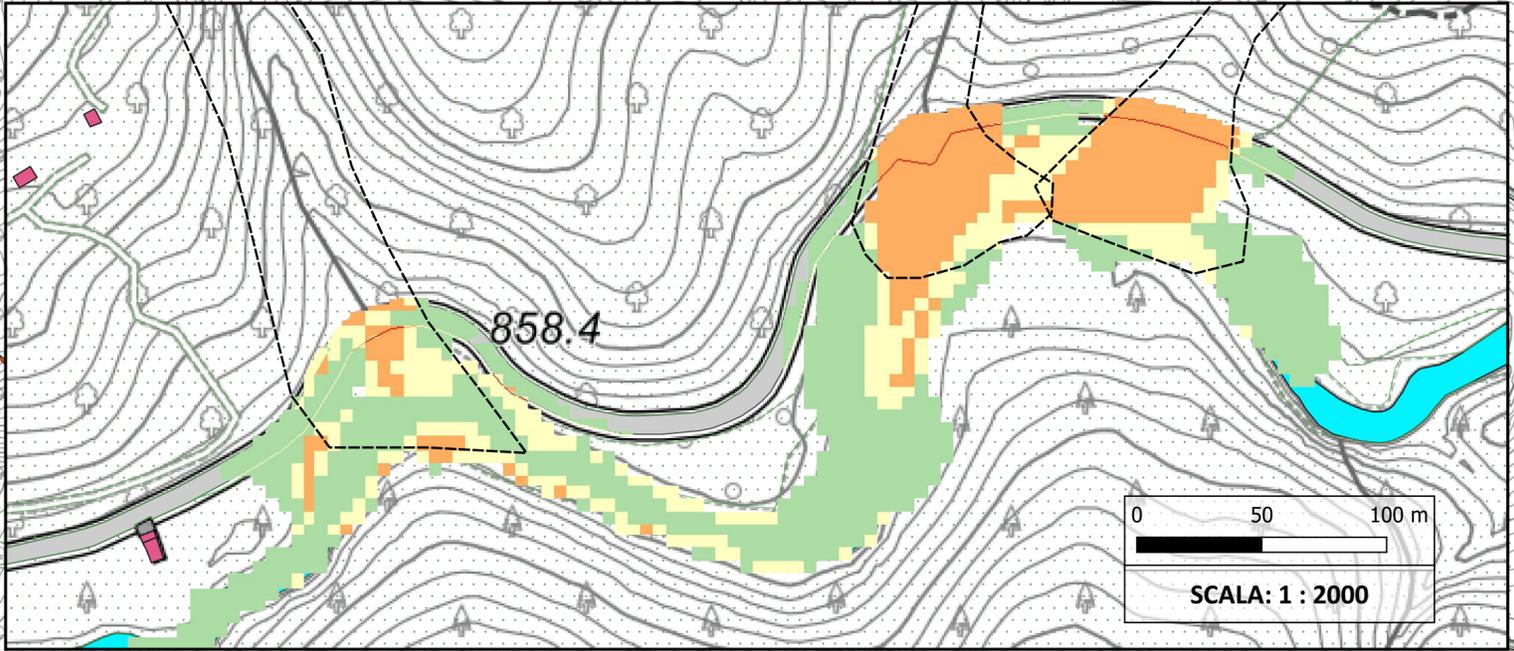
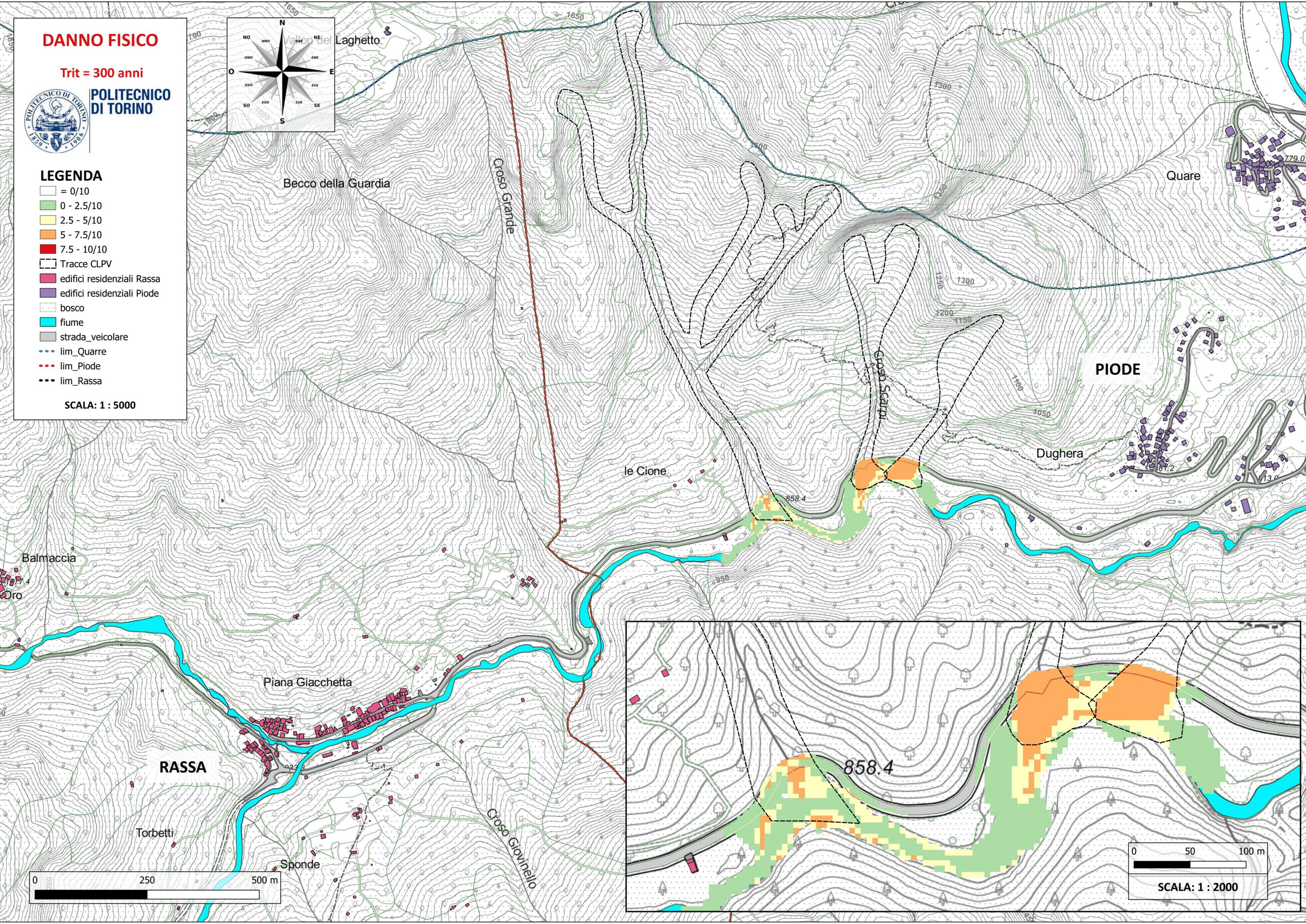
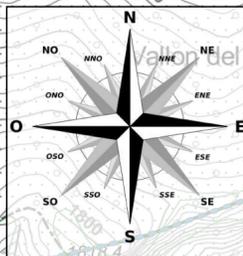


POLITECNICO DI TORINO

LEGENDA

- = 0/10
- 0 - 2.5/10
- 2.5 - 5/10
- 5 - 7.5/10
- 7.5 - 10/10
- Tracce CLPV
- edifici residenziali Rassa
- edifici residenziali Piode
- bosco
- fiume
- strada_veicolare
- lim_Quarre
- lim_Piode
- lim_Rassa

SCALA: 1 : 5000



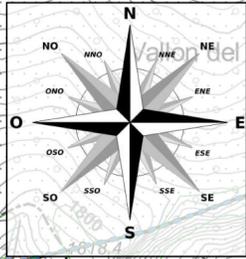
0 50 100 m
SCALA: 1 : 2000

DANNO SOCIALE

Trit = 300 anni



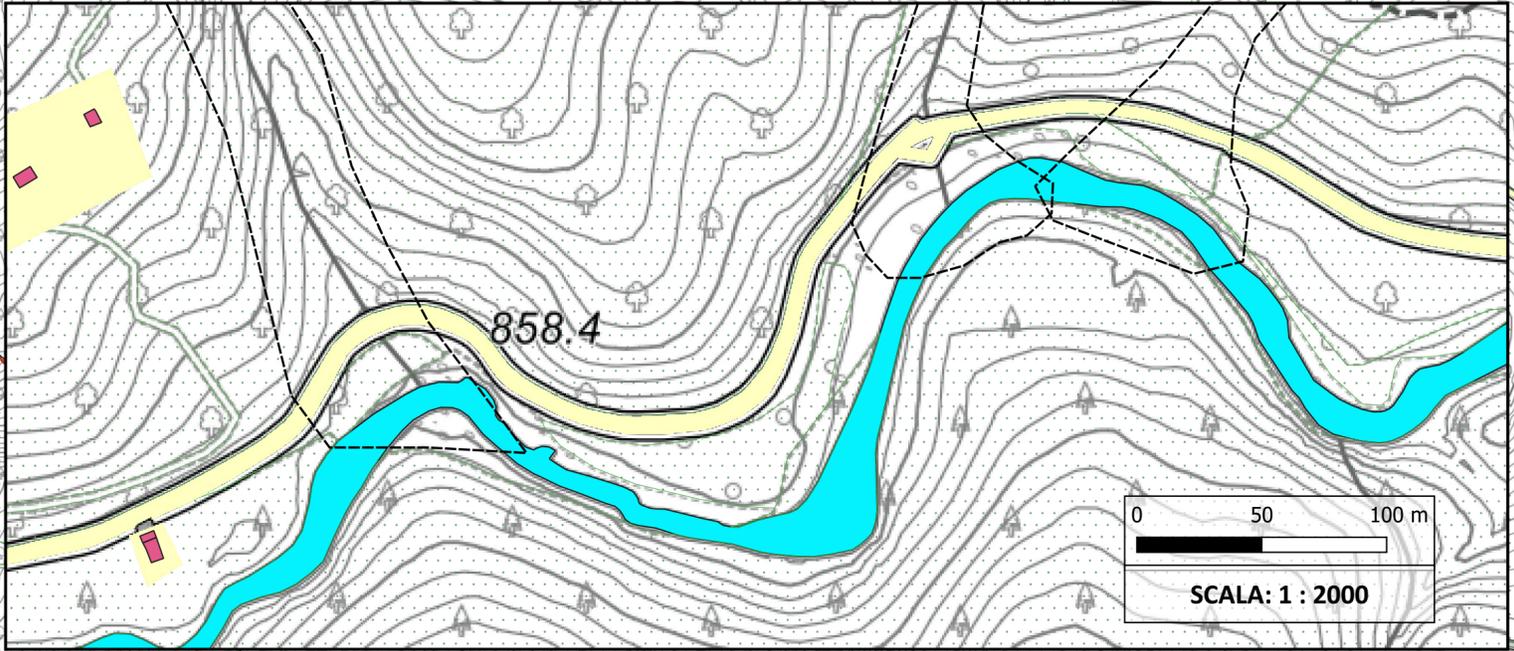
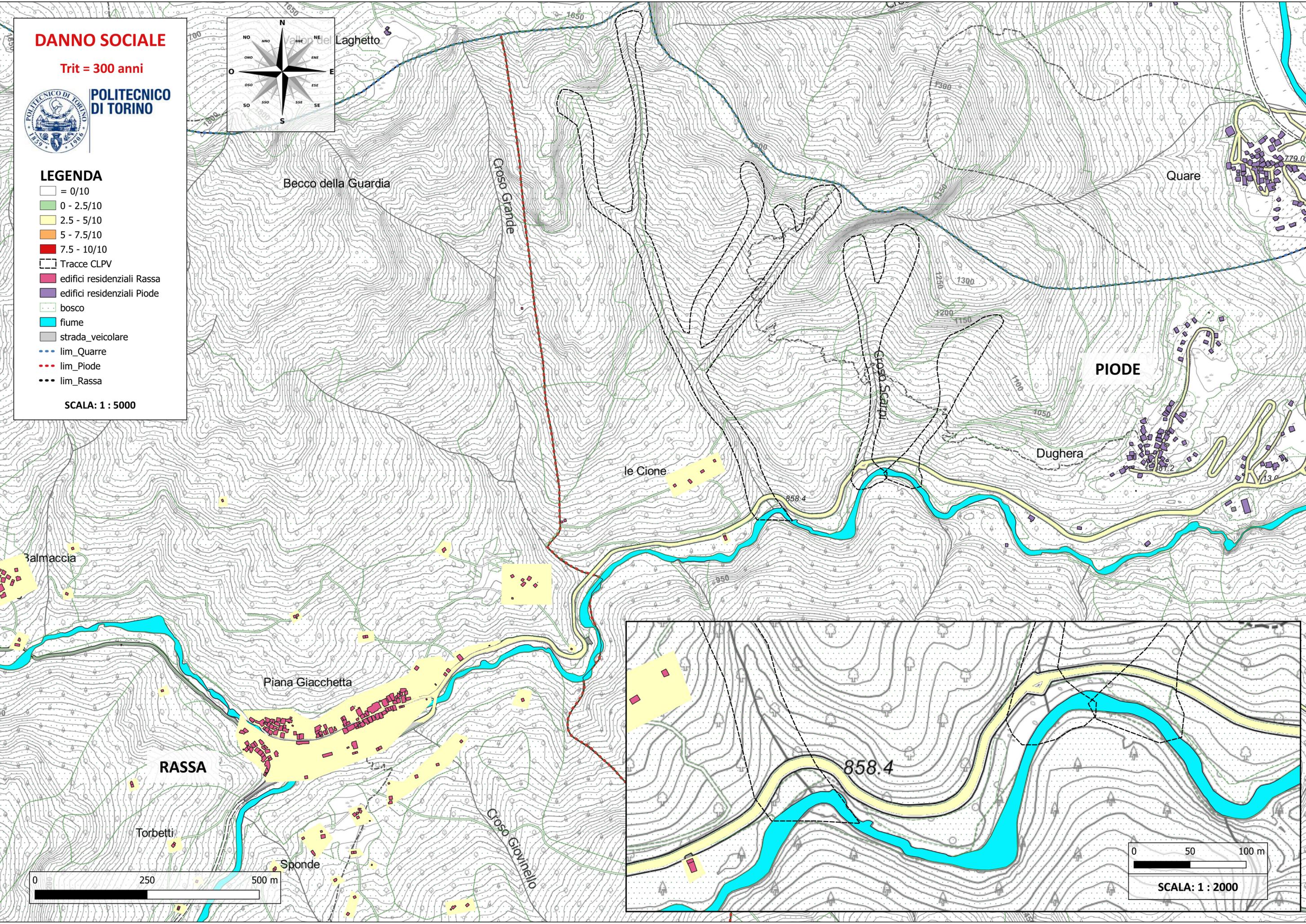
POLITECNICO DI TORINO



LEGENDA

- = 0/10
- 0 - 2.5/10
- 2.5 - 5/10
- 5 - 7.5/10
- 7.5 - 10/10
- Tracce CLPV
- edifici residenziali Rassa
- edifici residenziali Piode
- bosco
- fiume
- strada_veicolare
- lim_Quarre
- lim_Piode
- lim_Rassa

SCALA: 1 : 5000



0 50 100 m
SCALA: 1 : 2000

RISCHIO FISICO

Trit = 300 anni

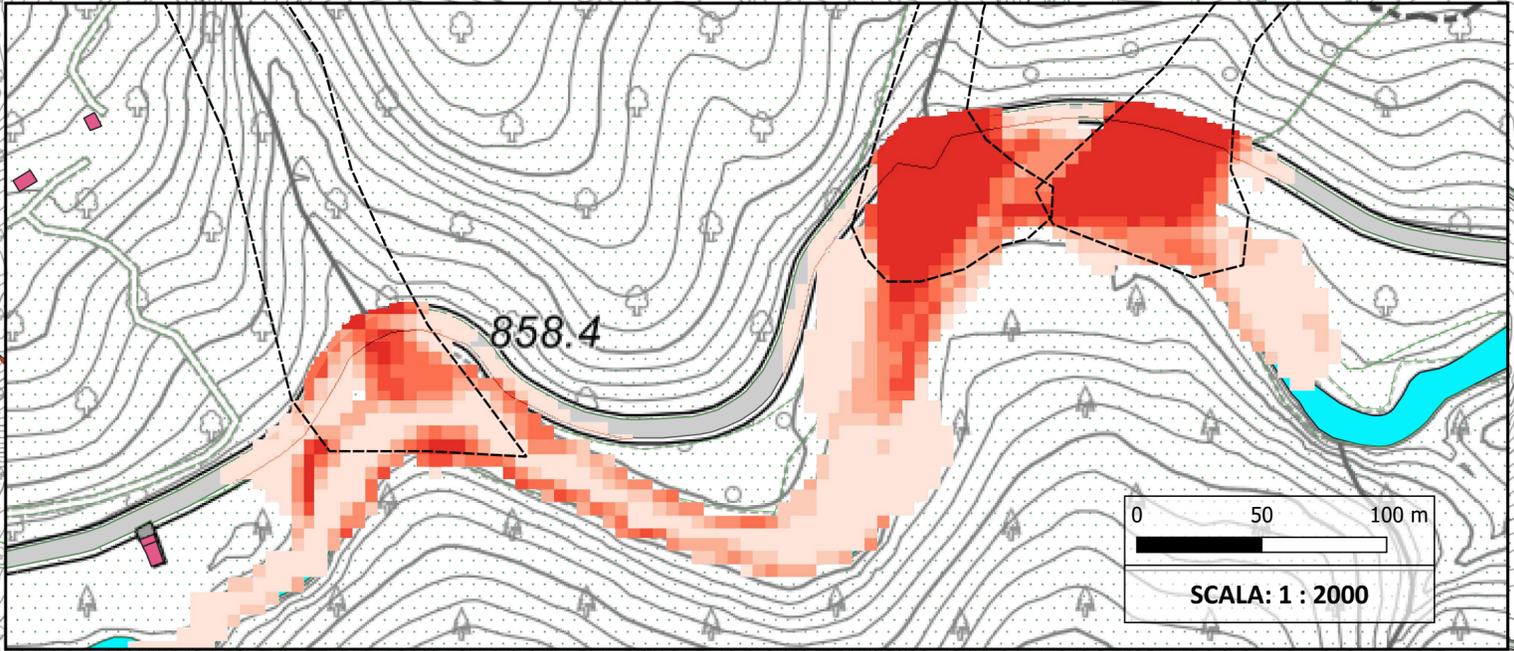
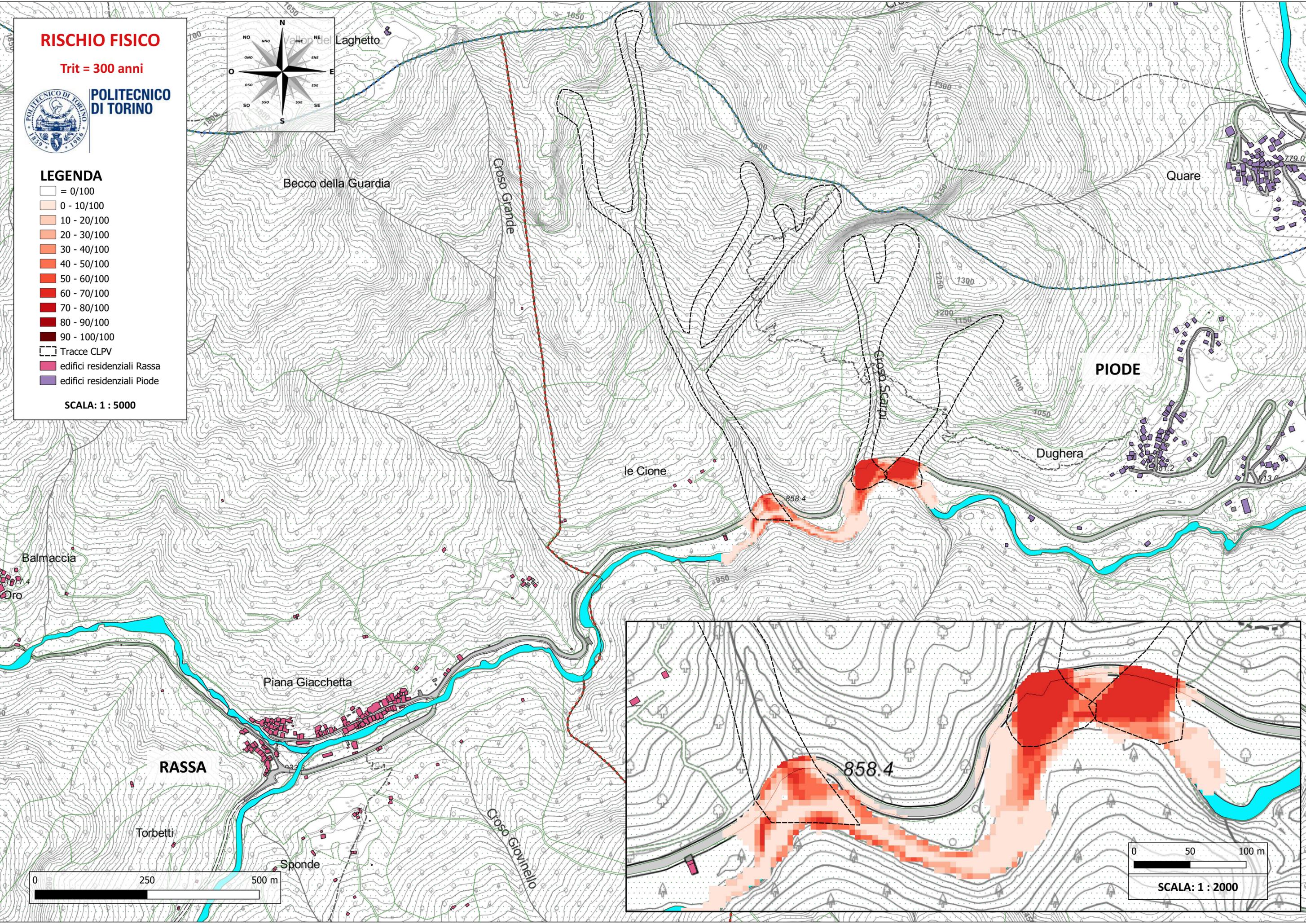
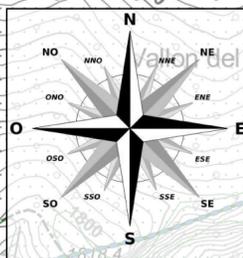


POLITECNICO DI TORINO

LEGENDA

- = 0/100
- 0 - 10/100
- 10 - 20/100
- 20 - 30/100
- 30 - 40/100
- 40 - 50/100
- 50 - 60/100
- 60 - 70/100
- 70 - 80/100
- 80 - 90/100
- 90 - 100/100
- Tracce CLPV
- edifici residenziali Rassa
- edifici residenziali Piode

SCALA: 1 : 5000

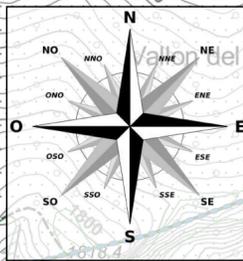


RISCHIO SOCIALE

Trit = 300 anni



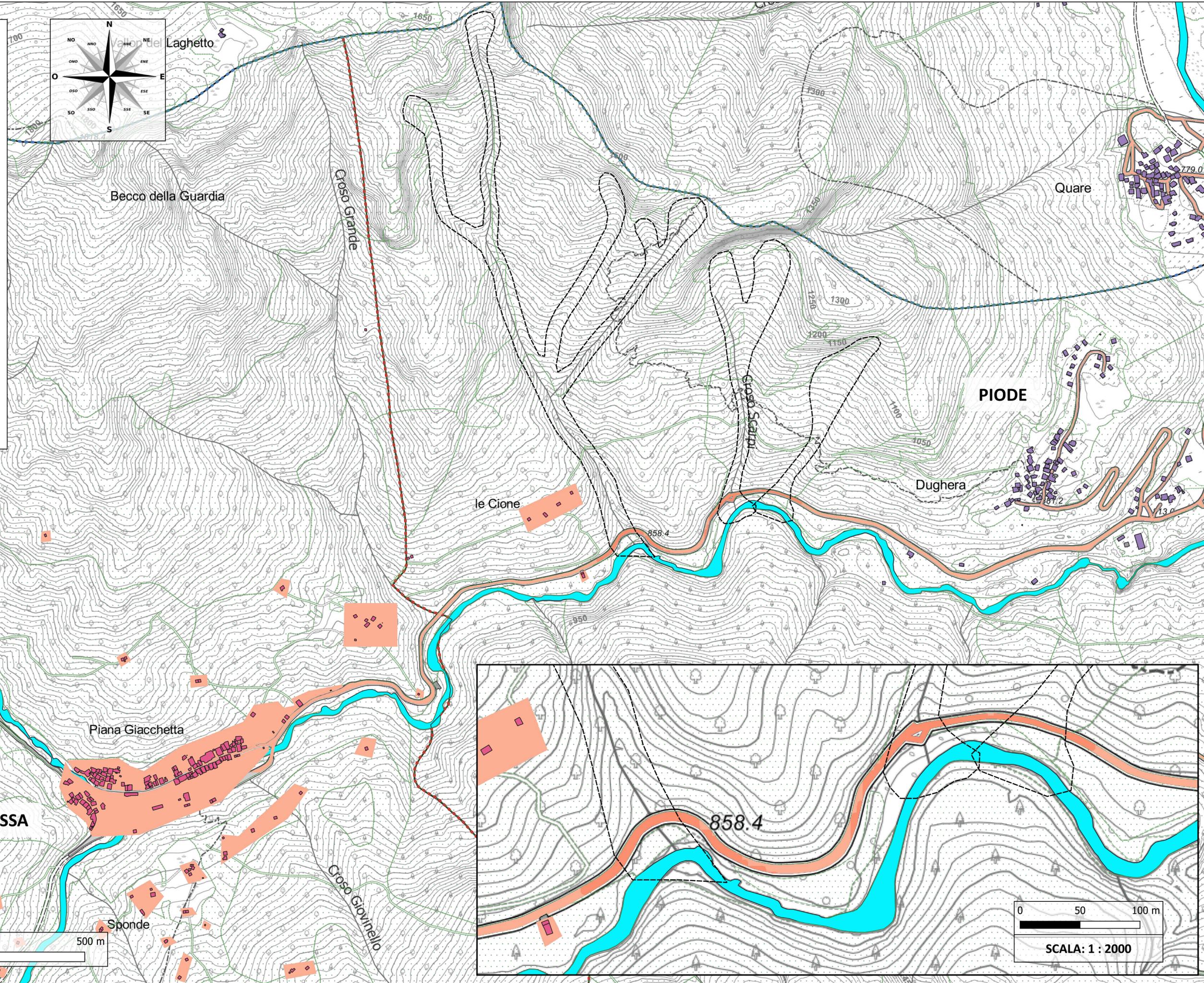
POLITECNICO DI TORINO



LEGENDA

- = 0/100
- 0 - 10/100
- 10 - 20/100
- 20 - 30/100
- 30 - 40/100
- 40 - 50/100
- 50 - 60/100
- 60 - 70/100
- 70 - 80/100
- 80 - 90/100
- 90 - 100/100
- Tracce CLPV
- edifici residenziali Rassa
- edifici residenziali Piode

SCALA: 1 : 5000



RISCHIO TOTALE

Trit = 300 anni

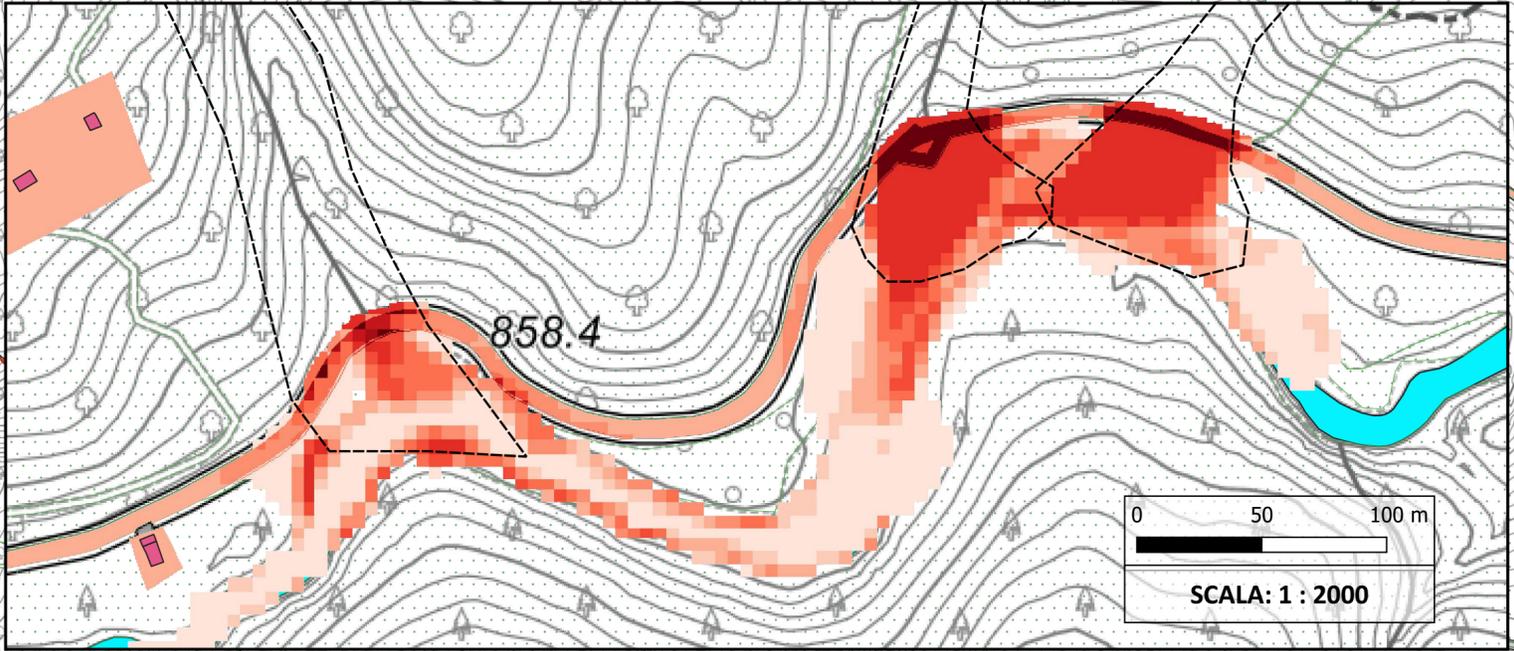
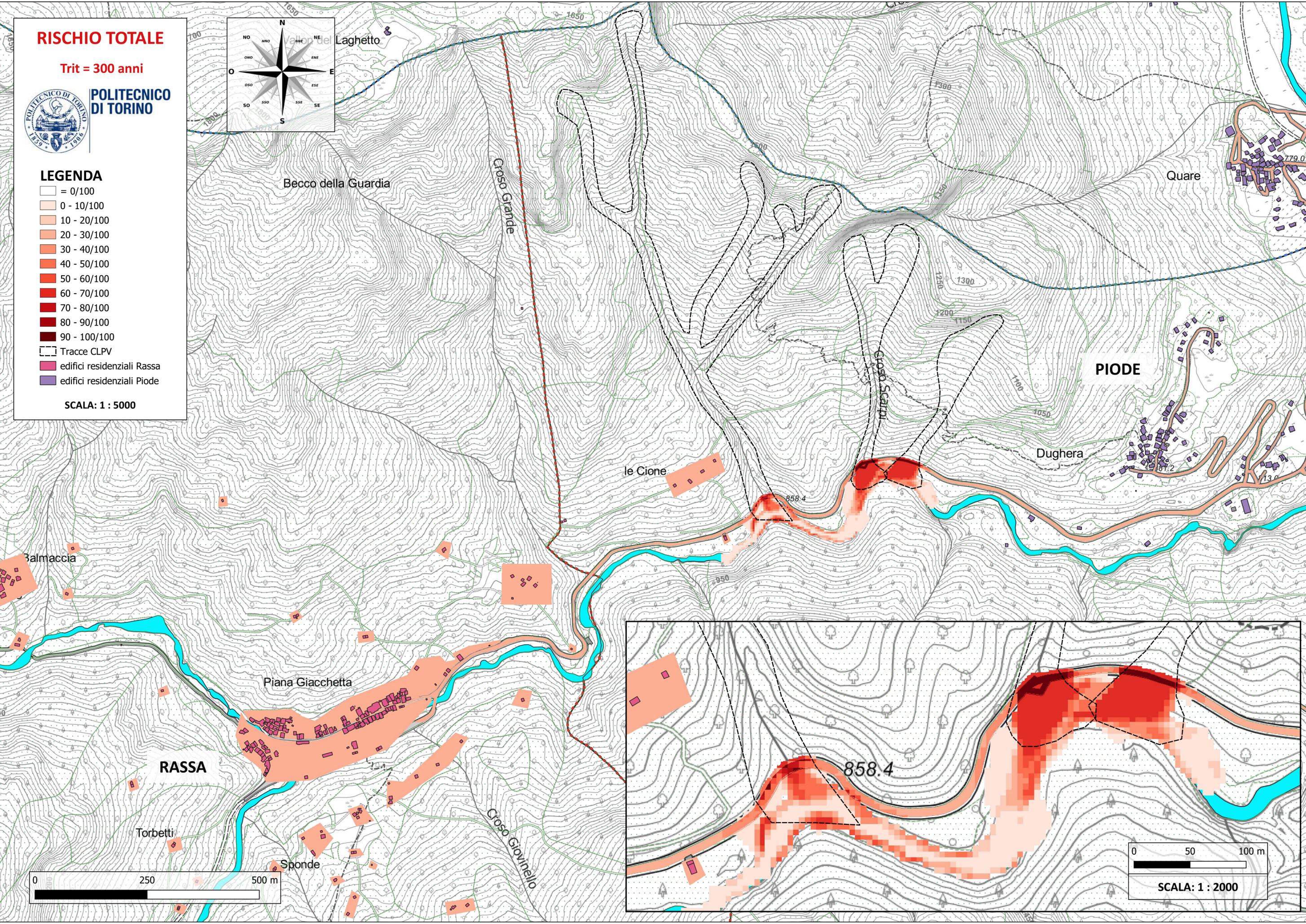
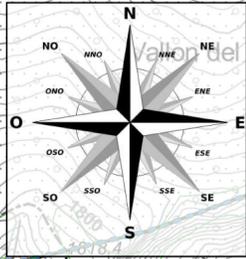


POLITECNICO DI TORINO

LEGENDA

- = 0/100
- 0 - 10/100
- 10 - 20/100
- 20 - 30/100
- 30 - 40/100
- 40 - 50/100
- 50 - 60/100
- 60 - 70/100
- 70 - 80/100
- 80 - 90/100
- 90 - 100/100
- Tracce CLPV
- edifici residenziali Rassa
- edifici residenziali Piode

SCALA: 1 : 5000



0 50 100 m
SCALA: 1 : 2000

VULNERABILITÀ

FISICA

Trit = 100 anni

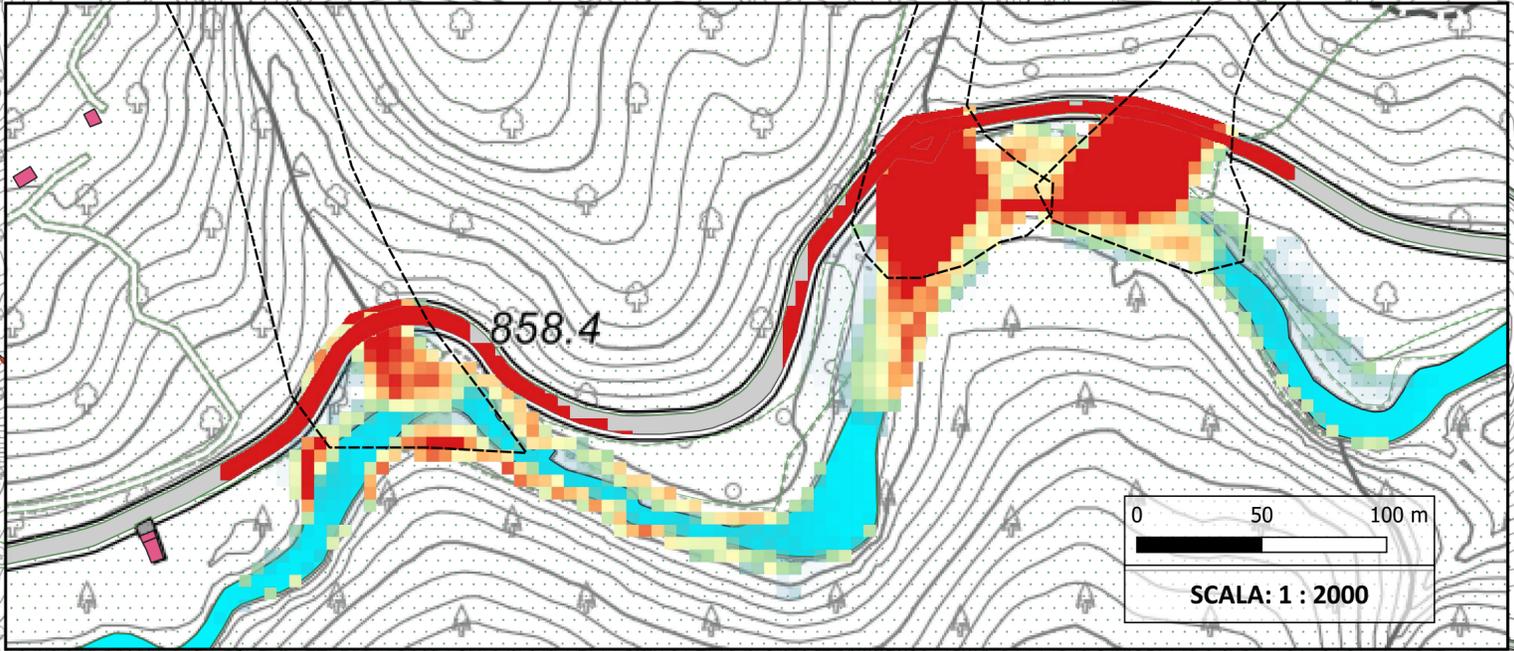
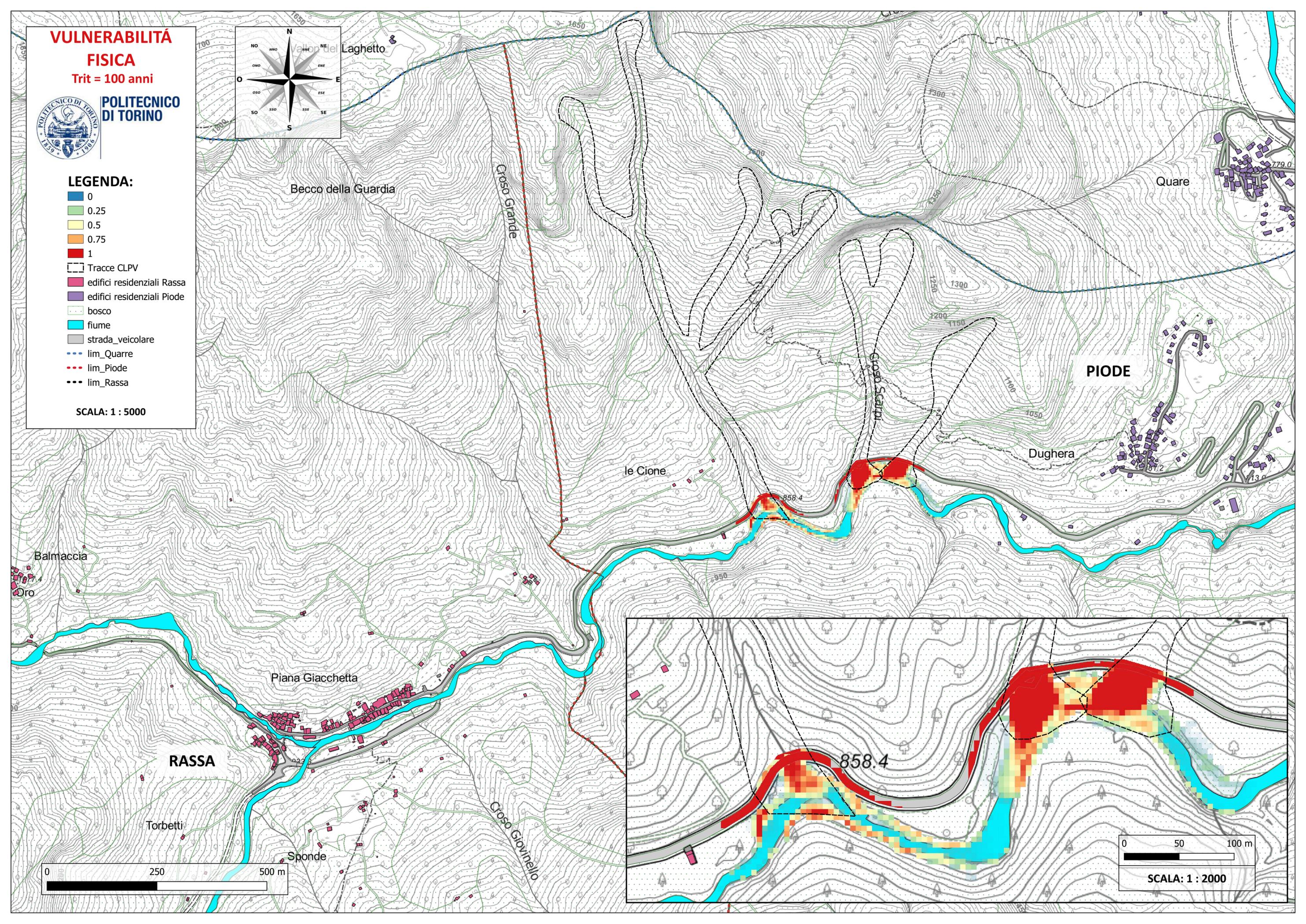
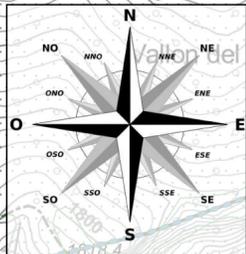


POLITECNICO
DI TORINO

LEGENDA:

- 0
- 0.25
- 0.5
- 0.75
- 1
- Tracce CLPV
- edifici residenziali Rassa
- edifici residenziali Piode
- bosco
- fiume
- strada_veicolare
- lim_Quarre
- lim_Piode
- lim_Rassa

SCALA: 1 : 5000



VULNERABILITÀ

SOCIALE

Trit = 100 anni

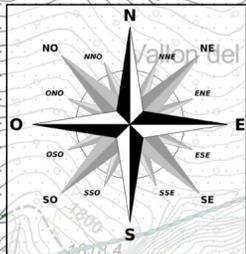


POLITECNICO
DI TORINO

LEGENDA:

- 0
- 0.25
- 0.5
- 0.75
- 1
- Tracce CLPV
- edifici residenziali Rassa
- edifici residenziali Piode
- bosco
- fiume
- strada_veicolare
- lim_Quarre
- lim_Piode
- lim_Rassa

SCALA: 1 : 5000



Becco della Guardia

Laghetto

Croso Grande

Quare

PIODE

Dughera

le Cione

Balmaccia

Piana Giacchetta

RASSA

Torbetti

Sponde

Croso Giovine

858.4

0 50 100 m

SCALA: 1 : 2000

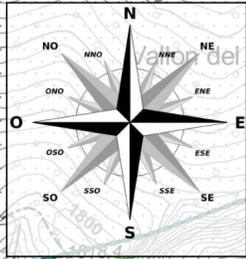
0 250 500 m

DANNO FISICO

Trit = 100 anni



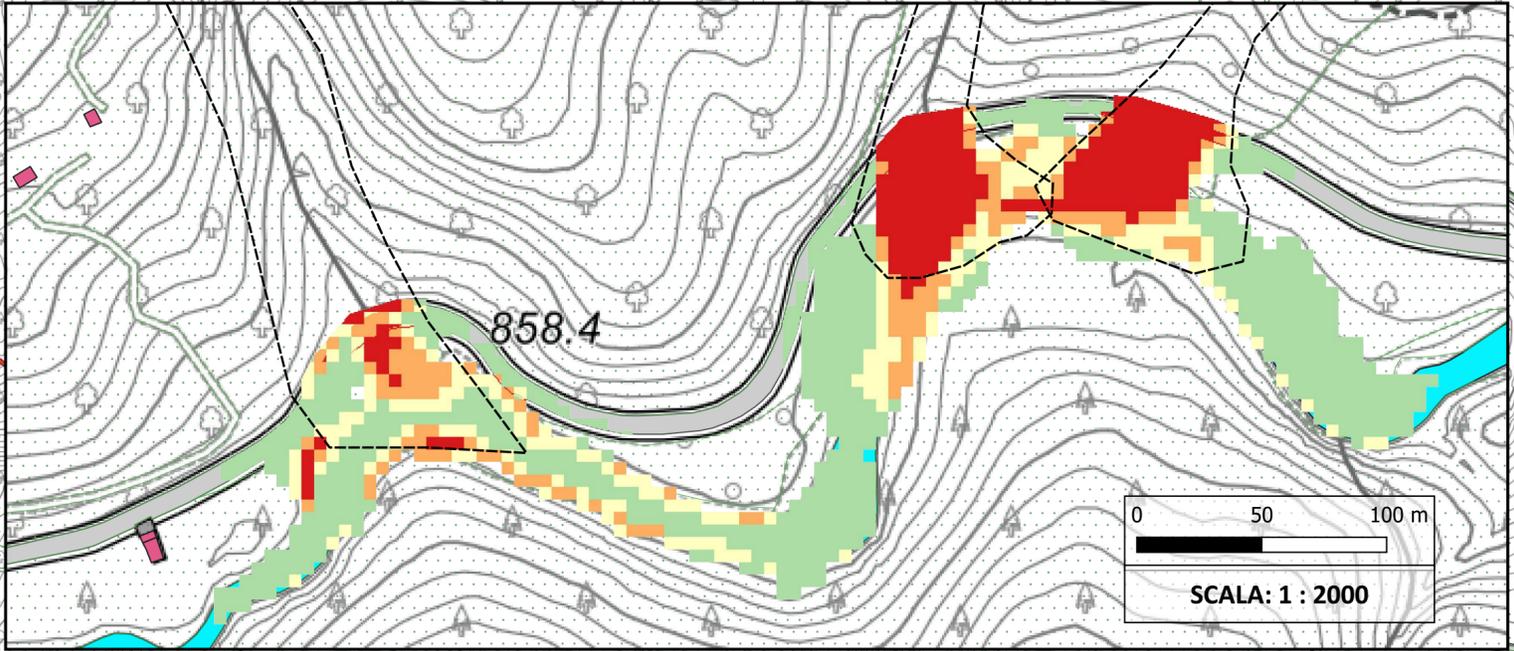
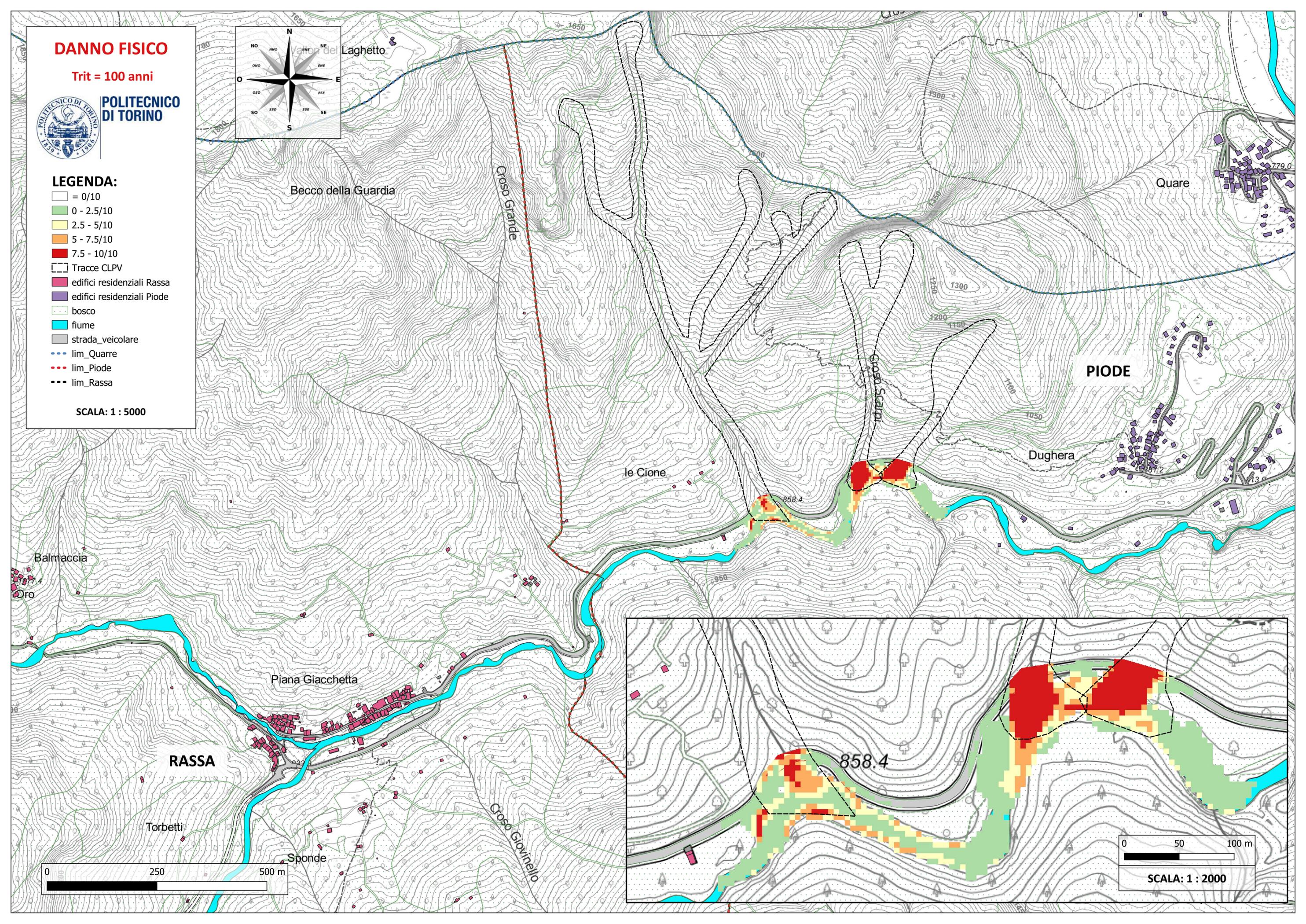
POLITECNICO DI TORINO



LEGENDA:

- = 0/10
- 0 - 2.5/10
- 2.5 - 5/10
- 5 - 7.5/10
- 7.5 - 10/10
- Tracce CLPV
- edifici residenziali Rassa
- edifici residenziali Piode
- bosco
- fiume
- strada_veicolare
- lim_Quarre
- lim_Piode
- lim_Rassa

SCALA: 1 : 5000



0 50 100 m

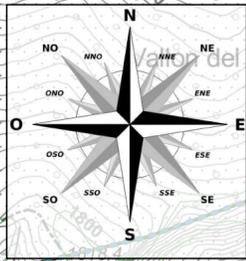
SCALA: 1 : 2000

DANNO SOCIALE

Trit = 100 anni



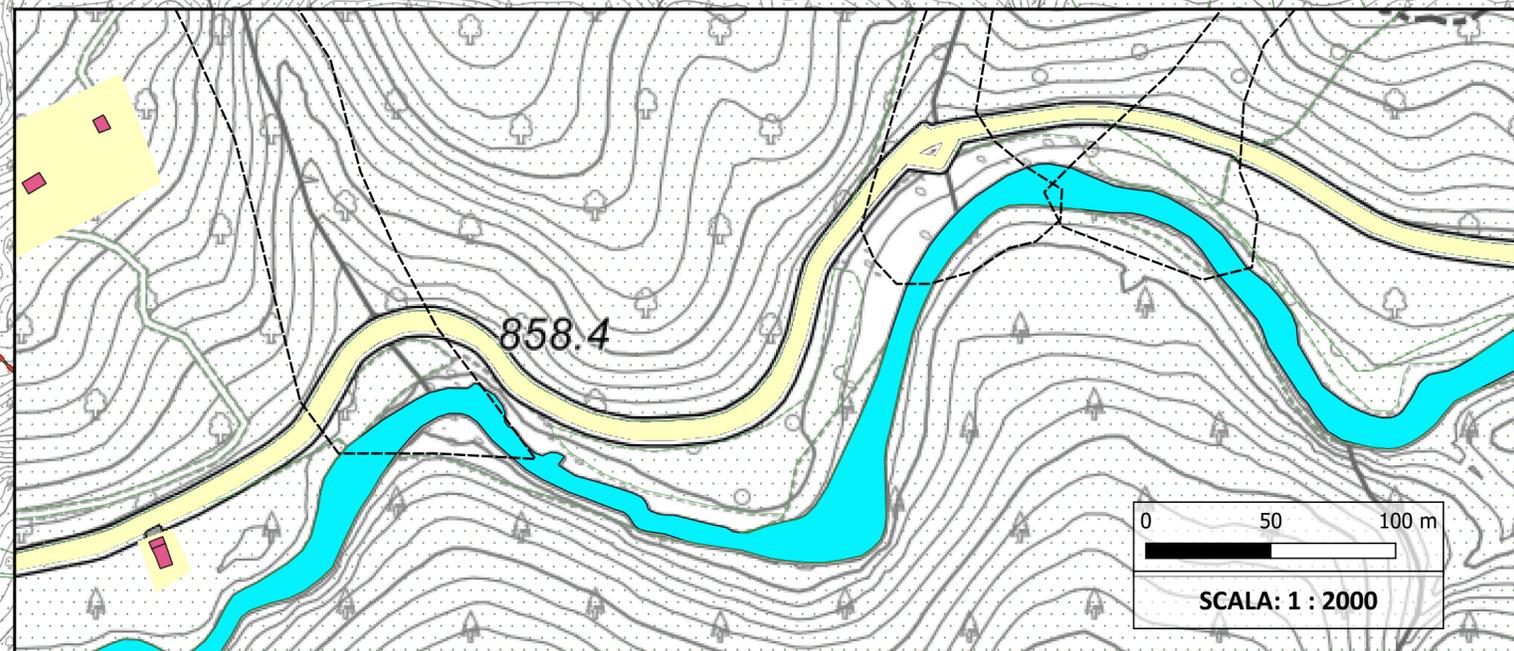
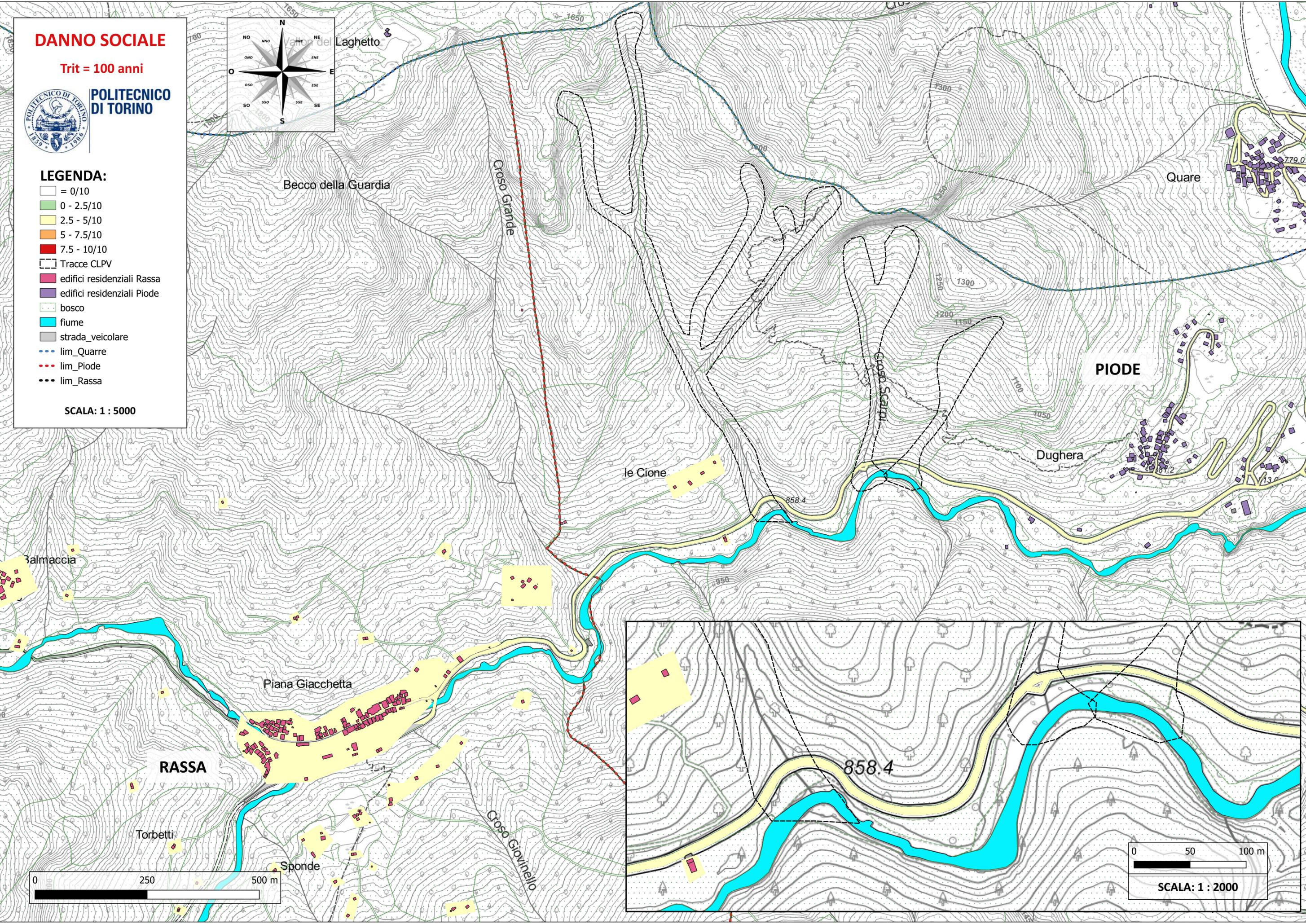
POLITECNICO DI TORINO



LEGENDA:

- = 0/10
- 0 - 2.5/10
- 2.5 - 5/10
- 5 - 7.5/10
- 7.5 - 10/10
- Tracce CLPV
- edifici residenziali Rassa
- edifici residenziali Piode
- bosco
- fiume
- strada_veicolare
- lim_Quarre
- lim_Piode
- lim_Rassa

SCALA: 1 : 5000

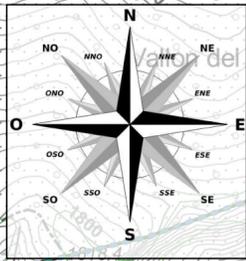


RISCHIO FISICO

Trit = 100 anni



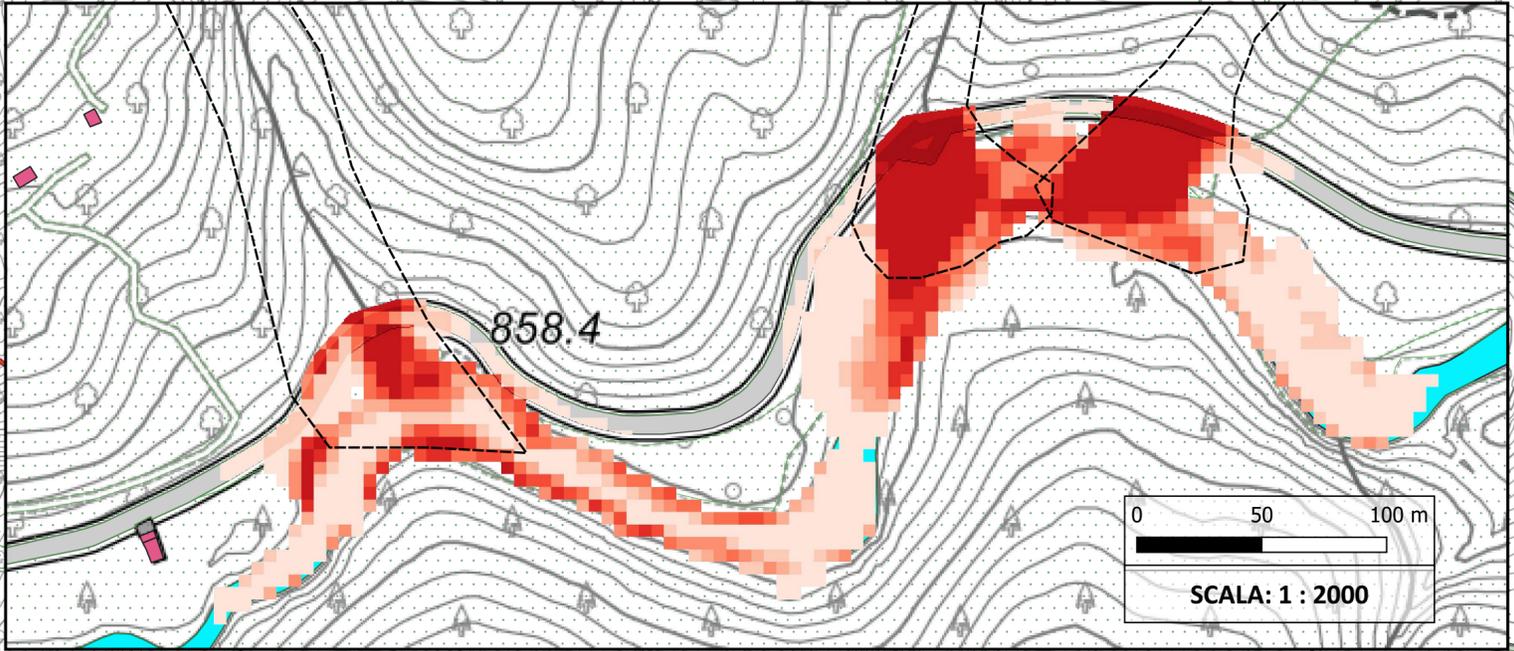
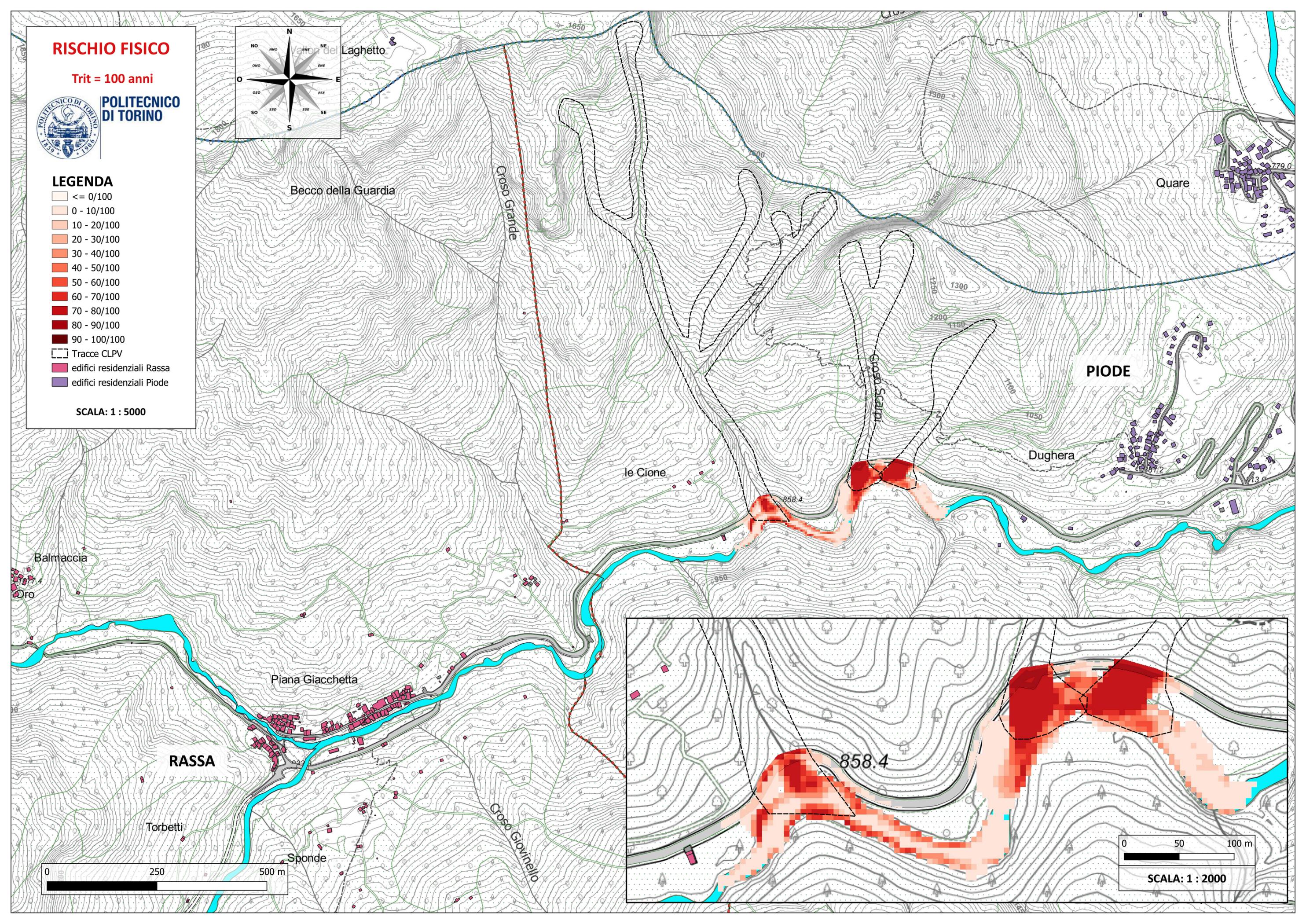
POLITECNICO DI TORINO



LEGENDA

- <= 0/100
- 0 - 10/100
- 10 - 20/100
- 20 - 30/100
- 30 - 40/100
- 40 - 50/100
- 50 - 60/100
- 60 - 70/100
- 70 - 80/100
- 80 - 90/100
- 90 - 100/100
- Tracce CLPV
- edifici residenziali Rassa
- edifici residenziali Piode

SCALA: 1 : 5000



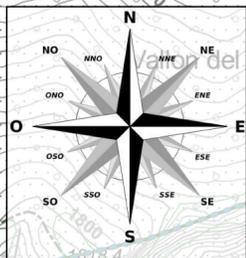
0 50 100 m
SCALA: 1 : 2000

RISCHIO SOCIALE

Trit = 100 anni



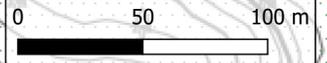
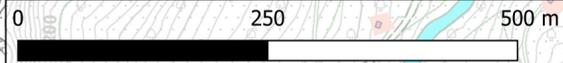
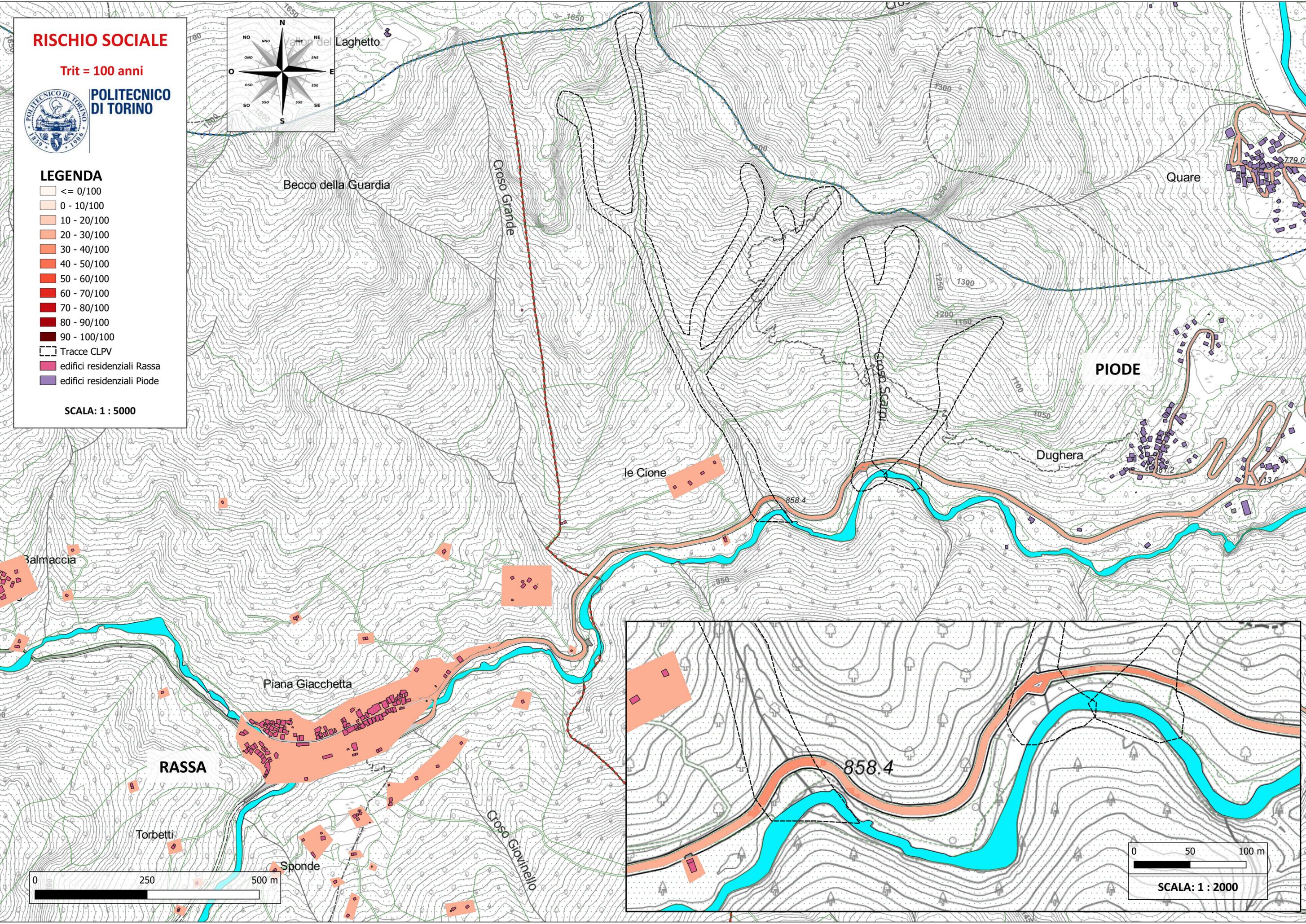
POLITECNICO DI TORINO



LEGENDA

- <= 0/100
- 0 - 10/100
- 10 - 20/100
- 20 - 30/100
- 30 - 40/100
- 40 - 50/100
- 50 - 60/100
- 60 - 70/100
- 70 - 80/100
- 80 - 90/100
- 90 - 100/100
- Tracce CLPV
- edifici residenziali Rassa
- edifici residenziali Piode

SCALA: 1 : 5000



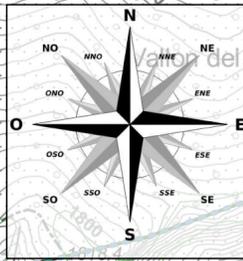
SCALA: 1 : 2000

RISCHIO TOTALE

Trit = 100 anni



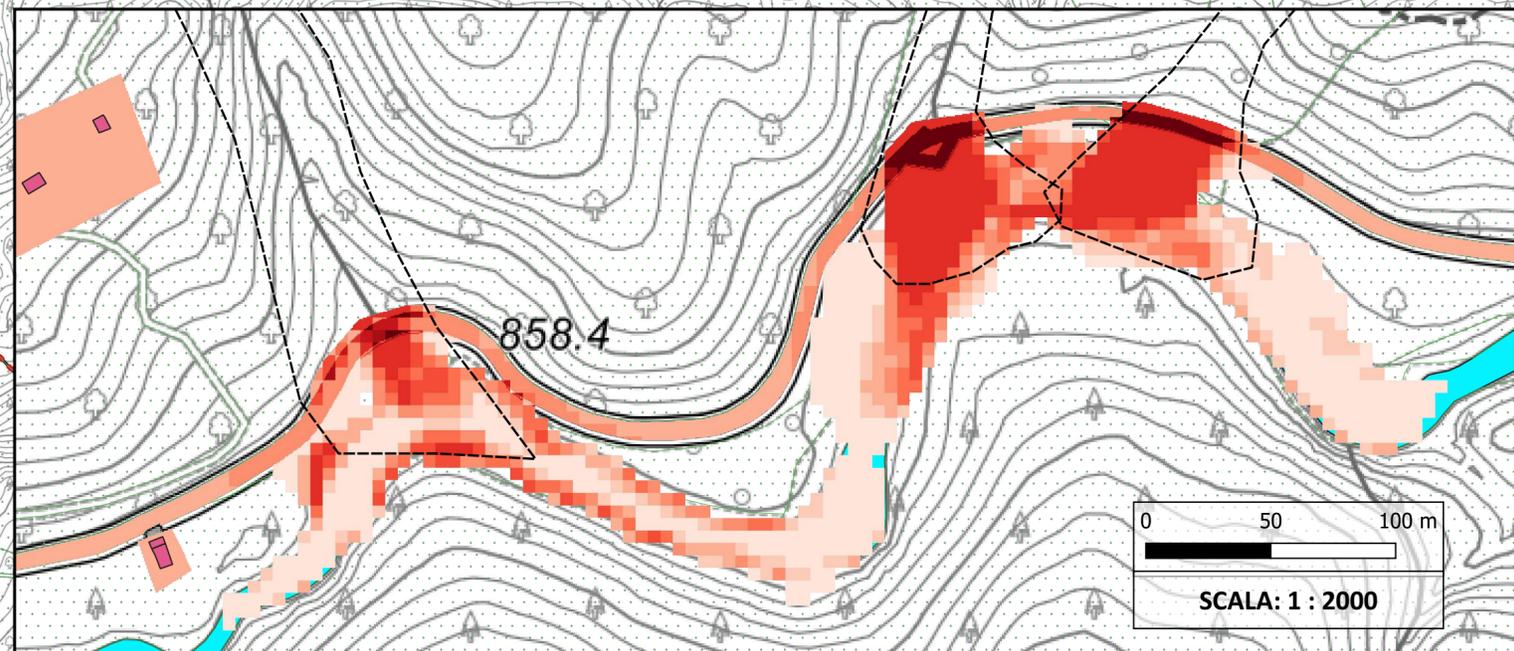
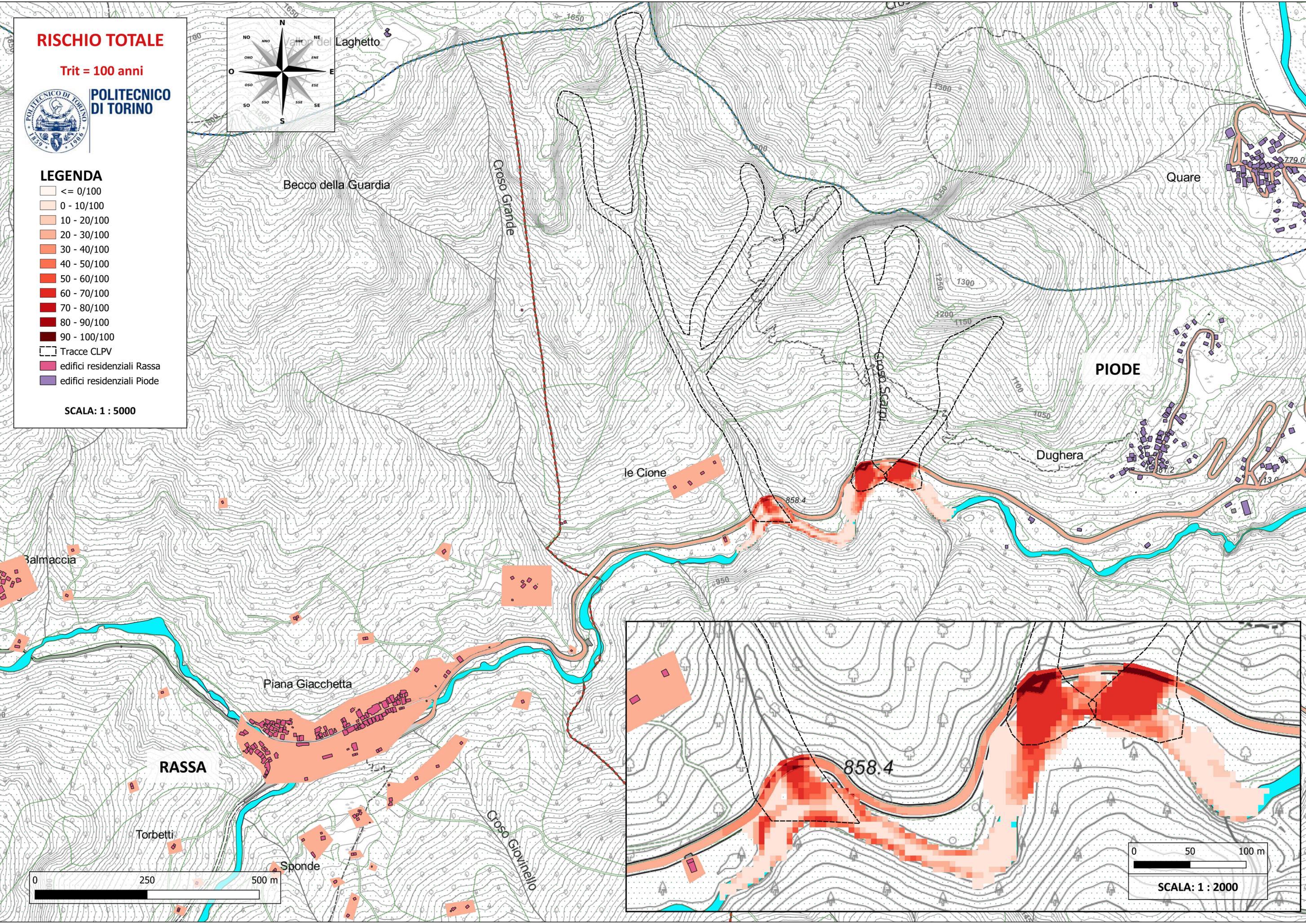
POLITECNICO DI TORINO



LEGENDA

- <= 0/100
- 0 - 10/100
- 10 - 20/100
- 20 - 30/100
- 30 - 40/100
- 40 - 50/100
- 50 - 60/100
- 60 - 70/100
- 70 - 80/100
- 80 - 90/100
- 90 - 100/100
- Tracce CLPV
- edifici residenziali Rassa
- edifici residenziali Piode

SCALA: 1 : 5000



0 50 100 m
SCALA: 1 : 2000

VULNERABILITÀ FISICA

FISICA

Trit = 30 anni

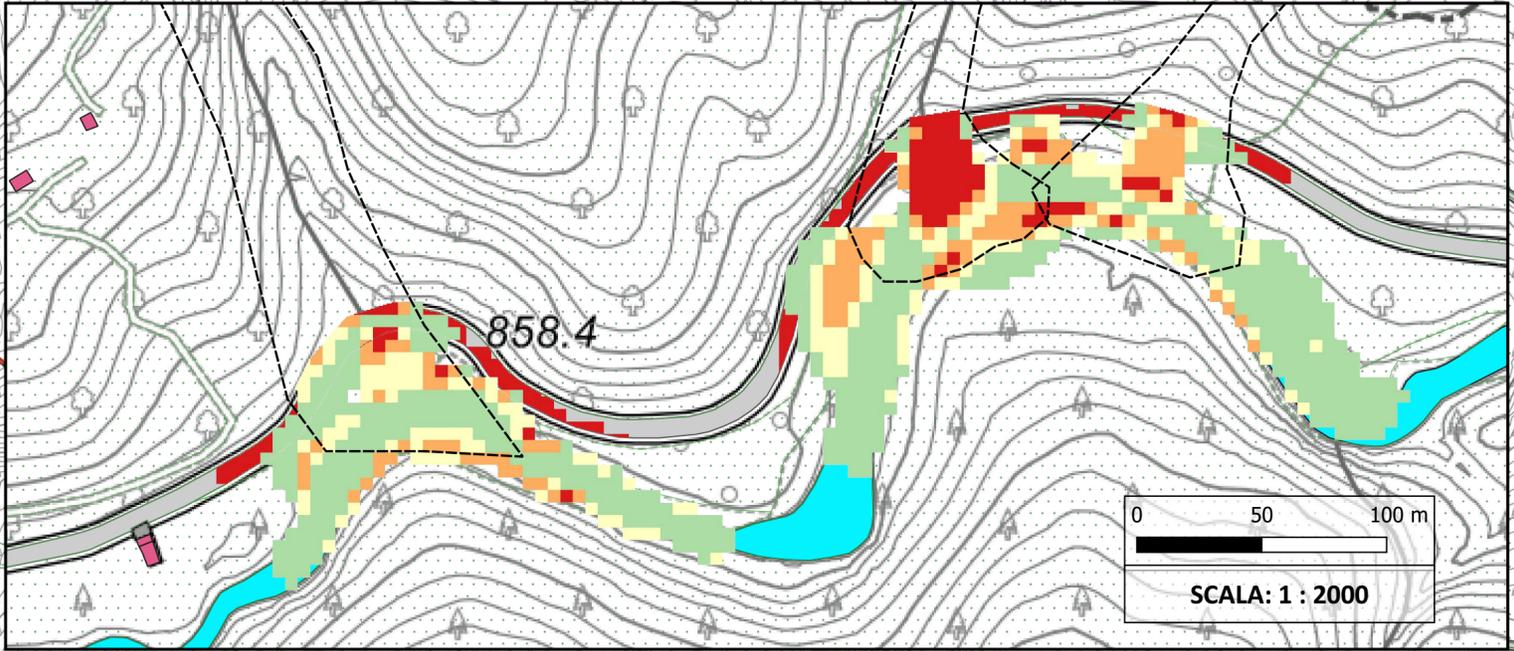
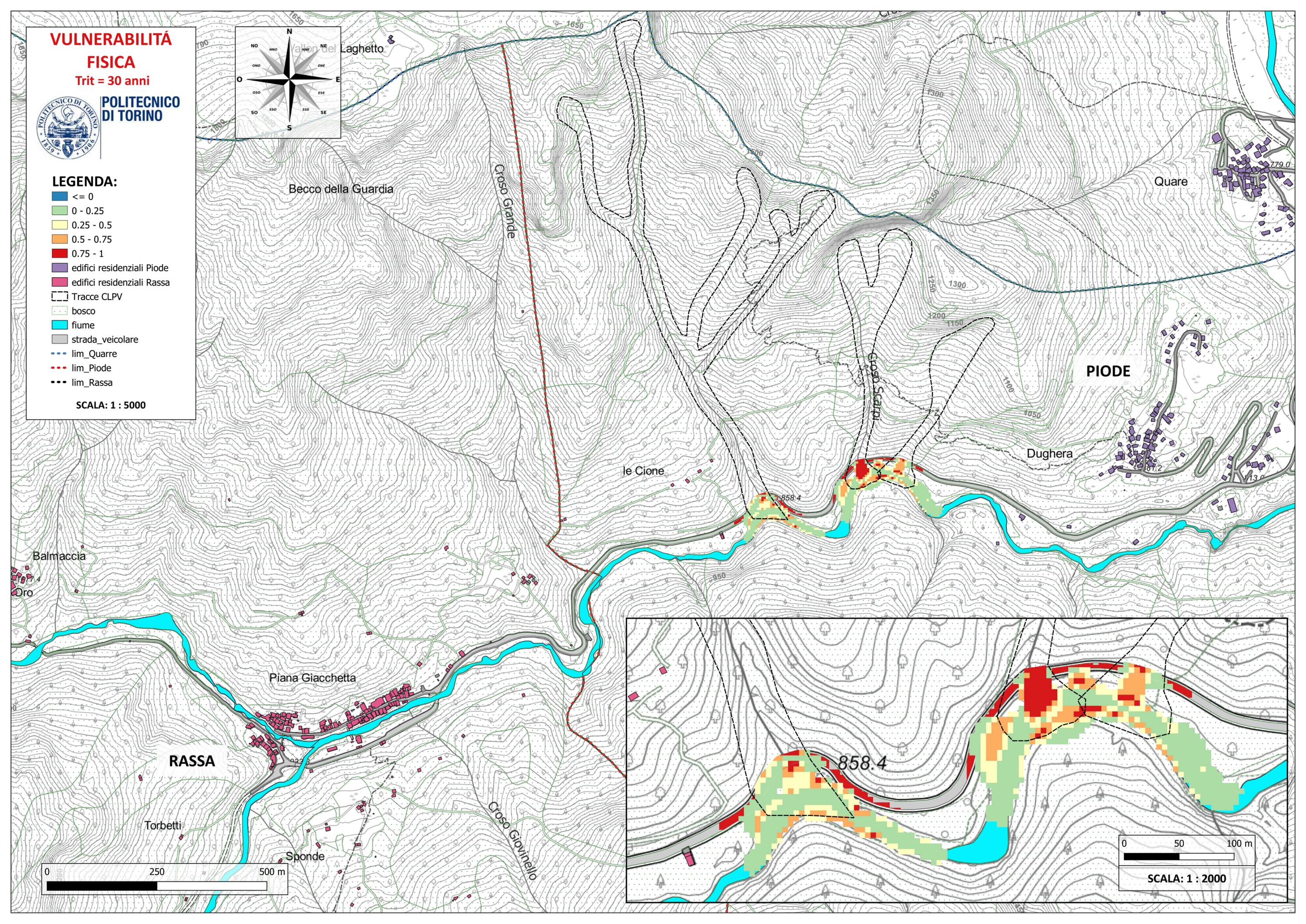
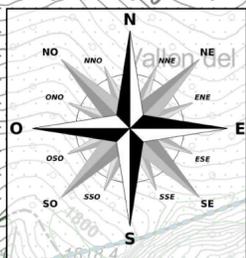


POLITECNICO DI TORINO

LEGENDA:

- <= 0
- 0 - 0.25
- 0.25 - 0.5
- 0.5 - 0.75
- 0.75 - 1
- edifici residenziali Piode
- edifici residenziali Rassa
- Tracce CLPV
- bosco
- fiume
- strada_veicolare
- - - lim_Quarre
- - - lim_Piode
- - - lim_Rassa

SCALA: 1 : 5000



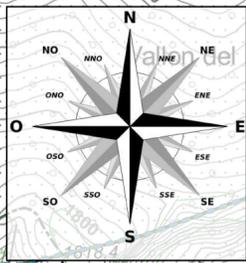
SCALA: 1 : 2000

VULNERABILITÀ SOCIALE

Trit = 30 anni



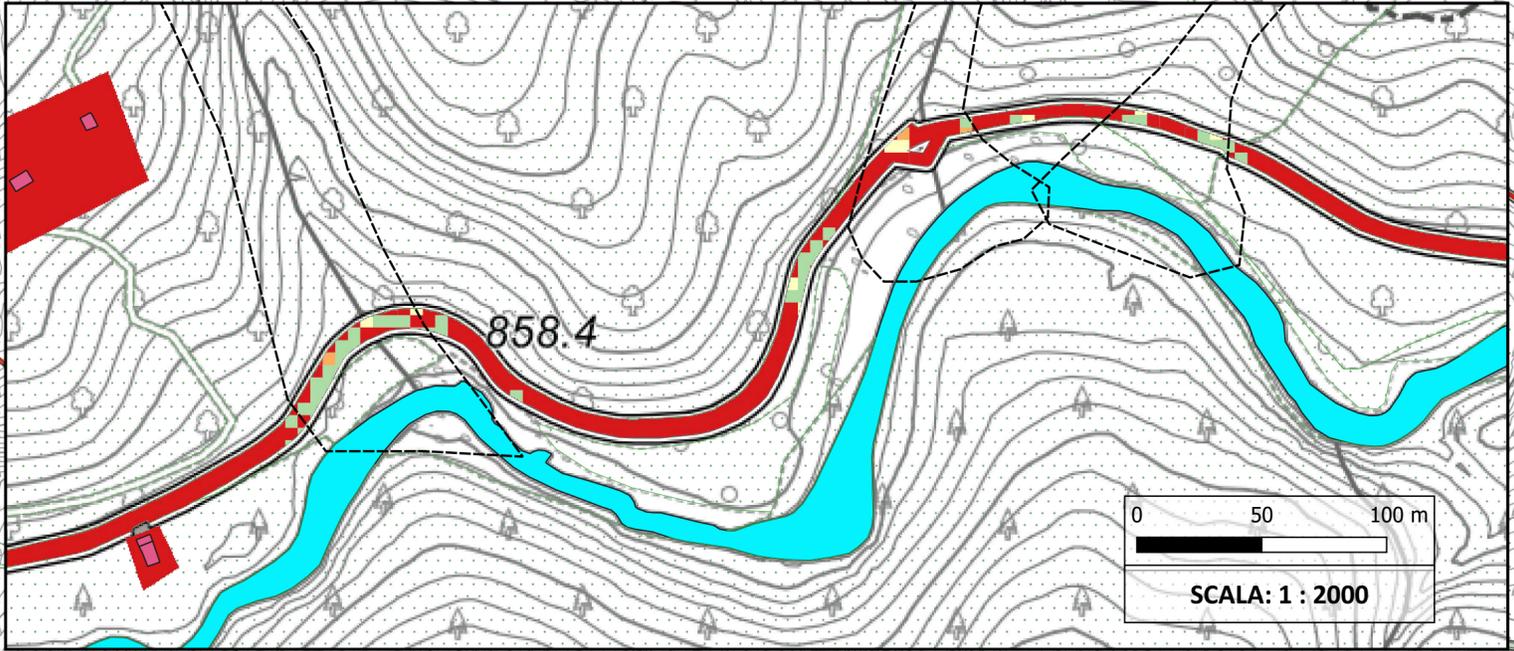
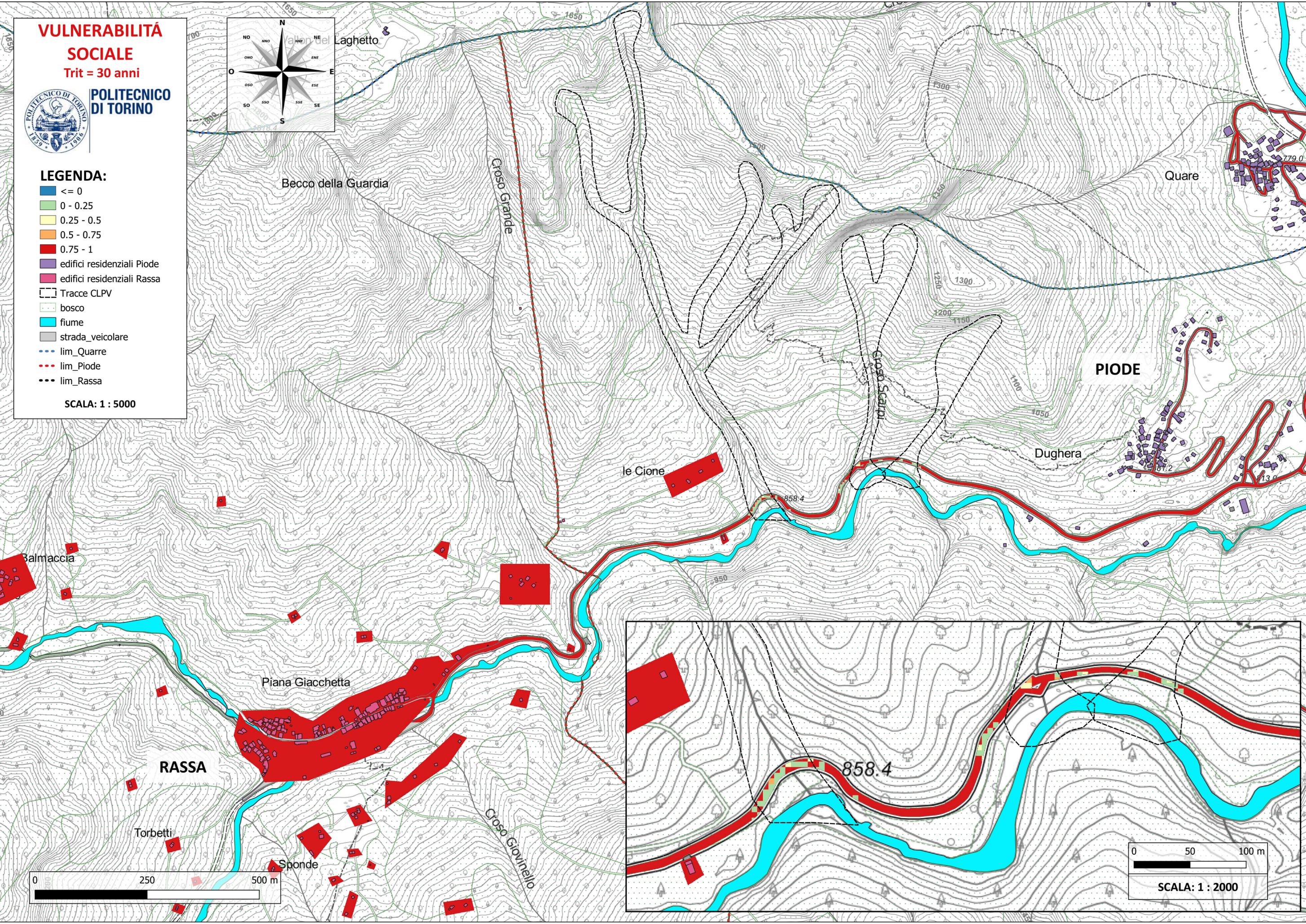
POLITECNICO DI TORINO



LEGENDA:

- <= 0
- 0 - 0.25
- 0.25 - 0.5
- 0.5 - 0.75
- 0.75 - 1
- edifici residenziali Piode
- edifici residenziali Rassa
- Tracce CLPV
- bosco
- fiume
- strada_veicolare
- - - lim_Quarre
- - - lim_Piode
- - - lim_Rassa

SCALA: 1 : 5000



0 50 100 m
SCALA: 1 : 2000

DANNO FISICO

Trit = 30 anni

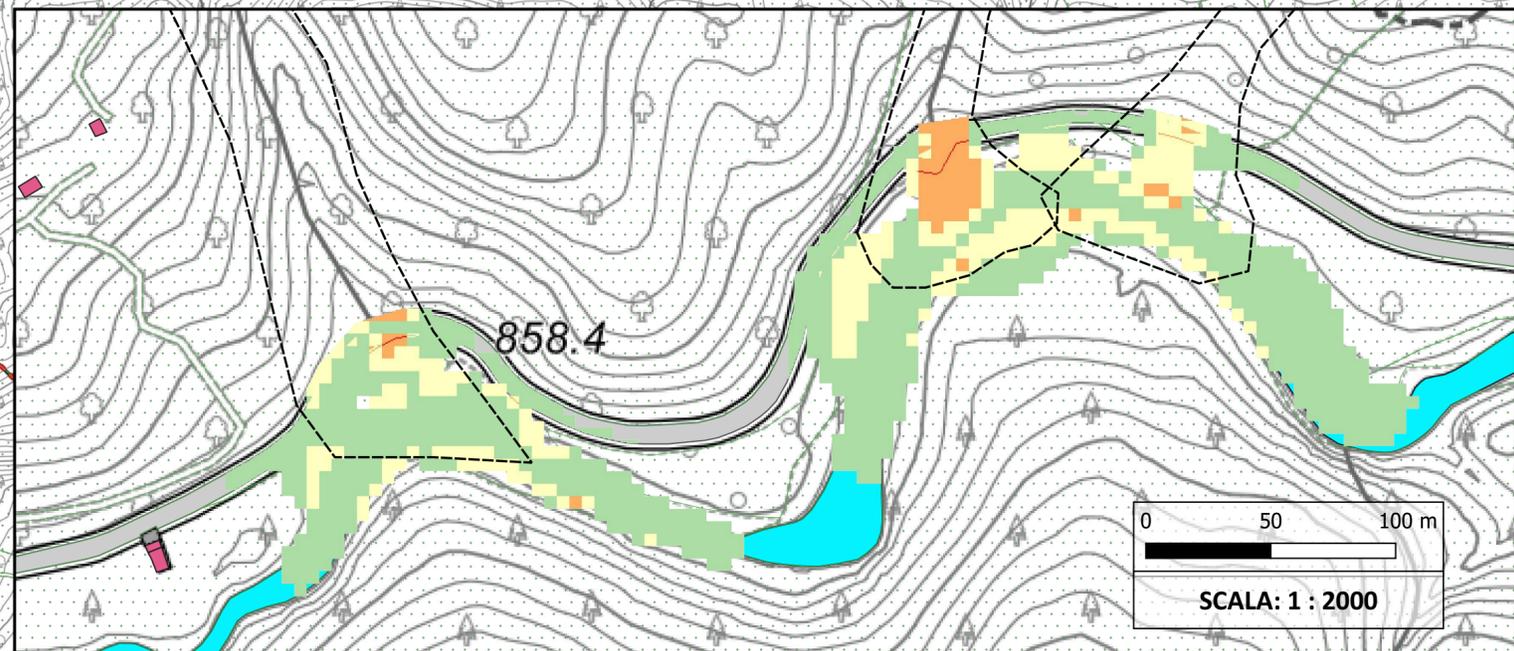
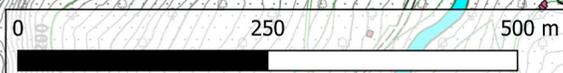
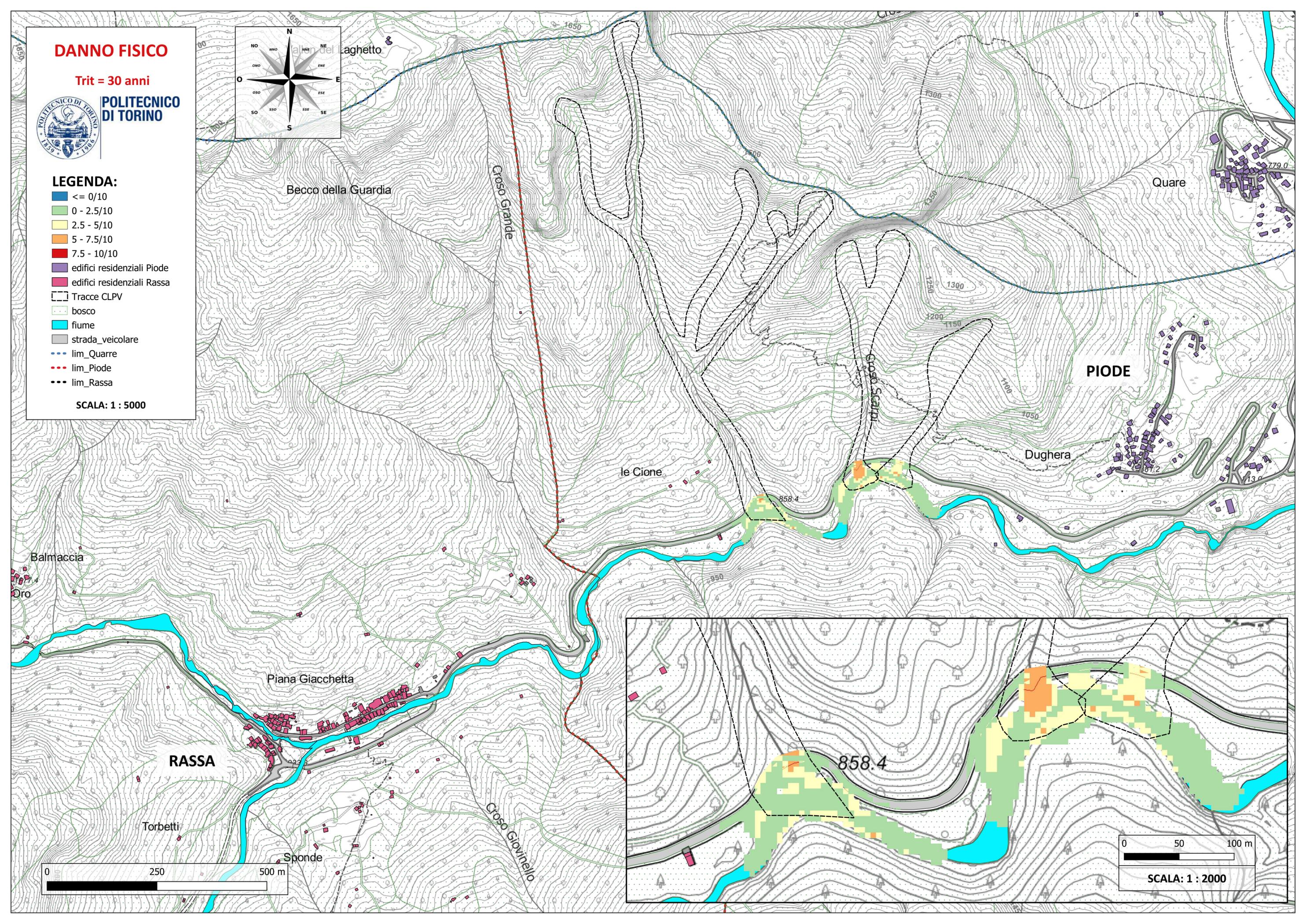
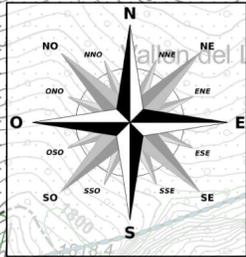


POLITECNICO DI TORINO

LEGENDA:

- <= 0/10
- 0 - 2.5/10
- 2.5 - 5/10
- 5 - 7.5/10
- 7.5 - 10/10
- edifici residenziali Piode
- edifici residenziali Rassa
- Tracce CLPV
- bosco
- fiume
- strada_veicolare
- lim_Quarre
- lim_Piode
- lim_Rassa

SCALA: 1 : 5000



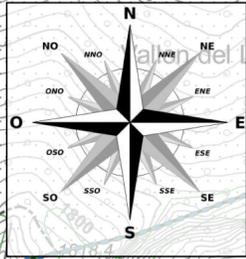
0 50 100 m
SCALA: 1 : 2000

DANNO SOCIALE

Trit = 30 anni



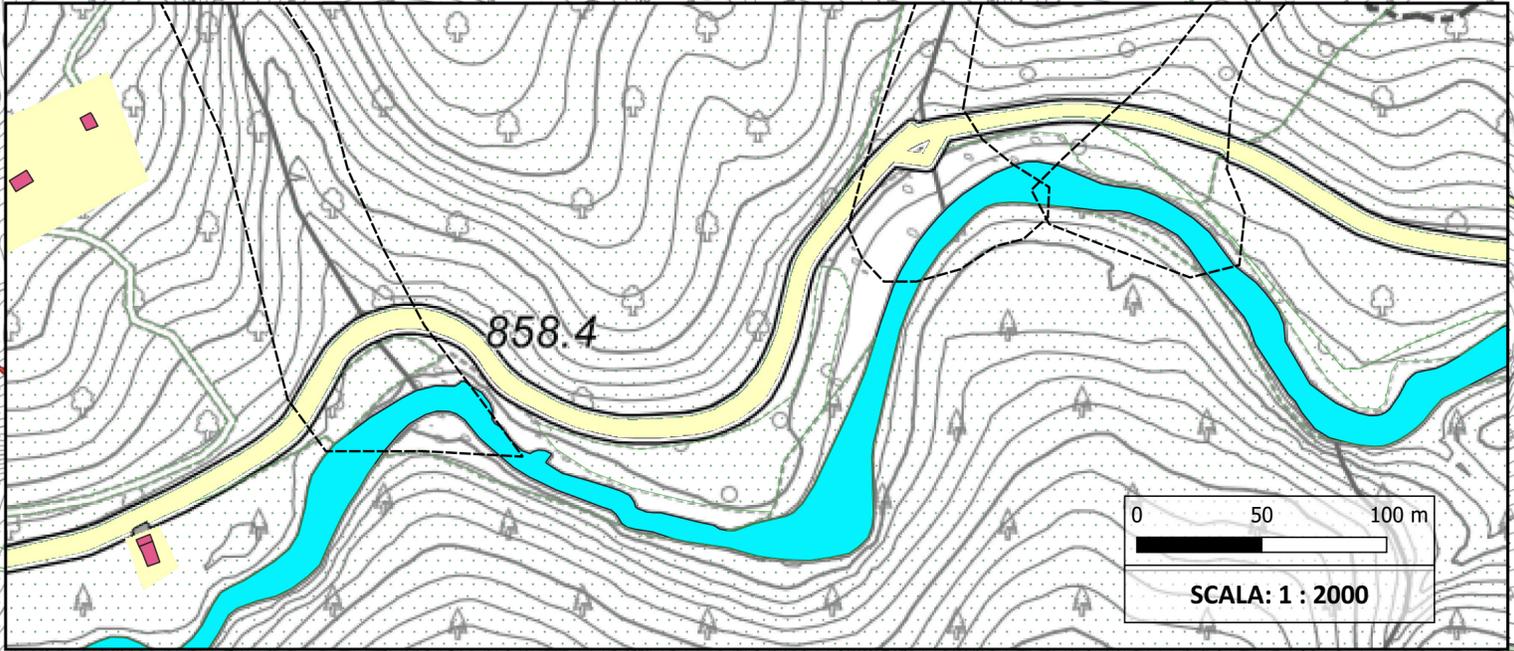
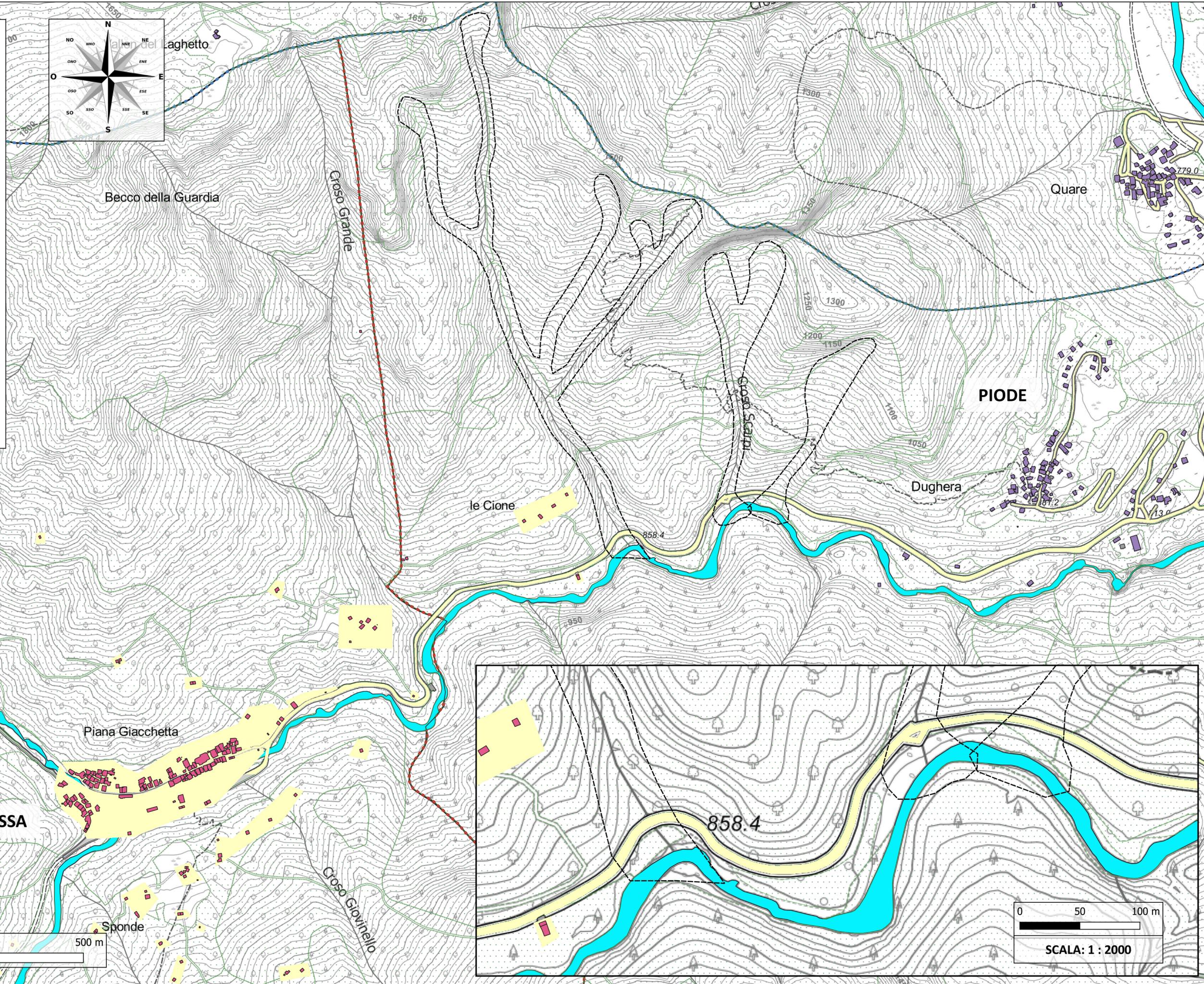
POLITECNICO DI TORINO



LEGENDA:

- <= 0/10
- 0 - 2.5/10
- 2.5 - 5/10
- 5 - 7.5/10
- 7.5 - 10/10
- edifici residenziali Piode
- edifici residenziali Rassa
- Tracce CLPV
- bosco
- fiume
- strada_veicolare
- - - lim_Quarre
- - - lim_Piode
- - - lim_Rassa

SCALA: 1 : 5000



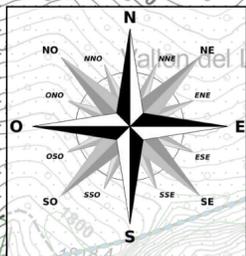
SCALA: 1 : 2000

RISCHIO FISICO

Trit = 30 anni



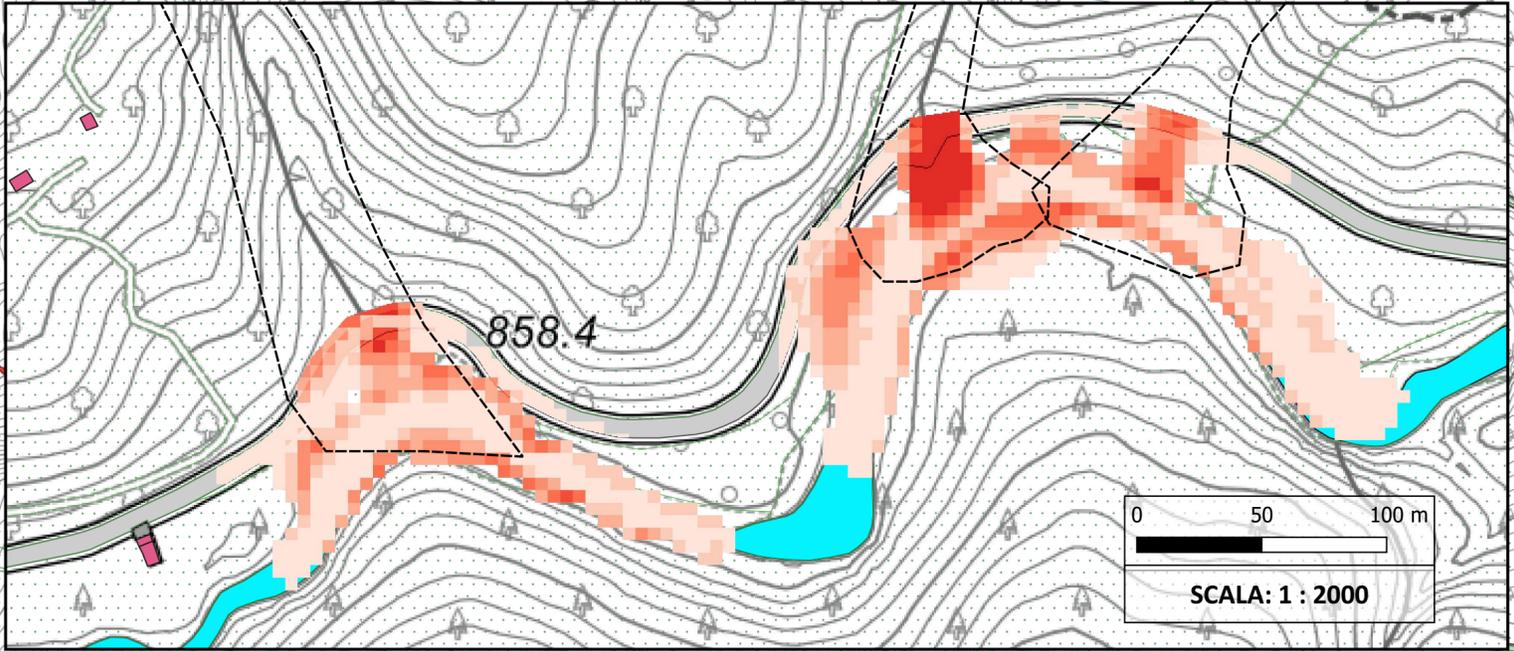
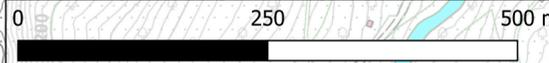
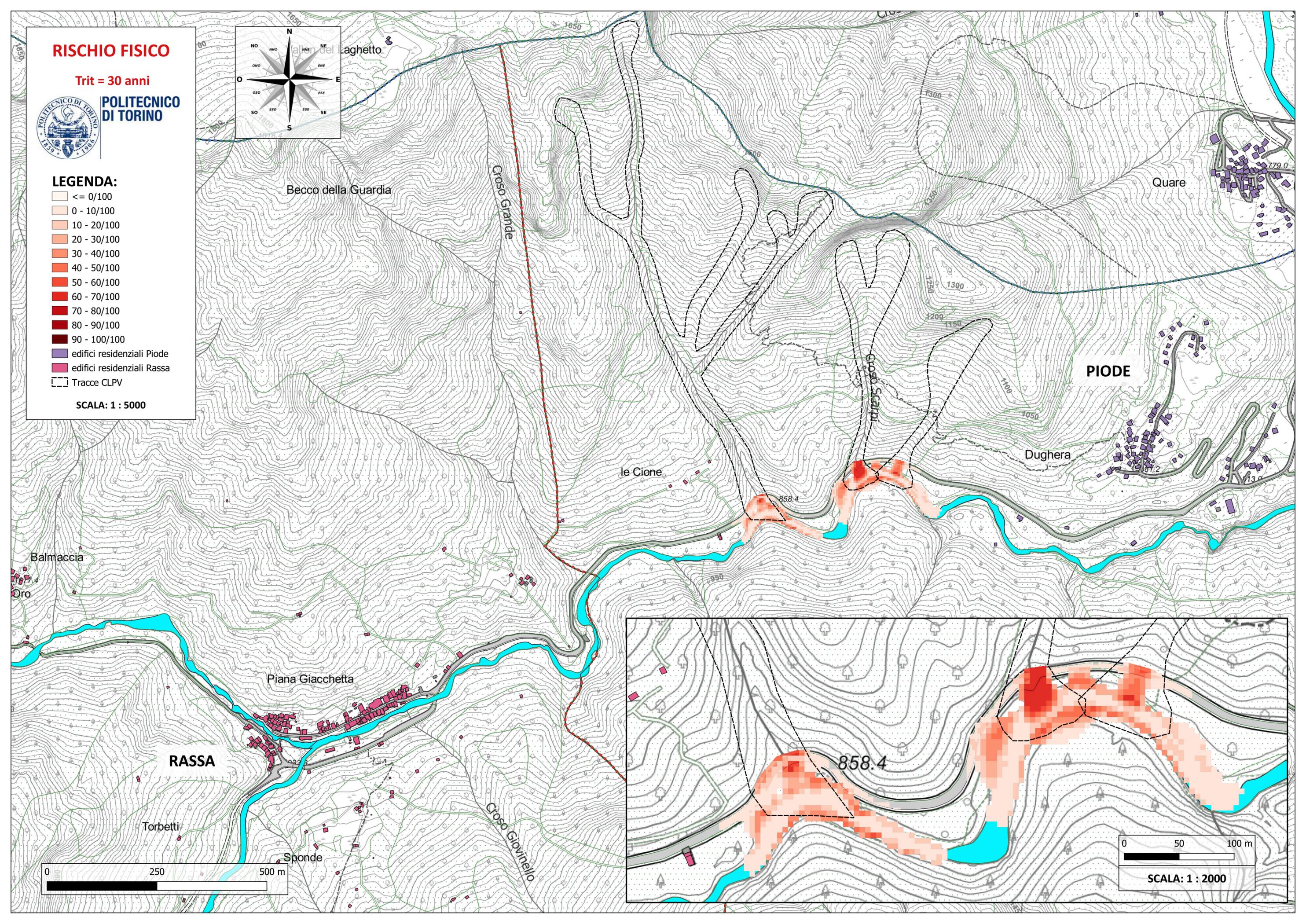
POLITECNICO DI TORINO



LEGENDA:

- <= 0/100
- 0 - 10/100
- 10 - 20/100
- 20 - 30/100
- 30 - 40/100
- 40 - 50/100
- 50 - 60/100
- 60 - 70/100
- 70 - 80/100
- 80 - 90/100
- 90 - 100/100
- edifici residenziali Piode
- edifici residenziali Rassa
- Tracce CLPV

SCALA: 1 : 5000



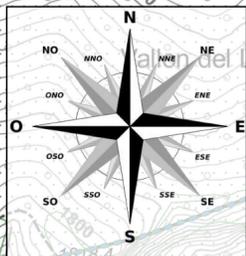
0 50 100 m
SCALA: 1 : 2000

RISCHIO SOCIALE

Trit = 30 anni



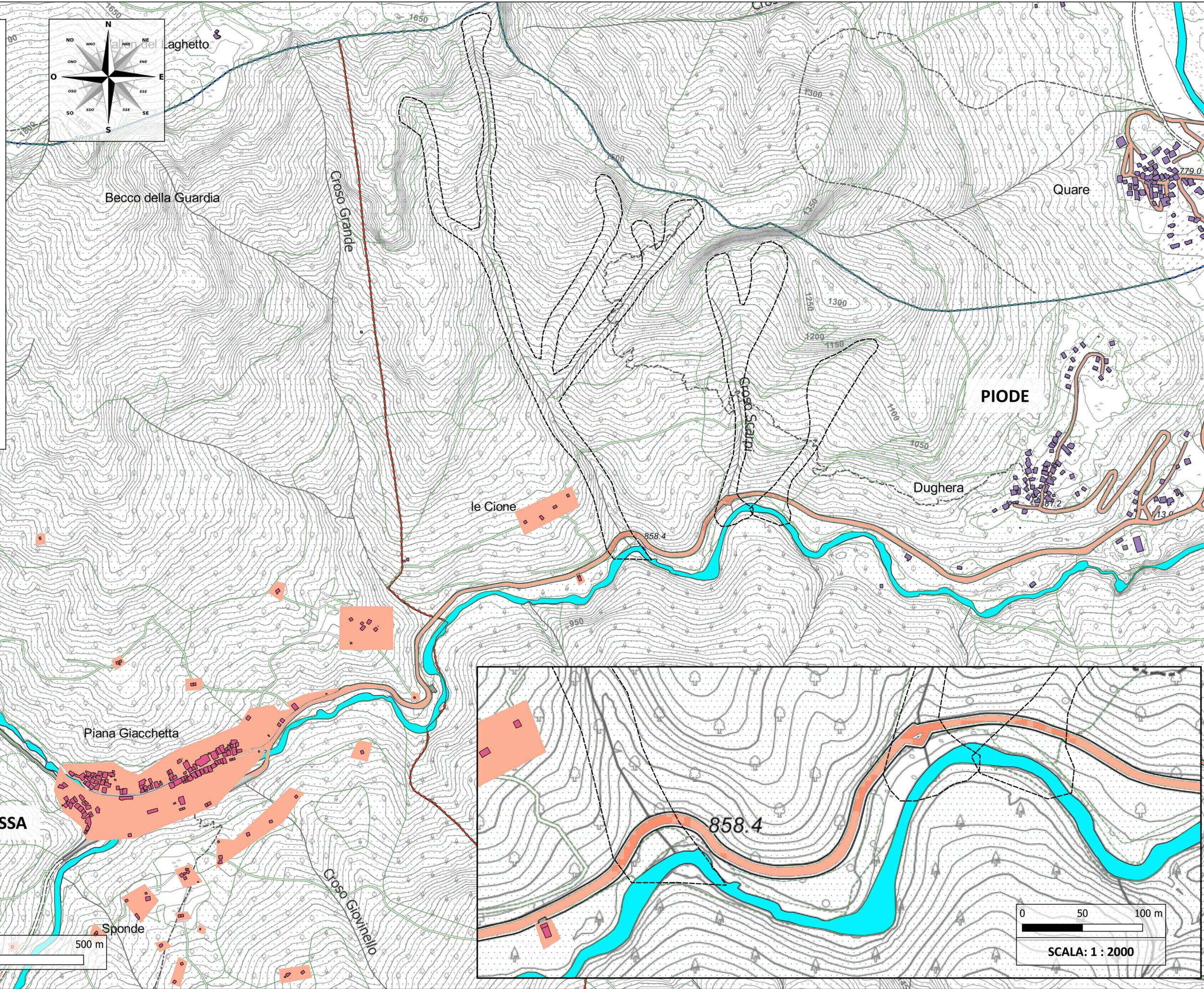
POLITECNICO DI TORINO



LEGENDA:

- <= 0/100
- 0 - 10/100
- 10 - 20/100
- 20 - 30/100
- 30 - 40/100
- 40 - 50/100
- 50 - 60/100
- 60 - 70/100
- 70 - 80/100
- 80 - 90/100
- 90 - 100/100
- edifici residenziali Piode
- edifici residenziali Rassa
- Tracce CLPV

SCALA: 1 : 5000

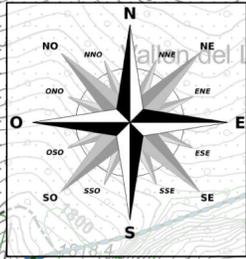


RISCHIO TOTALE

Trit = 30 anni



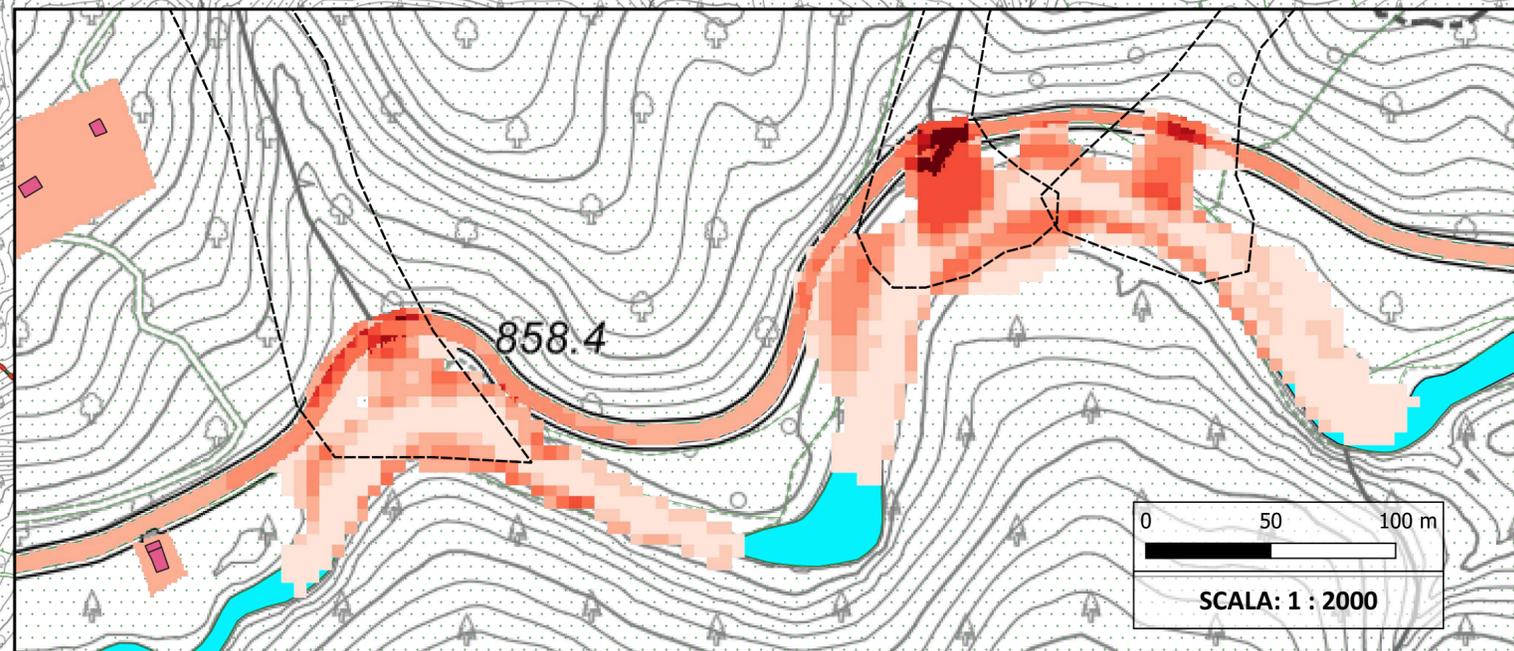
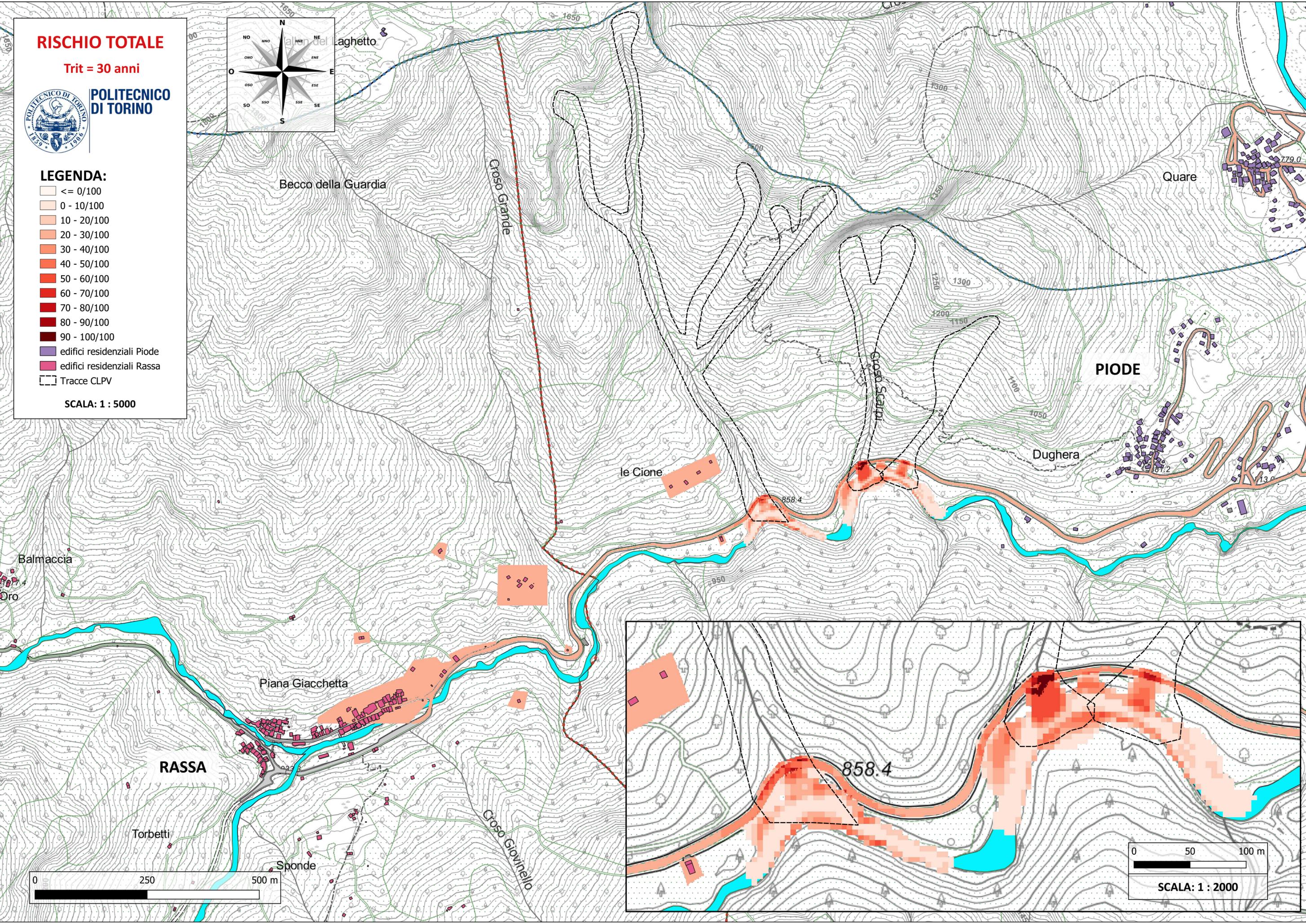
POLITECNICO DI TORINO



LEGENDA:

- <= 0/100
- 0 - 10/100
- 10 - 20/100
- 20 - 30/100
- 30 - 40/100
- 40 - 50/100
- 50 - 60/100
- 60 - 70/100
- 70 - 80/100
- 80 - 90/100
- 90 - 100/100
- edifici residenziali Piode
- edifici residenziali Rassa
- Tracce CLPV

SCALA: 1 : 5000



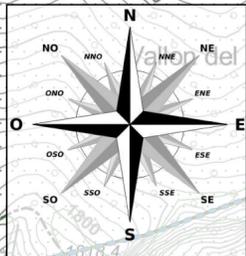
VULNERABILITÀ

FISICA

Trit = 10 anni



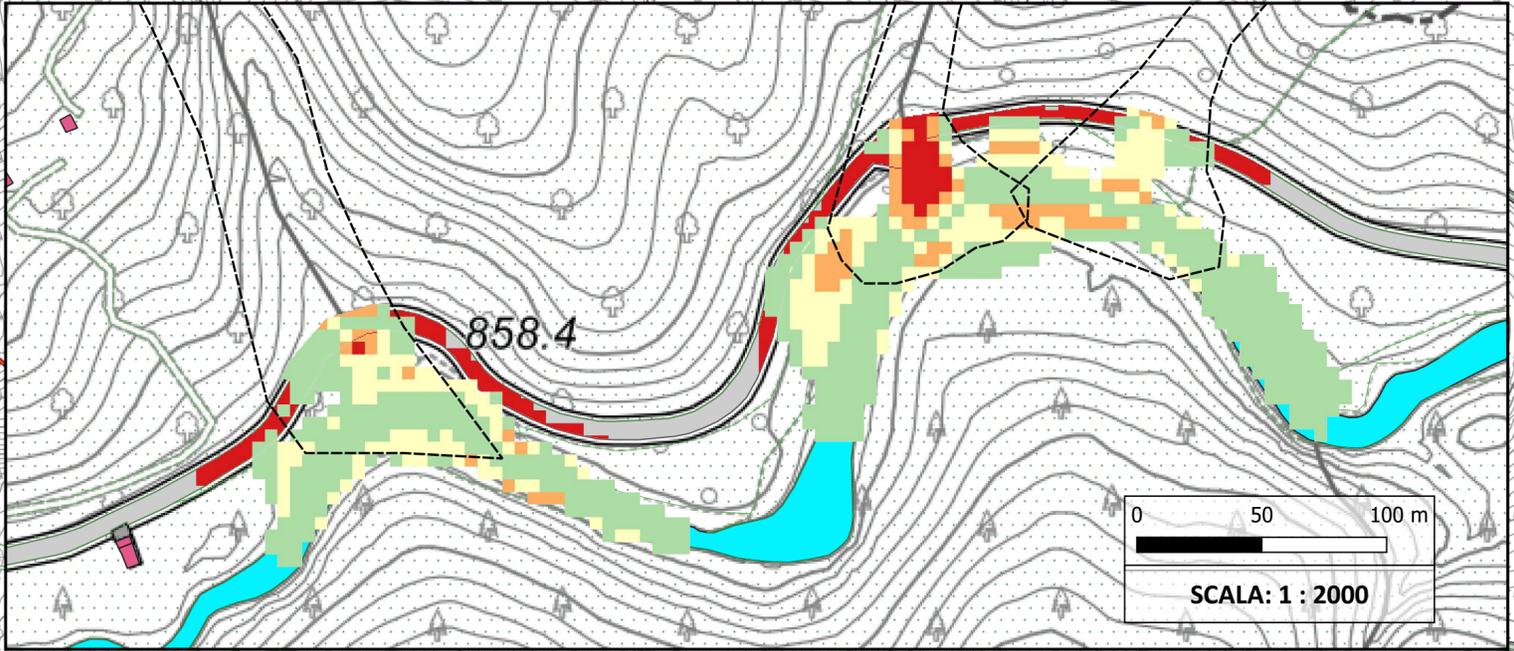
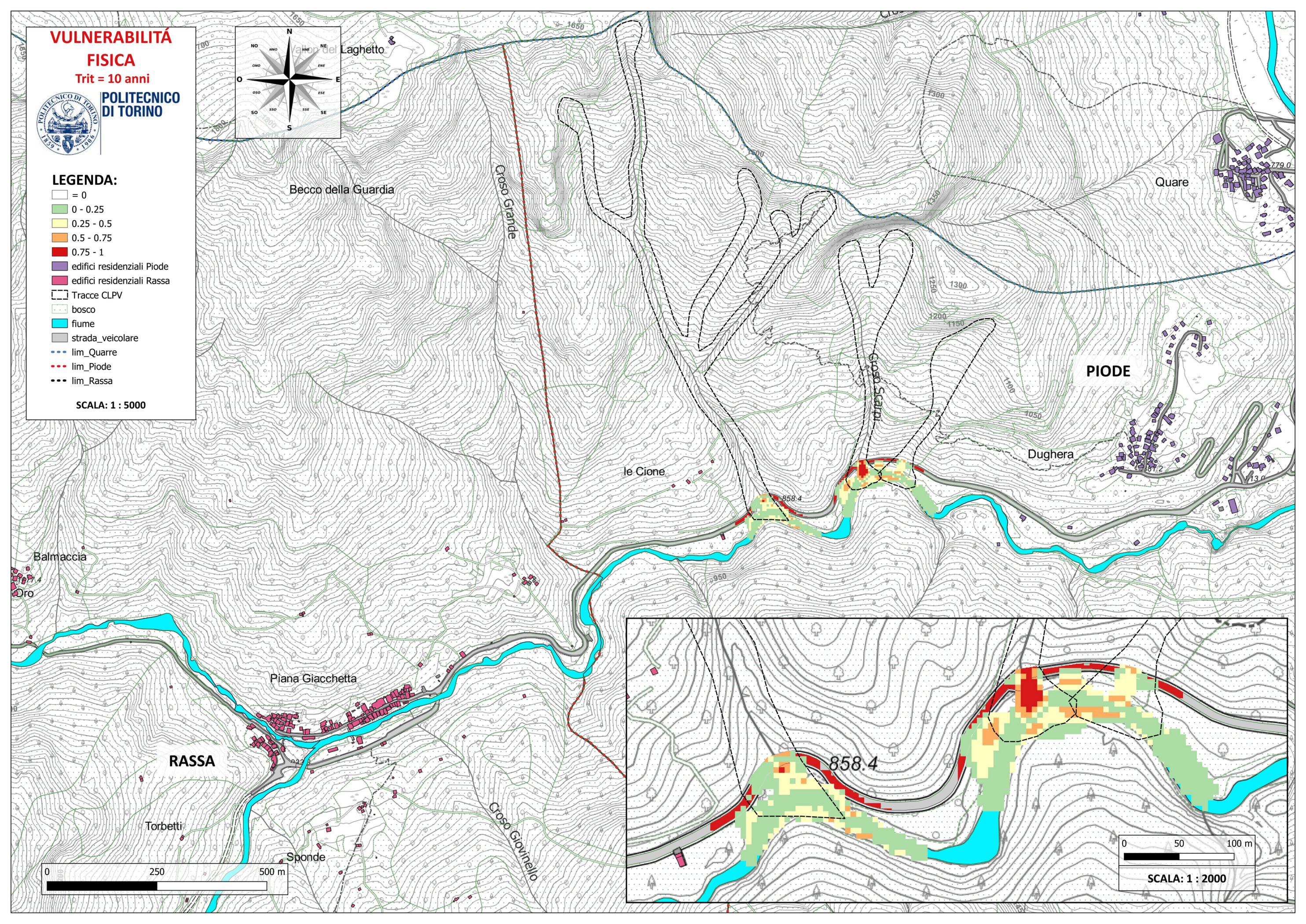
POLITECNICO DI TORINO



LEGENDA:

- = 0
- 0 - 0.25
- 0.25 - 0.5
- 0.5 - 0.75
- 0.75 - 1
- edifici residenziali Piode
- edifici residenziali Rassa
- Tracce CLPV
- bosco
- fiume
- strada_veicolare
- lim_Quarre
- lim_Piode
- lim_Rassa

SCALA: 1 : 5000

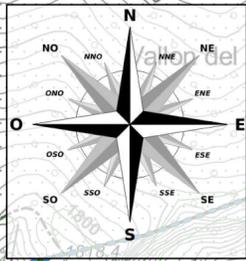


VULNERABILITÀ SOCIALE

Trit = 10 anni



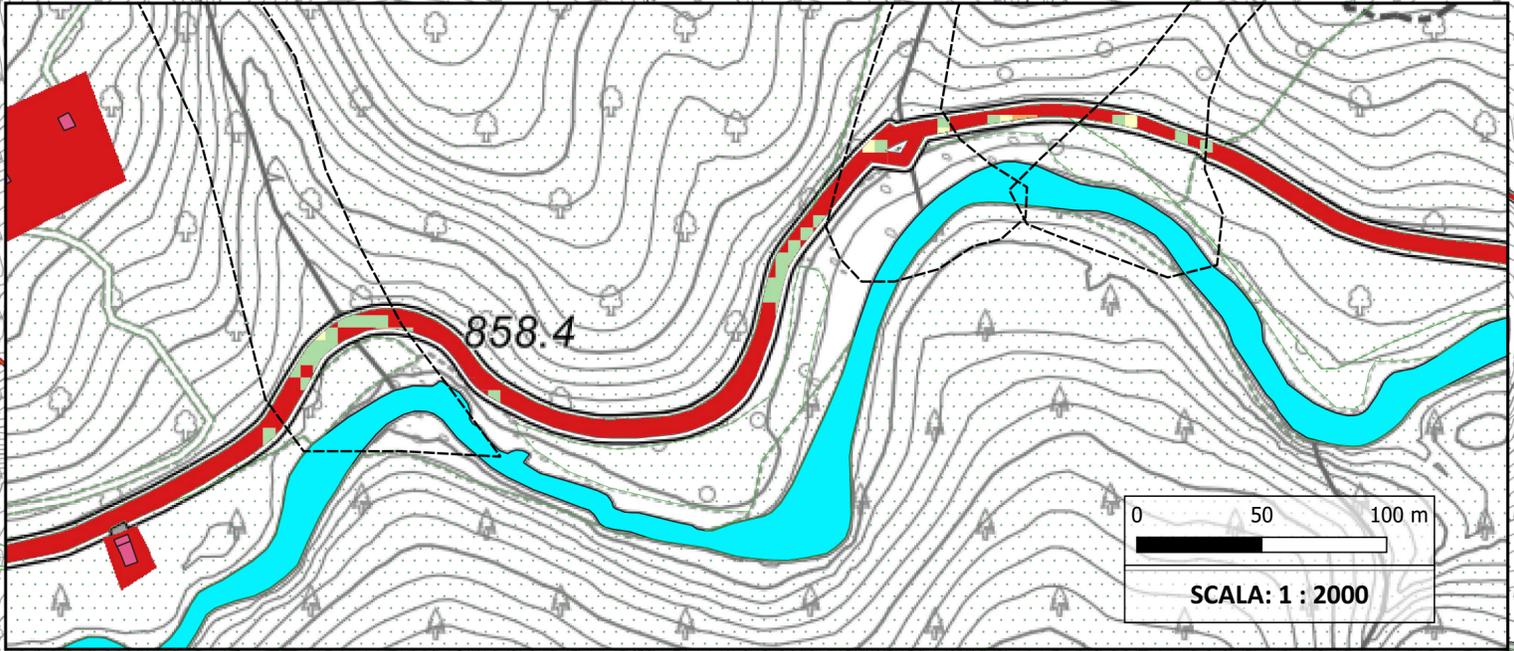
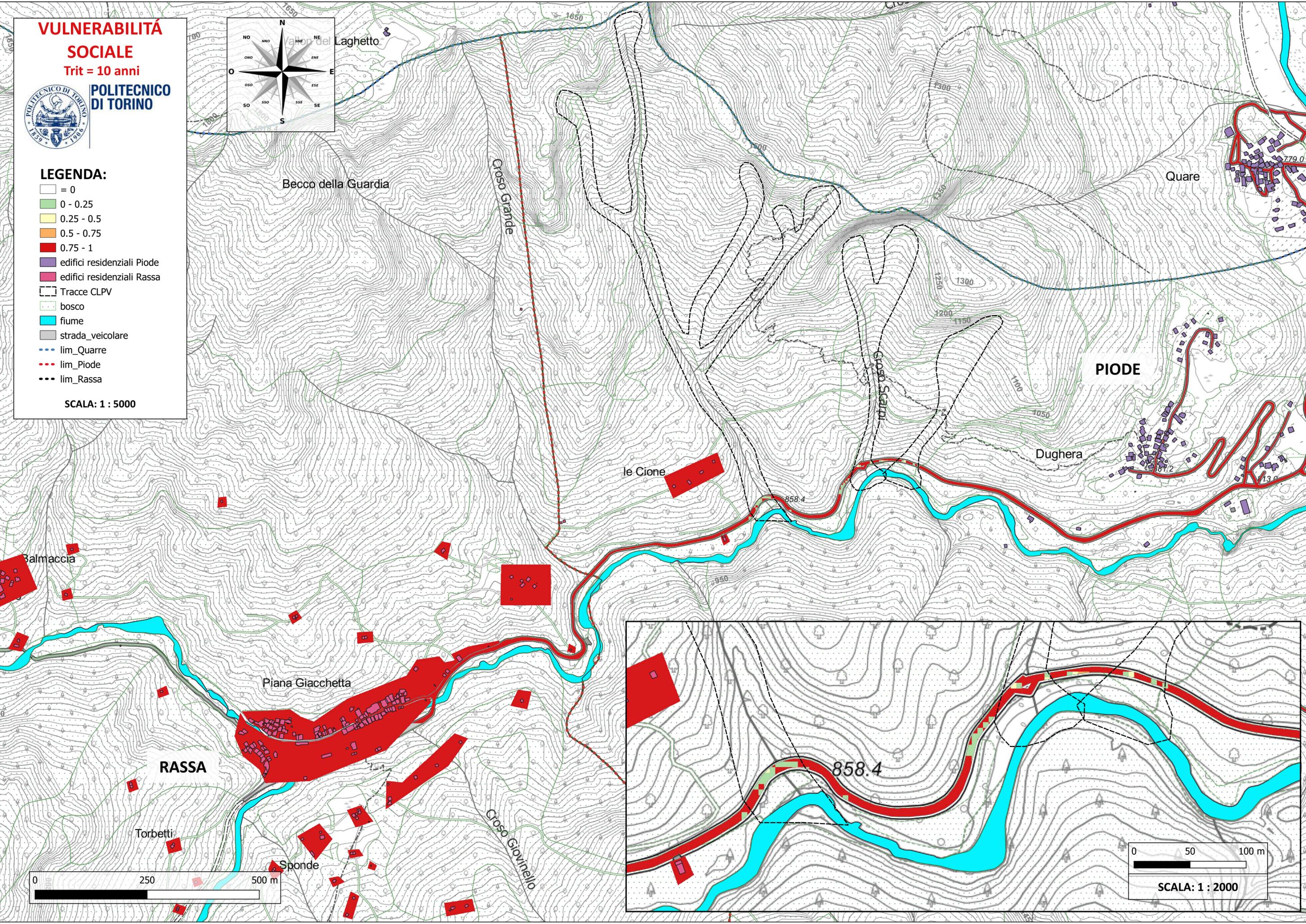
POLITECNICO DI TORINO



LEGENDA:

- = 0
- 0 - 0.25
- 0.25 - 0.5
- 0.5 - 0.75
- 0.75 - 1
- edifici residenziali Piode
- edifici residenziali Rassa
- Tracce CLPV
- bosco
- fiume
- strada_veicolare
- lim_Quarre
- lim_Piode
- lim_Rassa

SCALA: 1 : 5000



0 50 100 m
SCALA: 1 : 2000

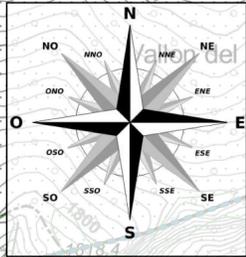
0 250 500 m

DANNO FISICO

Trit = 10 anni



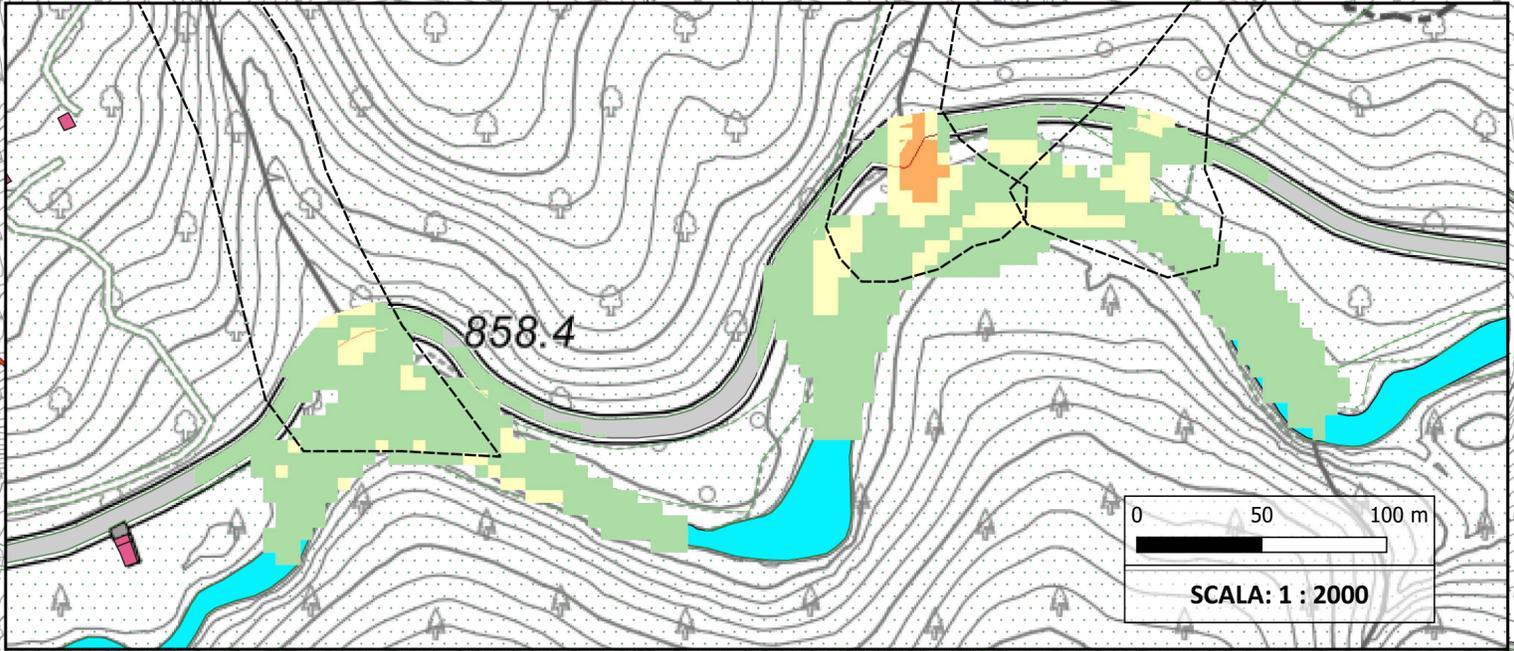
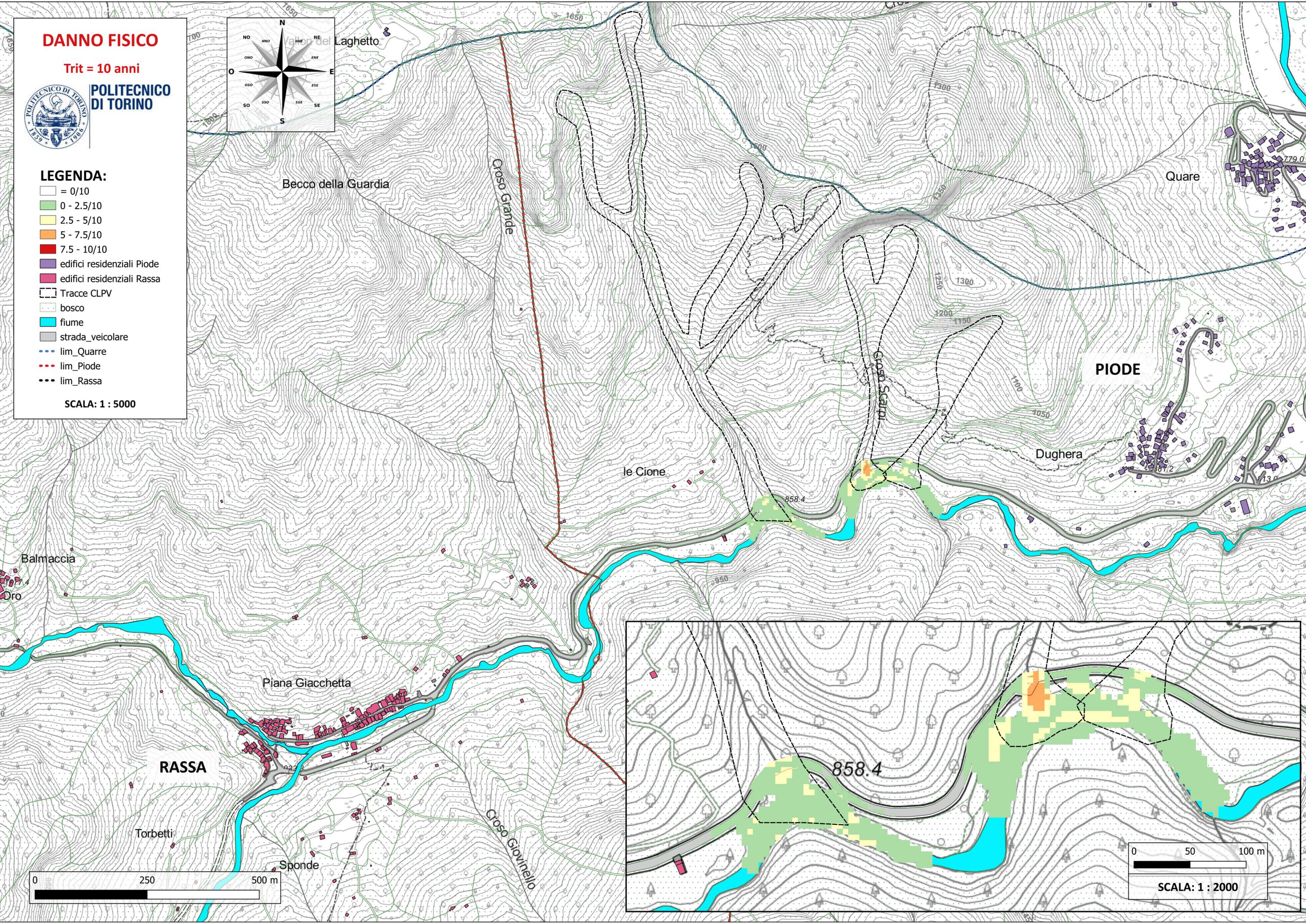
POLITECNICO DI TORINO



LEGENDA:

- = 0/10
- 0 - 2.5/10
- 2.5 - 5/10
- 5 - 7.5/10
- 7.5 - 10/10
- edifici residenziali Piode
- edifici residenziali Rassa
- Tracce CLPV
- bosco
- fiume
- strada_veicolare
- lim_Quarre
- lim_Piode
- lim_Rassa

SCALA: 1 : 5000

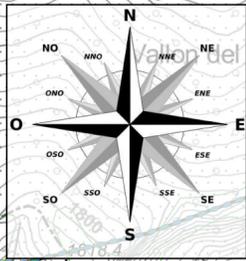


DANNO SOCIALE

Trit = 10 anni



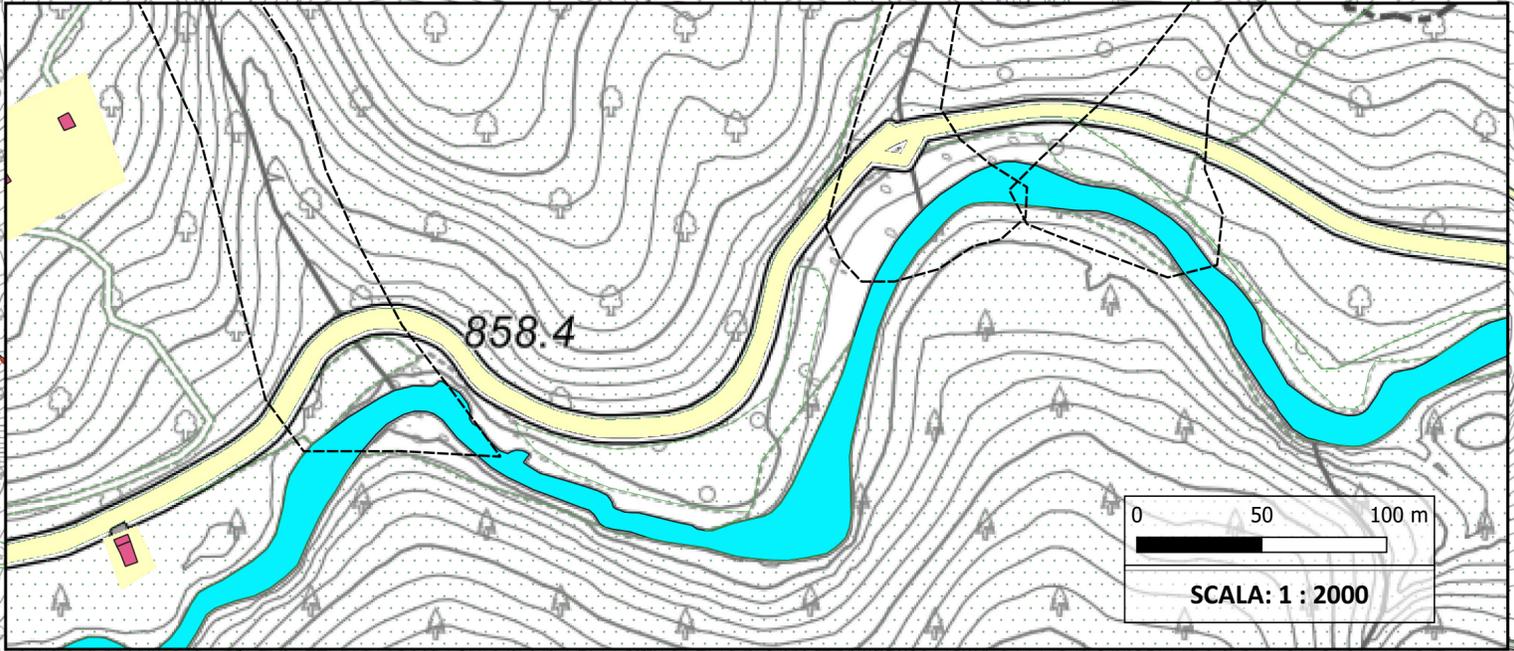
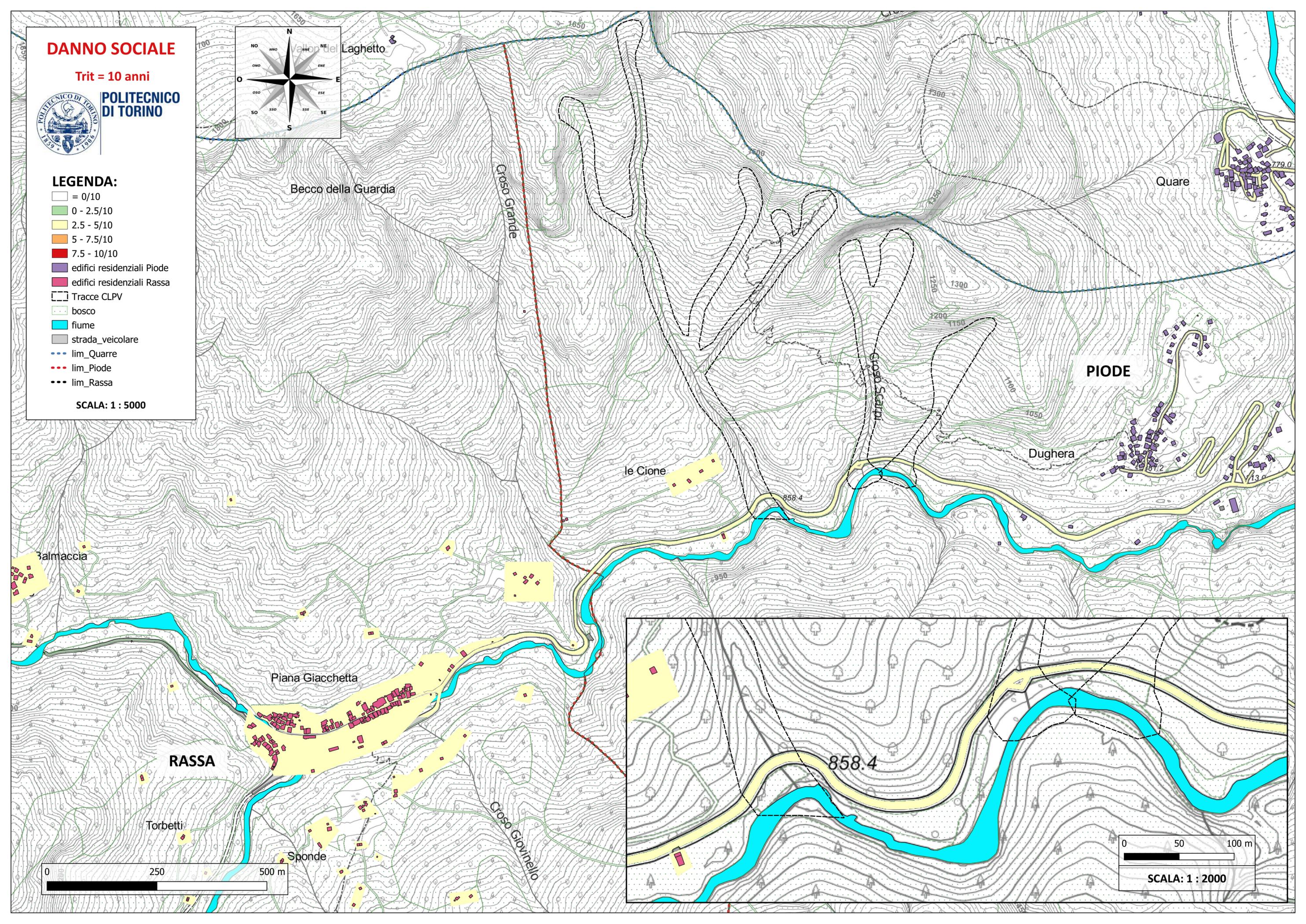
POLITECNICO DI TORINO



LEGENDA:

- = 0/10
- 0 - 2.5/10
- 2.5 - 5/10
- 5 - 7.5/10
- 7.5 - 10/10
- edifici residenziali Piode
- edifici residenziali Rassa
- Tracce CLPV
- bosco
- fiume
- strada_veicolare
- lim_Quarre
- lim_Piode
- lim_Rassa

SCALA: 1 : 5000



0 50 100 m

SCALA: 1 : 2000

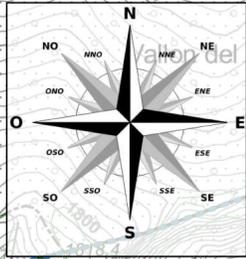
0 250 500 m

RISCHIO FISICO

Trit = 10 anni



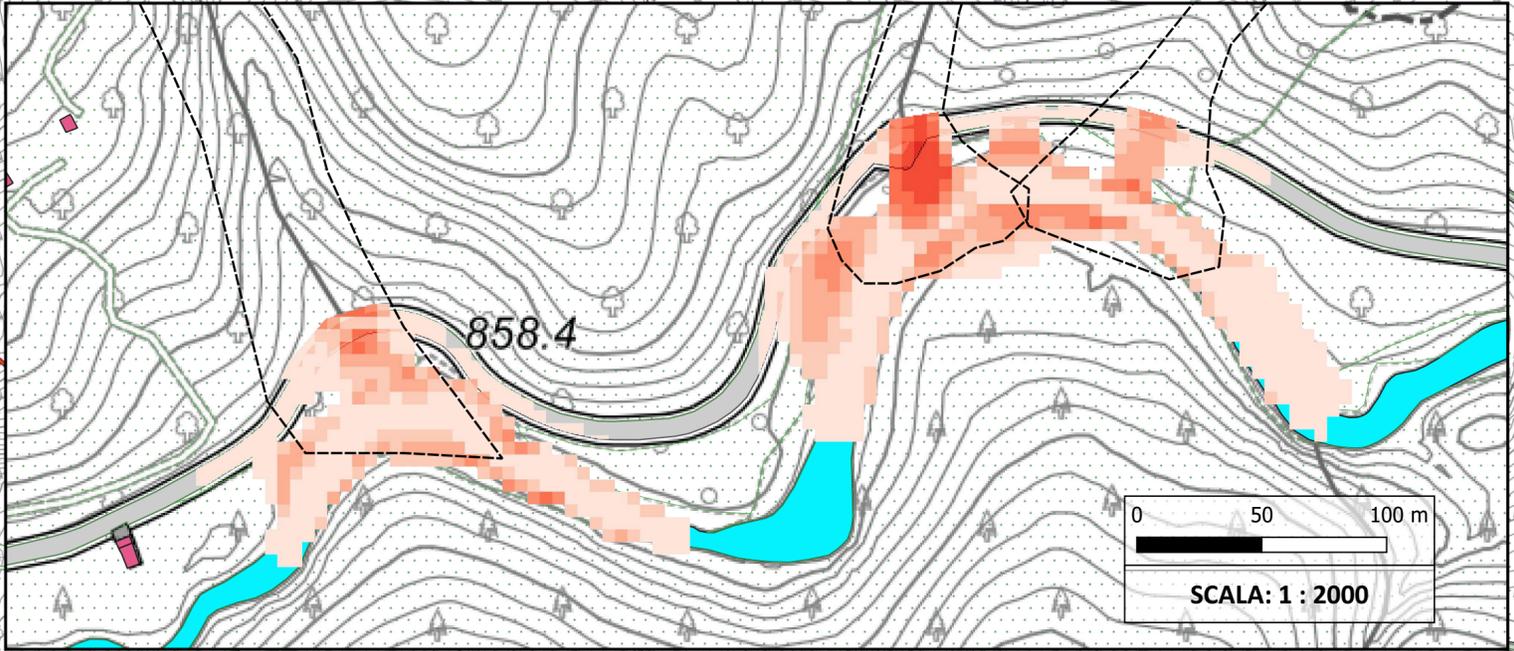
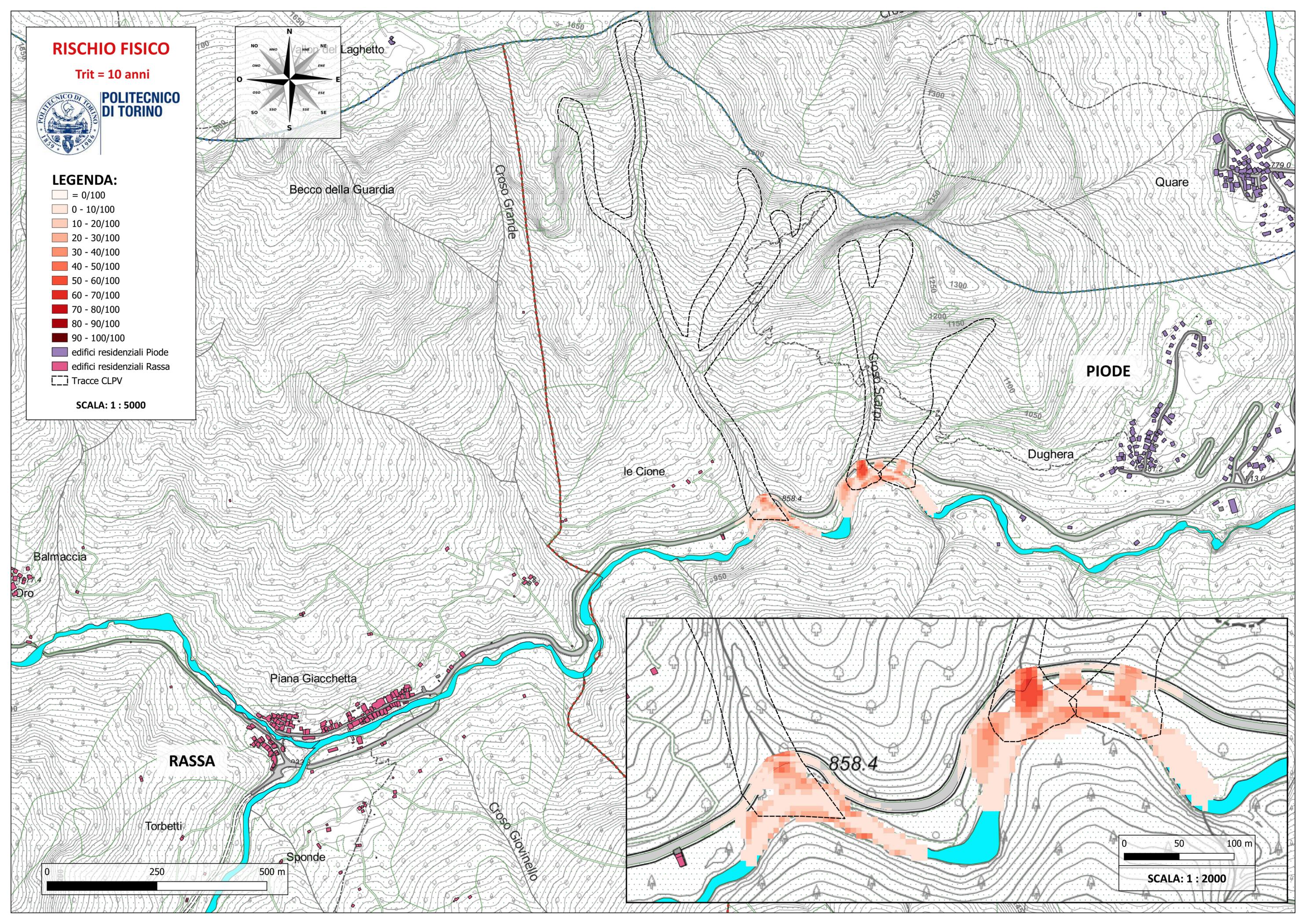
POLITECNICO DI TORINO



LEGENDA:

- = 0/100
- 0 - 10/100
- 10 - 20/100
- 20 - 30/100
- 30 - 40/100
- 40 - 50/100
- 50 - 60/100
- 60 - 70/100
- 70 - 80/100
- 80 - 90/100
- 90 - 100/100
- edifici residenziali Piode
- edifici residenziali Rassa
- Tracce CLPV

SCALA: 1 : 5000



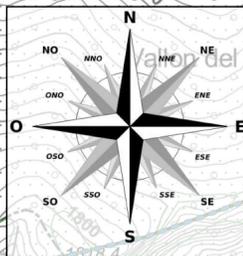
0 50 100 m
SCALA: 1 : 2000

RISCHIO SOCIALE

Trit = 10 anni



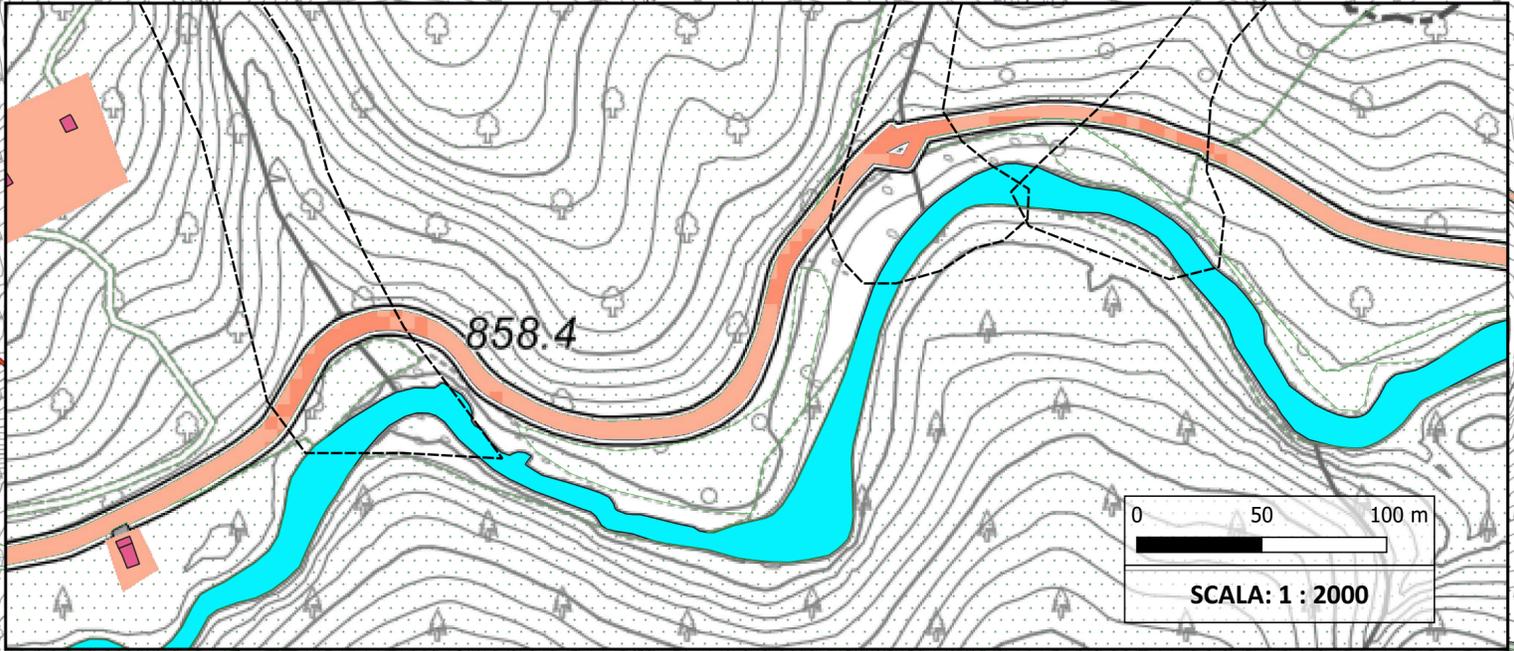
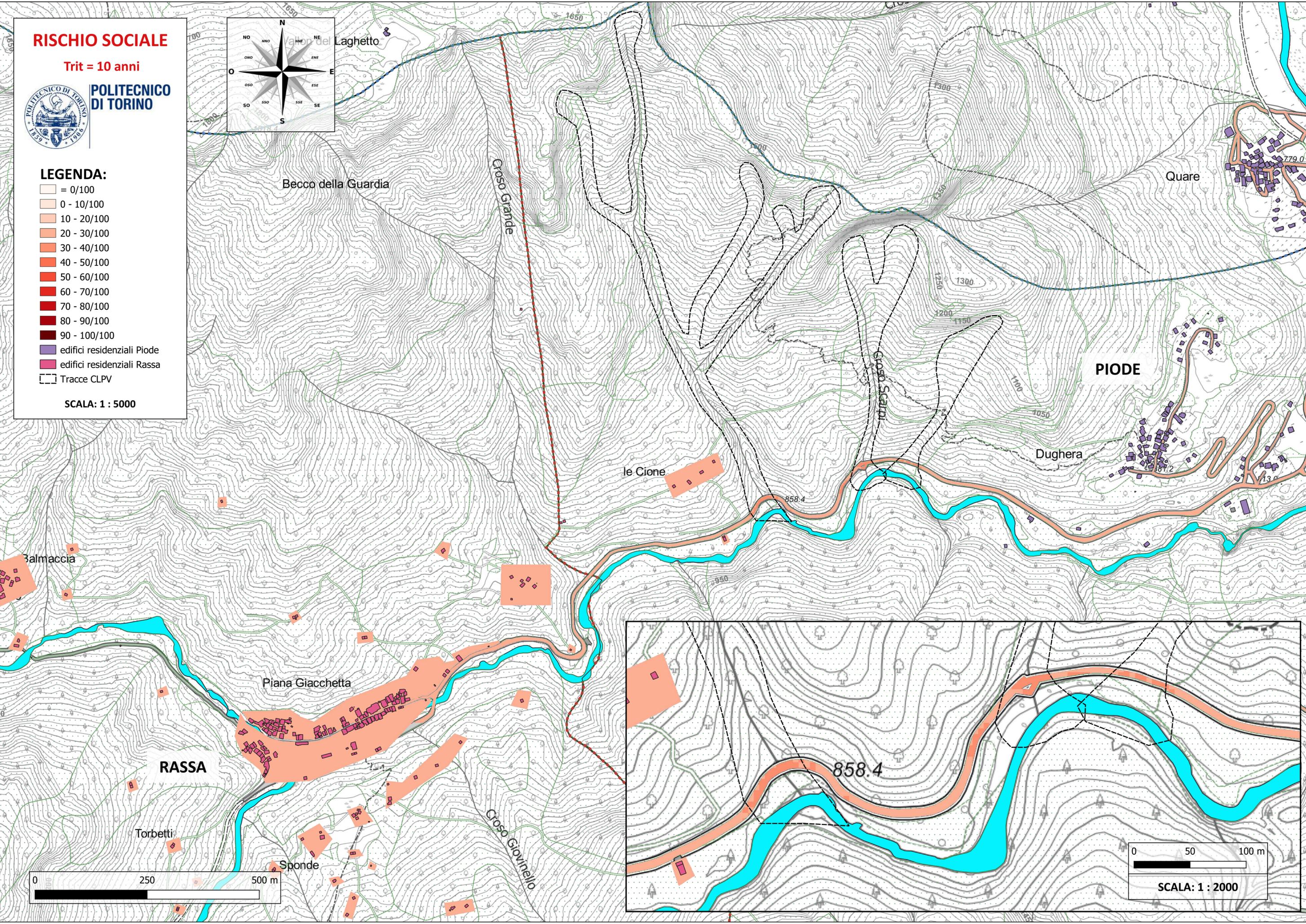
POLITECNICO DI TORINO



LEGENDA:

- = 0/100
- 0 - 10/100
- 10 - 20/100
- 20 - 30/100
- 30 - 40/100
- 40 - 50/100
- 50 - 60/100
- 60 - 70/100
- 70 - 80/100
- 80 - 90/100
- 90 - 100/100
- edifici residenziali Piode
- edifici residenziali Rassa
- Tracce CLPV

SCALA: 1 : 5000

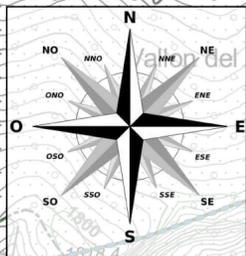


RISCHIO TOTALE

Trit = 10 anni



POLITECNICO DI TORINO



LEGENDA:

- = 0/100
- 0 - 10/100
- 10 - 20/100
- 20 - 30/100
- 30 - 40/100
- 40 - 50/100
- 50 - 60/100
- 60 - 70/100
- 70 - 80/100
- 80 - 90/100
- 90 - 100/100
- edifici residenziali Piode
- edifici residenziali Rassa
- Tracce CLPV

SCALA: 1 : 5000

