

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio**



TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**Analisi di rischio valanghivo nel settore italiano del Monte Bianco
(Val Ferret)**

Relatore

Dott. Ing. Barbara Frigo

Dott. Eloïse Bovet

Candidato

Giulia Venturato

Dicembre 2022

SOMMARIO

1. Introduzione	9
2. La neve e le valanghe	11
2.1 Origine della neve.....	11
2.2 Metamorfismi della neve	12
2.2.1 Metamorfismi della neve asciutta	12
2.2.2 Metamorfismi della neve umida	13
2.2.3 L'azione del vento	13
2.3 La stabilità del manto nevoso.....	13
2.4 Le valanghe.....	15
2.5 Interferenza valanghiva con aree antropiche	18
2.5.1 Organizzazione delle strutture di protezione civile in campo valanghivo	19
2.5.2 Distacco artificiale di valanghe	20
2.5.3 Foreste di protezione	21
2.5.4 Misure strutturali	21
3. Area di studio	24
3.1 Inquadramento generale dell'area di studio.....	24
3.2 Aspetti geomorfologici	25
3.3 Aspetti idrogeologici.....	28
3.4 Aspetti climatici	29
3.5 Aspetti naturalistici, vegetazionali e copertura del suolo	31
4. Analisi di rischio	35
4.1 Analisi dell'attività valanghiva pregressa	37
4.1.1 Inquadramento del bacino valanghivo all'interno del Catasto Valanghe Regionale	41
4.1.2 Zona di accumulo	43
4.1.3 Area di distacco	48
4.2 Analisi delle pendenze.....	51
4.3 Analisi della vegetazione e della copertura del suolo	55
4.4 Studio della dinamica valanghiva	57
4.4.1 Definizione dell'evento di progetto	59
4.4.1.1 Area di distacco dell'evento di progetto	60
4.4.2 Definizione dei parametri nivometrici di progetto	61
4.4.3 Modello di calcolo	68
4.4.3.1 Modello bidimensionale di dinamica implementato da RAMMS Operational e reologia Voellmy-Salm.....	68

4.4.3.2	Coesione	71
4.4.3.3	Curvatura	71
4.4.3.4	Parametri di attrito μ e ξ	72
4.4.3.5	Discretizzazione della mesh.....	72
4.4.4	Preparazione della simulazione con RAMMS	73
4.4.5	Taratura del modello	76
4.4.5.1	Input	76
4.4.5.2	Output	81
4.4.6	Simulazioni	84
4.4.6.1	Input	85
4.4.6.2	Output – $H_d < H_{d0}$	85
4.4.6.3	Output – $H_d > H_{d0}$	87
4.5	Valutazione del rischio per gli utenti della strada La Palud.....	92
4.5.1	Generalità sul rischio	92
4.5.2	Valutazione quantitativa del rischio	93
4.5.3	Raccolta dati sul traffico veicolare	97
4.5.4	Calcolo del rischio	102
4.5.4.1	Probabilità di impatto tra valanga e veicolo.....	102
4.5.4.2	Probabilità di morte per impatto tra valanga e automobili	103
4.5.5	Confronto tra la situazione pre e post ponti da neve.....	105
4.5.6	Considerazioni sulla gestione del rischio	108
5.	Conclusioni	112
	Bibliografia e sitografia.....	116

INDICE DELLE FIGURE

<i>Figura 2.1-1: I diversi tipi di crescita a partire dal germe di ghiaccio in condizioni di temperature regolari. Fonte: (Praolini, Tognoni, Turroni, & Valt, 2021)</i>	11
<i>Figura 2.3-1: Equilibrio del manto nevoso sul piano inclinato. Fonte (Praolini, Tognoni, Turroni, & Valt, Le valanghe, 2019)</i>	14
<i>Figura 2.4-1: Aree di distacco, scorrimento e arresto di una valanga. Fonte (Praolini, Tognoni, Turroni, & Valt, Le valanghe, 2019)</i>	15
<i>Figura 2.4-2: Distribuzione delle valanghe secondo varie classi di inclinazione del pendio. Fonte (Praolini, Tognoni, Turroni, & Valt, Le valanghe, 2019)</i>	17
<i>Figura 2.5-1: Ambiti inedificabili nei riguardi del pericolo di valanghe per la località di Planpincieux (Comune di Courmayeur) come definito dall'art. 37 della LR 11/1998, estratto dal Geoportale Sistema delle Conoscenze Territoriali SCT (Regione Autonoma Valle d'Aosta)</i>	19
<i>Figura 2.5-2 Dall'alto, ponte da neve, rastrelliera da neve, rete da neve. Fonte (Margreth, 2007)</i>	22
<i>Figura 2.5-3: Barriere frangivento. Foto: Giulia Venturato</i>	23
<i>Figura 3.1-1: La Val Ferret vista da Sud dalla cresta del Mont de La Saxe. Foto: Giulia Venturato</i>	24
<i>Figura 3.2-1: Inquadramento tettonico-metamorfico dell'area del Foglio Aosta nelle Alpi nord-occidentali. L'area di studio si colloca nel riquadro centrale in alto. Fonte (ISPRA, Note illustrative della Carta Geologica d'Italia)</i>	26
<i>Figura 3.2-2: Frane in Val Ferret distinte in base al tipo di movimento. Fonte (Piattaforma italiana sul dissesto idrogeologico IdroGEO)</i>	28
<i>Figura 3.4-1: Andamento della temperatura media annuale anni 2000-2009 per tre stazioni meteorologiche rappresentative dell'alta (Morgex), media (Aosta) e bassa (Donnas) Valle d'Aosta. Fonte (Regione Autonoma Valle d'Aosta, 2010)</i>	30
<i>Figura 3.4-2: Andamento della neve totale caduta in cinque stazioni automatiche. Courmayeur è la stazione rappresentativa della Val Ferret. Fonte (Regione Autonoma Valle d'Aosta, 2010)</i>	31
<i>Figura 3.5-1: Aree protette in Val Ferret (a destra in figura): ZSC Ambienti glaciali del Monte Bianco (contorno rosso grande), ZSC Talweg della Val Ferret (contorni rossi piccoli); ZPS Val Ferret (contorno blu). Elaborazione personale con QGIS</i>	32
<i>Figura 3.5-2: Copertura del suolo in Val Ferret. Fonte shapefiles (CORINE Land Cover). Elaborazione personale con QGIS</i>	34
<i>Figura 4.1-1: Alcune delle valanghe che si staccano dal Mont de La Saxe (in rosso la valanga di interesse). Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT). Elaborazione personale con QGIS</i>	38
<i>Figura 4.1-2: Estratto della cartografia in formato WMS degli Ambiti Inedificabili in relazione al rischio valanghe per il fondovalle della Val Ferret. Fonte (Geoportale SCT Sistema delle Conoscenze Territoriali). Elaborazione personale con QGIS</i>	39
<i>Figura 4.1-3: Estratto della Scheda Rilevamento Valanghe per la valanga 18-030, informazioni generali. Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT)</i>	41
<i>Figura 4.1-4: Piazzale Piazzale di Planpincieux, con l'Hotel Miravalle (sulla sinistra) e lo Chalet Proment (sulla destra) parzialmente nascosti dagli alberi. La valanga proviene da sinistra in foto. Foto: Giulia Venturato</i> .	42
<i>Figura 4.1-5: Valanga 18-030 - Estratto della cartografia in formato WMS degli Ambiti Inedificabili in relazione al rischio valanghe; a sinistra, la zona di deposito, a destra la zona di scorrimento in prossimità del nucleo Leuchey-Damon. Fonte (Geoportale SCT Sistema delle Conoscenze Territoriali)</i>	42
<i>Figura 4.1-6: Valanga 18-030 – Zone di deposito di alcuni eventi storici. Fonte shapefiles (Catasto Valanghe Regionale SCT). Elaborazione personale con QGIS</i>	43
<i>Figura 4.1-7: Valanga 18-030 - evento del 22-12-1991, zona di deposito. Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT)</i>	44
<i>Figura 4.1-8: Valanga 18-030 - Elementi frangivento sulla cresta del Mont de La Saxe a monte dei ponti da neve in zona di distacco. Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT)</i>	45

<i>Figura 4.1-9: Scheda rilevazione paravalanghe – Deflettori in legno sulla cresta del Mont de La Saxe. Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT).....</i>	45
<i>Figura 4.1-10: Scheda rilevazione paravalanghe – Ponti da neve nella zona di distacco della valanga 18-030. Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT).....</i>	46
<i>Figura 4.1-11: Valanga 18-030 - evento del 07-01-2001, zona di deposito. Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT)</i>	47
<i>Figura 4.1-12: Valanga 18-030 - Evento del 07-01-2001, danni in zona di deposito. Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT)</i>	47
<i>Figura 4.1-13: Valanga 18-030 - Evento del 18-02-2006, facciata dell'albergo Miravalle investita dal soffio. Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT).....</i>	48
<i>Figura 4.1-14: Valanga 18-030 - Evento del 07-01-2001, frattura nell'area di distacco. Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT)</i>	49
<i>Figura 4.1-15: Valanga 18-030 - Evento del 18-02-2006, frattura nella parte alta della zona di distacco a destra dei ponti da neve. Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT)</i>	50
<i>Figura 4.1-16: Valanga 18-030 - Evento del 05-05-2008, frattura nella zona di distacco a valle dei ponti da neve. Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT)</i>	50
<i>Figura 4.1-17: Valanga 18-030 – Posizione della frattura nella zona di distacco per alcuni eventi storici. Fonte shapefiles (Catasto Valanghe Regionale SCT). Elaborazione personale con QGIS.....</i>	51
<i>Figura 4.2-1: Valanga 18-030 – Pendenze del versante e suddivisione del bacino in zone di distacco, scorrimento, arresto. Fonte shapefiles (Catasto Valanghe Regionale SCT). Elaborazione personale con QGIS</i>	52
<i>Figura 4.2-2: Valanga 18-030 - Evento del 05-05-2008, zona di deposito, sulla destra l'alveo della Dora di Ferret ai piedi del pendio. Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT).....</i>	53
<i>Figura 4.2-3: Valanga 18-030 – Profilo longitudinale del versante. Fonte shapefiles (Catasto Valanghe Regionale SCT). Elaborazione personale con QGIS</i>	54
<i>Figura 4.2-4: Valanga 18-03 - Rappresentazione grafica del profilo longitudinale. Elaborazione personale con Excel</i>	54
<i>Figura 4.3-1: Valanga 18-030 - Copertura del suolo. Fonte shapefiles (CORINE Land Cover). Elaborazione personale con QGIS.....</i>	55
<i>Figura 4.3-2: Valanga 18-030 - Vegetazione nella zona di scorrimento. Foto: Giulia Venturato.....</i>	56
<i>Figura 4.3-3: Valanga 18-030 - Vegetazione della zona di distacco e scorrimento. Foto: Giulia Venturato... </i>	56
<i>Figura 4.4-1: Suddivisione del territorio regionale nelle quattro sottozone omogenee. Fonte (Centro Funzionale Regione Autonoma Valle d'Aosta)</i>	57
<i>Figura 4.4-2: Area di distacco definita per la taratura del modello a partire dell'evento del 18 febbraio 2006. Fonte shapefiles (Catasto Valanghe Regionale SCT). Elaborazione personale con QGIS.....</i>	61
<i>Figura 4.4-3: Correlazione fra quota e Hsmedio. Fonte (Barbolini & Ferro, 2005).....</i>	62
<i>Figura 4.4-4: Correlazione fra quota e DH3ggmedio. Fonte (Barbolini & Ferro, 2005).....</i>	63
<i>Figura 4.4-5: sottozone omogenee- Zona A e Zona B. Fonte (Barbolini & Ferro, 2005).....</i>	64
<i>Figura 4.4-6: Correlazione fra quota e Hsmedio per le due zone nivometriche "A" e "B". Fonte (Barbolini & Ferro, 2005)</i>	64
<i>Figura 4.4-7: Correlazione fra quota e DH3ggmedio per le due zone nivometriche "A" e "B". Fonte (Barbolini & Ferro, 2005).....</i>	65
<i>Figura 4.4-8: Curve di crescita regionale di Hs per il territorio valdostano, con riferimento alle tre differenti classi di quote. Fonte (Barbolini & Ferro, 2005)</i>	67
<i>Figura 4.4-9: Curve di crescita regionale di DH3gg per il territorio valdostano, con riferimento alle tre differenti classi di quote. Fonte (Barbolini & Ferro, 2005)</i>	67
<i>Figura 4.4-10: Sistema di riferimento Cartesiano per la schematizzazione della topografia Z(X,Y) e sistema di riferimento locale x,y,z. Fonte (Christen, Kowalski, & Bartelt, 2010)</i>	69

<i>Figura 4.4-11: Particolare dell'interfaccia dell'applicativo proposto dalla regione VDA, dati di input per calcolo di Hs e DH3gg. Fonte (Regione Autonoma Valle d'Aosta).....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 4.4-12: Particolare dell'interfaccia dell'applicativo proposto dalla regione VDA, dati di input per calcolo di Hd. Fonte (Regione Autonoma Valle d'Aosta).....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 4.4-13: Perimetrazione dell'area occupata dal bosco da inserire in RAMMS. Fonte shapefiles (Catasto Valanghe Regionale SCT). Elaborazione personale con QGIS.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 4.4-14: interfaccia di RAMMS per l'impostazione di tempo di ritorno e categoria di volume della valanga. Fonte: RAMMS 1.7.20.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 4.4-15: Prova 1 (taratura del modello) - visualizzazione 3D su RAMMS di area di distacco (area rossa), topografia, dominio di calcolo (contorno grande verde), vegetazione (contorni piccoli blu). Fonte: RAMMS 1.7.20.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 4.4-16: Prova 1 (taratura del modello) - Contour plot. Fonte: RAMMS 1.7.20.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 4.4-17: Prova 1 (taratura del modello) - Slope angle. Fonte: RAMMS 1.7.20.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 4.4-18: Prova 1 (taratura del modello) - Curvature plot. Fonte: RAMMS 1.7.20.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 4.4-19: Prova 1 (taratura del modello) - Distribuzione del parametro μ lungo il pendio. Fonte: RAMMS 1.7.20.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 4.4-20: Prova 1 (taratura del modello) - Distribuzione del parametro ξ lungo il pendio. Fonte: RAMMS 1.7.20.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 4.4-21: Prova 1 (taratura del modello) - Deposito. Fonte: RAMMS 1.7.20.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 4.4-22: Prova 1 (taratura del modello) – Confronto tra il deposito indicato dal Catasto Valanghe e quello ottenuto con RAMMS. Elaborazione personale con QGIS.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 4.4-23: Prova 1 (taratura del modello) – Pressioni d'impatto lungo la pista di fondo. Fonte: RAMMS 1.7.20.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 4.4-24: Prova 1 (taratura del modello) – Confronto tra le pressioni d'impatto ottenute con RAMMS e le aree definite dalla LR 11/98. Elaborazione personale con QGIS.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 4.4-25: Simulazioni ($H_d < H_{d0}$) – Confronto tra le impronte ottenute in RAMMS per valanghe di categoria medium. Elaborazione personale con QGIS.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 4.4-26: Simulazioni ($H_d < H_{d0}$) – Confronto tra le impronte ottenute in RAMMS per valanga di categoria medium e valanga di categoria small. Elaborazione personale con QGIS.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 4.4-27: Simulazioni ($H_d < H_{d0}$) – Confronto tra le impronte ottenute in RAMMS per valanga di categoria medium e valanga di categoria large. Elaborazione personale con QGIS.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 4.4-28: Parametri di attrito per le tre diverse categorie di volume utilizzate (large a sinistra, medium al centro e small a destra). Fonte: RAMMS 1.7.20.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 4.4-29: Simulazioni – Confronto tra le impronte ottenute in RAMMS per valanghe di categoria small, medium e large. Elaborazione personale con QGIS.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 4.4-30: Simulazioni – Confronto tra le pressioni ottenute in RAMMS per valanghe di categoria large e le aree definite dalla LR 11/98. Elaborazione personale con QGIS.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 4.5-1: Modello per la valutazione del rischio valanghe su strade. Fonte (Wilhelm, 1998).....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 4.5-2: Tratto della strada comunale La Palud oggetto di studio; a sinistra della strada si trovano la pista di fondo ed il percorso pedonale; sulla destra si trova il piazzale di Planpincieux; la valanga è in arrivo da sinistra. Fonte (Google Maps).....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 4.5-3: Posizione dei diversi rilevatori invernali del traffico nell'abitato di Courmayeur e lungo la strada Larzey (R6) e la strada La Palud (R7). Fonte (MIC Mobility In Chain, 2019-2020).....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 4.5-4: Postazione all'imbocco della Val Ferret (R7) lungo la strada La Palud: Fonte (MIC Mobility In Chain, 2019-2020).....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 4.5-5: Confronto dell'andamento dei flussi del traffico nei quattro giorni invernali di rilievo per le sette stazioni di misura. Fonte (MIC Mobility In Chain, 2019-2020).....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 4.5-6: Confronto della distribuzione oraria dei flussi nel giorno di picco invernale (a sinistra) ed estivo (a destra). Fonte (MIC Mobility In Chain, 2019-2020).....</i>	<i>100</i>

<i>Figura 4.5-7: Composizione dei flussi per categoria di veicoli. Fonte (MIC Mobility In Chain, 2019-2020)...</i>	101
<i>Figura 4.5-8: Larghezza del tratto di strada occupata dalla valanga nel caso di arresto sulla strada (Hd= 161 cm). Elaborazione personale con QGIS.....</i>	102
<i>Figura 4.5-9: Area di distacco nel caso di assenza di ponti da neve. Elaborazione personale con QGIS.....</i>	106
<i>Figura 4.5-10: Simulazione in assenza di ponti da neve – Confronto tra il deposito ricavato in presenza di ponti da neve (azzurro) e il deposito ricavato in assenza di ponti da neve (arancione). Elaborazione personale con QGIS.....</i>	107
<i>Figura 4.5-11: Elementi frangivento sulla cresta del Mont de La Saxe. Foto: Giulia Venturato</i>	108

INDICE DELLE TABELLE

<i>Tabella 4.1-1: Criteri di classificazione delle aree esposte al rischio valanghivo in funzione delle pressioni d’impatto dei fenomeni valanghivi. Fonte: DGR 422/1999</i>	40
<i>Tabella 4.4-1: Eventi storici per la valanga 18-030. Fonte dati (Regione Autonoma Valle d'Aosta). Elaborazione personale con Excel.....</i>	60
<i>Tabella 4.4-2: Classificazione delle valanghe in base alle dimensioni. Fonte (WSL - Istituto per lo studio della neve e delle valanghe SLF, 2017).....</i>	75
<i>Tabella 4.4-3: Prova 1 (taratura del modello) - Hs e DH3gg - dati di input e valori di output su applicativo proposto da regione VDA (Regione Autonoma Valle d'Aosta). Elaborazione personale con Excel.....</i>	80
<i>Tabella 4.4-4: Prova 1 (taratura del modello) - Hd - valori di input e output su applicativo proposto da regione VDA (Regione Autonoma Valle d'Aosta). Elaborazione personale con Excel</i>	80
<i>Tabella 4.4-5: Prova 1 (taratura del modello) - Riassunto dati di input. Elaborazione personale con Excel... ..</i>	81
<i>Tabella 4.4-6: Riassunto dei punti di arresto ottenuti nelle diverse simulazioni con valanghe appartenenti a diverse categorie di volume in RAMMS. Elaborazione personale con Excel.....</i>	85
<i>Tabella 4.5-1: Valori di rischio annuo tollerabile per pendii soggetti a fenomeni franosi. Fonte (Fell & Hartford, 1997)</i>	96
<i>Tabella 4.5-2: zone a diversi livelli di rischio accettabile per le aree residenziali in Islanda. Fonte (European Commission, 2009)</i>	96
<i>Tabella 4.5-3: Dati di input per il calcolo del numero medio di veicoli colpiti dalla valanga all’anno per lo scenario valanghivo considerato. Elaborazione personale con Excel.....</i>	103
<i>Tabella 4.5-4: Numero medio di veicoli colpiti dalla valanga all’anno per lo scenario valanghivo considerato. Elaborazione personale con Excel.....</i>	103
<i>Tabella 4.5-5: Dati di input per il calcolo del numero medio di morti all’anno a causa di impatto tra la valanga e i veicoli per lo scenario valanghivo considerato. Elaborazione personale con Excel</i>	104
<i>Tabella 4.5-6: Numero medio di morti all’anno a causa di impatto tra la valanga e i veicoli per lo scenario valanghivo considerato. Elaborazione personale con Excel</i>	104
<i>Tabella 4.5-7: Dati di input per la simulazione con RAMMS in assenza di ponti da neve. Elaborazione personale con Excel</i>	106
<i>Tabella 4.5-8: Numero medio di veicoli colpiti dalla valanga all’anno e numero medio di morti all’anno a causa di impatto tra la valanga e i veicoli per lo scenario valanghivo considerato in assenza di ponti da neve. Elaborazione personale con Excel.....</i>	107

1. Introduzione

La Val Ferret è una valle alpina che si trova sul versante italiano del massiccio del Monte Bianco, al confine tra Italia e Francia, in Valle d'Aosta. Per le sue caratteristiche orografiche e meteorologiche, le abbondanti precipitazioni nevose nella stagione invernale portano al frequente distacco di valanghe dalle pendici dei rilievi verso il fondovalle. L'area è molto frequentata durante tutto l'anno dai turisti, che in inverno praticano lo sci di fondo sulla pista ad anello che si sviluppa nel fondovalle o passeggiano lungo il percorso pedonale battuto sulla neve adiacente alla pista, con la possibilità di ristorarsi in varie strutture turistiche sparse lungo il percorso.

Esiste quindi un rischio valanghe per persone e cose. In questa tesi si è voluto analizzare in particolare il rischio per gli utenti della strada a bordo di veicoli in movimento. La strada presa in considerazione è la strada municipale La Palud, l'unico accesso alla valle; essa risale da Courmayeur e attraversa tutto il fondovalle fin sotto la testata della valle.

Dopo una prima parte introduttiva sulla formazione della neve, delle valanghe e di inquadramento del territorio studiato, sono state affrontate le principali fasi che compongono l'analisi di rischio per il fenomeno delle valanghe, ovvero:

- analisi dell'attività valanghiva pregressa;
- identificazione delle aree di distacco, scorrimento e arresto della valanga;
- analisi della dinamica valanghiva attraverso un modello bidimensionale;
- calcolo di un indice di rischio quantitativo.

Volendo valutare il rischio per gli utenti della strada, durante l'analisi storica, svolta grazie ai dati del Catasto Valanghe Regionale, si è ricercata la presenza di un evento arrestatosi sulla strada o in sua prossimità.

L'identificazione delle aree di distacco, arresto e scorrimento è stata effettuata attraverso l'analisi delle pendenze del versante e della vegetazione presente sul pendio.

La fase di studio della dinamica valanghiva è stata eseguita tramite l'utilizzo del software RAMMS, sviluppato dal centro di ricerca SLF di Davos, per la modellazione di valanghe radenti. Dapprima è stato tarato il modello di calcolo riproducendo un evento storico con caratteristiche di distacco e arresto note. È stato utilizzato per la taratura l'evento di interesse arrestato in prossimità della strada, in virtù delle informazioni riguardanti l'area di distacco e la zona di deposito raccolte su di esso, ipotizzando per esso un tempo di ritorno. I valori dei parametri nivometrici di progetto, come l'altezza di distacco, sono stati desunti dall'applicativo proposto dalla Regione Autonoma Valle d'Aosta.

Nel corso delle simulazioni seguenti è stata fatta variare l'altezza di distacco per ottenere una panoramica di distanze di arresto, ricercando in particolare l'arresto sulla strada.

Successivamente, avendo ottenuto l'arresto della valanga sulla strada a partire da un certo valore di altezza di distacco, è stato valutato il rischio per gli utenti della strada a bordo di veicoli attraverso il calcolo di un indice quantitativo. Essendo tale indice adatto a valutare l'efficienza delle misure di

protezione presenti sul pendio, il calcolo è stato eseguito due volte: dapprima è stata considerata la presenza (reale) di opere di protezione sul versante, successivamente è stato considerato il pendio naturale originale in assenza di opere di protezione.

Avendo ricavato, in relazione allo scenario valanghivo considerato, un valore di rischio non accettabile nonostante la presenza di opere di protezione sul versante, sono state brevemente richiamate le ulteriori misure di gestione del rischio in vigore sul territorio ed il loro effetto positivo sulla sicurezza delle persone ma anche negativo sull'economia della valle.

2. La neve e le valanghe

2.1 Origine della neve

La neve è acqua allo stato solido. Ad occhio nudo essa appare sotto forma di *fiocchi*, ma al microscopio si possono distinguere veri e propri cristalli di ghiaccio, la cui origine segue il processo di seguito descritto.

Dapprima, con il raffreddamento in atmosfera di masse di vapore acqueo si ha la formazione per condensazione di piccole goccioline d'acqua. Se nell'aria è presente un alto grado di umidità e vi è la presenza di polveri (di dimensioni variabili da 0.2 a 10 micron) provenienti dall'evaporazione dei mari, da particelle di origine vulcanica o da residui industriali, chiamate *nuclei di condensazione*, si ha la formazione delle nuvole (Praolini, Tognoni, Turrone, & Valt, 2021).

Affinchè le goccioline d'acqua diventino *cristalli di ghiaccio* è poi necessaria la presenza nell'aria di ulteriori particelle di polvere chiamate *nuclei di congelamento*, alle quali le goccioline si legano a partire da una temperatura di -12°C , per dare origine a *germi di ghiaccio*, particelle con struttura cristallina di forma esagonale.

In seguito, le dimensioni dei germi di ghiaccio aumentano rapidamente a causa dell'evaporazione di goccioline circostanti e della sublimazione del vapore acqueo rimanente sui germi. In base alla temperatura e al grado di umidità dell'aria la struttura esagonale di base del germe si trasforma e si può avere lo sviluppo di nuove parti sulle superfici, sui lati o sugli angoli del cristallo (*Figura 2.1-1*). A dimostrazione della varietà di trasformazioni possibili che possono subire i cristalli di ghiaccio sono stati catalogati più di 3000 tipi di cristalli diversi e 10 forme principali.

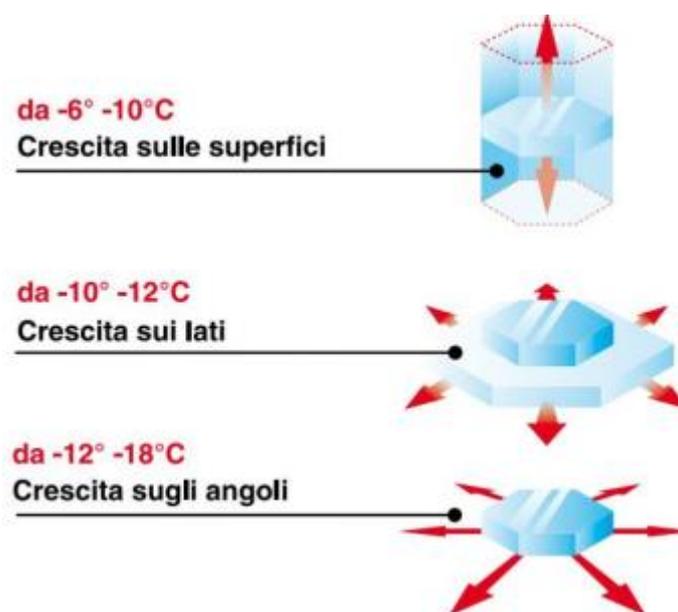


Figura 2.1-1: I diversi tipi di crescita a partire dal germe di ghiaccio in condizioni di temperature regolari.

Fonte: (Praolini, Tognoni, Turrone, & Valt, 2021)

Con l'aumento delle proprie dimensioni, i cristalli acquisiscono peso e precipitano al suolo. Se la temperatura fino al suolo è inferiore a -5°C , i fiocchi si depositano come neve leggera (da 50 a 100 kg/m^3) contenente molta aria. Se le temperature sono più miti (prossime a 0°C) al suolo giungono fiocchi più grossi, umidi e pesanti (da 100 a 200 kg/m^3).

Anche il vento agisce durante la caduta dei cristalli al suolo distruggendone la struttura e aumentando gli urti tra gli stessi. Al suolo quindi giungono cristalli frammentati o granuli compattati dal vento.

Con il susseguirsi delle precipitazioni la neve si deposita formando diversi strati, l'insieme dei quali è chiamato *manto nevoso*. Dal momento del deposito fino alla fusione primaverile del manto nevoso i cristalli subiscono trasformazioni continue dette *metamorfismi*.

I metamorfismi più importanti per la stabilità del manto nevoso sono quelli termodinamici, dovuti alle differenze di temperatura tra aria e suolo, i quali generano le trasformazioni maggiori nella struttura della neve (Giani, 2014).

2.2 Metamorfismi della neve

2.2.1 Metamorfismi della neve asciutta

Questa neve non contiene acqua allo stato liquido e i diversi tipi di metamorfismo dipendono dalla differenza di temperatura, presente tra gli strati del manto nevoso più superficiali e prossimi del contatto con l'aria (soggetti alla temperatura variabile dell'aria) e quelli profondi a contatto con il terreno (con temperatura sempre prossima a 0°C), chiamata *gradiente* (GT).

Se la temperatura dell'aria è inferiore a 0°C , si possono avere tre situazioni (Giani, 2014):

- Gradiente debole, se $\text{GT} < 0.05\text{ }^{\circ}\text{C/cm}$;
- Gradiente medio, se $0.05 < \text{GT} < 0.2\text{ }^{\circ}\text{C/cm}$;
- Gradiente forte, se $\text{GT} > 0.2\text{ }^{\circ}\text{C/cm}$.

Se c'è una bassa differenza di temperatura nel manto nevoso (gradiente debole), corrispondente ad una temperatura in superficie di poco inferiore a 0°C , i grani si arrotondano poiché le parti sporgenti evaporano e poi sublimano nelle parti concave (dimensioni dei grani intorno a 0.5 mm). Si creano così dei ponti di ghiaccio che portano i grani così smussati a saldarsi tra loro comportando un aumento di coesione della neve e una stabilizzazione del manto nevoso (*metamorfismo distruttivo*) (Praolini, Tognoni, Turrone, & Valt, 2021).

Se la differenza di temperatura nel manto nevoso è media (gradiente medio) e i grani sono recenti o arrotondati, a causa della temperatura superiore negli strati inferiori del manto, si crea un processo in cui i grani negli strati più profondi sublimano nella loro parte superiore e il vapore prodotto rigela alla base dei grani negli strati superiori, che aumentano le proprie dimensioni (da 0.5 ai alcuni mm), sviluppando facce piane e spigoli (grani a facce piane o sfaccettati); i grani così perdono coesione, ed il manto nevoso risulta instabile.

Infine, se la temperatura dell'aria è molto inferiore a 0°C e quindi vi è una differenza di temperatura nel manto nevoso forte e prolungata (gradiente forte), il processo di sublimazione e rigelo del caso precedente avviene in modo accentuato e porta alla formazione di *crystalli a calice* (poiché concavi). Essi sono grani ancora più grandi, che raggiungono la dimensione di alcuni mm, hanno una forma di piramide con gradini alla base, sono privi di coesione tra loro e possono essere causa di potenziale instabilità del manto nevoso (*metamorfismo costruttivo*).

2.2.2 Metamorfismi della neve umida

La neve umida si trova alla temperatura di 0°C ed è costituita da ghiaccio, aria e acqua allo stato liquido. È quest'ultima a governare la trasformazione dei grani che, con l'aumento di temperatura o a seguito di piogge, fondono nelle parti convesse e rigelano presso le parti concave, portando alla formazione di grani rotondi che aderiscono gli uni agli altri per la presenza di acqua alle interfacce (*metamorfismo distruttivo*) (Praolini, Tognoni, Turrone, & Valt, 2021).

Se però la neve è satura di acqua (periodo primaverile), quest'ultima perde il suo ruolo coesivo portando la neve a comportarsi come un liquido denso e al possibile distacco di valanghe. Quando la temperatura diminuisce, il manto torna stabile poiché l'acqua gela nuovamente ricompattando i grani gli uni agli altri attraverso ponti di ghiaccio.

La fusione dei grani per temperature dell'aria superiori a 0°C dovute a radiazione solare, irraggiamento geotermico o vento portano alla progressiva scomparsa del manto nevoso (*metamorfismo da fusione*).

2.2.3 L'azione del vento

Anche il vento svolge un ruolo importante nell'evoluzione del manto nevoso, secondo tre possibili modalità (Praolini, Tognoni, Turrone, & Valt, 2021). Se la velocità del vento è bassa (circa 4 m/s), il vento trasporta in modo radente alla superficie i grani che si arrotondano e smussano le irregolarità del manto nevoso (*trasporto per rotolamento*). Se si ha una sufficiente velocità del vento, i grani sono trasportati ad un'altezza tra 10 cm e 1 m da terra, andando a formare accumuli localizzati di neve (*saltazione*). Infine, se la velocità del vento è elevata, i grani sono trasportati dalla turbolenza muovendosi in nuvole anche a centinaia di metri d'altezza; ciò può causare fenomeni intensi di erosione e accumulo di neve in punti del pendio con diversa esposizione alle correnti (pendii vicini alle creste, nei canali, nelle conche e in corrispondenza dei cambi di pendenza).

2.3 La stabilità del manto nevoso

Per *manto nevoso* si intende la combinazione di aria e neve che compone gli strati depositati al suolo dopo la precipitazione dei cristalli di ghiaccio formati in atmosfera.

Il manto nevoso varia la propria struttura nel tempo, a causa delle mutevoli condizioni fisiche e climatiche in cui si trovano i cristalli di ghiaccio, che quindi si trasformano. Di conseguenza le caratteristiche fisiche, meccaniche e la stabilità del manto nevoso evolvono nel tempo; il manto nevoso, all'apparenza simile ad un corpo rigido, si comporta quindi come un fluido viscoso molto denso (Praolini, Tognoni, Turroni, & Valt, 2021).

Esso può essere soggetto a sollecitazioni di compressione, trazione e di taglio; gli effetti di tali sollecitazioni però dipendono dalla velocità con cui esse agiscono sul manto nevoso. Se una sollecitazione è applicata lentamente il manto nevoso è in grado di assorbirla e dissiparla generando delle deformazioni viscosi; se invece la sollecitazione è applicata velocemente si creano fratture elastiche che possono destabilizzare il manto nevoso (Praolini, Tognoni, Turroni, & Valt, 2021).

La compressione applicata lentamente infatti, come nel caso di una nuova nevicata, provoca generalmente un assestamento (stabilizzazione) del manto nevoso, mentre la stessa applicata in breve tempo (con il passaggio di uno sciatore, ad esempio) può innescare una valanga.

Le sollecitazioni lente possono provocare, oltre all'assestamento, anche lo scorrimento tra diversi strati di neve e lo slittamento dell'intero manto nevoso rispetto al pendio.

Se si analizza la stabilità del manto nevoso su un piano inclinato, si possono individuare tutte le componenti agenti o resistenti in gioco, legate alla forza di gravità (*Figura 2.3-1*). La componente della forza peso parallela al pendio rappresenta l'azione destabilizzante favorevole al movimento lungo il piano inclinato, la cui intensità dipende quindi dalla pendenza del versante e dallo spessore del manto nevoso. La resistenza al moto è fornita invece dall'attrito con il piano di scivolamento, che può essere sia il manto nevoso stesso sia la superficie del pendio.



Figura 2.3-1: Equilibrio del manto nevoso sul piano inclinato. Fonte (Praolini, Tognoni, Turroni, & Valt, Le valanghe, 2019)

Si può quindi descrivere l'equilibrio del manto nevoso attraverso il *grado di stabilità* (S), definito come il rapporto tra le forze resistenti (R) e quelle favorevoli al moto (T):

$$S=R/T$$

In base all'intensità di R e T si avrà una condizione di stabilità quando $R > T$ ($S > 1$); viceversa avverrà il movimento e quindi una valanga se $R < T$ ($S < 1$). Nel caso in cui si abbia $R = T$, vi sarà una condizione di equilibrio precario.

Nella realtà, non essendo un corpo rigido, il manto nevoso esso può essere soggetto a sollecitazioni e deformazioni differenti in punti diversi del pendio. La stabilità del manto nevoso è quindi un problema complesso influenzato da molteplici fattori, a cominciare dalle caratteristiche del pendio, tra le quali vi sono la quota, l'esposizione, la pendenza e la tipologia di vegetazione.

2.4 Le valanghe

Secondo l'European Avalanche Warning Services (EAWS) una *valanga* è un movimento rapido di una massa nevosa, con volume superiore a 100 m^3 e una lunghezza maggiore di 50 m.

Essa si genera, a seguito di un periodo di precipitazione nevosa, a causa delle diverse sollecitazioni a cui è soggetto nel tempo il manto nevoso.

Anche se EAWS identifica tutte le valanghe attraverso un'unica definizione, la Commissione Internazionale su Neve e Valanghe dell'Unesco ha redatto nel 1981 una prima classificazione di tipo morfologico, poi rielaborata nel 1981 dall'International Commission on Snow and Ice (ICSI), per permettere di descrivere ciascun evento attraverso le molteplici caratteristiche individuabili dall'osservazione dell'evoluzione dei fenomeni nelle *zone di distacco*, *scorrimento* e *arresto* (Figura 2.4-1) (Giani, 2014).



Figura 2.4-1: Aree di distacco, scorrimento e arresto di una valanga. Fonte (Praolini, Tognoni, Turrone, & Valt, Le valanghe, 2019)

Innanzitutto, la *zona di distacco* è la porzione di pendio da cui ha origine il fenomeno valanghivo, dove cioè si accumula la neve a seguito di precipitazioni o trasporto eolico, normalmente al di sopra del limite della vegetazione. In genere ha una pendenza superiore ai 30°, poiché per pendenze minori il manto nevoso risulta meno suscettibile al distacco.

La *zona di scorrimento* è la parte di pendio in cui la valanga scorre verso valle senza arrestarsi e può erodere il manto nevoso trascinando nuova neve nel proprio moto; essa dunque è caratterizzata da un'elevata pendenza (qui si raggiunge la massima velocità della valanga), e vegetazione scarsa o comunque differente rispetto alle aree circostanti.

Infine, a valle della zona di scorrimento, la *zona di arresto* si trova in corrispondenza di una diminuzione della pendenza del versante, in quanto qui si ha un progressivo rallentamento della valanga fino all'arresto; può essere un ripiano, un fondovalle o il versante opposto di una valle. In questa zona è frequente la presenza di *elementi a rischio* (strutture, infrastrutture, ecc) (Praolini, Tognoni, Turroni, & Valt, 2019).

Di seguito sono riportati i criteri per la classificazione delle valanghe individuabili nelle tre zone appena descritte (Giani, 2014):

- Zona di distacco:
 - o Tipo di distacco: può essere puntiforme se la valanga si origina da un punto del pendio (*a debole coesione*), oppure lineare se si origina da una linea spezzata più o meno estesa sul pendio (*lastroni*); si può distinguere inoltre tra lastroni soffici o duri;
 - o Posizione della superficie di slittamento: si può riconoscere se la valanga ha coinvolto l'intero manto nevoso scorrendo lungo il pendio sul terreno (*valanga di fondo*) o se la superficie di scivolamento si è creata tra diversi strati del manto nevoso (*valanga di superficie*); si può inoltre distinguere tra valanga di superficie con rottura in neve fresca o in neve vecchia;
 - o Contenuto di acqua della neve: se presente, si tratta di *neve umida*; se assente, di *neve asciutta* (la prima caratterizza in genere valanghe a lastroni, la seconda le valanghe nubiformi);

- Zona di scorrimento:
 - o Forma del percorso: se la valanga si sviluppa in un canale è detta *incanalata*, se interessa un versante aperto è detta *di versante*;
 - o Tipo di movimento: se la valanga si muove a contatto con il suolo è definita *radente*, se invece si genera una nube di neve e aria è definita *nubiforme*; si possono avere entrambe le situazioni nel caso di *valanga mista*.

- Zona di arresto:
 - o Rugosità superficiale del deposito: se l'accumulo finale è disgregato caratterizzato da elementi di neve e ghiaccio a grana fine esso è definito *deposito minuto*; se al termine dell'evento si sono formati blocchi di neve di dimensioni macroscopiche è definito *deposito grossolano*; si può inoltre distinguere tra deposito a grana grossa con blocchi angolosi o arrotondati;

- o Contenuto di acqua del deposito: se presente, si tratta di *deposito secco*; se assente, si tratta di *deposito umido*;
- o Inquinamento del deposito: se l'accumulo è costituito da sola neve, è definito *deposito pulito*, se l'accumulo contiene anche materiali diversi dalla neve è definito *deposito sporco*; tra i materiali presenti si può distinguere tra inerti (roccia, sassi, terriccio), vegetazione (rami, alberi) e rottami di manufatti.

Il distacco delle valanghe può essere dovuto a molteplici cause, che possono essere naturali, come l'azione del sole, del vento, di nuove precipitazioni e di variazioni climatiche, oppure antropiche.

Tuttavia, si possono individuare range di valori di pendenze del versante caratteristici di alcune tipologie di valanghe (*Figura 2.4-2*) (Praolini, Tognoni, Turroni, & Valt, 2019).

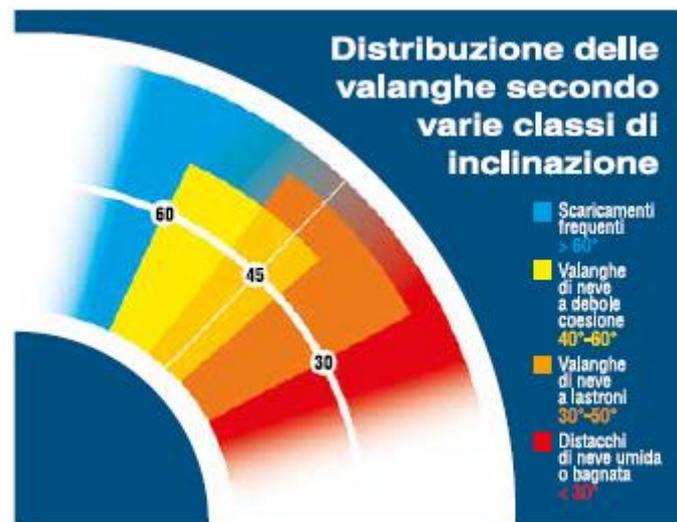


Figura 2.4-2: Distribuzione delle valanghe secondo varie classi di inclinazione del pendio. Fonte (Praolini, Tognoni, Turroni, & Valt, Le valanghe, 2019)

Le *valanghe di neve umida* possono verificarsi nel periodo primaverile (durante la fusione della neve) o in inverno (a seguito di piogge dopo un periodo di disgelo). La presenza di acqua liquida conferisce alla neve una elevata densità (tra i 300 e i 400 kg/m³) e una temperatura di 0°C; dunque queste valanghe, innescate a seguito di un forte rialzo termico, avvengono frequentemente anche a pendenze inferiori a 30°, portate a valle dal loro stesso peso a bassa velocità (30-50 km/h). Una volta innescate con distacco lineare o puntiforme, esse seguono le forme del pendio trascinando a valle il materiale che incontrano lungo la discesa e lasciando incisioni sul versante come tracce del proprio passaggio.

I *lastroni* si formano invece quando vi sono diversi strati nel manto nevoso caratterizzati da una coesione tale da permettere la trasmissione delle sollecitazioni a grande distanza e contemporaneamente c'è uno scarso legame tra questo strato e lo strato inferiore. Queste valanghe, facilmente innescate dal passaggio di uno sciatore, sono dunque caratterizzate da un distacco lineare più o meno esteso e possono essere di superficie o di fondo, se il lastrone comprende l'intero manto nevoso. L'azione del vento è importante nella formazione di lastroni

caratterizzati da una densità elevata (superiore 200 kg/m^3), tuttavia essi possono anche essere costituiti da neve soffice con densità prossima a 100 kg/m^3 . Per questo le valanghe a lastroni si formano in prevalenza su versanti con pendenza compresa tra i 30° e i 50° raggiungendo alte velocità in poco tempo; i lastroni possono frantumarsi lungo il percorso e originare *valanghe nubiformi*.

Le *valanghe di neve a debole coesione* necessitano di pendii molto acclivi, con pendenze comprese tra 40° e i 60° , poiché l'innescò proviene dal movimento iniziale di poche particelle di neve incoerente che trascinano durante la discesa nuova neve. Possono originarsi da neve polverosa (con densità inferiore a 100 kg/m^3 e temperatura inferiore a 0°C) o da neve umida (densità tra i 300 e i 500 kg/m^3 e temperature prossime a 0°C). Raggiungono solitamente una larghezza inferiore rispetto alle valanghe a lastroni e se il pendio non è abbastanza ripido percorrono distanze molto brevi.

Se la valanga raggiunge una forte velocità, la neve della parte radente si mescola all'aria formando una nube di particelle che raggiunge altezze di alcune decine di metri. Questa nuvola, procedendo dritta verso valle a velocità elevatissima, raggiunge distanze di arresto assai superiori rispetto alle valanghe radenti. I danni indotti da queste valanghe sono dovuti anche all'onda di pressione che si genera durante lo sviluppo del fenomeno. Queste valanghe, chiamate *nubiformi*, si originano spesso dalla frantumazione di lastroni lungo un pendio.

Generalmente, durante gli eventi osservabili sono presenti sia una componente radente sia una componente nubiforme, formata dalle particelle più leggere e comunque alimentata durante la fase di scorrimento.

2.5 Interferenza valanghiva con aree antropiche

Nel tempo sono state sviluppate diverse soluzioni per la difesa del territorio dalle valanghe. Tra i più antichi sistemi impiegati si possono individuare le *opere di protezione* nell'area di deposito, che con la propria struttura arginano fisicamente i fenomeni proteggendo i centri abitati dall'impatto di valanghe; successivamente, di pari passo alla nascita del concetto di *prevenzione*, si è diffusa la realizzazione di opere anche nella zona di distacco.

A livello organizzativo, con l'evoluzione nel tempo del sistema di protezione civile, sono state predisposte e affinate le procedure per la previsione e gestione del rischio valanghe attraverso la creazione di organi tra loro coordinati, sempre più capillari sul territorio.

Negli ultimi anni si è posta anche maggiore attenzione alla funzione protettiva delle foreste, attraverso la promozione di tecniche selvicolturali volte alla loro valorizzazione e conservazione.

Dal campo delle innovazioni tecnologiche invece, sempre più consolidato e diffuso nei territori montani è il *distacco artificiale di valanghe*, una misura temporanea per la messa in sicurezza di territori a rischio.

Lo sviluppo di questi sistemi segue di pari passo l'esigenza di un maggiore controllo dei fenomeni valanghivi; la presenza di uno di essi non preclude quella di altri, è anzi auspicabile la compartecipazione di diverse soluzioni per ottenere la maggiore protezione possibile per il territorio.

2.5.1 Organizzazione delle strutture di protezione civile in campo valanghivo

Dal momento che le aree montane sono abitate e frequentate dall'uomo, è probabile che durante un evento valanghivo si verifichi l'interferenza tra la valanga e gli elementi antropici. L'interazione con l'uomo può potenzialmente avvenire in qualsiasi punto del pendio, in base alla presenza di persone nella zona pericolosa, mentre elementi fissi come strutture ed infrastrutture si trovano solitamente, ma non necessariamente, in prossimità delle zone di arresto delle valanghe.

Per questo, a livello urbanistico i comuni dei territori montani redigono i P.Z.E.V. (*Piani delle Zone Esposte al Pericolo di Valanghe*), carte a grande scala, variabile da 1:5000 a 1:2000 che individuano per ogni sito valanghivo diverse aree corrispondenti a diversi livelli di pericolo (*Figura 2.5-1*).

Tali carte, previa approvazione delle regioni di competenza, costituiscono parte integrante del Piano Regolatore Generale del Comune (P.R.G.C.) e vengono utilizzate nella pianificazione urbanistica del territorio per la prevenzione del pericolo di valanghe su strutture ed infrastrutture, poiché ad ogni livello di pericolo corrispondono sia trasformazioni, interventi, usi e attività consentiti sia prescrizioni e divieti.

Per quanto riguarda la Valle d'Aosta, è sancito l'obbligo di individuare a livello comunale le aree esposte al pericolo valanghe nell'art. 37 della LR 11/1998 *Normativa urbanistica e di pianificazione territoriale della Valle d'Aosta*, mentre i criteri per la definizione delle zone esposte al pericolo di valanghe o slavine sono contenuti nel capitolo IV della D.G.R. 422/1999, *Disposizioni attuative L.R. 11/1998* e s.m.i..

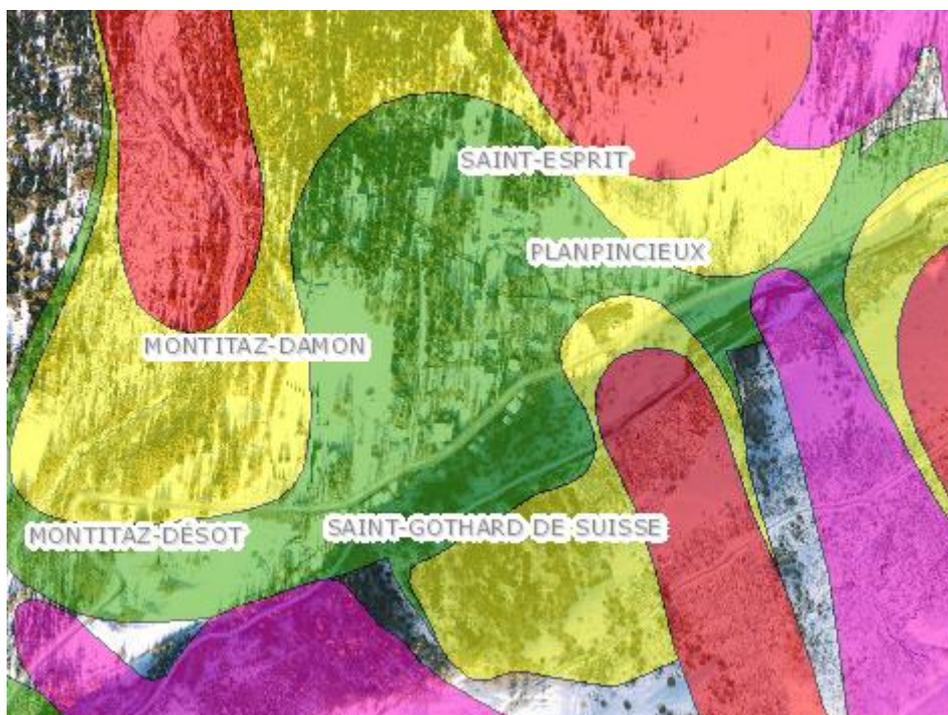


Figura 2.5-1: Ambiti inedificabili nei riguardi del pericolo di valanghe per la località di Planpincieux (Comune di Courmayeur) come definito dall'art. 37 della LR 11/1998, estratto dal Geoportale Sistema delle Conoscenze Territoriali SCT (Regione Autonoma Valle d'Aosta)

La problematica valanghiva assume rilevanza diversa nelle diverse regioni italiane e per questo c'è eterogeneità anche nelle modalità di gestione del rischio. In generale a livello comunale o di comunità montana la gestione del rischio valanghivo è operata dai *Dipartimenti locali di Protezione Civile*, i quali si appoggiano alla rete dei *Centri Funzionali* regionali, alle agenzie AINEVA e Meteomont (Dipartimento di Protezione Civile, AINEVA, 2007).

In quasi tutte le regioni dell'arco alpino sono attive anche le *Commissioni Locali Valanghe* (CLV), organi collegiali formati da soggetti esperti della specifica area geografica e competenti in materia di neve e valanghe; esse si occupano della previsione dei fenomeni valanghivi e della determinazione del livello di criticità a scala locale, svolgendo attività di consulenza e supporto al sindaco (autorità locale di protezione civile), nelle fasi di monitoraggio e intervento. Queste commissioni, valutati gli scenari di evento significativi a livello comunale e le attività di controllo, monitoraggio, e previsione del rischio, collaborano con l'amministrazione comunale alla predisposizione dei *Piani di Emergenza Valanghe* (PCEV).

I provvedimenti che il sindaco può attivare in situazioni di emergenza, sentita la Commissione Locale Valanghe, possono comprendere (Dipartimento di Protezione Civile, AINEVA, 2007):

- Divieti parziali o totali di circolazione;
- Ordini di allontanamento da luoghi o beni con presenza di persone;
- Evacuazione, confinamento di persone verso luoghi sicuri;
- Esecuzioni di interventi gestionali quali il distacco artificiale;
- Divieti di svolgimento di particolari attività relative a zone pericolose (ad esempio, attraverso la chiusura degli impianti sciistici).

2.5.2 Distacco artificiale di valanghe

Il *distacco artificiale di valanghe* consiste nell'innesco volontario, generalmente attraverso un esplosione, di valanghe in condizioni controllate, allo scopo di prevenire il distacco nella medesima area di masse elevate di neve in grado di causare danni a persone e cose.

Per quanto riguarda la messa in sicurezza di comprensori sciistici e vie di comunicazione, le procedure da seguire (monitoraggio delle condizioni nivometeorologiche, modalità di distacco, ecc.) vengono definite all'interno di appositi *Piani di Intervento per il Distacco Artificiale di Valanghe* (PIDAV) (Bruno, Maggioni, Freppaz, & Zanini, 2012). Questi vengono predisposti per aree geografiche ben definite, nelle quali vengono individuati e studiati tutti i bacini valanghivi potenzialmente pericolosi per la zona da proteggere. Tale documentazione viene redatta dal sindaco con il supporto dell'organo di protezione civile operante a livello locale (Dipartimento di Protezione Civile o la Commissione Locale Valanghe) e viene poi recepita dalla regione di competenza.

Le operazioni di distacco artificiale vengono svolte previa l'evacuazione delle aree interessate, ma in questo caso la durata del provvedimento è legata a quella delle operazioni di messa in sicurezza della zona. Comportano esse stesse un rischio per gli operatori impiegati, dunque è necessario che

il personale sia qualificato e riceva adeguata formazione e informazione, venga dotato di adeguati Dispositivi di Protezione Individuale e che sia previsto un efficiente sistema di comunicazione tra gli addetti.

2.5.3 Foreste di protezione

Le foreste svolgono una importante funzione stabilizzante e costituiscono una difesa “naturale” per il territorio stesso e per persone e beni. Per quanto riguarda in particolare il distacco di valanghe, le foreste frenano, disperdono il flusso e abbattano il potenziale distruttivo delle valanghe attraverso il passaggio e gli urti contro gli alberi, che fungono da elementi di deviazione. La Regione Valle d’Aosta in merito a ciò ha collaborato con il progetto *Gestione sostenibile delle foreste di montagna a funzione protettiva*”, svoltosi nel periodo 2003-2006 grazie al Programma di Iniziativa Comunitaria Interreg III A Italia-Francia (Alcotra) 2000-2006.

Sono state quindi individuate sul territorio regionale le *foreste di protezione* nei confronti del distacco di valanghe, dell’erosione superficiale e regimazione delle acque; in aggiunta le foreste che si trovano a monte di insediamenti umani o vie di comunicazione sono chiamate *foreste di protezione diretta*. Per queste categorie di foreste sono quindi promosse attività per la gestione ottimale delle foreste e modalità di intervento selvicolturali (Regione Autonoma Valle d’Aosta, 2006).

2.5.4 Misure strutturali

Le *misure strutturali* sono opere che vengono posizionate sul pendio nelle aree di distacco, scorrimento e arresto e possono svolgere funzioni di prevenzione o di protezione del rischio.

Tra le *misure di prevenzione*, nella zona di distacco si adoperano le *opere di sostegno*, il cui scopo è quello di neutralizzare i movimenti del manto attraverso una barriera ancorata al terreno; la neve così si accumula ed il manto nevoso si consolida su questi sostegni. Tali opere dunque prevenono il distacco di valanghe, ostacolando il verificarsi dell’evento. Tra queste si annoverano *reti*, *rastrelliere*, *ponti* in legno o acciaio, posti su una o più linee parallele per favorire l’assestamento del manto nevoso nella zona di distacco (*Figura 2.5-2*).

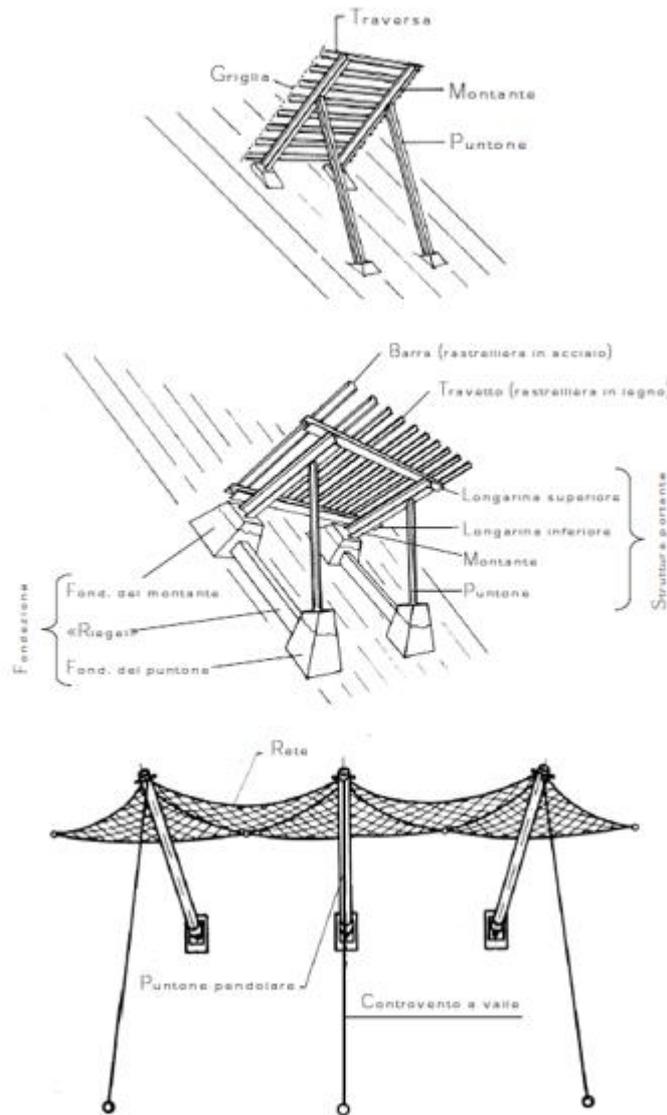


Figura 2.5-2 Dall'alto, ponte da neve, rastrelliera da neve, rete da neve. Fonte (Margreth, 2007)

Un elemento che gioca un ruolo fondamentale nel distacco di valanghe è il vento, che trasporta la neve sulle creste e sui crinali e porta alla formazione di accumuli o *cornicioni* di neve che possono in seguito distaccarsi o aggravare le condizioni di stabilità del manto nevoso. Per contrastare ciò vengono posizionati in prossimità delle zone di distacco *deflettori*, ulteriori opere per la prevenzione dei distacchi che influenzano con la loro forma la direzione del vento ed evitano il deposito di neve in zone critiche (Figura 2.5-3); tra gli elementi frangivento si trovano *pareti*, *tavolati*, *barriere* e *ombrelli*, i quali influenzano il deposito della neve.



Figura 2.5-3: Barriere frangivento. Foto: Giulia Venturato

Le *misure strutturali di protezione* hanno lo scopo di deviare, arginare e mitigare gli effetti di una valanga in corso con lo scopo di proteggere il territorio dai danni provocati da essa (*difesa passiva*).

Nella zona di scorrimento vengono realizzate *opere di deviazione*, manufatti in grado di contrastare le pressioni e modificare il percorso naturale della valanga deviandone il flusso da elementi a rischio; agiscono mediante la deviazione, il contenimento o la ripartizione del flusso in più parti con minor potere distruttivo.

Le strade di montagna, che spesso attraversano ripidi pendii su cui scendono le valanghe, sono invece protette con le gallerie paravalanghe, in modo tale che il flusso oltrepassi la strada e prosegua verso valle senza arrecarle danni.

Nella zona di deposito ci possono essere *opere frenanti e di arresto*. Le *opere frenanti* (*cunei, speroni*) favoriscono il rallentamento della valanga provocando l'espansione laterale del flusso attraverso ripetuti urti e deviazioni. Le *opere di arresto*, come le *dighe di contenimento* e i *terrapieni di arresto*, sono poste perpendicolarmente al flusso per resistere alle sollecitazioni della valanga e per arrestarla, accumulandone il materiale a monte.

3. Area di studio

3.1 Inquadramento generale dell'area di studio



Figura 3.1-1: La Val Ferret vista da Sud dalla cresta del Mont de La Saxe. Foto: Giulia Venturato

La Val Ferret è una valle alpina ai piedi del massiccio del Monte Bianco, in alta Valle d'Aosta, nel comune di Courmayeur. Essa è, insieme alla Val Veny, il limite geografico orientale del massiccio e segna il confine tra le Alpi Graie a Ovest e le Alpi Pennine a Est. Ha l'aspetto tipico di una valle glaciale dall'ampio fondovalle, lunga circa 13 km e si sviluppa in direzione Sud Ovest-Nord Est tra le quote 1360 e 4201 m s.l.m., coprendo una superficie di 3261 km².

Nel fondovalle scorre la Dora di Ferret, che nasce dal ghiacciaio di Pré de Bar a 2714 m s.l.m. sul monte Tête de Ferret e si unisce nella zona di Entreves con la Dora di Veny, dando origine alla Dora Baltea.

In testata il monte Dolent, Col Ferret e punta Allobrogia segnano il confine con la Svizzera a Nord, mentre in orografica destra il gruppo del Monte Bianco separa la valle dalla Francia. In orografica sinistra la valle è separata dalla Valle del Gran San Bernardo e dalla val Sapin da cime minori quali Gran Golliat, Gran Rochere e Mont de la Saxe.

Le creste del Monte Bianco corrono più vicine al margine meridionale del massiccio (italiano) rispetto a quello settentrionale (francese), per cui c'è una forte asimmetria tra il versante destro della valle, caratterizzato da pendii rocciosi molto ripidi e il versante opposto, con pendii più dolci ricoperti di vegetazione (*Figura 3.1-1*).

Nel fondovalle sono presenti alcuni insediamenti, nati come nuclei di alpeggio e oggi riconvertiti a funzioni turistiche. Risalendo la valle si incontrano Chapy, Mayen, Mayencet, Plampincieux, Tronchey, Freboudze, Lavachey, ArpNouvaz, Pré-de-Bar.

L'accesso è consentito tramite una strada comunale che risale il fondovalle fino alla località Arp Nouvaz. In prossimità dell'imbocco della valle presso Entreves l'autostrada A5 termina in corrispondenza dell'ingresso del traforo del Monte Bianco che collega Italia e Francia.

Nella zona in inverno si praticano sci nordico, sci alpinismo ed escursionismo, nella stagione estiva le attività sono più diversificate. Il massiccio del Monte Bianco offre agli appassionati di alpinismo lo scenario perfetto per ascensioni avventurose. Le escursioni a piedi o in mountain bike permettono di esplorare ed ammirare le numerose bellezze naturali degli ambienti alpini, dagli imponenti ghiacciai agli ambienti umidi del fondovalle, tutelati a livello comunitario europeo.

L'offerta turistica comprende un golf club, un centro ippico, una riserva per la pesca sportiva, due campeggi e numerose strutture ricettive per il ristoro e il pernottamento.

Di seguito si espongono brevemente gli aspetti riguardanti la morfologia, l'idrogeologia, i ghiacciai, il clima e la vegetazione della valle.

3.2 Aspetti geomorfologici

La val Ferret si sviluppa in modo rettilineo: risalendo il fondovalle, vi è un primo dislivello (220 m) tra l'imbocco della valle a Entreves (1306 m s.l.m.) e la località principale Planpincieux (1590 m s.l.m.), a cui segue un pianoro erboso che si protrae oltre il vallone Armina fino alla località Lavachey. Qui un altro salto morfologico di 50 m in corrispondenza dei boschi di Frebouze è seguito da una zona paludosa in leggera discesa fino ai boschi di Arnouva, dove termina il fondovalle ed i versanti si fanno ripidi fino al Col Ferret, testata della valle (Pierantonio & Vezzoli, 1995).

La valle è disposta in direzione SO-NE conformemente alla direzione del Fronte Pennidico, il quale localmente corre lungo la Val Sapin, per poi passare tra Testa Bernarda e Tête de La Tronche e raggiungere il confine con la Francia in corrispondenza di Tête de Ferret (*Figura 3.2-1*).

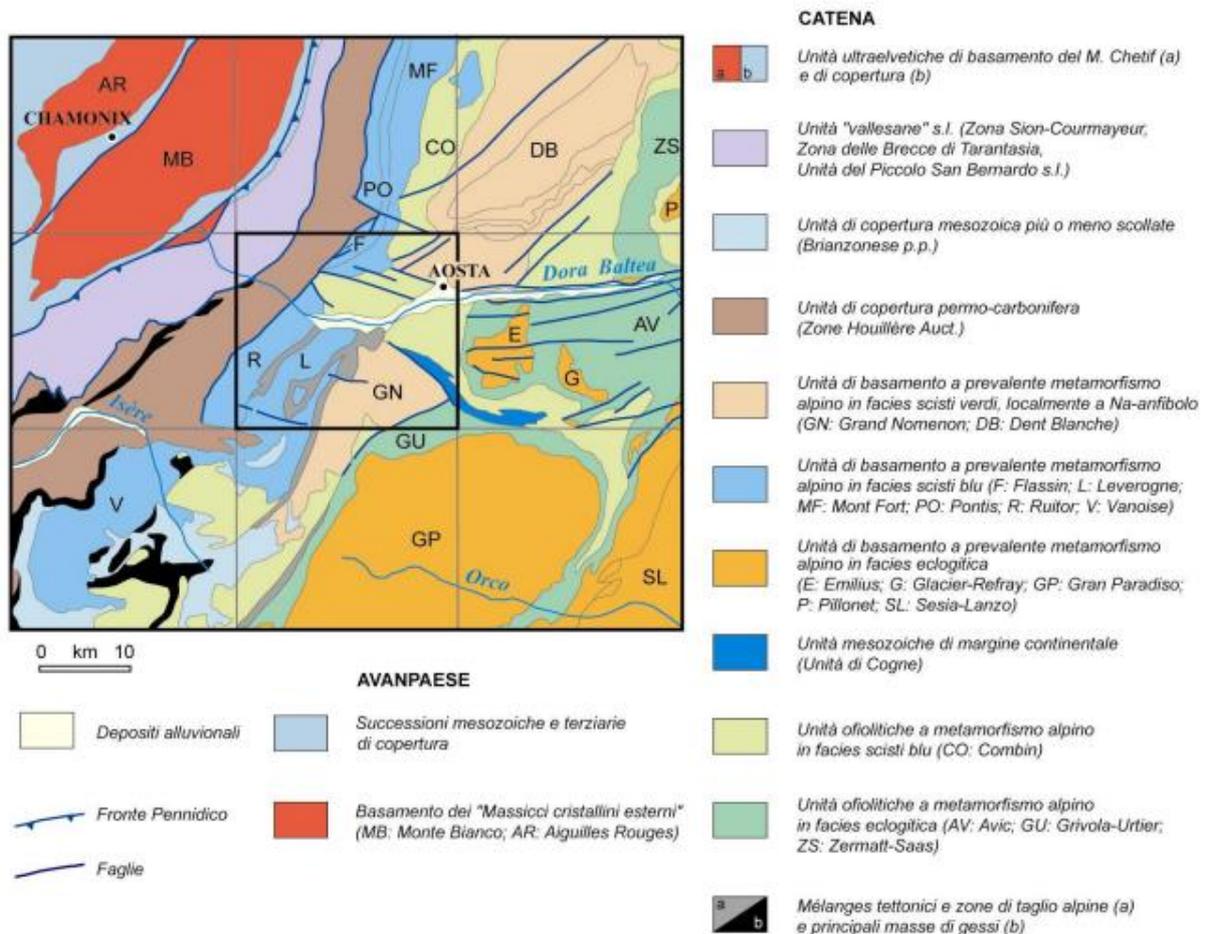


Figura 3.2-1: Inquadramento tettonico-metamorfico dell'area del Foglio Aosta nelle Alpi nord-occidentali. L'area di studio si colloca nel riquadro centrale in alto. Fonte (ISPRA, Note illustrative della Carta Geologica d'Italia)

Il Fronte Pennidico divide il dominio elvetico e ultra elvetico a Nord del fronte dal dominio nord-Pennidico, con la falda Sion-Courmayeur e l'unità di Ferret a Sud del fronte.

In Val Ferret, in destra orografica dominano, come substrato roccioso affiorante, il granito e gli scisti del Monte Bianco (basamento cristallino del dominio elvetico), mentre in sinistra orografica e nel fondovalle si trova la copertura quaternaria, costituita da deposito indifferenziato di rocce metamorfiche (ISPRA).

Il profilo trasversale della valle mostra un fondovalle relativamente ampio e una forte asimmetria tra il versante destro, caratterizzato da elevate pendenze, e il versante sinistro, più dolce e con valloni laterali.

La morfologia della valle è legata principalmente all'azione erosiva del ghiacciaio della Dora, generato dall'unione dei ghiacciai del Monte Bianco, del Gran Paradiso e della Valpelline, nel corso degli ultimi episodi di espansione glaciale e nell'ultimo episodio in particolare (25000-11500 anni B.P.). Di tale ghiacciaio rimane oggi traccia nei tanti ghiacciai sospesi in alta quota sul Monte Bianco.

In destra orografica della Val Ferret, si possono oggi ammirare una decina di ghiacciai. In prossimità della testata della valle il ghiacciaio Prè de Bard, che si sviluppa dall'ampio circo posto fra l'Aiguille

de Triolet (3874 m s.l.m.) e il Mont Dolent (3819 m s.l.m.), forma una stretta seraccata sul salto morfologico tra le quote 2600 e 2300 m s.l.m., e si conclude con una lunga lingua di ablazione valliva. Rimane separato tramite il gruppo dei Monts Rouges de Triolet dall'omonimo ghiacciaio di Triolet. Questo è circondato dalle cime Aiguille de Triolet e Mont Gruetta (i cui versanti meridionali ospitano i ghiacciai Gruetta Orientale e Occidentale e una parte del ghiacciaio Frebouze).

Sul versante sud del Dente del Gigante i ghiacciai Tronchey e Praz Sec, il ghiacciaio Grandes Jorasses, il ghiacciaio di Planpincieux, il ghiacciaio Rochefort dominano, insieme al ghiacciaio del Mont Frety, la parte bassa della Val Ferret.

Le dimensioni delle singole masse glaciali, la litologia, l'assetto strutturale dell'ammasso roccioso e l'attività tettonica insieme hanno determinato l'elevata capacità erosiva e l'approfondimento delle valli (ISPRA).

L'azione dei corsi d'acqua alimentati dai ghiacciai influisce invece con l'incisione ulteriore dei versanti laterali e il trasposto solido, riscontrabile nei numerosi conoidi alluvionali del fondovalle. (Giardino & Ratto, 2005).

Oltre ai depositi risalenti all'ultima grande espansione glaciale del Pleistocene superiore, si possono osservare anche apparati morenici legati ad avanzate tardoglaciali; un esempio è rappresentato dalla morena in Planpincieux (ISPRA).

Il glacialismo influisce anche in modo indiretto sulla dinamica dei versanti attuali per l'effetto protratto nel tempo del rilascio della pressione delle masse glaciali conseguente al loro ritiro. In orografica destra, dalle pareti rocciose del massiccio del Monte Bianco, sono infatti registrati numerosi fenomeni gravitativi come crolli, ribaltamenti e colamenti rapidi (Giardino & Ratto, 2005).

Il versante Nord-Ovest del Mont de La Saxe invece è classificato come *Deformazione Gravitativa Profonda di Versante (DGPV)* all'interno dell'*Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia* IFFI (*Figura 3.2-2*) (Piattaforma italiana sul dissesto idrogeologico IdroGEO). Si tratta di un fenomeno complesso che interessa una superficie di versante molto estesa, con una velocità del movimento inferiore a 16 mm/anno. Le evidenze associate sono fenomeni di ribaltamento flessurale in cresta, creeping e crolli nella parte medio-inferiore del versante, oltre ad avvallamenti (trench) trasversali al versante e lungo le dorsali spartiacque e rigonfiamenti alla base del pendio (Giardino & Ratto, 2005). Queste condizioni sono associate allo scarico delle pressioni glaciali, alla fratturazione del materiale e all'orientazione favorevole delle discontinuità.

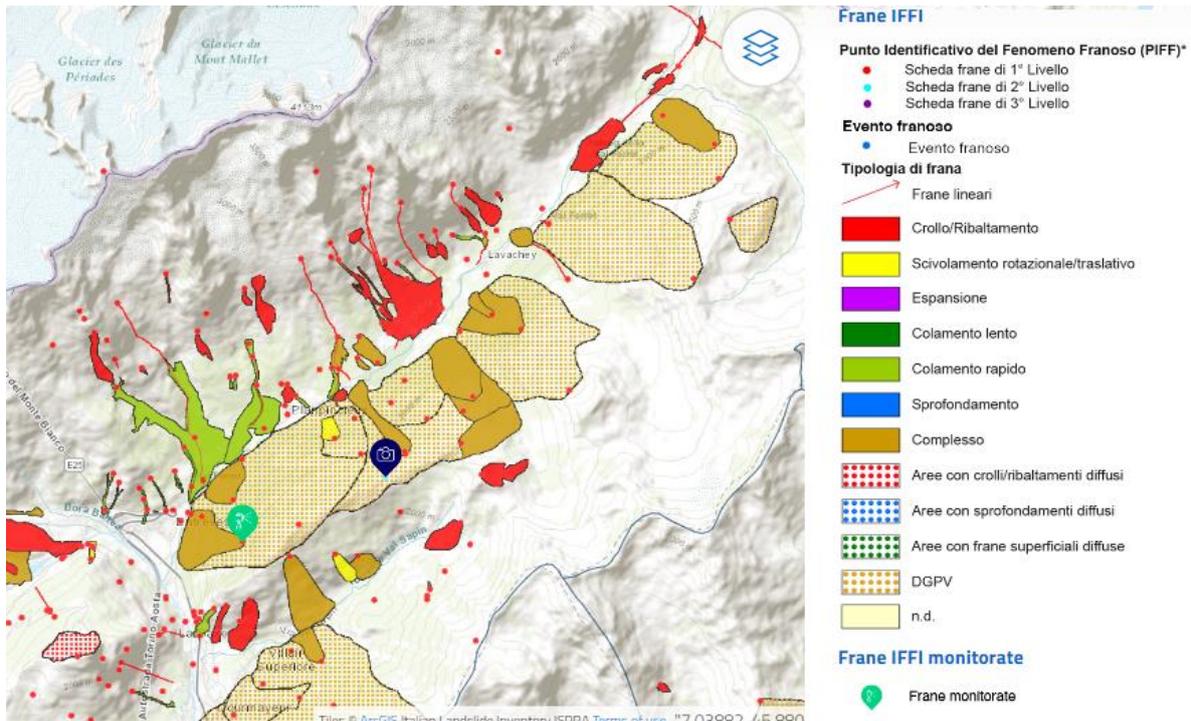


Figura 3.2-2: Frane in Val Ferret distinte in base al tipo di movimento. Fonte (Piattaforma italiana sul dissesto idrogeologico IdroGEO)

3.3 Aspetti idrogeologici

La Dora di Ferret è il corso d'acqua che, insieme alla Dora di Veny, dà origine alla Dora Baltea, poco a valle dell'abitato di Entreves, nel comune di Courmayeur. I due torrenti fanno parte del primo sottobacino secondario montano della Dora Baltea. (Autorità di Bacino del fiume Po, 2001)

Il bacino della Dora di Ferret ha una superficie pari a 93.461 km². La quota massima del bacino corrisponde alla cima de Les Grandes Jorasses (4203 m s.l.m.), la quota minima alla sezione di chiusura è 1280 m s.l.m. (Regione Autonoma Valle d'Aosta, 2006)

Lo spartiacque corre lungo le cime di Mont de La Saxe (2345 m s.l.m.), Tete de Bernarde (2534 m s.l.m.), l'Aiguille de Chambave (3084 m s.l.m.), la Grande Rochère (3326 m s.l.m.), il Grand Golliat (3237 m s.l.m.), il Mont Dolent (3818 m s.l.m.), punto di incontro dei confini tra Francia, Svizzera e Italia, e in destra orografica è segnato dalle cime del massiccio del Monte Bianco che si affacciano sulla Val Ferret.

La Dora di Ferret nasce dal ghiacciaio Pré-de-Bard e scorre da Nord-Est verso Sud-Ovest con andamento quasi rettilineo. In destra orografica è alimentata da torrenti minori che scorrono su versanti ripidi, ricaricati dai soprastanti ghiacciai del Monte Bianco; tra questi (procedendo da monte verso valle) il torrente du Triolet, du Frebougé, de Leveque, de Praz Sec, de Tronchey, torrente Le Pont-Margueraz, Planpincieux, Montitaz, torrente Mayen, torrente Rochefort-Praz du Moulin; essi sono tutti brevi e a forte pendenza, scorrono per lo più su roccia affiorante e ghiacciai, caratterizzati da ridotti tempi di corrivazione ridotti.

Gli affluenti in sinistra idrografica scorrono invece su pendii prativi meno acclivi e godono dell'alimentazione fornita dai nevai e dalle acque infiltrate ed immagazzinate nella copertura

detritico-glaciale che ricopre il versante (Regione Autonoma Valle d'Aosta, 2006). Alcuni di questi sono il torrente de la Combette, de Belle Combe, Greuvettaz, du Col de Malatra, d'Arminaz, de la Gora.

In riferimento alle condizioni di squilibrio connesse ai fenomeni di dissesto lungo le aste fluviali, per quanto riguarda la Dora di Ferret e la Dora di Veny i processi connessi alla dinamica fluviale sono governati dai ridotti tempi di corrivazione dei piccoli bacini tributari e dalla grande quantità di materiale solido trasportato. Fenomeni locali erosivi di sponda e sovralluvionamento interessano il tratto medio-alto dell'asta torrentizia della Dora di Ferret, mentre il segmento inferiore è maggiormente soggetto all'erosione (Autorità di Bacino del fiume Po, 2001).

Alcuni affluenti della Dora di Ferret del reticolo minore (in particolare il torrente Greuvettaz), in sinistra idrografica tra Arp Nouva e Ferrachet, presentano nel tratto terminale un alveo poco definito con rischio associato di esondazione e sovralluvionamento di ampie superfici anche in caso di eventi di piena di poca rilevanza.

Anche lungo i versanti le condizioni di dissesto sono dovute, oltre che alle frequenti valanghe nel periodo invernale, a fenomeni di trasporto di massa lungo le aste torrentizie, il cui materiale solido deriva da frane da crollo nella parti medio-superiori dei versanti. Durante precipitazioni intense questi depositi non stabilizzati ai piedi dei versanti sono facilmente soggetti a erosione (Autorità di Bacino del fiume Po, 2001).

In destra idrografica gli estesi depositi di detrito sulla fascia di medio versante sono invece soggetti ad erosione areale.

3.4 Aspetti climatici

Il clima in Valle d'Aosta è strettamente dipendente dall'orografia. La disposizione dei rilievi infatti determina situazioni climatiche molto diverse all'interno di un territorio relativamente poco esteso.

Il settore nord-occidentale beneficia di un innevamento abbondante e costante nel periodo autunnale e invernale, perché maggiormente influenzato dalle correnti oceaniche (Cresta, 2012). Focalizzando l'attenzione sul massiccio del Monte Bianco, i venti occidentali provenienti dall'oceano atlantico investono prima la Val Veny e successivamente la Val Ferret. In questo modo sulla Val Veny si abbattono forti precipitazioni, mentre in Val Ferret giunge aria meno carica di umidità portando precipitazioni meno intense.

La bassa valle è soggetta ai flussi umidi provenienti dalla pianura Padana che, in concomitanza con temperature relativamente alte, causano maggiore piovosità in primavera ed estate con frequenti temporali. La media valle ha caratteristiche intermedie tra le due, ma in genere si può considerare la zona più secca. (Cresta, 2012).

In generale la prolungata assenza di precipitazioni si presenta nei periodi invernali per la permanenza di condizioni anticicloniche. Nel periodo estivo caratterizzato da attività convettiva maggiore, risulta difficile osservare lunghi periodi con totale assenza di precipitazione.

Per la descrizione di alcuni parametri meteorologici di interesse si è fatto riferimento al lavoro, svolto dal Centro Funzionale regionale, di elaborazione dei dati registrati dalla rete meteorologica regionale e dalla rete di misura ARPA (Regione Autonoma Valle d'Aosta, 2010); esso restituisce l'andamento delle principali variabili meteorologiche (precipitazione, temperatura, neve e portata) nel periodo compreso tra il 2000 e il 2009. Sebbene non sia riportata la situazione degli ultimi dieci anni, l'analisi descrive la distribuzione delle variabili meteorologiche nelle diverse parti della regione.

Innanzitutto, tale studio afferma che la Val Ferret presenta, secondo la classificazione di Lang sul grado di aridità, come la maggior parte del territorio regionale, un clima umido. Solo il fondovalle centrale è caratterizzato da elevato grado di aridità, classificato come semiarido o stepico.

Le temperature variano con la quota, ma anche con la posizione geografica e l'esposizione dei versanti; la Val Ferret in particolare presenta differenze di quota (e di temperatura) in senso longitudinale alla valle e soprattutto fra i monti che vi si affacciano.

Nel fondovalle della Val Ferret infatti si ha temperatura media annuale tra i 10 e 15°C, alle quote più alte (oltre i 4000 m) le temperature medie variano dai -5°C ai -10°C, mentre sul versante del Mont de La Saxe, la temperatura media varia tra 0°C e 5°C. In inverno, anche nel fondovalle le temperature medie sono rigide, variando dai -5°C a 0°C. Per quanto riguarda le stagioni intermedie invece, la primavera risulta più fredda dell'autunno.

Presso la stazione di Morgex (quota 938 m s.l.m.), i valori annuali estremi registrati sono inferiori a -10°C per quanto riguarda le temperature minime, che emergono come le più rigide rispetto alla media e bassa valle, mentre superano regolarmente i 30°C nei valori massimi. Rispetto al resto del territorio regionale però, l'alta valle risulta la zona con le temperature medie più basse (Figura 3.4-1). Nonostante ciò, è anche la zona caratterizzata dalle maggiori escursioni termiche di tutta la regione, con variazioni termiche medie giornaliere di circa 12°C, a causa della sua scarsa ventilazione rispetto al settore sud-orientale.

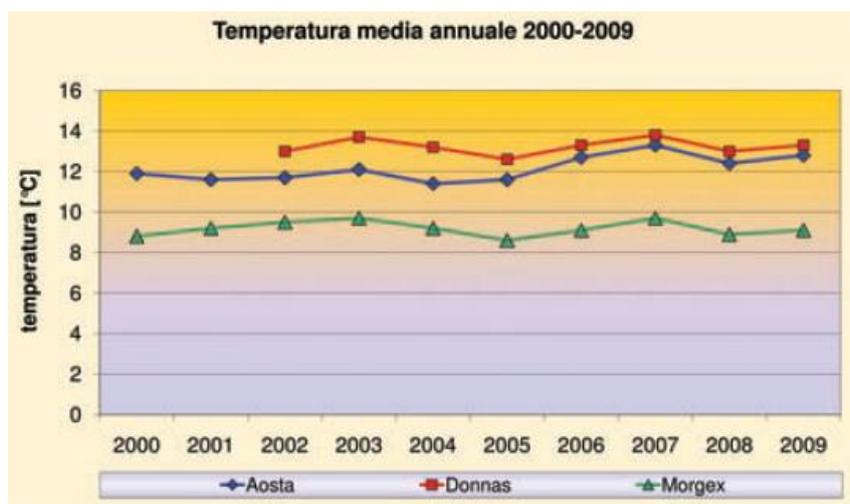


Figura 3.4-1: Andamento della temperatura media annuale anni 2000-2009 per tre stazioni meteorologiche rappresentative dell'alta (Morgex), media (Aosta) e bassa (Donnas) Valle d'Aosta. Fonte (Regione Autonoma Valle d'Aosta, 2010)

Per quanto riguarda le nevicate, si nota che la zona della Valle d'Aosta che registra mediamente le nevicate più abbondanti è l'alta Valle d'Aosta, come dimostra la stazione Courmayeur-Ferrache, posizionata a 2290 m s.l.m., con valori compresi tra gli 8 e i 10 m caratterizzati negli anni da limitata variabilità (Figura 3.4-2).

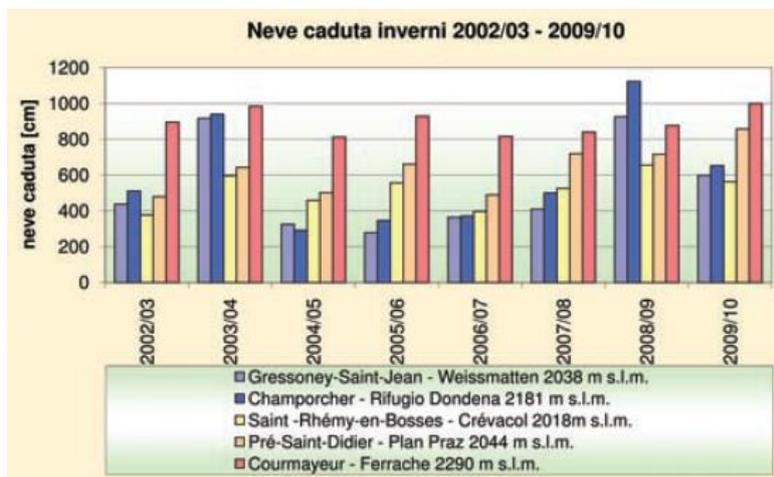


Figura 3.4-2: Andamento della neve totale caduta in cinque stazioni automatiche. Courmayeur è la stazione rappresentativa della Val Ferret. Fonte (Regione Autonoma Valle d'Aosta, 2010)

A livello regionale infine, facendo riferimento agli indici di copertura nevosa (SCA-Snow Covered Area) e contenuto d'acqua del manto nevoso (SWE-Snow Water Equivalent), si osserva che il massimo di copertura nevosa si ha nei mesi di gennaio e febbraio, mentre i massimi valori di contenuto di acqua nella neve si registrano nei mesi di marzo-aprile, quando generalmente una minor estensione di copertura di neve è bilanciata da una maggior altezza del manto.

3.5 Aspetti naturalistici, vegetazionali e copertura del suolo

La Val Ferret custodisce numerose varietà vegetali rare per le Alpi e a livello regionale, ed è abitata da specie animali della fauna alpina che qui hanno il proprio habitat naturale, in un delicato equilibrio finora mantenuto intatto.

L'Unione Europea tutela la biodiversità tramite *Rete Natura 2000*, una rete ecologica istituita ai sensi della Direttiva 92/43/CEE *Habitat* per la conservazione a lungo termine di habitat e specie di flora e fauna rari a livello comunitario; tale rete comprende i *Siti di Interesse Comunitario* (SIC), alcuni dei quali successivamente designati come *Zone Speciali di Conservazione* (ZSC), e le *Zone di Protezione Speciale* (ZPS), istituite ai sensi della Direttiva 2009/147/CE *Uccelli* riguardante la conservazione degli uccelli selvatici.

Rete Natura 2000 ha riconosciuto l'alta naturalità e l'importanza degli habitat della zona (Figura 3.5-1), promuovendo l'intera Val Ferret come *ZPS Val Ferret*, il versante italiano del massiccio del

Monte Bianco come ZSC Ambienti glaciali del Monte Bianco ed alcune parti della piana alluvionale della Val Ferret come ZSC Talweg della Val Ferret (Bocca, Bovio, Passerin d'Entreves, Poggio, & Tutino, 2006).

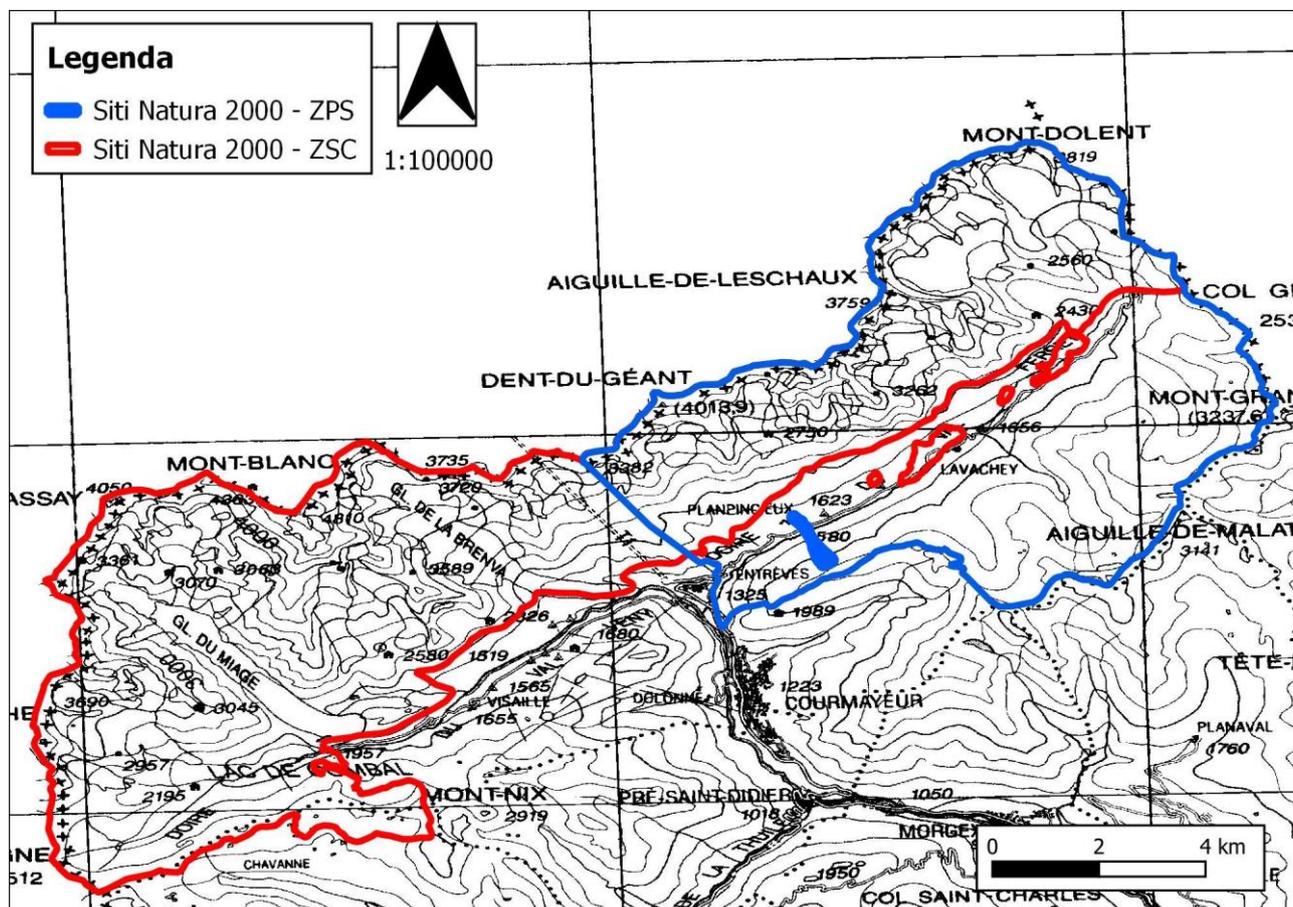


Figura 3.5-1: Aree protette in Val Ferret (a destra in figura): ZSC Ambienti glaciali del Monte Bianco (contorno rosso grande), ZSC Talweg della Val Ferret (contorni rossi piccoli); ZPS Val Ferret (contorno blu). Elaborazione personale con QGIS

Per quanto riguarda le caratteristiche vegetazionali della zona, il lato destro della valle, ovvero il versante italiano del massiccio del Monte Bianco, è dominato da ambienti rocciosi e glaciali e presenta per lo più specie vegetazionali pioniere (Camerano, Terzuolo, & Varese, 2007).

Avvicinandosi al fondovalle i grossi depositi di materiale roccioso dovuti all'evoluzione nel tempo dei ghiacciai del Monte Bianco e all'azione dei corsi d'acqua si alternano a boschi di conifere (Pecete ad abete rosso) e zone con vegetazione boschiva ed arbustiva in evoluzione (Lariceti e Cembrete, Arbusteti subalpini) (Camerano, Terzuolo, & Varese, 2007).

Il lato sinistro della Val Ferret si trova tra quote 1500 e 2400 m s.l.m., dunque la vegetazione osservabile è quella tipica del piano subalpino e alpino. Alle quote più alte si trovano praterie alpine e pascoli; scendendo di quota si fanno sempre più fitte specie arbustive come il rododendro ferrugineo, mirtillo nero, ginepro nano ed erbacee come l'imperatoria ostruthium e rumex acetosa (Camerano, Terzuolo, & Varese, 2007).

La presenza quasi continua di siti valanghivi sui questi pendii corrisponde ad una maggiore varietà di specie vegetali. Negli impluvi a forte e prolungato innevamento, il suolo idromorfo è occupato essenzialmente da flora igrofila. Nei frequenti canalini di valanga si trovano infatti prevalentemente arbusteti subalpini costituiti da alneto di ontano verde ed altre specie pioniere, come il larice, il sorbo degli uccellatori e un sottobosco con abbondante presenza di megaforbie idrofile.

Ai lati dei canalini di valanga, meno disturbati dal passaggio di valanghe, fasce di limitata estensione di lariceti e cembrete risalgono il pendio dal fondovalle, diradandosi con la quota.

Il fondovalle, formato dalla successione di tre piane alluvionali sovrapposte (Mayen, Plampincieux-Lavachey, Ferrachet-Arp Nouva), è attraversato dalla Dora di Ferret e alimentato da una moltitudine di ruscelli, torrenti e risorgive provenienti dai più alti ambienti glaciali. Ciò ne fa un ambiente umido tra i più importanti della Valle d'Aosta poiché ricco di rare specie idrofile e acquatiche (Bocca, Bovio, Passerin d'Entreves, Poggio, & Tutino, 2006).

Gli ambienti di greto che costeggiano la Dora di Ferret sono invece occupati da vegetazione riparia erbacea e legnosa a tamerice alpina, salice ripaiolo e ontano verde.

Il CORINE Land Cover consiste in un inventario a livello europeo delle tipologie di copertura del suolo suddivise in 44 classi secondo diversi livelli di dettaglio, e deriva dall'interpretazione visiva di immagini satellitari ad alta risoluzione (CORINE Land Cover). Viene adoperato, tra le numerose applicazioni, nei settori dell'ambiente, dell'agricoltura, dei trasporti e della pianificazione territoriale. Anch'esso è utile a delineare il quadro generale della copertura presente, con qualche un'indicazione anche sugli usi del suolo nella zona di interesse.

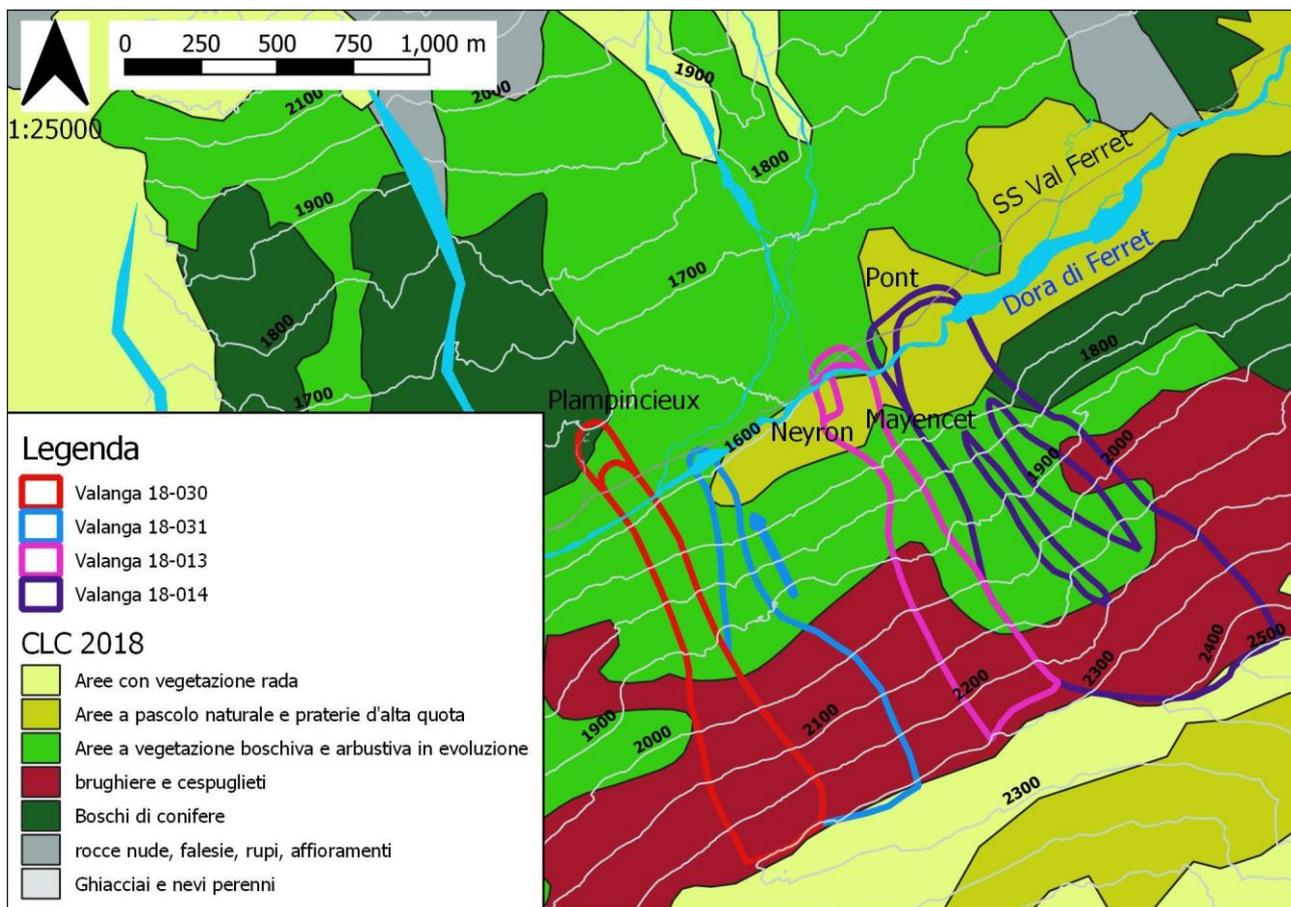


Figura 3.5-2: Copertura del suolo in Val Ferret. Fonte shapefiles (CORINE Land Cover). Elaborazione personale con QGIS

Dall'osservazione dei dati si può notare l'assenza in Val Ferret di ambienti strettamente di natura antropica, come aree agricole, tessuti urbani o aree industriali, a favore della esclusiva presenza di ambienti naturali o semi-naturali (Figura 3.5-2). Infatti, le categorie riscontrate al terzo livello di classificazione sono (Regione Autonoma Valle d'Aosta, 2006):

- 312- boschi di conifere,
- 321- aree a pascolo naturale e praterie d'alta quota,
- 322 - brughiere e cespuglieti,
- 324 - aree a vegetazione boschiva e arbustiva in evoluzione,
- 332 - rocce nude, falesie, rupi, affioramenti
- 333 - aree con vegetazione rada.

4. Analisi di rischio

Nelle parti seguenti della tesi sono state affrontate le diverse fasi dell'analisi di rischio applicata al fenomeno delle valanghe. Queste fasi sono analoghe a quelle che vengono adottate per l'analisi di rischio dei fenomeni franosi.

Esse comprendono, nell'ordine (Dai, Lee, & Ngai, 2001):

- Valutazione della probabilità di distacco;
- Studio della dinamica valanghiva;
- Valutazione della vulnerabilità degli elementi a rischio;
- Valutazione del rischio.

Se si considera il rischio in termini di probabilità condizionata (ad esempio, probabilità annuale di morte a seguito di un evento valanghivo), esso può essere definito come il prodotto della probabilità di distacco, per la probabilità spaziale di impatto a seguito di distacco, per la probabilità temporale di impatto relativa alle specifiche condizioni spaziali di impatto, per la vulnerabilità dell'individuo (probabilità di morte per l'individuo a seguito di impatto).

Per quanto riguarda la probabilità di distacco, è importante individuare i fattori responsabili dell'instabilità del manto nevoso e le cause di innesco del distacco. Si devono distinguere:

- I *fattori predisponenti*, ovvero fattori che rendono il pendio predisposto al distacco di valanghe e che tendono a portare il manto nevoso verso una condizione di instabilità (ad esempio, pendenza, esposizione, vegetazione);
- I *fattori di innesco*, ovvero i fattori che portano le condizioni del manto nevoso da una condizione di equilibrio precario ad una condizione di instabilità. (ad esempio, variazioni di temperatura, vento, precipitazioni).

La probabilità di distacco dipende da entrambi questi fattori. Le cause di innesco, ovvero le condizioni meteorologiche, sono i fattori più difficili da valutare, a causa della loro variabilità nel tempo. Si sottolinea che in questa tesi si è tenuto conto solamente dei fattori predisponenti trascurando le possibili condizioni meteorologiche di innesco di valanghe; è stata quindi considerata solamente la *suscettibilità* delle aree esposte a fenomeni valanghivi.

Esistono diversi metodi per la determinazione della probabilità di distacco (Dai, Lee, & Ngai, 2001): tramite *dati catastali*, metodi *statistici* (determinazione statistica delle combinazioni di parametri che hanno portato al distacco di valanghe in passato) o *deterministici* (basate su analisi di stabilità del manto nevoso). Tra questi, la via più semplice è l'utilizzo di dati storici di catasti valanghe, i quali costituiscono le basi per numerose tecniche di mappatura della suscettibilità; inoltre, in un'area caratterizzata da numerosi eventi valanghivi catalogati nelle loro caratteristiche, la frequenza storica delle valanghe può essere determinata per fornire stime realistiche dell'insieme di probabilità di distacco, probabilità spaziale di impatto e probabilità temporale di impatto nella zona stessa.

In questa tesi si è fatto riferimento ai dati storici del Catasto Valanghe della Regione Valle d'Aosta; nonostante la quantità di dati disponibili fosse scarsa in relazione alla necessità di determinare la probabilità di distacco sul sito di interesse, in base alle caratteristiche degli eventi è stata ipotizzata la probabilità di accadimento dell'evento di interesse.

La dinamica della valanga viene studiata per la determinazione di parametri utili a valutare l'interferenza del fenomeno con gli elementi a rischio; tra questi parametri vi sono la distanza di arresto, la larghezza della valanga, la velocità, l'altezza di flusso e le pressioni di impatto. Una corretta analisi della dinamica del fenomeno dipende anche dalla conoscenza dei parametri che possono influenzare il moto del flusso, come ad esempio le caratteristiche del pendio (morfologia, pendenza, vegetazione sulla superficie di scorrimento).

Sono due le principali categorie di metodi per lo studio della dinamica valanghiva (Barbolini M. , a.a. 2004/2005): i *metodi empirici* (basati su elaborazioni statistiche di dati relativi ad eventi valanghivi storici) permettono la valutazione della sola distanza di arresto; i *modelli di dinamica*, i quali, per la modellazione delle valanghe di neve densa, si distinguono ulteriormente in modelli a *centro di massa* e in modelli di tipo *continuo*. I primi studiano il moto del baricentro della valanga (assunta con massa puntiforme) lungo una traiettoria predefinita, rappresentata dal profilo longitudinale del pendio. I modelli di tipo *continuo* considerano invece la valanga come un mezzo continuo monofase e rappresentano il comportamento dinamico della valanga attraverso le equazioni di conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia, abbinate ad un'ideale legge reologica per descrivere le proprietà di flusso della neve in movimento. Questi modelli permettono di ottenere parametri come la velocità e la pressione d'impatto, oltre alla distanza di arresto.

In questa tesi in particolare è stato utilizzato un modello bidimensionale per lo studio di valanghe radenti (RAMMS Operational), che adotta per la modellazione delle valanghe la legge reologica di Voellmy-Salm.

Dopo aver determinato la probabilità di distacco e l'estensione areale di territorio potenzialmente affetta da valanga attraverso l'analisi della dinamica valanghiva, possono essere individuati gli *elementi a rischio* (popolazione, edifici, attività economiche, servizi pubblici e infrastrutture) presenti nell'area.

Una volta definiti gli elementi a rischio, se ne valuta la vulnerabilità (in relazione alla valanga considerata), definita come livello di danno potenziale, o grado di perdita di un dato elemento soggetto ad una valanga di data intensità (Dai, Lee, & Ngai, 2001). La vulnerabilità varia in base all'elemento a rischio e dipende dalla natura degli elementi a rischio (beni, persone, strutture), dalla loro vicinanza alla valanga e dalle caratteristiche della valanga stessa (distanza, volume e velocità del flusso). La valutazione della vulnerabilità è alquanto soggettiva, ma è anche fatto largo uso di dati storici.

In questa tesi gli elementi a rischio considerati sono gli utenti della strada comunale a bordo di veicoli in movimento. Volendo stimare la probabilità di morte in auto a seguito di impatto di veicoli con la valanga, la determinazione della vulnerabilità si è basata su statistiche riguardanti incidenti stradali mortali sulle strade dei valichi alpini.

L'ultima fase dell'analisi di rischio riguarda appunto la valutazione del rischio. Il rischio può essere valutato come rischio *distribuito*, rischio *sito-specifico* e rischio *globale* (Dai, Lee, & Ngai, 2001).

Il rischio distribuito mira a fornire una mappa che mostri il livello di rischio in termini di fatalità o perdita economica nei diversi punti di una data area, quantitativamente o qualitativamente. Con la valutazione sito-specifica si determina il rischio, in termini di fatalità o perdita economica, per una determinata valanga potenziale. Infine la valutazione globale del rischio prevede la somma dei rischi sito-specifici riferiti a tutte le valanghe presenti nell'area di studio.

In questa tesi si è posta l'attenzione su un singolo bacino valanghivo (valutazione sito-specifica) potenzialmente pericoloso per il fondovalle ed in particolare per gli utenti della strada.

4.1 Analisi dell'attività valanghiva pregressa

L'analisi del bacino valanghivo di interesse è stata condotta grazie ai dati forniti dal Catasto Valanghe Regionale consultabile online (Catasto Valanghe Regionale SCT).

Il Catasto Valanghe della Regione Valle d'Aosta è attivo dai primi anni 70 e suddivide il territorio valdostano in 19 comprensori di cui la Val Ferret è il numero 18. Grazie a questo archivio virtuale per ogni valanga, associata ad un codice univoco, sono raccolti informazioni, misure, testimonianze e fotografie riguardanti alcuni eventi storici, oltre a dati di carattere generale.

Il sito valanghivo di seguito analizzato (evidenziato in rosso in *Figura 4.1-1*) è catalogato nel Catasto Valanghe come segue:

18-030: Mont de La Saxe-Planpincieux A.

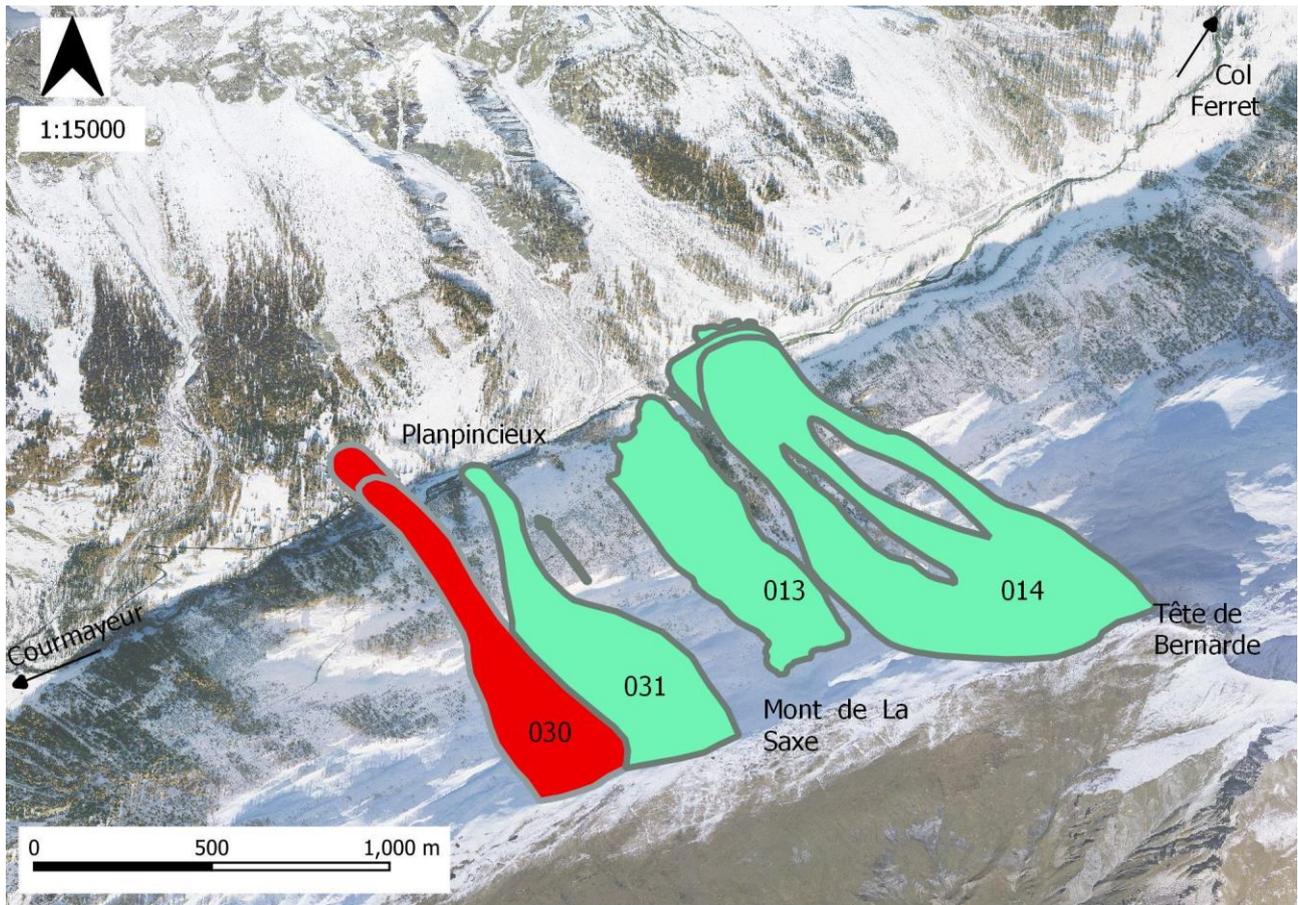


Figura 4.1-1: Alcune delle valanghe che si staccano dal Mont de La Saxe (in rosso la valanga di interesse).
Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT). Elaborazione personale con QGIS

Tale valanga è stata classificata, insieme a numerosi altri bacini valanghivi distribuiti sul territorio regionale, secondo l'art. 37 della L.R. 11/1998, Normativa urbanistica e di pianificazione territoriale della Valle d'Aosta, e la D.G.R. 422/1999, Disposizioni attuative L.R 11/1998, le quali definiscono gli ambiti inedificabili in relazione al rischio di valanghe e slavine.

Il Geoportale SCT, il portale dei dati territoriali della Valle d'Aosta (Geoportale SCT Sistema delle Conoscenze Territoriali), fornisce la cartografia relativa agli ambiti inedificabili in modalità WMS, anche in riferimento al rischio valanghe (Figura 4.1-2).

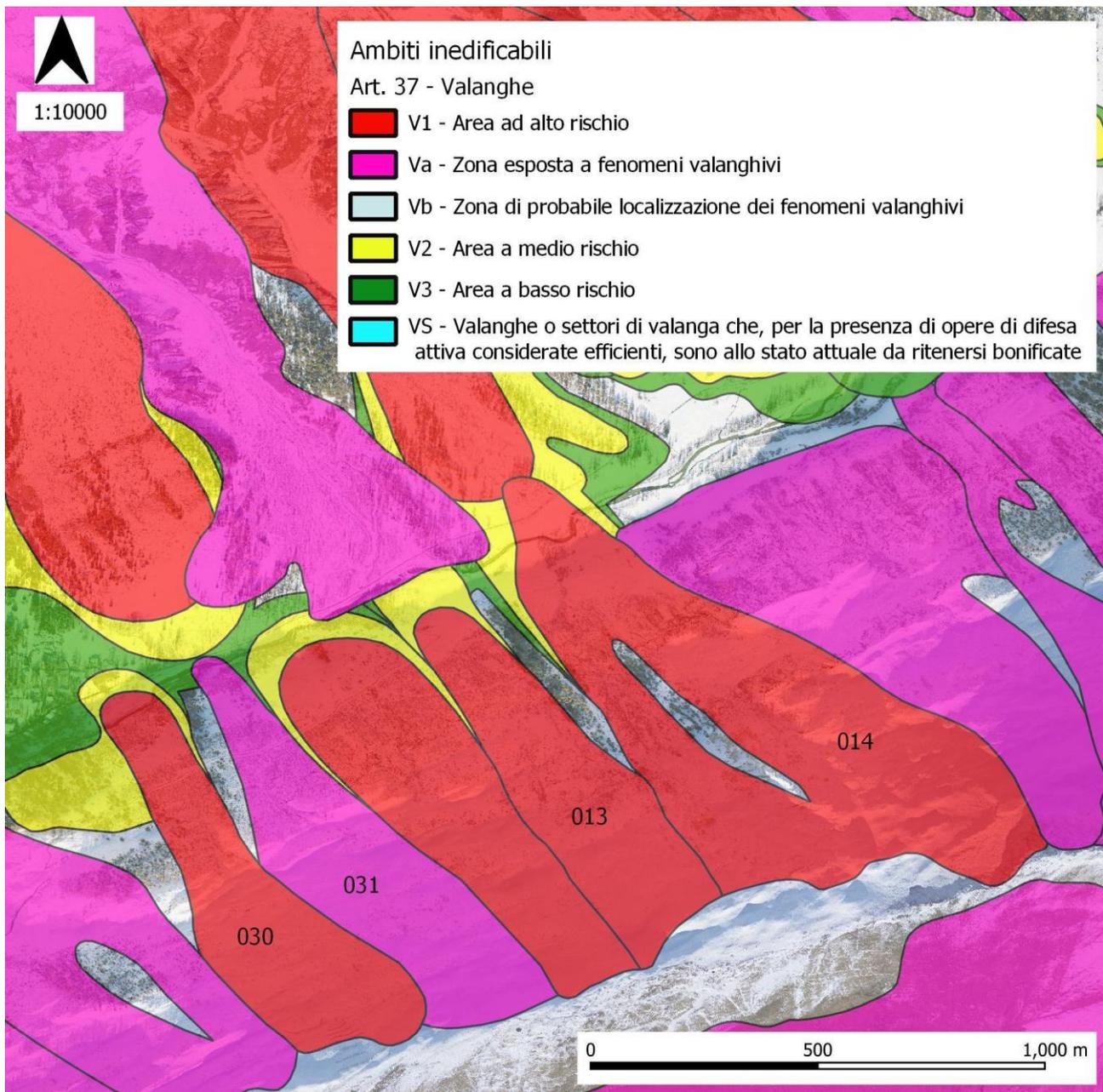


Figura 4.1-2: Estratto della cartografia in formato WMS degli Ambiti Inedificabili in relazione al rischio valanghe per il fondovalle della Val Ferret. Fonte (Geoportale SCT Sistema delle Conoscenze Territoriali). Elaborazione personale con QGIS

Come definito dal paragrafo A, capitolo IV, Terreni soggetti al rischio valanghe o slavine, Allegato A, Ambiti inedificabili, D.G.R. 422/1999, la classificazione del rischio valanghivo è fondata a sua volta sulla definizione di tre classi di pericolosità, distinte in relazione all'intensità dei massimi eventi attesi e alla loro frequenza temporale. In particolare le aree esposte a rischio valanghivo sono classificate "in funzione delle pressioni di impatto dei fenomeni valanghivi calcolate su tempi di ritorno non inferiori a 100 anni e sul massimo evento storico riscontrato" (Tabella 4.1-1).

CLASSIFICAZIONE DEI TERRENI	limiti di pressione per la suddivisione delle aree valanghive
aree a elevato rischio	pressioni d'impatto superiori a 3 t/mq
aree a medio rischio	pressioni d'impatto comprese tra 3 e 0,5 t/mq
aree a debole rischio	pressioni d'impatto inferiori a 0,5 t/mq

Tabella 4.1-1: Criteri di classificazione delle aree esposte al rischio valanghivo in funzione delle pressioni d'impatto dei fenomeni valanghivi. Fonte: DGR 422/1999

Di seguito il sito valanghivo oggetto di studio è stato analizzato dal punto di vista della cartografia degli ambiti inedificabili appena citata, oltre che in riferimento ad eventi storici significativi dal punto di vista dei danni procurati agli elementi antropici. Per lo stesso bacino sono poi state definite le aree di distacco, scorrimento ed arresto in relazione alle pendenze del versante, e si è infine posta attenzione sulle caratteristiche di copertura del suolo.

4.1.1 Inquadramento del bacino valanghivo all'interno del Catasto Valanghe Regionale

Di seguito è riportata la prima parte della *Scheda rilevamento valanghe* disponibile sul Catasto Valanghe, contenente le informazioni generali sulla valanga 18-030 (*Figura 4.1-3*)

Regione Autonoma Valle d'Aosta - Ufficio Neve e Valanghe - Corpo Forestale della Valle d'Aosta



CATASTO REGIONALE VALANGHE - SCHEDA RILEVAMENTO VALANGHE - Modello 7

Anagrafica valanga

Comprensorio	Val Ferret
Comune	COURMAYEUR
Stazione forestale	Prè-Saint-Didier
Codice valanga	V-18-030
Categoria	Valanga spontanea
Numero valanga	030
Denominazione	Mont de la Saxe -Planpincieux A

Scheda Generale

Località	Planpincieux
	Fenomeno non ricadente in comprensorio sciistico
	Ingresso fenomeno in CRV ante 2005
Versante idrografico	Sx
Sistemi di difesa esistenti	Opere attive (stabilizzazione del manto);
Frequenza stimata dell'evento	Almeno una volta ogni 5 anni
Tipo	Ponti da neve e Frangivento
Ubicazione cartografica (Carta tecnica regionale numero)	4278-4678-4282

Figura 4.1-3: Estratto della Scheda Rilevamento Valanghe per la valanga 18-030, informazioni generali. Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT)

Nelle sezioni successive della scheda sono riportati anche la quota massima della zona di distacco (2302 m s.l.m.), la quota minima nella zona di accumulo (1571 m s.l.m.), il corrispondente dislivello percorso (731 m), l'esposizione del versante a Nord-Ovest, la pendenza media della zona di distacco, pari a 45°.

Nel fondovalle, nelle vicinanze della zona di arresto, si trovano la pista di fondo, il percorso pedonale libero parallelo ad essa, la strada comunale *La Palud* e le strutture della località Planpincieux; tra gli edifici più vicini alla zona di arresto, vi sono quelli che si affacciano sull'ampio piazzale del parcheggio adiacente alla strada, ovvero l'Hotel Miravalle, lo Chalet Proment ed il Club Des Sports (*Figura 4.1-4*). Questi sono i principali elementi vulnerabili per la valanga in oggetto oltre, ovviamente, alle persone.



Figura 4.1-4: Piazzale di Planpincieux, con l'Hotel Miravalle (sulla sinistra) e lo Chalet Proment (sulla destra) parzialmente nascosti dagli alberi. La valanga proviene da sinistra in foto. Foto: Giulia Venturato

Come già visto in Figura 2, con la L.R. 11/98 per la valanga 18-030 è stata individuata una zona ad alto rischio (zona rossa) che arriva ad interferire con la pista di fondo sul versante opposto della valle in sponda destra della Dora, oltrepassando il fiume; la zona a medio rischio (gialla), più estesa, include la strada comunale fino al piazzale del parcheggio di fronte all'albergo Miravalle, interrompendosi a metà del piazzale. Intorno a questa la zona a basso rischio (verde) copre il resto del piazzale, comprendendo l'albergo Miravalle, il Club des Sports, lo Chalet Proment e gli altri edifici di Planpincieux (Figura 4.1-5).

L'area ad alto rischio si trova inoltre a ridosso delle baite della frazione Leuchey-Damon, nella zona di scorrimento.

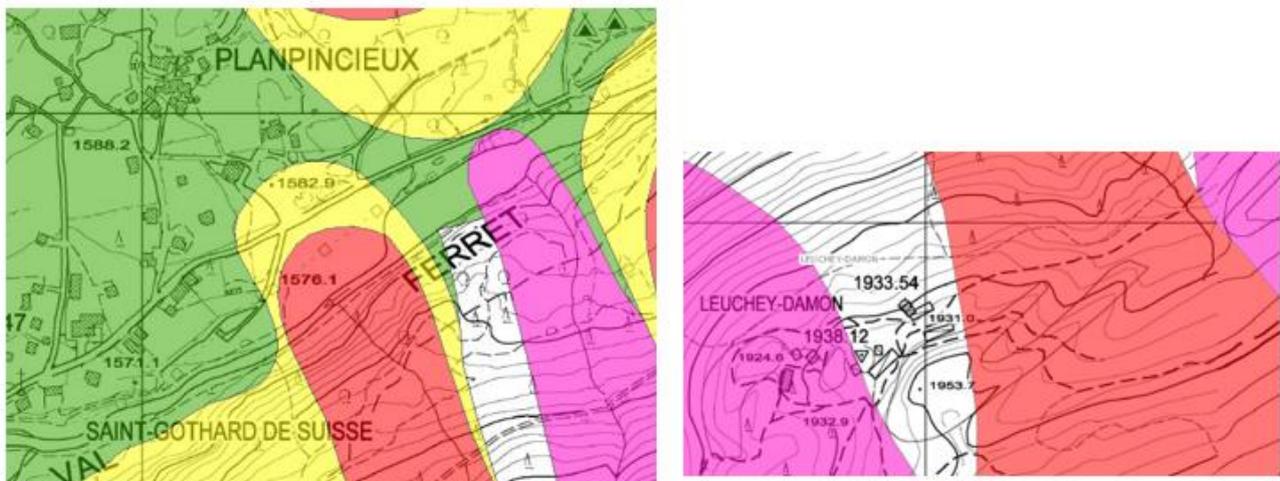


Figura 4.1-5: Valanga 18-030 - Estratto della cartografia in formato WMS degli Ambiti Inedificabili in relazione al rischio valanghe; a sinistra, la zona di deposito, a destra la zona di scorrimento in prossimità del nucleo Leuchey-Damon. Fonte (Geoportale SCT Sistema delle Conoscenze Territoriali)

Le informazioni contenute nel Catasto Valanghe relative agli eventi storici si trovano sotto forma di materiale fotografico, dati riguardanti le dimensioni della valanga, le caratteristiche della neve e del pendio; sono anche disponibili per qualche evento storico file in formato vettoriale che rappresentano la forma della valanga (talvolta distinguono l'area coperta dalla componente radente dalla zona di espansione della componente nubiforme).

4.1.2 Zona di accumulo

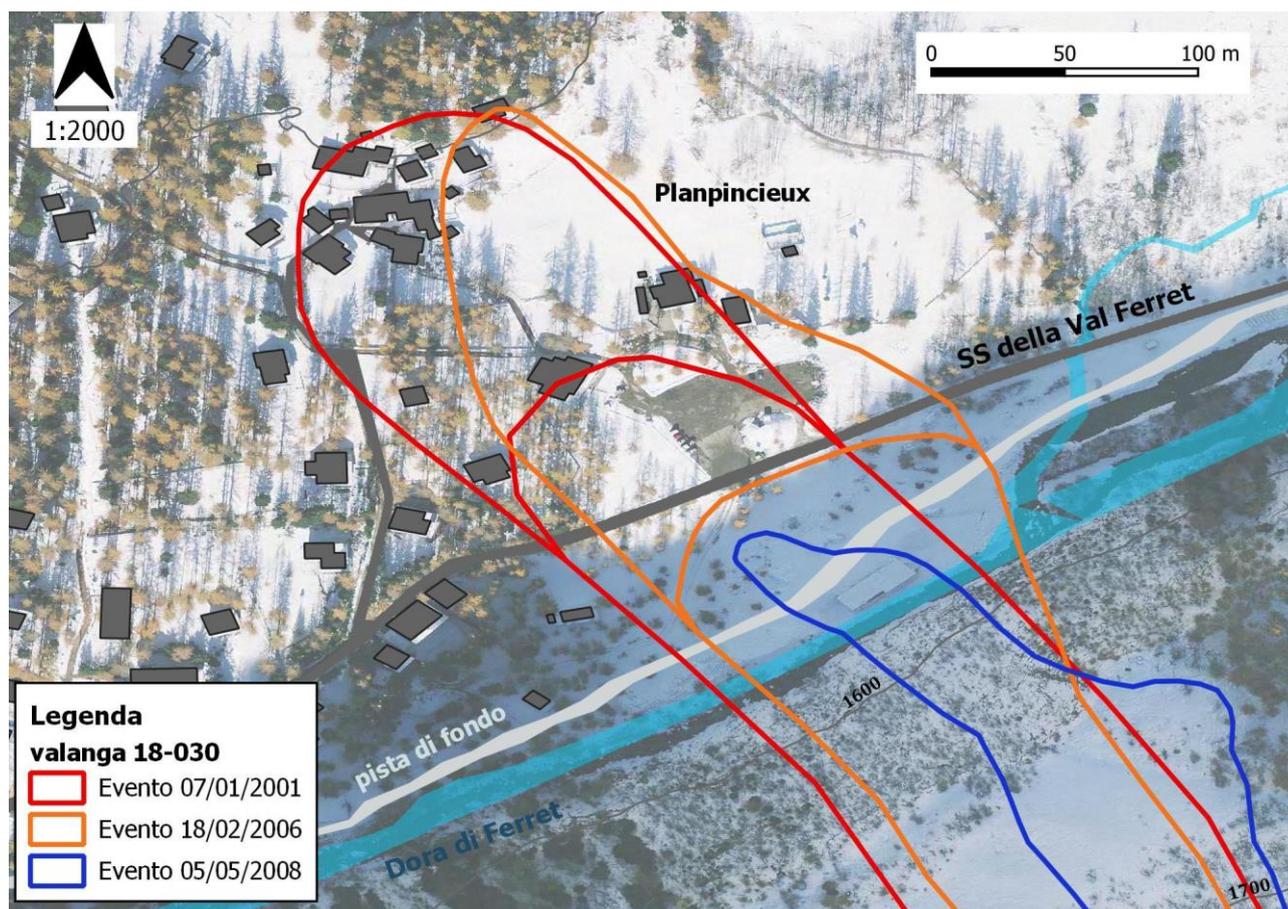


Figura 4.1-6: Valanga 18-030 – Zone di deposito di alcuni eventi storici. Fonte shapefiles (Catasto Valanghe Regionale SCT). Elaborazione personale con QGIS

Osservando le informazioni riguardanti gli eventi storici per la valanga 18-030 si nota che nella maggior parte delle occasioni i danni per l'ambiente e per la frazione di Planpincieux sono stati provocati dalla componente nubiforme della valanga, in grado di risalire il versante opposto della valle fino alla chiesetta di Saint-Esprit a quota 1604 m s.l.m., dopo aver superato nell'ordine, la Dora, punto più basso del fondovalle (1570 m s.l.m.), la strada (1582 m s.l.m.) ed il piazzale del parcheggio. Raramente infatti la componente radente si è avvicinata e ha interferito con zona urbanizzata. In Figura 4.1-6 sono riportati alcuni eventi nei quali è stato possibile individuare sia una componente radente sia una componente nubiforme (2001 e 2006). È inoltre riportato nella stessa figura l'evento del 2008, evento primaverile caratterizzato solamente dalla componente radente.

Volendo richiamare brevemente le caratteristiche di alcuni degli eventi storici, si può cominciare dall'evento del 20 gennaio 1981, il quale ha interessato il versante sinistro della valle fino a Tête de Bernarde, ha visto il distacco di lastroni di neve ad alta coesione evolutosi in una valanga nubiforme di neve a bassa coesione; a causa di ciò il bosco di proprietà comunale ha riportato gravi danni, con circa 100 piante sradicate. Inoltre con il passaggio del soffio le grondaie dell'hotel Miravalle sono state strappate, alcune finestre sono andate in frantumi e gli infissi di alcuni edifici sono stati danneggiati.

Il Catasto Valanghe riporta poi che il 22 dicembre 1991 un'altra valanga nubiforme di neve asciutta ha demolito un deposito di rifiuti in legno a lato del parcheggio e scagliato un'auto parcheggiata contro l'ingresso dell'hotel Miravalle danneggiando l'infisso, oltre a danneggiare la pista di fondo ed il bosco comunale (*Figura 4.1-7*).

Rif. Prot. 742/'91

Courmayeur Planpincieux, Valanga Coste Mont Saxe, ha investito il parcheggio pubblico, facciate di case, Albergo Miravalle sino alla facciata della chiesetta, un'auto parcheggiata è stata asportata.



Figura 4.1-7: Valanga 18-030 - evento del 22-12-1991, zona di deposito. Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT)

Il 23 gennaio 1995 la valanga ha investito la pista di fondo (chiusa al pubblico per pericolo valanghe, così come la strada comunale a partire da La Palud). In zona di arresto la parte di deposito caratterizzata da neve pallottolare si è fermata nel piazzale dell'hotel Miravalle. Il soffio inoltre ha danneggiato la linea elettrica, che corre dietro all'hotel Miravalle e al ristorante Floriano (attuale Chalet Proment), e sfondato una finestra del ristorante.

Per evitare la formazione di pericolosi accumuli in zona di distacco tra il 1990 ed il 1996 sono stati posizionati 77 elementi frangivento sulla cresta del Mont de La Saxe a 2300 m di quota; inoltre, tra il 1996 e il 1997 sono stati montati 147 ponti da neve nella zona di distacco, tra 2205 e 2310 m di quota, disposti su otto file su un'area di 1,2 ha (*Figura 4.1-8*).



Figura 4.1-8: Valanga 18-030 - Elementi frangivento sulla cresta del Mont de La Saxe a monte dei ponti da neve in zona di distacco. Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT)

Come i bacini valanghivi, anche le opere di protezione collocate sul territorio sono catalogate nel Catasto Valanghe attraverso schede che riportano, insieme alla posizione geografica, la geometria dell'opera, la data di posa e le informazioni sullo stato di manutenzione delle opere stesse (Figura 4.1-9, Figura 4.1-10).

Scheda rilevazione paravalanghe	
Comune	Courmayeur
Località	Mont de la Saxe. Cresta.
Tipo dell'opera	Deflettori in legno
Zona protetta	Fraz. Plampincieux
Proprietà	R.A.V.A.
Numero elementi	77 elementi
Sviluppo m.	193 ml.
Quota	2.300 m s.l.m.
Anno di realizzazione	1990-96
Superficie d'intervento (ha)	0,9
Accesso	Sentiero Rifugio Bertone-Testa Bernarda
Stato dell'opera	Degradato
Descrizione dei danni e osservazioni	Alcuni elementi danneggiati dai venti nell'inverno 2005
Data sopralluogo	3 giugno 2005
Effettuato da	Sig. Colombotto Paolo
	Riferimento n.13

Figura 4.1-9: Scheda rilevazione paravalanghe – Deflettori in legno sulla cresta del Mont de La Saxe. Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT)

Scheda rilevazione paravalanghe		
Comune	Courmayeur	
Località	Mont de la Saxe. Leucher.	
Tipo dell'opera	Ponti da neve	
Zona protetta	Fraz. Plampincieux	
Proprietà	R.A.V.A.	
Numero elementi	147 elementi. 103 collegamenti.	
Sviluppo m.	604 ml.	
Quota	Min: 2205 m s.l.m. Max: 2310 m s.l.m.	
Anno di realizzazione	1996-97	
Superficie d'intervento (ha)	1,2	
Accesso	Sentiero Rifugio Bertone-Testa Bernarda	
Stato dell'opera	Buono	
Descrizione dei danni e osservazioni		
Data sopralluogo	3 giugno 2005	
Effettuato da	Sig. Colombotto Paolo	Riferimento n.14

Figura 4.1-10: Scheda rilevazione paravalanghe – Ponti da neve nella zona di distacco della valanga 18-030.
Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT)

L'inserimento di tali opere, tuttavia, non ha sempre raggiunto l'obiettivo di proteggere gli elementi vulnerabili a valle dagli effetti delle valanghe.

Ad esempio, il 7 gennaio 2001 è avvenuto l'evento più grave tra quelli riportati nel Catasto Valanghe, il quale ha interessato gran parte del versante sinistro da Planpincieux alla frazione Pont. A Planpincieux la componente radente della valanga si è arrestata in sponda destra nel piazzale e contro l'albergo Miravalle, attraversando il fiume, la pista di fondo e la strada (Figura 4.1-11). In questa occasione l'accumulo ha raggiunto la larghezza di 350 m ed uno spessore massimo di 4 m. La componente nubiforme ha invece raggiunto il Club des Sports, il ristorante Floriano (attuale Chalet Proment) e la parte più alta di Planpincieux, fino alla chiesa di Saint-Esprit.

È possibile che l'accumulo nella zona di deposito sia stato così ampio anche in relazione alla rilevante superficie di manto nevoso mobilitata, non limitata alle aree dei singoli bacini valanghivi.



Figura 4.1-11: Valanga 18-030 - evento del 07-01-2001, zona di deposito. Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT)



Sourmayeur, Val Ferret 7/1/2001 Documentazione fotografica fenomeno valanhivo

Figura 4.1-12: Valanga 18-030 - Evento del 07-01-2001, danni in zona di deposito. Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT)

La figura precedente (*Figura 4.1-12*) mostra la biglietteria della pista di fondo posizionata tra la pista e la strada divelta dall'impatto e numerosi alberi piegati.

In via eccezionale, nel 2006 si sono verificati due eventi a breve tempo l'uno dall'altro. Durante l'evento del 18 febbraio 2006 la componente radente ha coperto la pista di fondo e si è arrestata a pochi metri dalla strada senza oltrepassarla, allargandosi verso Est e ostruendo per alcune ore il corso della Dora di Ferret (*Figura 4.1-13*); la componente nubiforme particolarmente densa e unita

al trasporto di rami ha raggiunto la chiesa come nel caso precedente, causando danni agli infissi degli edifici, ai vetri di un'automobile, a cartelli e lampioni.



*Figura 4.1-13: Valanga 18-030 - Evento del 18-02-2006, facciata dell'albergo Miravalle investita dal soffio.
Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT)*

Pochi giorni dopo, il 5 marzo 2006 è seguito un secondo evento in cui il soffio ha raggiunto nuovamente il piazzale di Planpincieux; questa volta, avendo accertato la condizione di elevata criticità, si era provveduto in anticipo all'evacuazione della zona e alla chiusura della strada.

Durante l'evento primaverile del 5 maggio 2008, la valanga radente si è arrestata poco oltre la Dora sulla pista di fondo, a 30 m dalla strada comunale, con larghezza all'accumulo di 30 m e spessore massimo di 5 m.

Negli anni seguenti altre valanghe nubiformi di minor rilievo sono avvenute nel 2010 e nel 2012, mentre nel 2021 si è abbattuta una valanga composta da componente nubiforme e neve pallottolare che ha raggiunto il piazzale e l'hotel Miravalle, senza però arrecare danni.

4.1.3 Area di distacco

La parte superiore del pendio è caratterizzata da elevate pendenze e assenza di irregolarità o sconessioni; ciò rende difficile l'individuazione precisa dell'area di distacco.

In assenza di opere paravalanghe, l'area di distacco interessava la parte alta del versante sopra il canalone di fronte al piazzale di Planpincieux, compresa tra le quote 2300 m s.l.m. (in cresta) e 2000 m s.l.m. e con larghezza variabile fino ad alcune centinaia di metri; il 20 gennaio 1981 ad esempio, l'area di distacco ha raggiunto la notevole larghezza di 500 m.

Negli eventi successivi al posizionamento dei deflettori tra il 1990 ed il 1996 sulla cresta del Mont de la Saxe e dei ponti da neve nel 1997, l'area di distacco è risultata modificata portando un significativo miglioramento nelle condizioni di sicurezza del versante. Tuttavia, data l'assenza nella parte alta del pendio di irregolarità ed incisioni, le sollecitazioni e le fratture nel manto nevoso sono in grado di propagarsi anche a grande distanza. (Figura 4.1-14).

È il caso ad esempio dell'evento eccezionale del 7 gennaio 2001, quando la frattura, estesa per circa 1200 m poco sotto le creste del Mont de La Saxe e di Tête de Bernarde, ha attivato in poche ore diverse valanghe oltre a quella studiata. La mobilitazione dell'intero manto nevoso del versante ha portato a gravi danni in diverse aree del fondovalle.



Figura 4.1-14: Valanga 18-030 - Evento del 07-01-2001, frattura nell'area di distacco. Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT)

Per quanto riguarda l'evento del 18 febbraio 2006, la frattura ha circondato i ponti da neve sul lato destro dalla quota della cresta (2300 m s.l.m.) alla quota della fila più bassa dei ponti da neve (2200 m s.l.m.), per poi allargarsi anche a sinistra di essi con una larghezza di quasi 200 m (Figura 4.1-15).



Figura 4.1-15: Valanga 18-030 - Evento del 18-02-2006, frattura nella parte alta della zona di distacco a destra dei ponti da neve. Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT)

Durante l'evento del 5 maggio 2008 invece le opere di protezione hanno prodotto l'effetto desiderato; la frattura della zona di distacco si è propagata per una larghezza notevole di 300 m, mantenendosi però sotto la quota 2200 m s.l.m., cioè sotto la fila più bassa di ponti da neve (Figura 4.1-16). La valanga scaturita non ha prodotto gravi danni, forse anche grazie al minore dislivello percorso.



Figura 4.1-16: Valanga 18-030 - Evento del 05-05-2008, frattura nella zona di distacco a valle dei ponti da neve. Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT)

Uno tra gli eventi più recenti registrati nel Catasto Valanghe, avvenuto il 28 gennaio 2021, ha visto l'arresto della parte radente alla base del canalone nel fondovalle con danni alle piste da sci ed il

soffio raggiungere il piazzale e gli edifici oltre la strada. Esso ha avuto un distacco lineare con quota massima della frattura a 2290 m s.l.m., ovvero in prossimità della cresta.

Nella figura seguente sono riportati i contorni delle valanghe avvenute nel 2001, 2006 e nel 2008. È opportuno ricordare che, durante l'evento catastrofico del 2001, la frattura non ha interessato solo la valanga 030 ma anche quelle vicine (censite come 044, 032, 013, 014); dunque la frattura riportata in *Figura 4.1-17* (in rosso) rappresenta solo un tratto dell'intera frattura osservata.

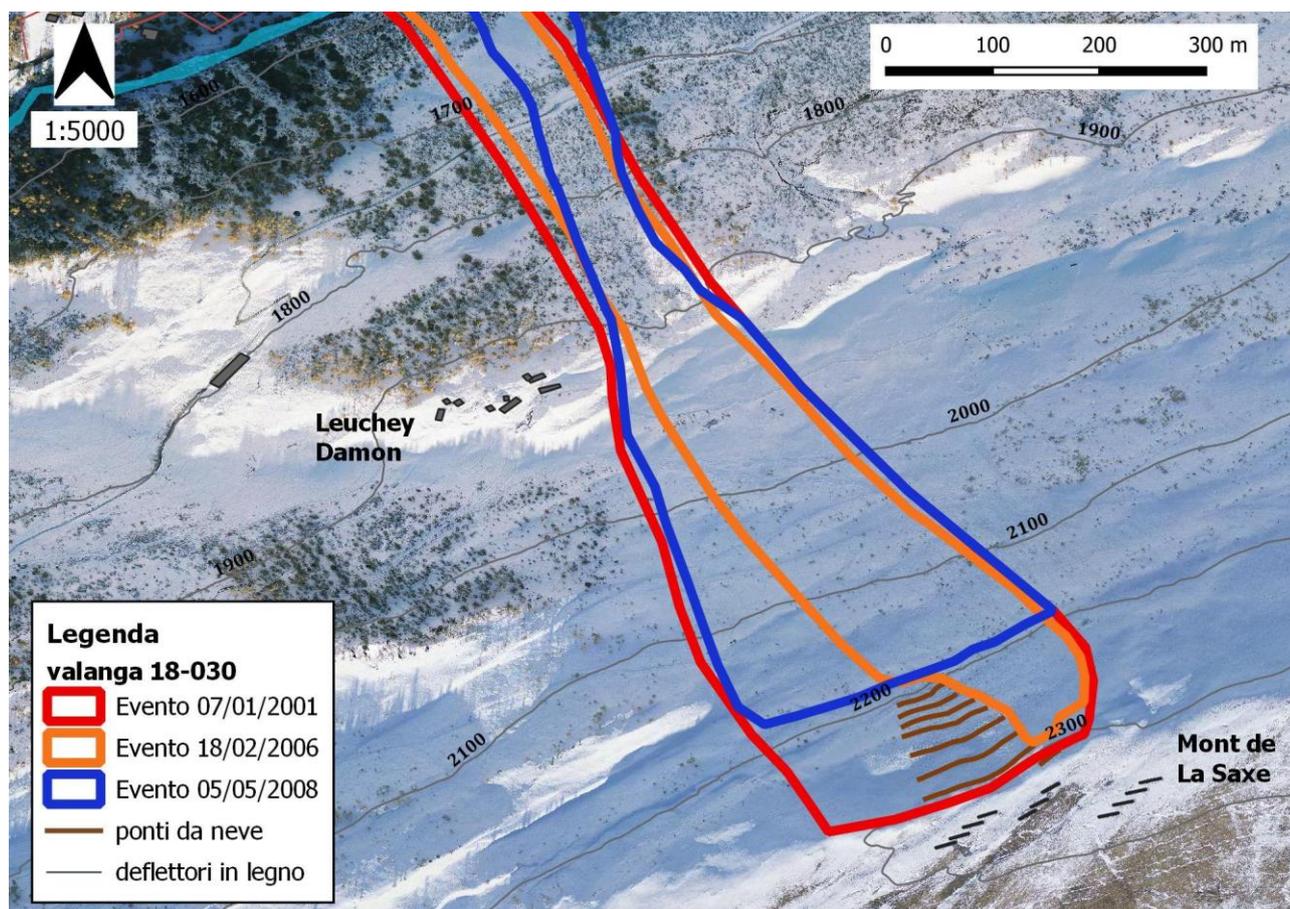


Figura 4.1-17: Valanga 18-030 – Posizione della frattura nella zona di distacco per alcuni eventi storici. Fonte shapefiles (Catasto Valanghe Regionale SCT). Elaborazione personale con QGIS

4.2 Analisi delle pendenze

In aggiunta all'analisi dei principali eventi storici, lo studio delle pendenze e delle forme che caratterizzano il pendio permette di individuare sul versante in via generale le aree di distacco, scorrimento e arresto (*Figura 4.2-1*).

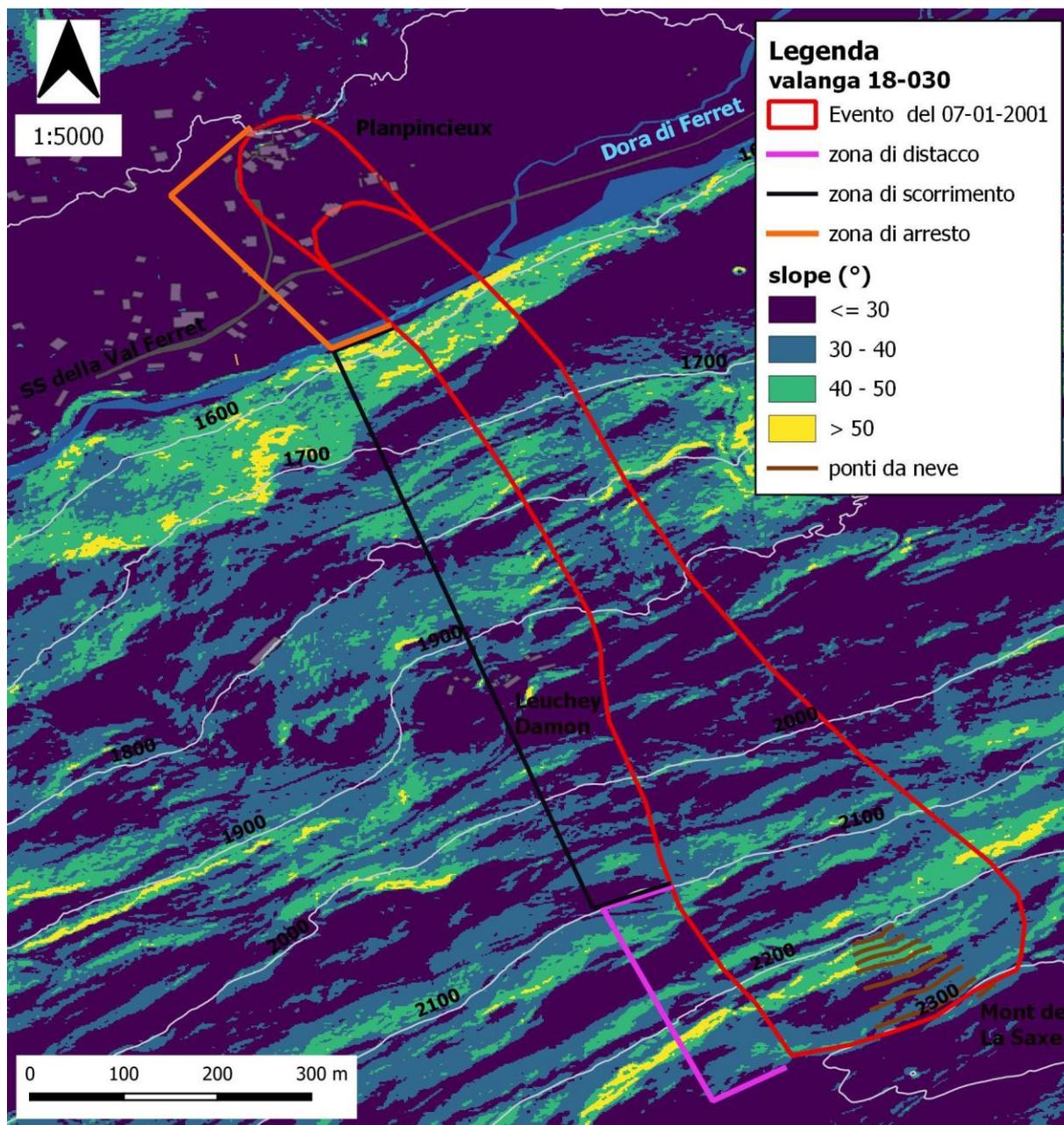


Figura 4.2-1: Valanga 18-030 – Pendenze del versante e suddivisione del bacino in zone di distacco, scorrimento, arresto. Fonte shapefiles (Catasto Valanghe Regionale SCT). Elaborazione personale con QGIS

Nella parte alta del versante, tra le quote 2300 e 2100 m s.l.m., le pendenze variano tra i 30 e i 50 gradi con tratti che superano anche i 50 gradi; questa zona può quindi essere imputata come zona di distacco, ad eccezione dell'area coperta dai ponti di legno. Si è visto però che la frattura al distacco riesce a propagarsi a quota 2300 m sia a destra che a sinistra rispetto ai ponti da neve. Data l'assenza di forme significative del pendio utile per una chiara definizione dell'estensione della zona di distacco si considerano come estremità della valanga 18-030 i limiti dei bacini valanghivi adiacenti (10-044 a sinistra e 18-031 a destra), per una larghezza di circa 350 m.

Di conseguenza la zona di scorrimento è indicativamente compresa tra la quota inferiore della zona di distacco (2100 m s.l.m.) e la quota dell'alveo della Dora, ai piedi del versante (1571 m s.l.m.).

Subito il pendio si addolcisce tra 2000 e 1900 m di quota con pendenze inferiori a 30 gradi (sullo stesso avvallamento si trovano le baite di Leuchey-Damon, a sinistra del sito valanghivo). Scendendo sotto la quota 1900 m s.l.m., l'inflessione delle curve di livello indica l'ingresso nel canale che si sviluppa fino a 1700 m di quota, con pendenze nuovamente elevate tra i 30 e i 40 gradi. Qui il pendio si riapre in un secondo terrazzo con basse pendenze, meno esteso rispetto al primo, prima dell'ultimo salto verso il fondovalle su pendenze molto elevate, anche superiori a 50 gradi.

A valle di quest'ultimo ripido salto si apre il fondovalle dove si trova la zona di arresto. La Dora scorre proprio contro montagna ed è la parte più depressa del fondovalle. Il letto infatti è limitato da scarpate alte circa 2.5 m (*Figura 4.2-2*).



Figura 4.2-2: Valanga 18-030 - Evento del 05-05-2008, zona di deposito, sulla destra l'alveo della Dora di Ferret ai piedi del pendio. Fonte (Catasto Valanghe Regionale SCT)

Oltre la Dora il fondovalle, largo circa 350 m, si trova interamente in destra orografica, in declivio verso il fiume ma con basse pendenze su tutta l'area occupata dagli edifici di Planpincieux.

Di seguito si riporta un profilo con rappresentate le quote del versante lungo la traiettoria verosimilmente seguita dalla valanga, ovvero tracciato sulle curve di livello tenendo conto dell'andamento della massima pendenza e della presenza del canale nella parte bassa del pendio (*Figura 4.2-3*).

Nel grafico successivo (*Figura 4.2-4*), dove l'andamento delle quote è suddiviso secondo le zone di distacco, scorrimento, arresto ed espansione del soffio si possono individuare i due terrazzi, il primo a circa 1900 m e il secondo a circa 1650 m di quota, le uniche forme che alterano la continuità del pendio. Inoltre si può chiaramente distinguere la parte più ripida del versante, seppur di ridotta lunghezza, che termina direttamente nel letto della Dora.

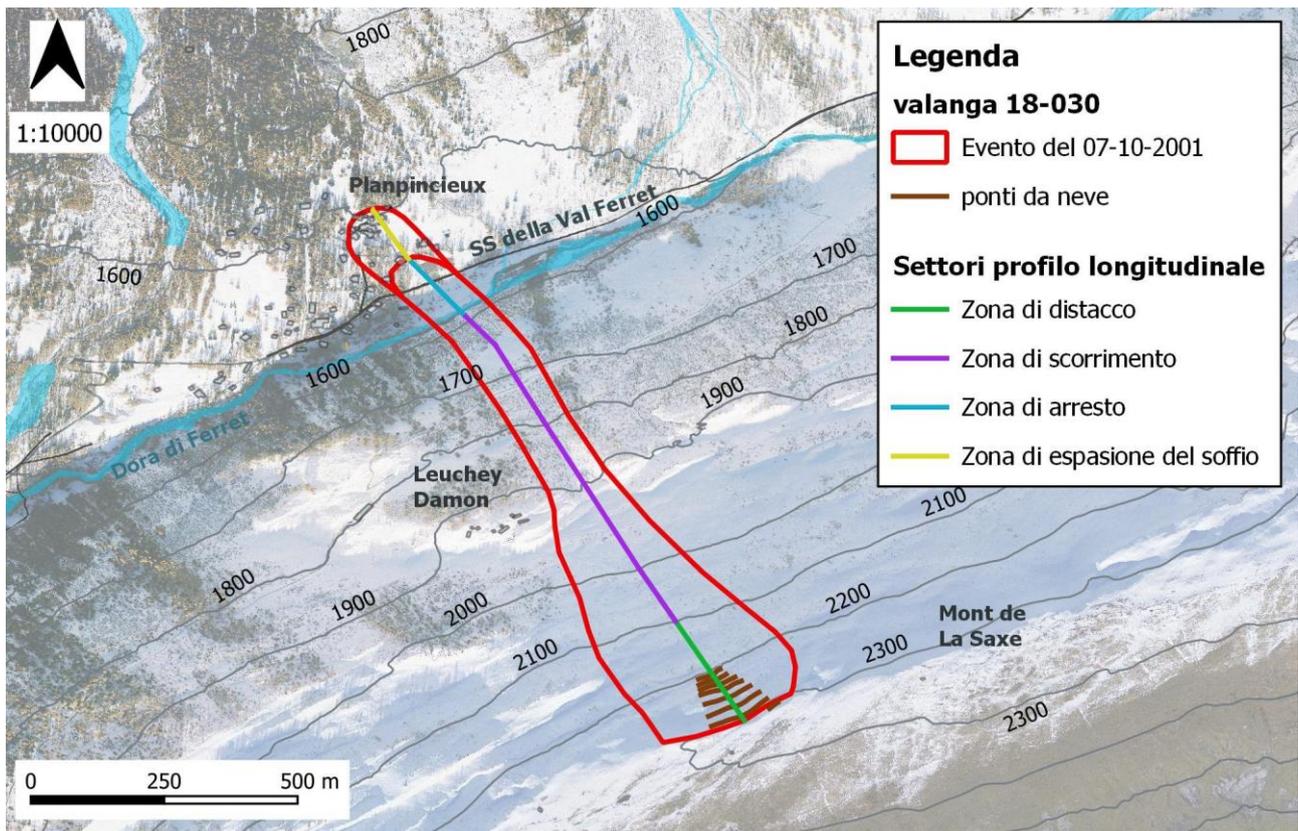


Figura 4.2-3: Valanga 18-030 – Profilo longitudinale del versante. Fonte shapefiles (Catasto Valanghe Regionale SCT). Elaborazione personale con QGIS

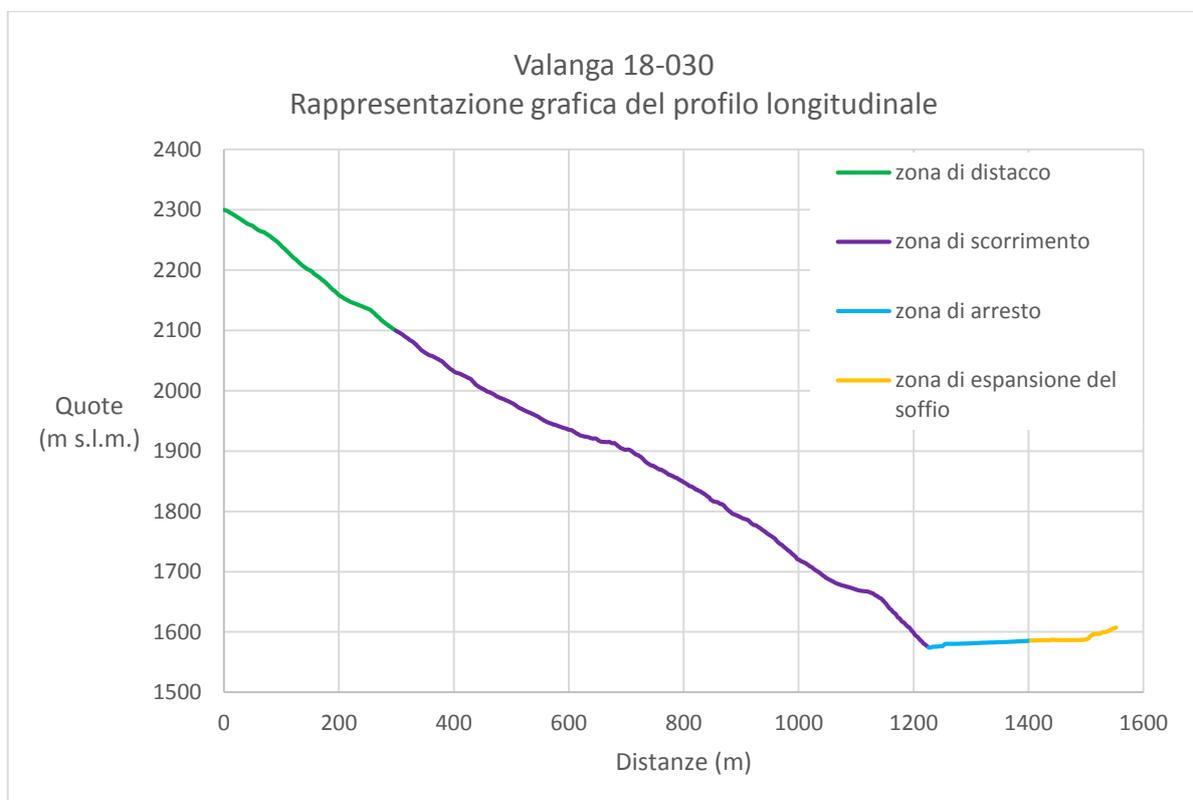


Figura 4.2-4: Valanga 18-03 - Rappresentazione grafica del profilo longitudinale. Elaborazione personale con Excel

4.3 Analisi della vegetazione e della copertura del suolo

Una prima indicazione sulla copertura del suolo fornita dai dati del Corinne Land Cover 2018, disponibile sul sito del Copernicus Land Monitoring Service (CORINE Land Cover), riporta che il sito valanghivo 18-030 è inquadrato in due classi di vegetazione: la parte bassa del pendio è caratterizzata da vegetazione boschiva ed arbustiva, la parte alta del sito da brughiere e cespuglieti (Figura 4.3-1). Questa divisione avviene a circa 1950 m di quota.

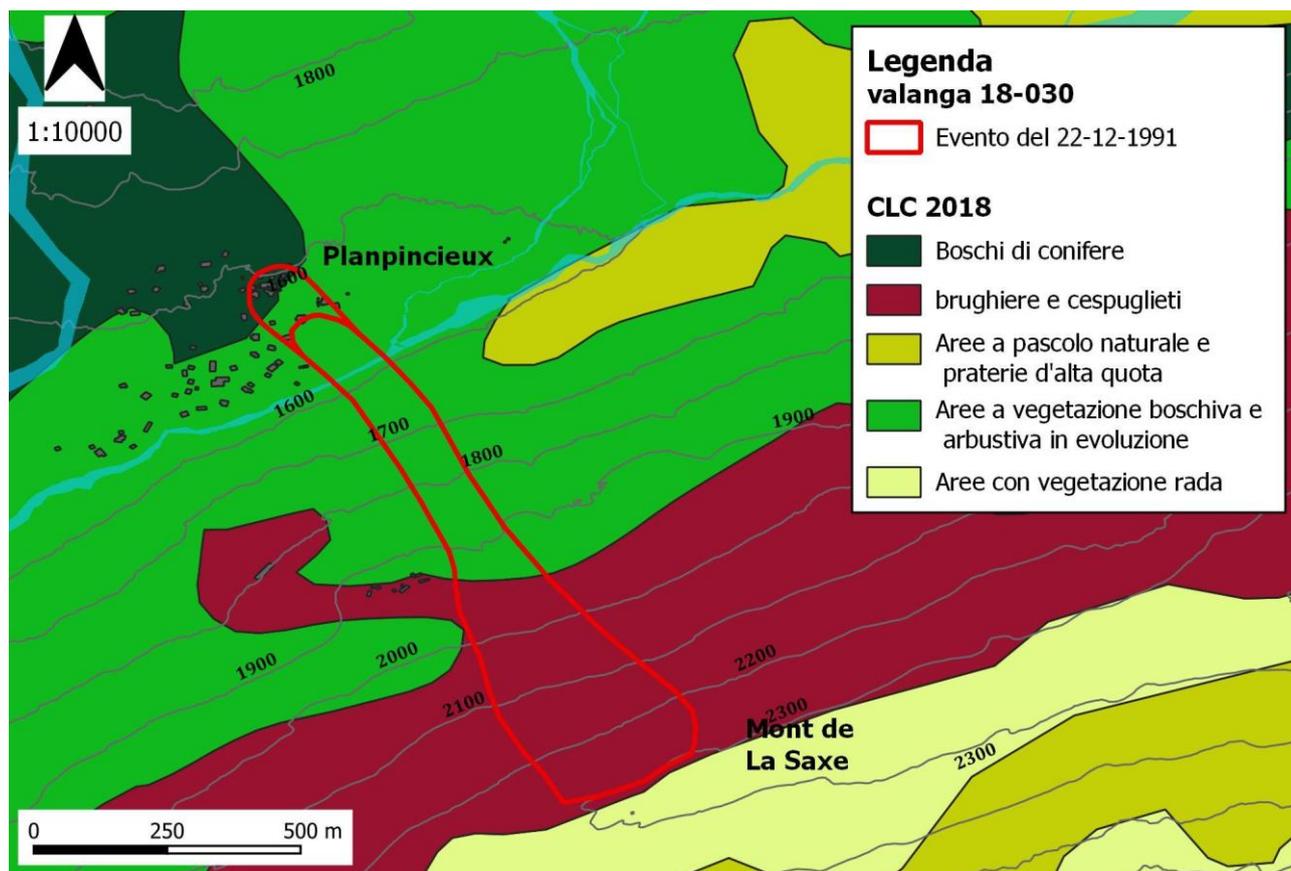


Figura 4.3-1: Valanga 18-030 - Copertura del suolo. Fonte shapefiles (CORINE Land Cover). Elaborazione personale con QGIS

Da un sopralluogo sul posto (Figura 4.3-2, Figura 4.3-3) è emerso che anche nella parte bassa del pendio gli alberi, in prevalenza conifere, sono presenti ai lati del canale che ospita il flusso valanghivo, mentre al suo interno vi è assenza di alberi ad alto fusto e presenza di cespugli e specie arbustive a basso fusto fino al fondovalle, chiaro segno del passaggio frequente di valanghe. La fascia di alberi sul lato destro del canale è peraltro molto ristretta, per la presenza in adiacenza del canale corrispondente al sito valanghivo 18-031. Nella parte alta si conferma presenza di vegetazione erbacea ed arbustiva fino alla sommità del sito. Essendo prevalente la copertura vegetale su pendii dalle forme dolci e rotonde, si ritiene di considerare bassa la rugosità del sito.



Figura 4.3-2: Valanga 18-030 - Vegetazione nella zona di scorrimento. Foto: Giulia Venturato



Figura 4.3-3: Valanga 18-030 - Vegetazione della zona di distacco e scorrimento. Foto: Giulia Venturato

4.4 Studio della dinamica valanghiva

Il sistema di previsione e di allerta regionale gestito dal Centro Funzionale della Regione Autonoma Valle d'Aosta (Centro Funzionale Regione Autonoma Valle d'Aosta), si occupa dello studio dei fenomeni naturali che possono causare danni sul territorio quali:

- Fenomeni meteorologici: temporali, nevicate, vento forte, ondate di calore;
- Fenomeni idrogeologici: frane sul territorio e inondazioni sui torrenti;
- Fenomeni idraulici: inondazioni sulla Dora Baltea;
- Fenomeni valanghivi: distacco di valanghe.

Per l'attività di previsione il territorio regionale è stato suddiviso in quattro sottozone omogenee caratterizzate da una risposta meteorologica omogenea, tenute in considerazione l'idrografia, la meteorologia e l'orografia del territorio (*Figura 4.4-1*). Tra queste, la Val Ferret fa parte della zona D (Dorsale settentrionale e nord-occidentale, Valgrisenche e Valdigne).



Figura 4.4-1: Suddivisione del territorio regionale nelle quattro sottozone omogenee. Fonte (Centro Funzionale Regione Autonoma Valle d'Aosta)

A valle dell'attività di previsione, vengono emessi ogni giorno:

- Il bollettino meteorologico;
- Il bollettino di vigilanza (rischio idrogeologico, idraulico);
- Il bollettino neve e valanghe (nella stagione invernale).

Il Centro Funzionale Regionale, valutati gli effetti sul territorio potenzialmente derivanti dagli eventi previsti dai bollettini sopracitati, riunisce i risultati di tali valutazioni in un unico bollettino di criticità emesso giornalmente, strumento fondamentale ai fini di protezione civile.

Per quanto concerne la valutazione del pericolo e della criticità valanghiva, il territorio regionale viene suddiviso ulteriormente in ventisei sottozone omogenee a partire dalle quattro zone di allerta omogenee appena citate.

Il bollettino, nella sezione relativa alla criticità valanghiva, pur fornendo importanti dati utili alla valutazione per pericolo, fornisce comunque informazioni troppo generiche e non applicabili per una valutazione locale del pericolo.

Infatti, come precisato al punto 4.3.3 *Criticità valanghiva* del paragrafo 4.3 *Sistemi di soglie delle Disposizioni e procedure operative per l'attivazione della Direttiva del Presidente del consiglio dei ministri del 27 Febbraio 2004 (SUPP. G.U. N. 59 dell'11 marzo 2004) e successive modifiche e integrazioni* (Regione Autonoma Valle d'Aosta, 2013) non è possibile definire soglie univoche relative all'altezza della neve da utilizzare nel sistema di allertamento, dal momento che il pericolo è il risultato dell'interazione di molteplici fattori meteorologici ed ambientali che vanno osservati e valutati localmente caso per caso.

Di seguito a ciò, nel presente capitolo si è cercato di valutare alla scala locale del sito di interesse (valanga 18-030), un set di soglie relativo all'altezza della neve, da tenere in considerazione nell'ambito del sistema di allerta valanghiva e di gestione del rischio ai fini di protezione civile. Si sottolinea che tutti gli aspetti legati alla stabilità del manto nevoso, che portano alla redazione di un bollettino valanghe e, di conseguenza, di un bollettino di criticità, non sono stati trattati in questa tesi.

Data la vasta casistica di situazioni compatibili con una condizione di pericolo e la complessa interazione tra molteplici fattori concomitanti, nei paragrafi seguenti è stata trattata solo una tra le tante possibili situazioni valanghive pericolose; nell'ottica di pervenire ad una completa valutazione del pericolo in un particolare sito valanghivo, tale procedimento di valutazione preventiva dovrebbe essere esteso a tutte le possibili situazioni di pericolo.

In particolare, l'evento di progetto, ovvero un evento valanghivo teorico caratterizzato da prefissata periodicità, è stato definito a seguito dell'analisi degli eventi storici precedentemente analizzati per la valanga 18-030 e a valle della fase di taratura del modello per lo studio della dinamica valanghiva.

Lo studio della dinamica della valanga è stato effettuato attraverso il software RAMMS di dinamica per valanghe radenti sviluppato dall'Istituto WSL per lo studio della neve e delle valanghe SLF di Davos (WSL - Istituto per lo studio della neve e delle valanghe SLF). Le caratteristiche del modello sono descritte nel dettaglio nei paragrafi seguenti.

Per l'esecuzione delle simulazioni è necessario definire anticipatamente le caratteristiche dell'evento da rappresentare nel modello, tra le quali di fondamentale importanza sono il tempo di ritorno e l'area di distacco della valanga.

Per tempo di ritorno si intende il numero di anni che intercorre, mediamente, tra due eventi in grado di interessare con una certa intensità una determinata area. Nella fase di definizione delle caratteristiche dell'evento da utilizzare per la taratura del modello, il tempo di ritorno è stato ipotizzato in funzione delle caratteristiche di deposito dell'evento storico selezionato e della frequenza di accadimento di tale fenomeno nei confronti delle altre valanghe osservate, nonostante

il ridotto numero di eventi storici registrati non permetta una determinazione precisa di tale parametro.

4.4.1 Definizione dell'evento di progetto

Come già visto, gli elementi vulnerabili al distacco della valanga 18-030 sono gli edifici della frazione di Planpincieux, la pista di fondo e la strada comunale.

Essendo la strada comunale "La Palud" che risale la valle da Courmayeur fino alla località Arprouva l'unica via di accesso alla valle, essa è di fondamentale importanza per la popolazione e le attività turistiche che vi si trovano. Infatti, oltre ad essere una meta ricercata per la bellezza e la naturalità degli ambienti alpini, in inverno la valle è frequentata per le escursioni sulla neve a piedi o con le ciaspole, per l'attività dello scialpinismo e dello sci di fondo, che si pratica sulla pista che attraversa il fondovalle da Planpincieux a Lavachey. Parallelamente alle molteplici attività sportive, nella valle si trovano numerose strutture ricettive e per la ristorazione.

In una prima fase dello studio della dinamica valanghiva, si è provato a riprodurre un evento reale con determinate caratteristiche in RAMMS calibrando i parametri di input in modo tale da ottenere dalla simulazione l'esito osservato durante l'evento reale. A valle di questa prima fase di taratura del modello, i parametri di input hanno caratterizzato la valanga di progetto e sono stati utilizzati nelle successive simulazioni.

Dal momento che RAMMS è un software di dinamica per valanghe radenti, è stato selezionato tra le valanghe storiche un evento di cui fossero note le principali caratteristiche di tipo radente.

Tra gli eventi storici riportati nel Catasto Valanghe Regionale, la maggior parte è rappresentata da valanghe miste (*Tabella 4.4-1*). Ai fini delle simulazioni con RAMMS è stata considerata solamente la componente radente di questi eventi trascurando quella nubiforme.

DATA	ARRESTO	TIPO DI MOTO	TIPO DI VALANGA	TIPO DI DISTACCO	COESIONE	TIPO DI NEVE
20/01/1981	Soffio su strada	nubiforme	di superficie	lineare	elevata	asciutta
Mar-83	/	/	/	/	/	/
1984	/	/	/	/	/	/
15/02/1990	/	/	di superficie	lineare	/	asciutta
22/12/1991	Soffio davanti ad albergo Miravalle	nubiforme	di superficie	puntiforme	debole	asciutta
23/01/1995	Soffio e neve pallottolare nel parcheggio	/	di superficie	lineare	/	/
07/01/2001	Davanti ad albergo Miravalle	mista	di fondo	lineare	debole	asciutta
18/02/2006	A pochi m dalla strada; soffio sul piazzale	mista	/	lineare	debole	/
05/03/2006	Soffio nel piazzale	/	/	/	/	/
Mar-07	/	/	/	/	/	/
05/05/2008	30 m prima della strada	/	/	lineare	elevata	/
28/02/2010	Poco dopo la Dora	/	/	/	/	/

06/12/2010	Soffio su strada	nubiforme	/	/	/	/
Apr-11	/	/	/	puntiforme/lineare	debole ed elevata	bagnata
15/12/2012	Arresto su strada	nubiforme	di superficie	puntiforme	elevata	asciutta
06/03/2020	Nella Dora	mista	di superficie	lineare	elevata	asciutta
28/01/2021	Soffio e neve pallottolare su piazzale e albergo	mista	di superficie	lineare	elevata	asciutta

Tabella 4.4-1: Eventi storici per la valanga 18-030. Fonte dati (Regione Autonoma Valle d'Aosta). Elaborazione personale con Excel

Nell'ottica di valutare l'interferenza della valanga con la strada La Palud, si è osservato che eventi arrestatisi presso la strada e di tipo radente si sono verificati nel 2001 e nel 2006; la restante parte degli eventi storici riguarda infatti o valanghe nubiformi o valanghe caratterizzate da arresto in zona di deposito lontano dalla strada.

Tra i due individuati si è scelto di riprodurre in RAMMS l'evento del 18 febbraio 2006. Questa valanga è stata caratterizzata da una componente nubiforme e da una radente; in particolare quest'ultima ha superato la Dora e coperto la pista di fondo, senza oltrepassare la strada comunale. I danni principali sono stati provocati dal soffio propagatosi verso gli edifici di Planpincieux.

Si è preferita questa valanga rispetto a quella del 2001 per la maggior semplicità nella riproduzione di questo evento. Come già visto, l'evento del 2001 ha avuto un distacco diffuso lungo l'intero versante, con una frattura lunga complessivamente più di 1000 m; è probabile che durante l'evento siano avvenuti diversi distacchi a breve distanza di tempo l'uno dall'altro e non è da escludere che ci siano state interazioni tra questi. Nel 2006 è avvenuto invece un unico distacco con limiti ben individuati e tracciati dal Catasto Valanghe Regionale.

Questo evento ha visto il distacco della porzione di manto nevoso a destra dei ponti da neve, con l'arresto della componente radente oltre la pista di fondo a pochi metri dalla strada comunale, e danni da parte della componente polverosa ad automobili ed infissi. Sia l'evento del 2001 sia l'evento del 2006 presentano caratteristiche uniche mai ripetute tra gli eventi storici documentati. Quest'ultimo si colloca come secondo tra gli eventi storici registrati per magnitudo e distanza di arresto della componente radente. Per la taratura del modello, si è ipotizzato per l'evento valanghivo del febbraio 2006 un tempo di ritorno di 100 anni.

In linea generale l'osservazione dei danni provocati dalla valanga può aiutare ad ipotizzare l'ordine di grandezza delle pressioni di impatto della valanga nella zona di deposito, per avere un ulteriore parametro di confronto con i risultati delle simulazioni. In questo caso però i danni sono stati provocati dalla componente nubiforme, la quale non viene considerata in RAMMS.

4.4.1.1 Area di distacco dell'evento di progetto

L'area di distacco da utilizzare per le simulazioni con RAMMS è stata tracciata seguendo il perimetro definito dal Catasto Valanghe per l'evento del 18 febbraio 2006, ovvero è stata considerata tutta la porzione di pendio a destra dei ponti da neve.

Nel tracciare il *piede* dell'area di distacco si è tenuto conto anche del processo naturale di erosione da parte del manto nevoso, non considerato dal software utilizzato RAMMS Operational.

Si è dunque ipotizzata una zona di distacco compresa tra le quote 2125 e 2300 m s.l.m. compresa lateralmente nei limiti della valanga definiti da Catasto Valanghe per una larghezza di circa 350 m (Figura 4.4-2).

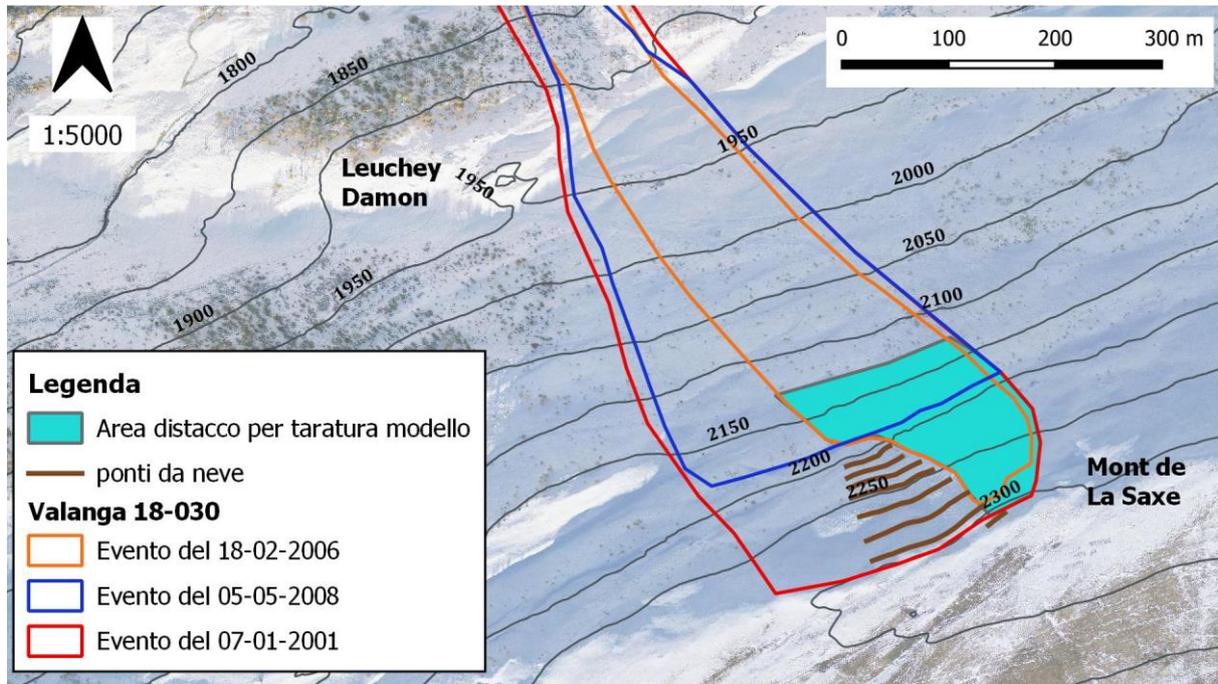


Figura 4.4-2: Area di distacco definita per la taratura del modello a partire dell'evento del 18 febbraio 2006. Fonte shapefiles (Catasto Valanghe Regionale SCT). Elaborazione personale con QGIS

4.4.2 Definizione dei parametri nivometrici di progetto

Per condurre le simulazioni di dinamica delle valanghe è necessario definire lo spessore di neve nella zona di distacco dal quale deriva il volume iniziale della valanga. Non avendo a disposizione il dato relativo allo spessore di distacco per l'evento storico del 2006 (utilizzato per la taratura del modello), si è fatto riferimento ai risultati dello studio *Definizione dei valori di progetto di parametri nivometrici standard per la prevenzione del rischio valanghivo sul territorio valdostano* (Barbolini & Ferro, 2005), realizzato nell'ambito del *Progetto strategico "STRADA" Obiettivo cooperazione territoriale europea Italia/Svizzera (Alpi) 2007-2013* e del *Progetto "STRADA 2.0-CAPVAL" Italia/Svizzera 2007/2013*.

Tale studio ha portato alla definizione su tutto il territorio regionale dei valori delle due variabili nivometriche di interesse per la progettazione degli interventi di difesa attiva o passiva dalle valanghe e per la mappatura delle aree a rischio valanghe, ovvero l'altezza del manto nevoso al suolo (H_s) e l'incremento dell'altezza del manto nevoso su tre giorni consecutivi di precipitazione ($DH3gg$). Sono state definite in particolare le relazioni tra i due parametri e la posizione geografica, la quota e il tempo di ritorno, attraverso un'analisi statistica di tipo regionale.

Il campione di dati, fornito dall'Ufficio Meteo e dall'Ufficio Valanghe della Regione Autonoma Valle d'Aosta, è costituito dai dati di 43 stazioni di tipo "manuale" operative in modo continuo o discontinuo sul territorio regionale dalla stagione 1912-1913 alla stagione 2003-2004, tutte caratterizzate da almeno 10 anni di registrazioni e con quasi il 50% di stazioni con serie storiche di lunghezza superiore a 50 anni. Con l'aggiornamento dello studio effettuato nel 2013 il campione di dati è stato allargato grazie all'aggiunta dei dati forniti da 12 stazioni automatiche appartenenti alla rete gestita dalla Regione Autonoma Valle d'Aosta.

La prima fase dello studio ha riguardato il filtraggio dei dati: in primo luogo è stata affrontata la mancanza puntuale di dati nelle serie, risolta o con il riempimento manuale dei "buchi" o con l'eliminazione dell'intera stagione. Successivamente è stata verificata la vicinanza tra le date di misura dei massimi valori stagionali per stazioni simili in quanto a posizione geografica e/o quota, ed infine sono state confrontate le serie dei massimi stagionali tra stazioni appartenenti alla stessa zona geografica (anche a quote diverse).

Il campione di massimi stagionali di Hs e DH3gg ottenuto a valle di questi controlli è stato poi sottoposto all'analisi statistica regionale di seguito descritta. Si sottolinea che il filtraggio dei dati è stato effettuato cercando di minimizzare le valutazioni soggettive introdotte nelle serie del campione di dati.

Dal campione filtrato è stato estratto per ogni stazione il valore medio dei massimi stagionali di Hs e DH3gg. Di questi valori medi ottenuti è stata valutata la variabilità spaziale in funzione della posizione geografica e della quota.

Rispetto ai valori medi di Hs è stata appurata la dipendenza dalla quota attraverso un andamento rappresentabile con una curva "bilineare", formata cioè da due interpolanti del primo ordine (Figura 4.4-3).

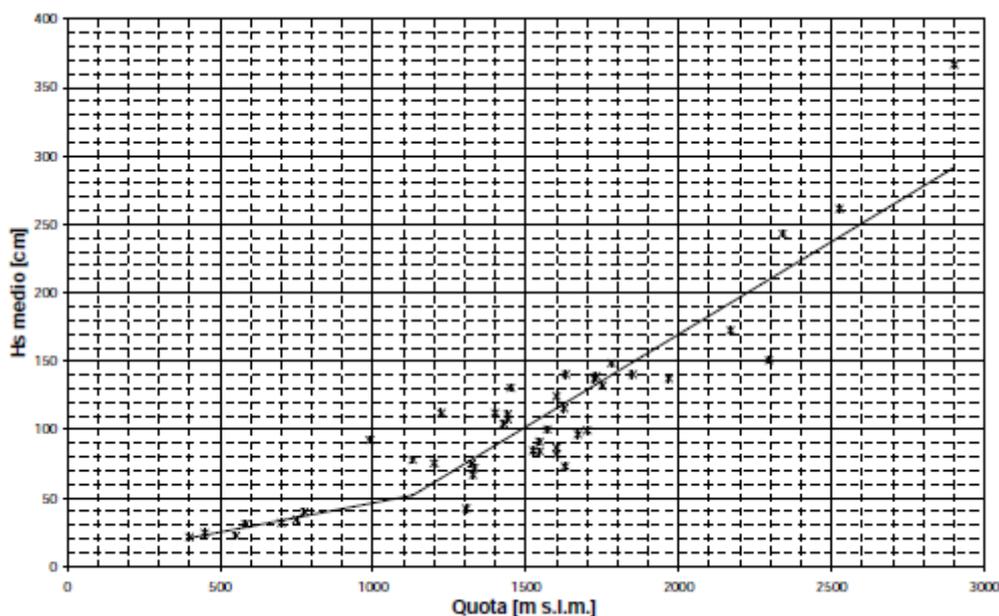


Figura 4.4-3: Correlazione fra quota e $H_{s\text{medio}}$. Fonte (Barbolini & Ferro, 2005)

Per quanto riguarda la relazione tra i valori medi di DH3gg e la quota, è stato valutato un andamento lineare riconducibile ad una polinomiale del primo ordine passante per l'origine (*Figura 4.4-4*).

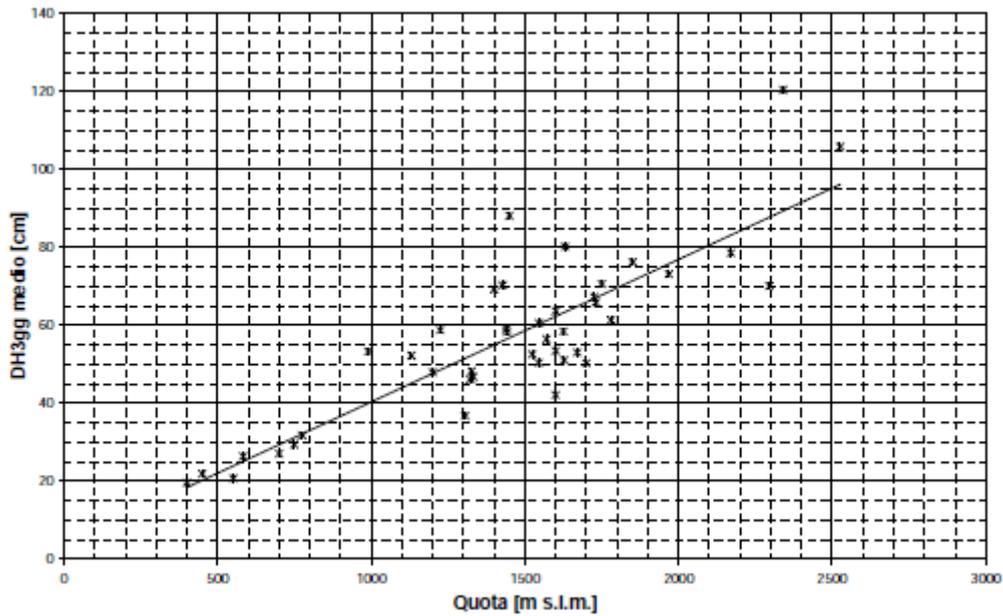


Figura 4.4-4: Correlazione fra quota e DH3gg_{medio}. Fonte (Barbolini & Ferro, 2005)

Per valutare la variabilità rispetto alla posizione geografica delle due variabili nivometriche, è stato calcolato lo scarto percentuale tra i valori del campione e la funzione caratterizzante il legame tra i valori medi e la quota trovata al passo precedente. Tali scarti sono stati collocati su una carta geografica dell'area di studio per individuare eventuali zone caratterizzate da scarti appartenenti ad uno stesso intervallo di valori. Sono state così individuate due sottozone omogenee (*Figura 4.4-5*).

- Zona A, ovvero zona a maggior innevamento, caratterizzata da scarti negativi (sovrastime rispetto alla curva interpolante);
- Zona B, ovvero zona a minor innevamento, caratterizzata da scarti positivi (sottostime rispetto alla curva interpolante).

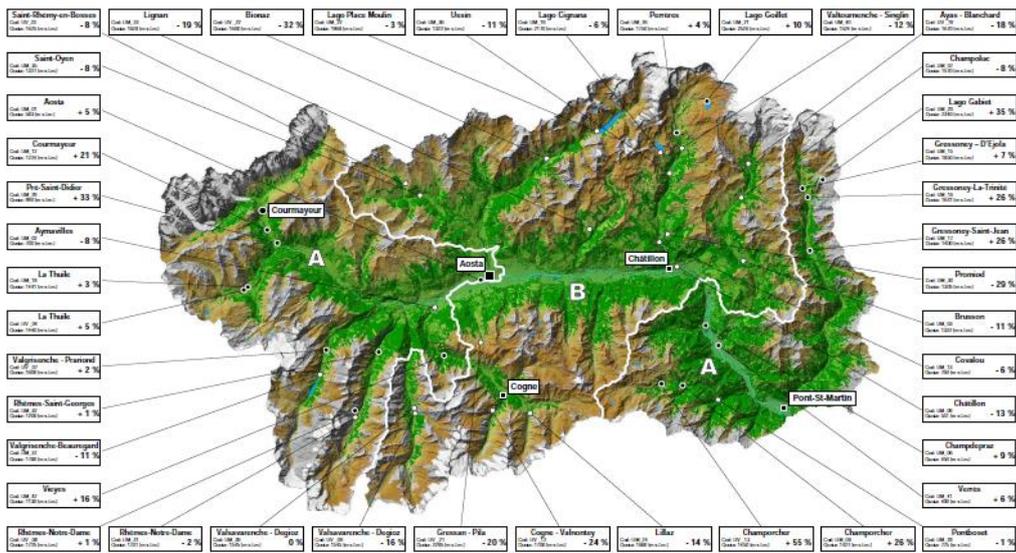


Figura 4.4-5: sottozone omogenee- Zona A e Zona B. Fonte (Barbolini & Ferro, 2005)

È stata così rivalutata separatamente la dipendenza dalla quota dei valori medi afferenti alle due sottozone omogenee appena trovate, ottenendo due nuove curve “bilineari”, caratterizzate da un maggiore coefficiente di correlazione rispetto alla funzione interpolante del campione regionale (Figura 4.4-6).

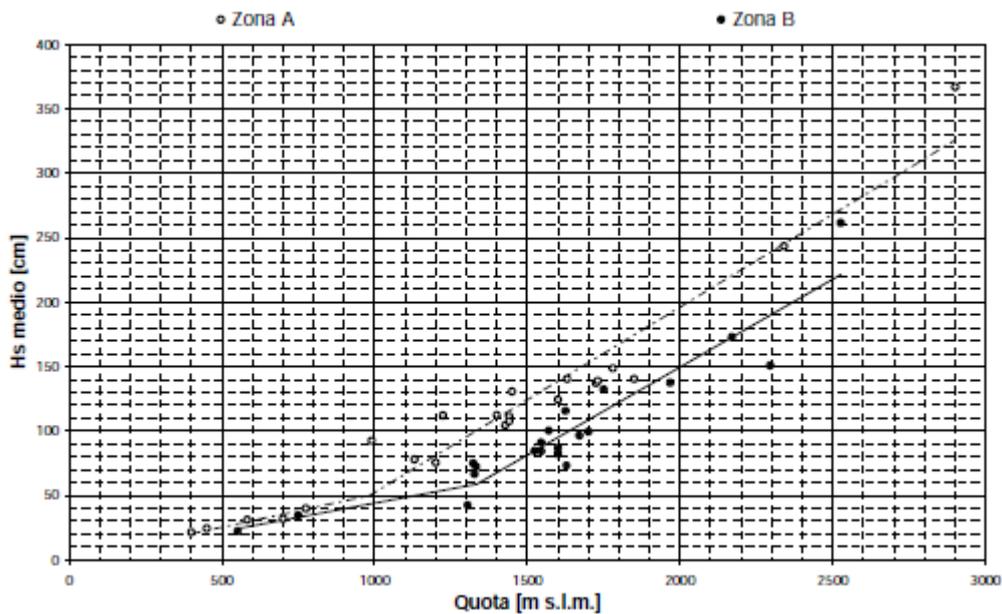


Figura 4.4-6: Correlazione fra quota e Hs_{medio} per le due zone nivometriche “A” e “B”. Fonte (Barbolini & Ferro, 2005)

La stessa procedura per la ricerca del legame con la posizione geografica è stata effettuata tra il campione di valori medi di DH3gg e la funzione interpolante lineare, portando a confermare le due

aree omogenee trovate con lo studio dei valori di Hs, seppur riscontrando qualche anomalia. È stata infine rianalizzata la dipendenza di DH3gg dalla quota per i due gruppi di valori relativi alla Zona A e alla Zona B, ottenendo anche in questo caso correlazioni migliori tra la quota e i valori medi di DH3gg (Figura 4.4-7).

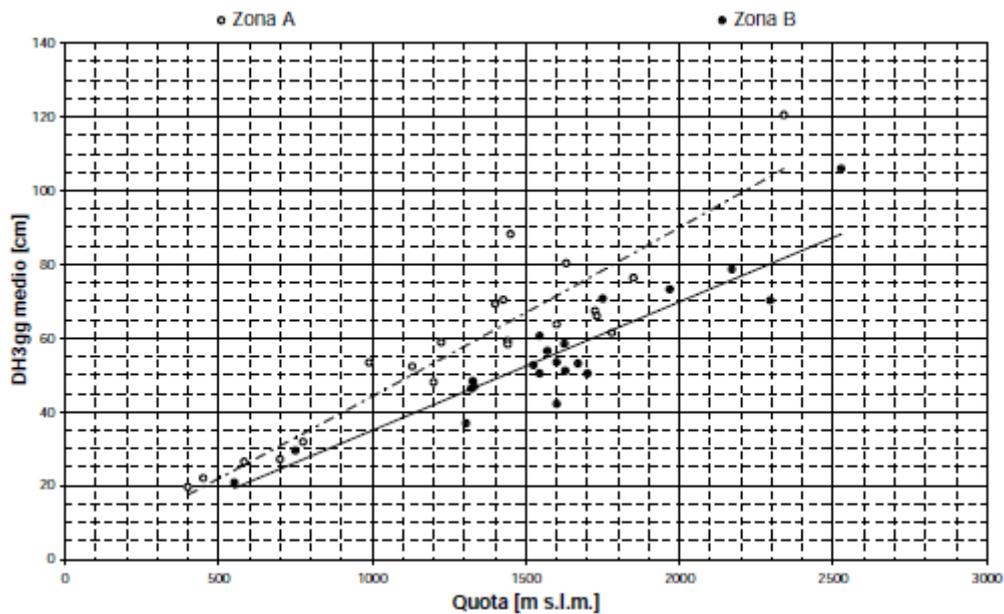


Figura 4.4-7: Correlazione fra quota e $DH3gg_{medio}$ per le due zone nivometriche "A" e "B". Fonte (Barbolini & Ferro, 2005)

I risultati dell'analisi della variabilità spaziale dei valori medi di Hs e DH3gg sono poi stati utilizzati, combinati con le curve di crescita regionali descritte di seguito, per la stima dei valori dei parametri nivometrici Hs e DH3gg.

L'analisi statistica di tipo regionale è stata condotta separatamente per le sottozone omogenee A e B sulle stazioni aventi un numero di dati superiore a 40, ovvero 28 stazioni, per ridurre le distorsioni della stima dei momenti ordine superiore al primo legate a limitate serie di dati; dall'analisi regionale è stato ottenuto il legame tra le variabili nivometriche di interesse Hs e DH3gg ed il tempo di ritorno.

Per lo svolgimento dell'analisi regionale è stato applicato al nuovo campione di dati il metodo del "valore indice" ((Kite, 1988); (Cunnane, 1989); (Maione & Moisello, 1993); (Hosking & Wallis, 1997)).

Tale metodo prevede che il parametro di progetto sia il risultato del prodotto tra un valore medio \bar{x}_j e di un valore legato al tempo di ritorno estratto dalla curva di crescita regionale $y(T)$ (1):

$$x_j(T) = y(T) * \bar{x}_j \tag{1}$$

Per curva di crescita regionale si intende la distribuzione di probabilità dei valori y_{ij} della variabile adimensionale ottenuta dal rapporto tra ciascun valore x_{ij} della serie di dati delle M stazioni e la media del proprio campione \bar{x}_j (3) di dimensione N_j (2) :

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\bar{x}_j} \quad (2)$$

$$\bar{x}_j = \sum_i x_{ij} / N_j \quad (3)$$

Dove $i=1, \dots, N_j$ e $j=1, \dots, M$.

Il metodo assume che i campioni di valori adimensionali delle diverse stazioni abbiano la stessa curva di crescita regionale, ovvero siano rappresentate dalla stessa distribuzione di probabilità. Il grado di omogeneità tra i dati è stato valutato attraverso il coefficiente di variazione CV, verificando che si rispettasse la condizione $CV(CV_j) < 0.4$.

La distribuzione di probabilità utilizzata nello studio è la legge Wakeby a 5 parametri (m, a, b, c, d), la cui funzione quantile ha la seguente espressione (4) (Houghton, 1978):

$$y(F) = m + a * [1 - (1 - F)^b] - c * [1 - (1 - F)^{-d}] \quad (4)$$

La stima regionale dei parametri della legge Wakeby è stata effettuata mediante il metodo dei momenti pesati in probabilità (Greenwood, Landwehr, Matalas, & Wallis, 1979).

I momenti di ordine k della distribuzione di probabilità regionale \overline{M}_k sono stati ottenuti come media pesata dei momenti relativi alle serie di valori adimensionali di ogni stazione ($M_{(k)j}$), utilizzando come peso il numero di osservazioni relative ad ogni stazione N_j (5):

$$\overline{M}_k = \frac{\sum_{j=1}^M (M_{(k)j} * N_j)}{\sum_{j=1}^M N_j} \quad (5)$$

I parametri della curva di crescita regionale sono stati quindi calcolati mediante relazioni algebriche con i momenti pesati in probabilità M_k ((Landwehr, Matalas, & Wallis, 1979-a); (Landwehr, Matalas, & Wallis, 1979 b)) di conseguenza è risultata definita la curva di crescita regionale $y = y(T)$.

Relativamente ai campioni di Hs e DH3gg considerati, nonostante il coefficiente CV regionale soddisfacesse il criterio di omogeneità ($CV(CV) < 0.4$), è stato scelto di raggruppare le rispettive serie in tre classi in funzione delle quote delle stazioni, ottenendo così un aumento ulteriore del grado di omogeneità all'interno delle singole classi.

- Classe 1: stazioni a quote inferiori a 900 m s.l.m.;
- Classe 2: stazioni a quote comprese tra 900 e 1700 m s.l.m.;
- Classe 3: stazioni a quote superiori a 1700 m s.l.m.

Sono state così definite tre curve di crescita regionale per la variabile H_s (Figura 4.4-8) e per la variabile $DH3gg$ (Figura 4.4-9).

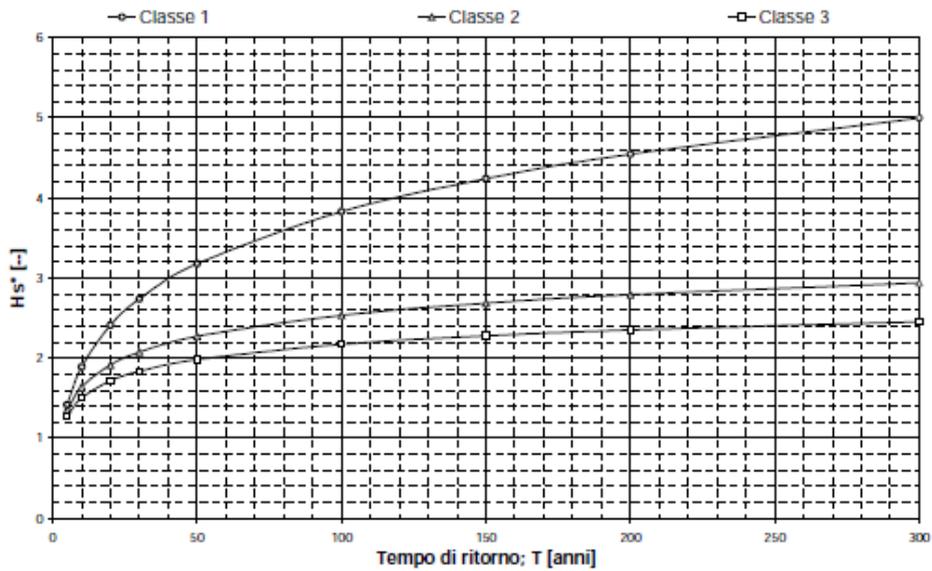


Figura 4.4-8: Curve di crescita regionale di H_s per il territorio valdostano, con riferimento alle tre differenti classi di quote. Fonte (Barbolini & Ferro, 2005)

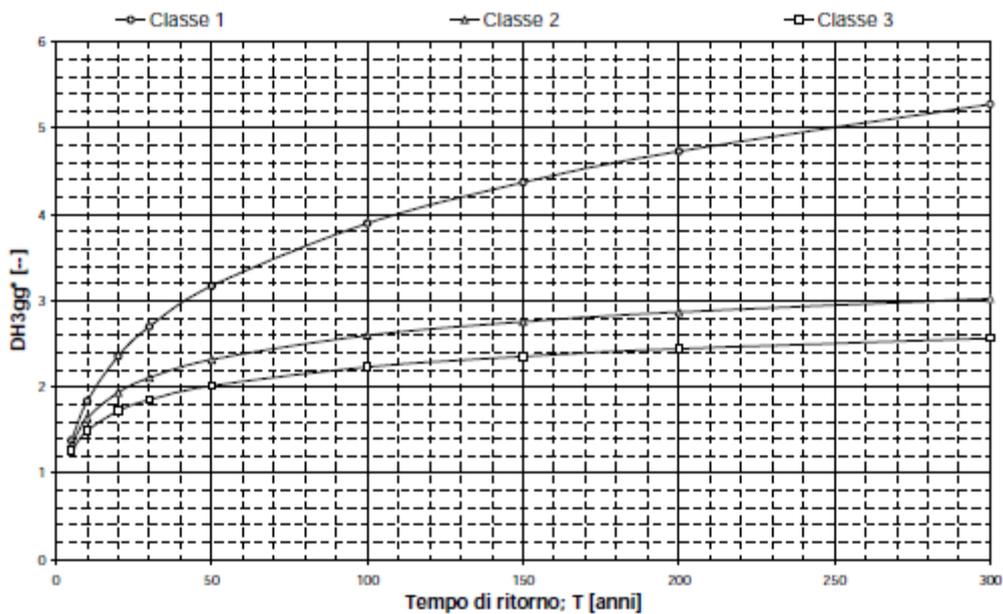


Figura 4.4-9: Curve di crescita regionale di $DH3gg$ per il territorio valdostano, con riferimento alle tre differenti classi di quote. Fonte (Barbolini & Ferro, 2005)

Il termine medio \bar{x}_j dell'espressione (1) è invece derivabile a partire da regressioni sui parametri morfometrici della zona di distacco. Nel caso in esame, il valore medio dei parametri nivometrici di

interesse è calcolabile a partire dalle relazioni di interpolazione in funzione della quota relative alle due sottozone omogenee (Zona A e Zona B) ricavate nella fase di studio della variabilità spaziale di Hs e DH3gg.

Questa procedura permette così di stimare i valori dei parametri nivometrici su tutto il territorio valdostano, ed in particolare anche in siti non strumentati, quali le zone di distacco di pendii esposti a valanghe, di interesse per lo studio della dinamica delle valanghe.

Inoltre, grazie all'analisi regionale è stato possibile migliorare l'accuratezza delle stime delle variabili nivometriche di progetto per tempi di ritorno elevati.

4.4.3 Modello di calcolo

L'analisi di dinamica è stata svolta con il software RAMMS (Rapid Mass Movement Simulation), versione 1. 7. 20, un applicativo sviluppato dall' Istituto WSL per lo studio della neve e delle valanghe SLF (WSL - Istituto per lo studio della neve e delle valanghe SLF). RAMMS è un modello numerico di simulazione bidimensionale che calcola l'evoluzione del moto di movimenti di massa geofisici dal distacco all'arresto su di un terreno tridimensionale, in grado di trattare sia valanghe di neve sia colate detritiche e caduta massi. In questo studio è stato utilizzato il modulo RAMMS-AVALANCHE, capace di fornire distanze di arresto, velocità, altezze di flusso e pressioni di impatto di valanghe radenti.

La versione del software utilizzata (RAMMS Operational) risolve numericamente le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto mediate rispetto all'altezza del flusso (depth average equations) utilizzando come legge reologica il modello di Voellmy-Salm.

E' però stata sviluppata anche una versione avanzata del software (RAMMS Extended) che utilizza come legge reologica l'approccio RKE (Random Kinetic Energy), modello di flusso basato sulla produzione, trasporto e decadimento dell'energia cinetica del moto casuale associato alla massa dei granuli di neve del flusso. Questo approccio permette una buona modellazione dell'erosione del manto nevoso da parte della valanga, aspetto non considerato dal modello Voellmy-Salm ma che influenza fortemente le dimensioni e l'accrescimento della valanga.

Di seguito sono descritte le caratteristiche di RAMMS 1.7.20 (Bartelt et al., 2017), le equazioni che governano il modello e la legge reologica di Voellmy-Salm (Christen, Kowalski, & Bartelt, 2010).

4.4.3.1 Modello bidimensionale di dinamica implementato da RAMMS Operational e reologia Voellmy-Salm

Innanzitutto, la superficie del pendio è schematizzata attraverso: un sistema di riferimento cartesiano assoluto con coordinate X, Y orizzontali e la coordinata Z (X, Y) rappresentante la quota dei punti; un sistema di coordinate x, y, z locale e solidale alla superficie topografica, con z

perpendicolare al profilo e la cui orientazione varia con la posizione sulla superficie (Figura 4.4-10). Insieme a x , y e z , il tempo t completa il set di variabili indipendenti del sistema.

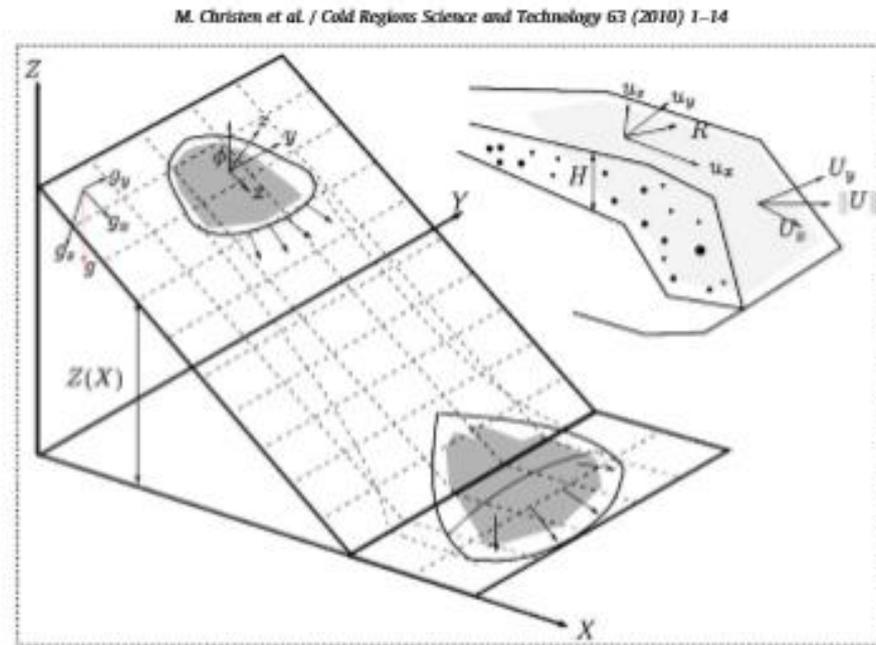


Figura 4.4-10: Sistema di riferimento Cartesiano per la schematizzazione della topografia $Z(X, Y)$ e sistema di riferimento locale x, y, z . Fonte (Christen, Kowalski, & Bartelt, 2010)

Il flusso della valanga è caratterizzato da moto non-stazionario e non uniforme con velocità e altezze variabili; perciò le variabili di campo di interesse sono:

- l'altezza di flusso $H(x, y, t)$
- velocità media $U(x, y, t) = (U_x(x, y, t), U_y(x, y, t))^T$

Le ipotesi assunte dal modello sono:

- la valanga è considerata come un mezzo continuo incompressibile di densità costante ρ ;
- la valanga è costituita da una superficie libera superiore ben definita e vi è una forte differenza di densità tra il centro della valanga e l'aria circostante;
- la componente nubiforme è trascurata;
- bassa profondità del flusso valanghivo (ipotesi delle acque basse); si assume che la scala caratteristica delle altezze di flusso ($H \approx 1 \text{ m}$) sia molto inferiore alla scala delle lunghezze del flusso ($l \approx 200 \text{ m}$); in questo modo il parametro di *shallowness* $e = H h/l$ è molto basso, ovvero si ha $e \ll 1$;
- le deformazioni di taglio sono concentrate vicino alla superficie inferiore del flusso;
- la distribuzione interna degli sforzi è rappresentata da una relazione isotropa o da una relazione anisotropa Mohr-Coulomb.

Come già accennato, il modello è governato dall'equazione di conservazione della massa (6) e dalle equazioni di conservazione della quantità di moto (7)(8) nelle direzioni x e y:

$$\partial_t H + \partial_x(HU_x) + \partial_y(HU_y) = \dot{Q}(x, y, t) \quad (6)$$

dove $\dot{Q}(x, y, t)$ è il termine di produzione di massa, riferito al tasso di erosione della neve ($\dot{Q} > 0$) o al tasso di deposizione ($\dot{Q} < 0$).

Le equazioni di equilibrio della quantità di moto sono le seguenti:

$$\partial_t(HU_x) + \partial_x(c_x HU_x^2 + g_z k_{a/p} H^2 / 2) + \partial_y(HU_x U_y) = S_{gx} - S_{fx} \quad (7)$$

$$\partial_t(HU_y) + \partial_x(HU_x U_y) + \partial_y(c_y HU_y^2 + g_z k_{a/p} H^2 / 2) = S_{gy} - S_{fy} \quad (8)$$

I cui termini sono:

- il vettore dell'accelerazione gravitazionale, $g = (g_x, g_y, g_z)$
- i fattori di forma del profilo di velocità c_x e c_y , in generale $\frac{7}{8} \leq c_{x,y} \leq 1$, e qui posti pari a $c_x = c_y = 1$;
- i coefficienti di spinta del terreno, fattori di proporzionalità tra gli sforzi normali verticali e orizzontali (9)

$$k_{a/p} = \left[45^\circ \mp \frac{\Phi}{2} \right] \quad (9)$$

dove Φ è l'angolo di attrito interno. Il coefficiente di spinta attiva k_a è relativo alle regioni con flusso dilatante $\nabla * U \geq 0$, mentre il coefficiente di spinta passiva k_p è relativo alle regioni con flusso compressivo $\nabla * U \leq 0$, ed entrambi regolano le altezze di flusso. Questi coefficienti possono essere usati per controllare la diffusione e la deposizione della massa nevosa nella zona di deposito, ma, dal momento che $k_{a/p}$ ha poca influenza nella determinazione di distanze di arresto e velocità, esso viene qui posto pari a 1;

- I termini dell'accelerazione gravitazionale nelle direzioni x e y rispettivamente (10) (10)

$$S_{gx} = g_x H \quad e \quad S_{gy} = g_y H \quad (10) (11)$$

- La resistenza per attrito dato da $S_f = (S_{fx}, S_{fy})^T$

In particolare, le componenti della resistenza per attrito sono definite nelle direzioni x (12) e y (13) come segue:

$$S_{fx} = n_{U_x} \left[\mu g_z H + \frac{g \|U\|^2}{\xi} \right] \quad (12)$$

$$S_{fy} = n_{U_y} \left[\mu g_z H + \frac{g \|U\|^2}{\xi} \right] \quad (13)$$

Come si può vedere, il modello di Voellmy-Salm attribuisce l'attrito a due componenti distinte:

- un termine di Coulomb indipendente dalla velocità che riduce lo sforzo normale alla base del flusso (parametro μ);
- un termine di attrito "viscoso" o "turbolento" dipendente dalla velocità (parametro ξ).

Il modello di Voellmy-Salm considera quindi separatamente la resistenza della fase solida (μ) è espressa a volte come la tangente dell'angolo di attrito interno) e la resistenza della fase fluida viscosa o turbolenta, dovuta all'interazione tra gli elementi granulari che compongono il flusso (ξ) è stato introdotto da Voellmy usando argomentazioni idrodinamiche). In questo modo è possibile modellare il comportamento della valanga considerando la condizione di flusso ad alta velocità nella zona di accelerazione, in cui ha maggior influenza il parametro ξ , e la condizione di flusso in decelerazione nella zona di arresto, governata dal parametro μ .

4.4.3.2 Coesione

Dalla versione 1.6.20 le espressioni base della resistenza di attrito di Voellmy-Salm (12) (13) sono state modificate per includere anche un contributo alla resistenza dovuto alla coesione, considerata come un'energia interna di legame da superare necessariamente per ottenere l'espansione del volume del flusso. Con questo nuovo approccio è possibile modellizzare anche materiali idealmente plastici. In questo caso il termine di coesione rappresenta uno sforzo limite μ è considerato un parametro "includente".

4.4.3.3 Curvatura

Dalla versione 1.6.20 è stata modificata anche la forza normale legata al parametro di attrito di Coulomb μ mediante l'aggiunta del contributo dovuto alle forze centrifughe generate dalla curvatura del terreno. È usato il metodo proposto da Fischer et al. (2021) che fu sviluppato specificatamente per RAMMS. La forza centrifuga (14) è data dal prodotto tra densità, altezza di flusso e accelerazione centrifuga, la quale è funzione sia della velocità della valanga sia della curvatura del terreno, ed è calcolata come:

$$f = uKu^T$$

(14)

In questa relazione $u = (u_x, u_y)^T$ è il vettore velocità nelle direzioni x e y e la matrice K descrive la curvatura del percorso in tutte le direzioni.

La componente della forza centrifuga F così definita viene aggiunta alla forza normale e considerata nel termine relativo all'attrito Coulombiano della resistenza di attrito.

L'azione delle forze centrifughe legate alla curvatura del terreno, contributo importante lungo percorsi di flusso tortuosi e a curvi, generalmente aumenta l'attrito, provocando il rallentamento della valanga, e può modificare il punto di deposito nel momento di uscita del flusso dal tratto canalizzato. La curvatura può essere attivata o disattivata in fase di preparazione della simulazione.

4.4.3.4 Parametri di attrito μ e ξ

RAMMS offre una modalità di calcolo costante e una variabile. Se il calcolo è fatto con parametri di attrito costanti, questi devono essere impostati manualmente e così non viene tenuto conto delle ondulazioni del terreno né delle aree boscate. È quindi consigliata la modalità di calcolo con parametri di attrito variabili. Una procedura automatica di RAMMS attribuisce i valori di attrito (μ e ξ) in base ad analisi sul dato topografico (inclinazione del pendio, altitudine e curvatura), informazioni sulla vegetazione ed in funzione del tempo di ritorno e del volume totale della valanga.

4.4.3.5 Discretizzazione della mesh

La superficie della mesh del modello consiste in una griglia bidimensionale collocata in uno spazio tridimensionale (superficie del terreno), definita a partire da un modello digitale del terreno (DTM). È possibile, in fase di preparazione del modello, assegnare una risoluzione del dominio di calcolo diversa rispetto a quella del DTM originale.

Per fare questo RAMMS genera la mesh applicando il seguente algoritmo:

- Il dominio di calcolo è dapprima discretizzato nel piano X-Y in funzione della risoluzione scelta ($\Delta X = \Delta Y$);
- La coordinata Z(X_i, Y_i) corrispondente a ciascun punto della nuova mesh (x_i, y_i) è calcolata come interpolazione bilineare delle coordinate di elevazione dei quattro punti più vicini del DTM originale.

Per ridurre il tempo di calcolo (legato principalmente alla risoluzione della mesh), in genere si restringe il dominio tracciando un poligono intorno al percorso previsto della valanga.

Il solutore numerico applicato al sistema di equazioni iperboliche non lineari consiste in uno schema ai volumi finiti del tipo HLLE (schema numerico Heun) formulato sui volumi di controllo a quattro lati generati con la definizione della mesh.

4.4.4 Preparazione della simulazione con RAMMS

Per avviare la simulazione con RAMMS, bisogna impostare i seguenti parametri:

- Modello Digitale del Terreno (DTM);
- Area e condizioni di distacco;
- Dominio di calcolo;
- Vegetazione;
- Parametri di attrito del modello Voellmy-Salm.

Per quanto riguarda la rappresentazione del pendio, nelle simulazioni è stato sempre usato il Modello Digitale del Terreno disponibile sul sito della Regione Valle d'Aosta con risoluzione 2 m, con possibilità di generare la mesh con la risoluzione uguale o modificata.

L'area di distacco viene inserita su RAMMS come shapefile creato su Qgis a seguito dell'analisi degli eventi storici, ed in particolare dell'evento del 18 febbraio 2006.

L'altezza di distacco H_d , dato mancante tra le informazioni relative all'evento storico del 2006, è stata calcolata grazie all'applicativo proposto dalla regione Valle d'Aosta per il calcolo dei parametri nivometrici H_s e $DH3gg$ (Regione Autonoma Valle d'Aosta).

L'espressione utilizzata per il calcolo di H_d è la seguente (15):

$$H_d(T; z) = [DH3gg(T; z) + H_{sd}] * \cos(28^\circ) * f(\theta) \quad (15)$$

$DH3gg$ è l'incremento dell'altezza del manto nevoso su tre giorni consecutivi di precipitazione, H_{sd} è l'altezza di neve trasportata dal vento e $f(\theta)$ è una funzione decrescente della pendenza media della zona di distacco θ (16):

$$f(\theta) = \frac{0.291}{\sin(\theta) - 0.202 * \cos(\theta)} \quad \text{con } \theta \geq 28^\circ \quad (16)$$

Per ottenere H_d è dunque necessario ricavare prima il valore $DH3gg$. A questo proposito, in una interfaccia iniziale della pagina web dedicata, sono stati inseriti come dati di input il comune (Courmayeur), la quota media dell'area di distacco ed il tempo di ritorno della valanga (Figura 4.4-11). La pagina restituisce come primo risultato l'altezza del manto nevoso al suolo H_s e l'incremento dell'altezza del manto nevoso su tre giorni consecutivi di precipitazione nevosa $DH3gg$.

Tempo di ritorno
5

Altezza sul livello del mare
1050

* per la quota indicata i valori di DH3gg hanno valore puramente indicativo.

CALCOLA Hs

CALCOLA DH3gg

AZZERA

Figura 4.4-11: Particolare dell'interfaccia dell'applicativo proposto dalla regione VDA, dati di input per calcolo di Hs e DH3gg. Fonte (Regione Autonoma Valle d'Aosta)

Successivamente l'altezza di distacco H_d viene ricavata inserendo in una seconda finestra i dati di input richiesti, ovvero il valore di DH3gg appena trovato, l'altezza di neve trasportata dal vento Hsd (se considerata) e l'angolo medio della zona di distacco θ (Figura 4.4-12).

- VALANGHE -
CALCOLO DELL'ALTEZZA DI DISTACCO, H_d

Incremento dell'altezza del manto nevoso su tre giorni consecutivi $DH3gg$ [cm] = 0

Angolo medio della zona di distacco θ [deg] = 00000

Altezza di neve trasportata dal vento Hsd [cm] = 0

RISOLVI

AZZERA

Figura 4.4-12: Particolare dell'interfaccia dell'applicativo proposto dalla regione VDA, dati di input per calcolo di H_d . Fonte (Regione Autonoma Valle d'Aosta)

Il valore di H_d ottenuto viene inserito in RAMMS, associato allo shapefile dell'area di distacco predefinita, cosicché il software fornisce automaticamente il volume di distacco, utile per la definizione dei parametri di attrito del modello Voellmy-Salm.

Prima dell'assegnazione dei parametri di attrito è opportuno definire il dominio di calcolo e inserire la vegetazione, se presente. Il dominio è stato definito tracciando un poligono attorno al presunto

percorso di flusso della valanga; questa operazione permette l'assegnazione dei parametri di attrito solo all'interno del dominio e riduce notevolmente il tempo di calcolo. La foresta viene inserita come shapefile, precedentemente creato con Qgis, sulla base di un'ortofoto fornita online dal Geoportale SCT regionale (Figura 4.4-13).

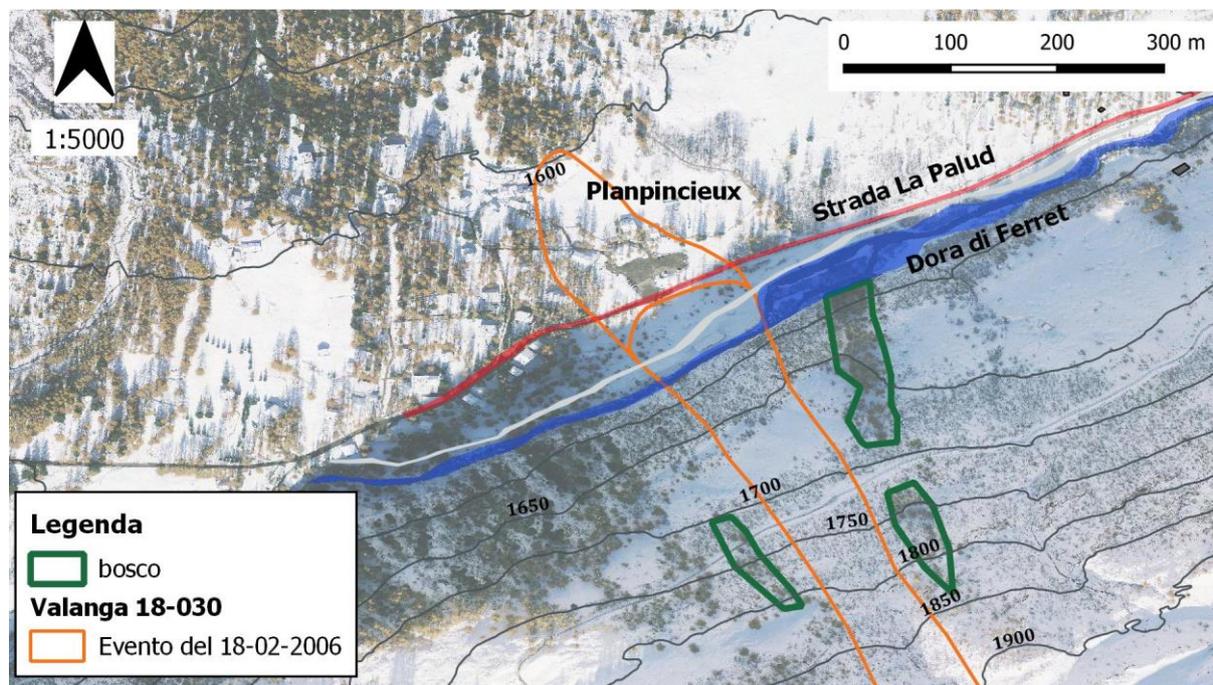


Figura 4.4-13: Perimetrazione dell'area occupata dal bosco da inserire in RAMMS. Fonte shapefiles (Catasto Valanghe Regionale SCT). Elaborazione personale con QGIS

Successivamente si assegnano i parametri di attrito μ e ξ del modello di Voellmy-Salm, che dipendono appunto dalle dimensioni e dal tempo di ritorno della valanga, ma anche dalla copertura vegetazionale (se presente) e da parametri topografici (pendenze del versante, quota e curvatura), elaborati direttamente da RAMMS sul DTM di input.

Seguendo i criteri riportati in Tabella 4.4-2, la categoria di volume si imposta automaticamente dopo aver assegnato lo spessore di distacco che conseguentemente restituisce il volume di distacco, il quale è anche il volume totale della valanga, non essendo considerata l'erosione in RAMMS Operational.

CLASSIFICAZIONE	VOLUME
Large	> 60000 m ³
Medium	25000 - 60000 m ³
Small	5000 - 25000 m ³
Tiny	< 5000 m ³

Tabella 4.4-2: Classificazione delle valanghe in base alle dimensioni. Fonte (WSL - Istituto per lo studio della neve e delle valanghe SLF, 2017)

Si riporta di seguito la finestra di RAMMS riguardante l'impostazione del tempo di ritorno e le dimensioni della valanga. Come mostrato in *Figura 4.4-14*, per il tempo di ritorno della valanga è possibile scegliere tra quattro valori.

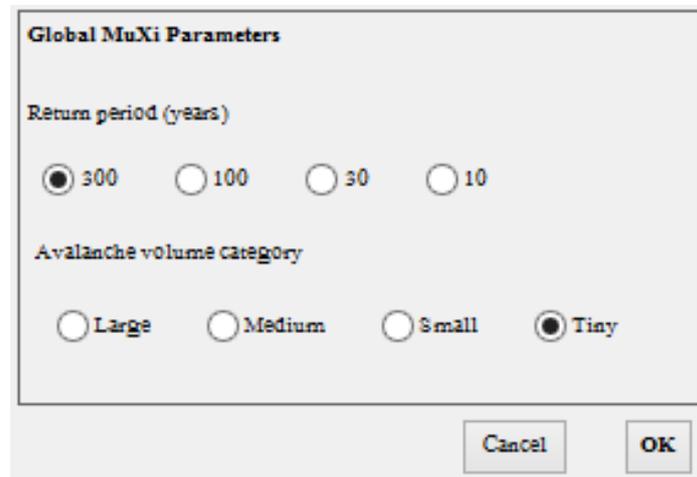


Figura 4.4-14: interfaccia di RAMMS per l'impostazione di tempo di ritorno e categoria di volume della valanga. Fonte: RAMMS 1.7.20

Una volta definiti tutti i dati di input si può avviare la simulazione, ma non prima di aver assegnato gli ultimi parametri legati al calcolo numerico, ovvero:

- la percentuale di momento totale limite per poter terminare il calcolo, fissata sempre pari al 5%
- la durata della simulazione, preimpostata sempre pari a 300 s;
- l'intervallo di tempo da considerare ad ogni passo del calcolo, fissata sempre pari a 2 sec;
- la densità della neve, impostata pari a 300 kg/m³;
- il tipo di schema numerico, impostato sempre come del secondo ordine, con altezza di cutoff fissata sempre pari a 0.000001 m;
- l'influenza della curvatura, impostata sempre come attiva, ovvero presenza nell'attrito della componente legata all'accelerazione centrifuga legata alla curvatura del pendio;
- la coesione della neve.

4.4.5 Taratura del modello

4.4.5.1 Input

Volendo simulare dapprima l'evento avvenuto il 18 febbraio 2006 è stato inserito in RAMMS lo shapefile creato con Qgis dell'area di distacco individuata durante la fase di analisi degli eventi storici (*Figura 4.4-2*). È stato poi tracciato il dominio di calcolo ed è stata inserita la vegetazione come shapefile (*Figura 2.1-1*).

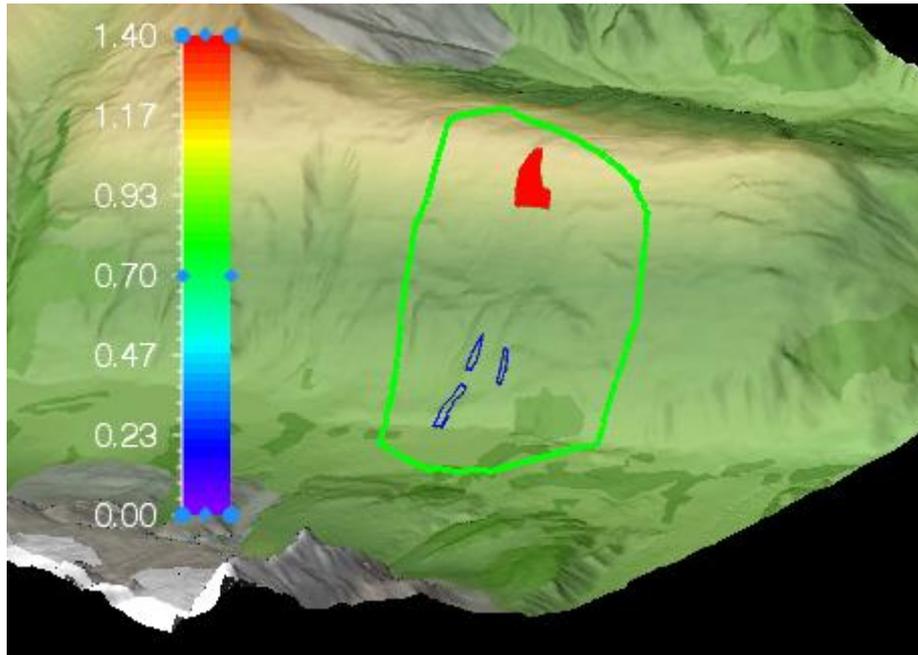


Figura 4.4-15: Prova 1 (taratura del modello) - visualizzazione 3D su RAMMS di area di distacco (area rossa), topografia, dominio di calcolo (contorno grande verde), vegetazione (contorni piccoli blu). Fonte: RAMMS 1.7.20

L'inserimento del DTM in RAMMS permette di visualizzare una rappresentazione 3D delle curve di livello (Figura 4.4-16), degli angoli di inclinazione del pendio (Figura 4.4-17) e delle curvature (Figura 4.4-18), in funzione dei quali RAMMS assegna i parametri di attrito μ e ξ .

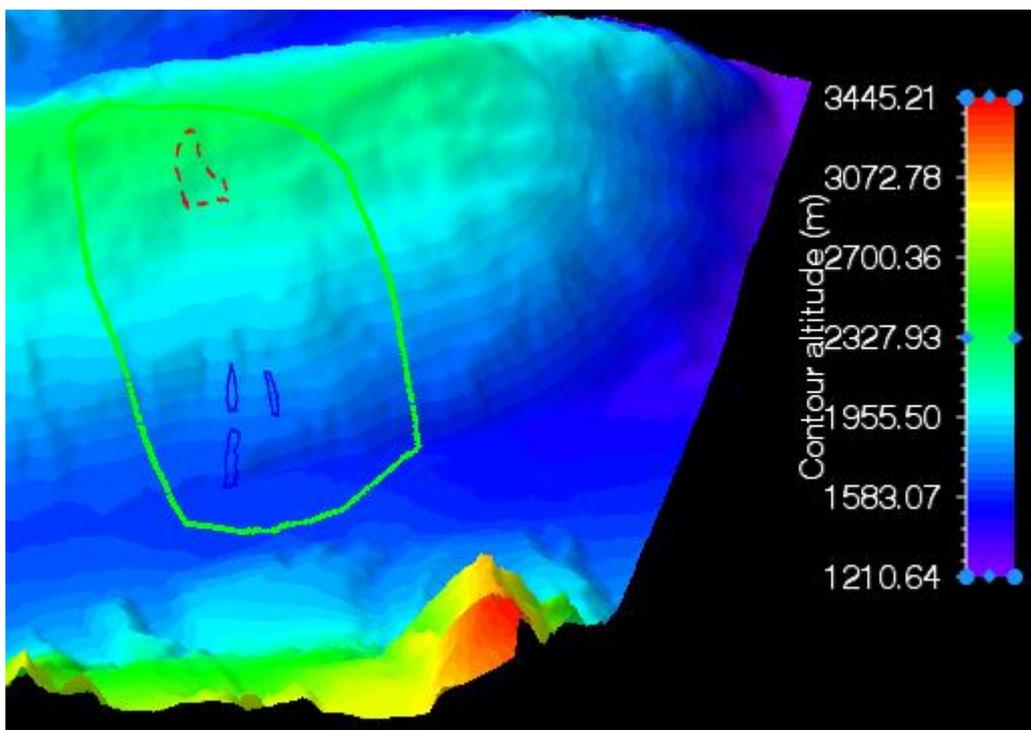


Figura 4.4-16: Prova 1 (taratura del modello) - Contour plot. Fonte: RAMMS 1.7.20

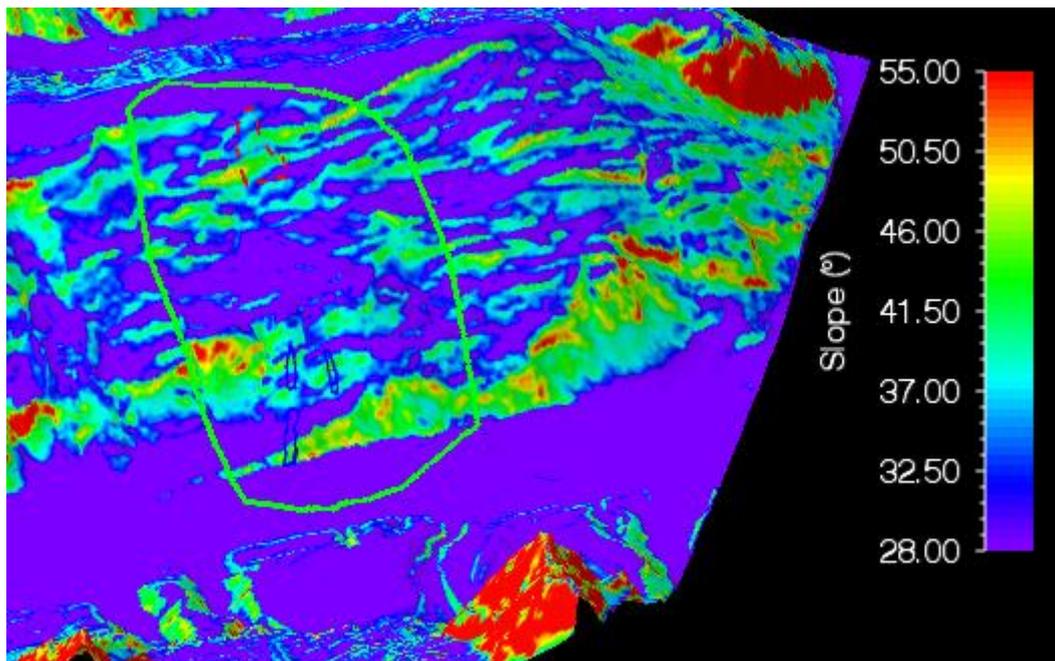


Figura 4.4-17: Prova 1 (taratura del modello) - Slope angle. Fonte: RAMMS 1.7.20

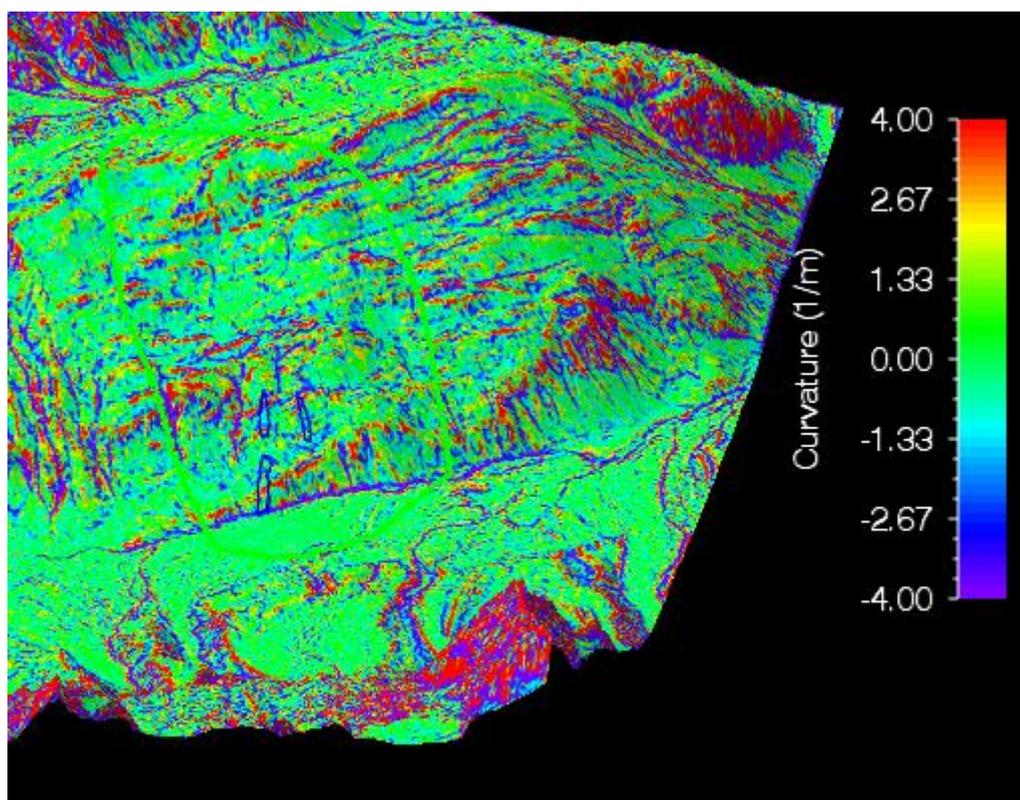


Figura 4.4-18: Prova 1 (taratura del modello) - Curvature plot. Fonte: RAMMS 1.7.20

Successivamente all'inserimento del DTM si impostano i parametri di attrito mediante la procedura automatica implementata da RAMMS, che prevede l'impostazione del tempo di ritorno e della categoria di volume della valanga. Avendo assegnato alla valanga un tempo di ritorno pari a 100

anni e potendo scegliere quel valore tra i quattro selezionabili in RAMMS (10, 30, 100 e 300), si può in questo caso impostare il valore ipotizzato.

La categoria di volume è assegnata automaticamente da RAMMS, che calcola il volume della valanga in funzione dell'area della zona di distacco e dello spessore di distacco ottenuto con l'applicativo della Regione Valle d'Aosta. In questo caso, essendo il volume totale pari a 52393 m³, è stata assegnata la categoria *medium*. Purtroppo, per l'evento del 2006, nel Catasto Valanghe non sono riportate informazioni riguardanti né l'altezza di distacco né il volume della valanga.

Di seguito la distribuzione dei parametri μ e ξ ottenuta per il pendio considerato (Figura 4.4-19, Figura 4.4-20).

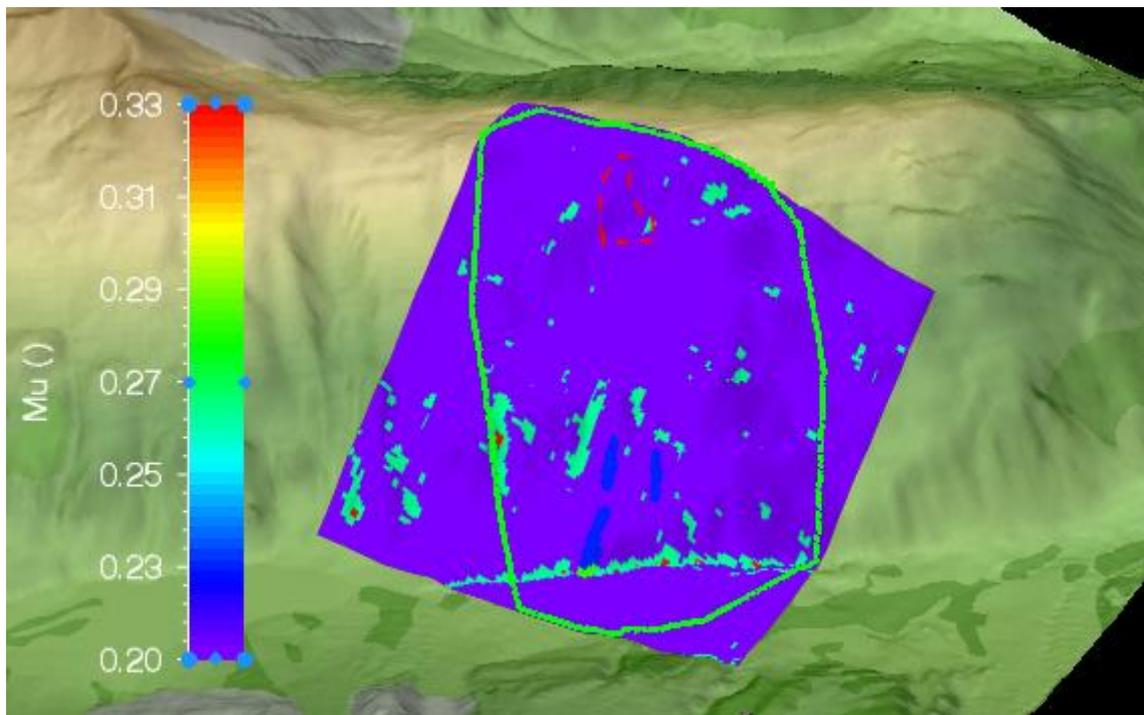


Figura 4.4-19: Prova 1 (taratura del modello) - Distribuzione del parametro μ lungo il pendio. Fonte: RAMMS 1.7.20

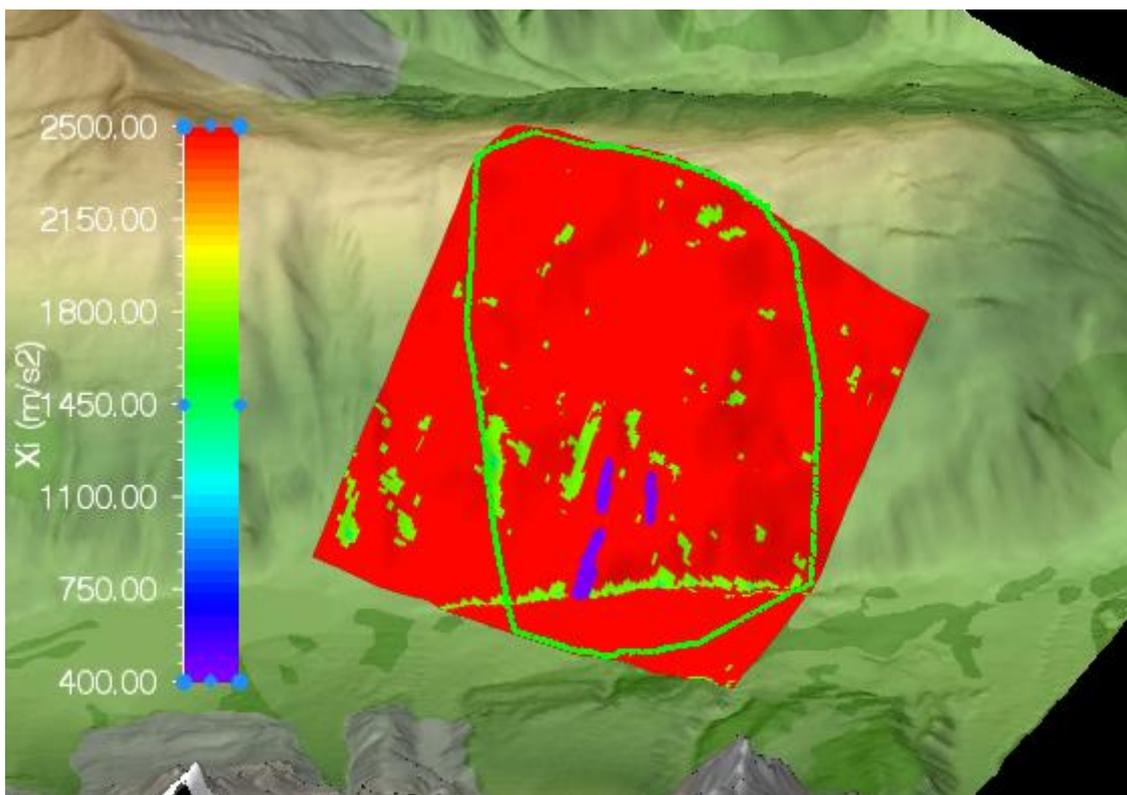


Figura 4.4-20: Prova 1 (taratura del modello) - Distribuzione del parametro ξ lungo il pendio. Fonte: RAMMS 1.7.20

Si riportano di seguito i dati inseriti nell'applicativo fornito dalla Regione Valle d'Aosta per il calcolo dei parametri nivometrici di progetto (Tabella 4.4-3 e Tabella 4.4-4).

Dati di input	Comune	Courmayeur
	Tempo di ritorno (anni)	100
	Quota media zona di distacco (m s.l.m.)	2200
Dati di output	Hs (cm)	446
	DH3gg (cm)	226

Tabella 4.4-3: Prova 1 (taratura del modello) - Hs e DH3gg - dati di input e valori di output su applicativo proposto da regione VDA (Regione Autonoma Valle d'Aosta). Elaborazione personale con Excel

Dati di input	DH3gg (cm)	226
	θ (°)	35
	Hsd (cm)	0
Dato di output	Hd (cm)	142

Tabella 4.4-4: Prova 1 (taratura del modello) - Hd - valori di input e output su applicativo proposto da regione VDA (Regione Autonoma Valle d'Aosta). Elaborazione personale con Excel

Si riporta di seguito una tabella riassuntiva dei principali parametri assegnati nella prima simulazione effettuata (*Tabella 4.4-5*). È stata scelta una risoluzione della mesh pari a 5 m. Infine, come suggerito durante il corso AVAL-RAMMS, essendo la valanga avvenuta in periodo invernale ed essendo a debole coesione, è stata assegnata una coesione di 100 Pa. L'altezza di distacco di progetto, utilizzata per la taratura del modello, verrà chiamata Hd_0 .

DTM	5 m
Inclinazione media area di distacco	35°
Quota media area di distacco	2200
Tr Hd	100 anni
Hsd (sovraccarico da vento)	0
Hd_0	142 cm
Categoria di volume	<i>medium</i>
Tr (μ, ξ)	100 anni
Bosco	si
ρ (kg/m ³)	300
Coesione (Pa) (neve asciutta)	100

Tabella 4.4-5: Prova 1 (taratura del modello) - Riassunto dati di input. Elaborazione personale con Excel

4.4.5.2 Output

Oltre ai risultati legati alle valanghe rappresentate, sono stati inseriti negli output alcuni shapefile di riferimento quali la Dora di Ferret (contorno blu), la pista di fondo (contorno giallo) e la strada comunale con il piazzale di Planpincieux (contorno rosso).

La simulazione ha restituito il risultato ricercato: la valanga si è arrestata pochi metri prima della strada, oltre la Dora (*Figura 4.4-21*).

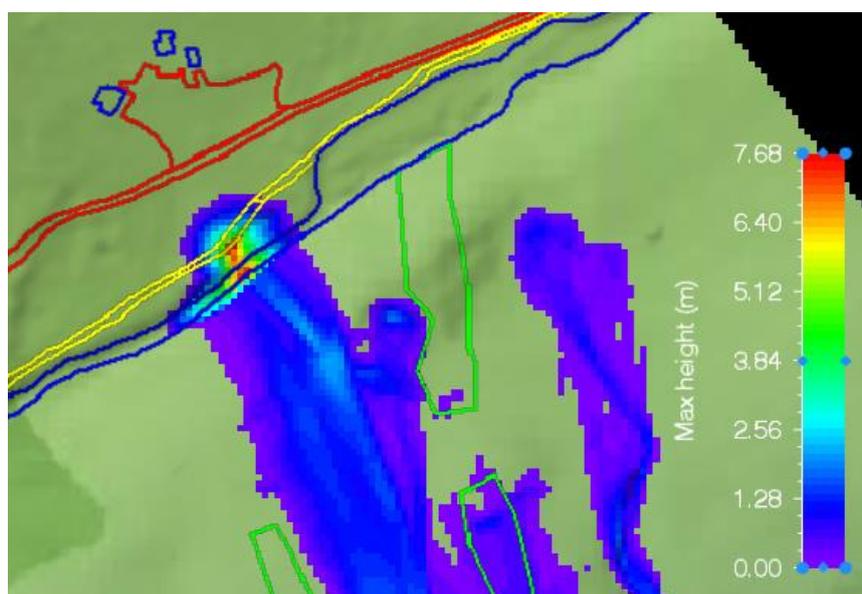


Figura 4.4-21: Prova 1 (taratura del modello) - Deposito. Fonte: RAMMS 1.7.20

Da un confronto con la perimetrazione dell'evento fatta dal Catasto Valanghe si può osservare come la parte densa si arresti tra la pista di fondo e la strada, con il risultato della simulazione leggermente arretrato rispetto a quello indicato del Catasto Valanghe Regionale.

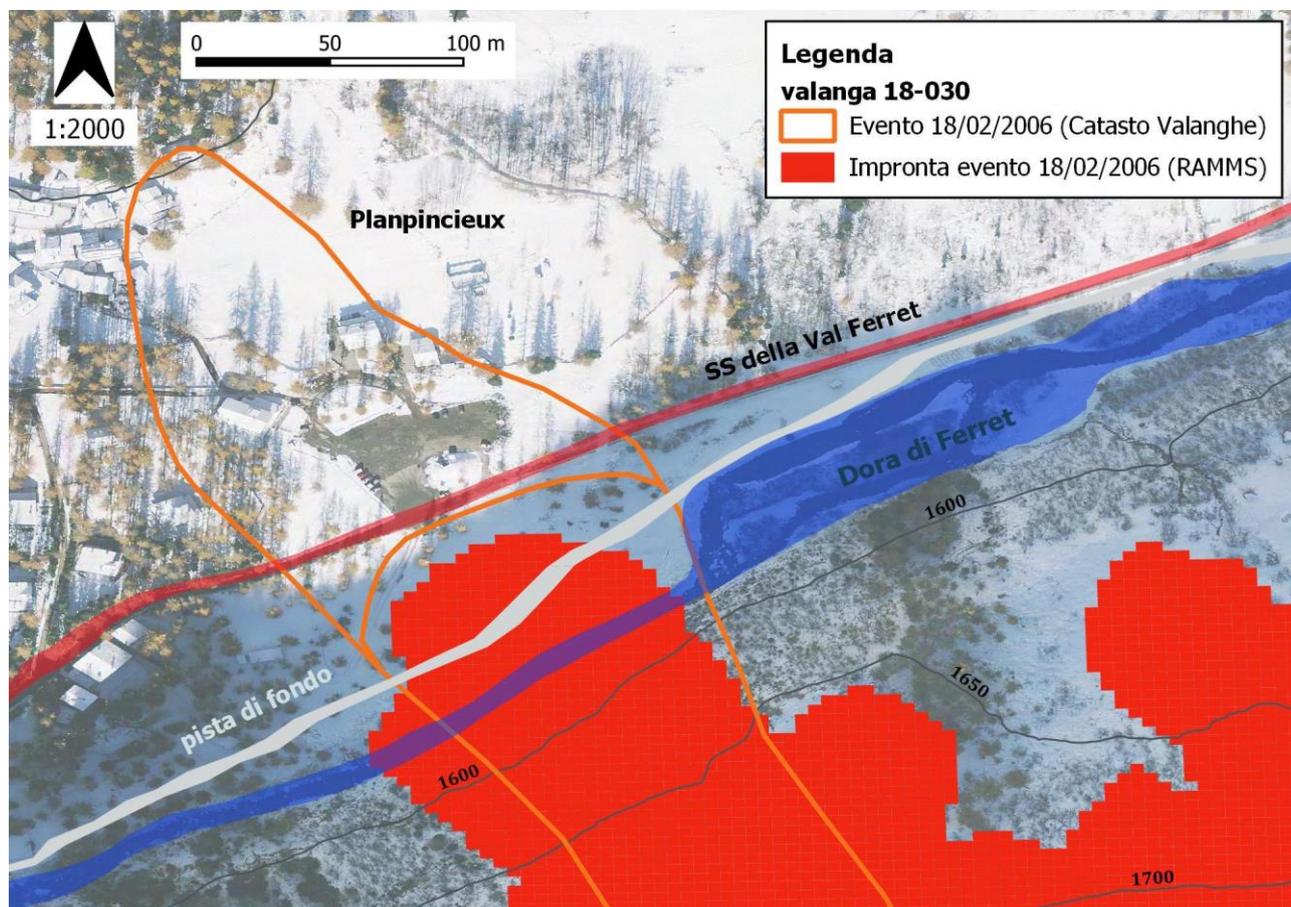


Figura 4.4-22: Prova 1 (taratura del modello) – Confronto tra il deposito indicato dal Catasto Valanghe e quello ottenuto con RAMMS. Elaborazione personale con QGIS

Anche le pressioni d'impatto risultano compatibili con la cartografia delle aree esposte al pericolo valanghe; la zona rossa della valanga 18-030, ovvero la zona ad alto rischio corrispondente a pressioni di impatto uguali o superiori a 30 kPa per valanghe con tempo di ritorno di 100 anni, circonda di poco il perimetro ottenuto con la presente simulazione. In particolare come si può osservare nella figura seguente, lungo la pista di fondo le pressioni sono inferiori a 30 kPa (Figura 4.4-23).

Nel seguente grafico, e in altri grafici riportati in seguito, la spezzata verde rappresenta l'andamento delle quote lungo la linea di profilo (il cui asse è riportato a destra), l'area grigia sottostante rappresenta l'andamento di uno tra i possibili parametri di output da analizzare (il cui asse è riportato a sinistra), mentre la spezzata rossa rappresenta lo stesso parametro di output scalato e aggiunto alle quote della sezione. L'asse orizzontale riporta la lunghezza della sezione.

Non deve dunque trarre in inganno la linea rossa nel grafico, poiché il parametro di interesse, ovvero la pressione di impatto, è rappresentato dall'area grigia nella parte bassa del grafico.

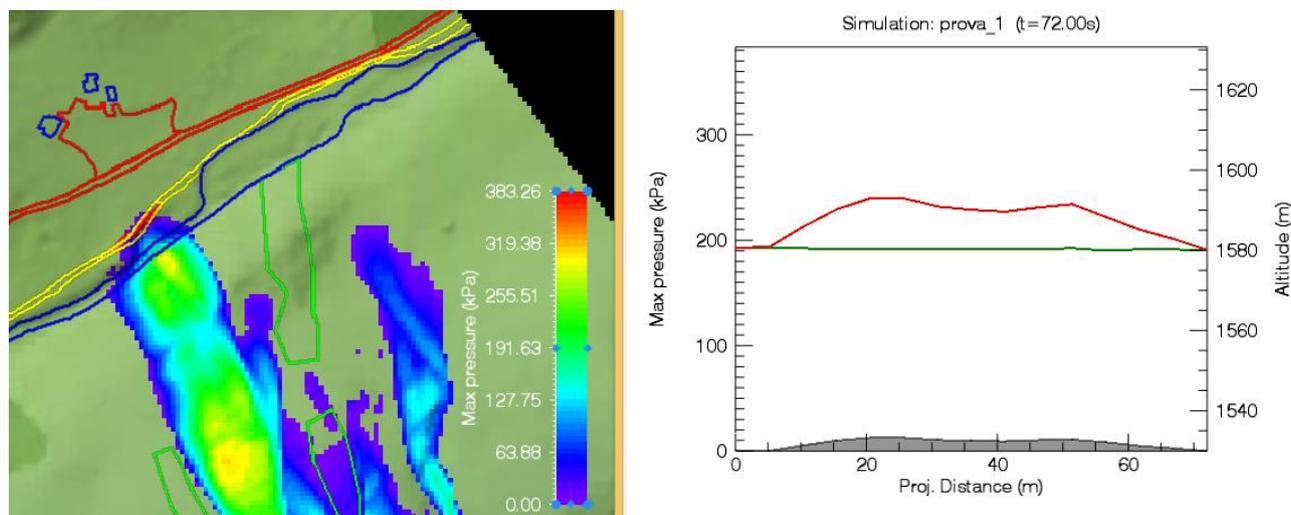


Figura 4.4-23: Prova 1 (taratura del modello) – Pressioni d’impatto lungo la pista di fondo. Fonte: RAMMS 1.7.20

Confrontando i risultati della simulazione in termini di pressioni di impatto con la cartografia vigente degli ambiti inedificabili per zone esposte a rischio valanghe si osserva che tutte le pressioni sono tutte comprese entro la zona rossa definita da cartografia (Figura 4.4-24).

La differenza tra il risultato della simulazione e i confini dati dalla cartografia potrebbe essere legata al fatto che la cartografia relativa agli ambiti inedificabili probabilmente considera anche il contributo in termini di pressioni di impatto della componente nubiforme, la quale è in grado anch’essa di sviluppare notevoli pressioni (solitamente essa è la causa principale di danni a strutture ecc.). Come già detto, purtroppo il software utilizzato (RAMMS) è in grado di riprodurre solamente la componente radente.

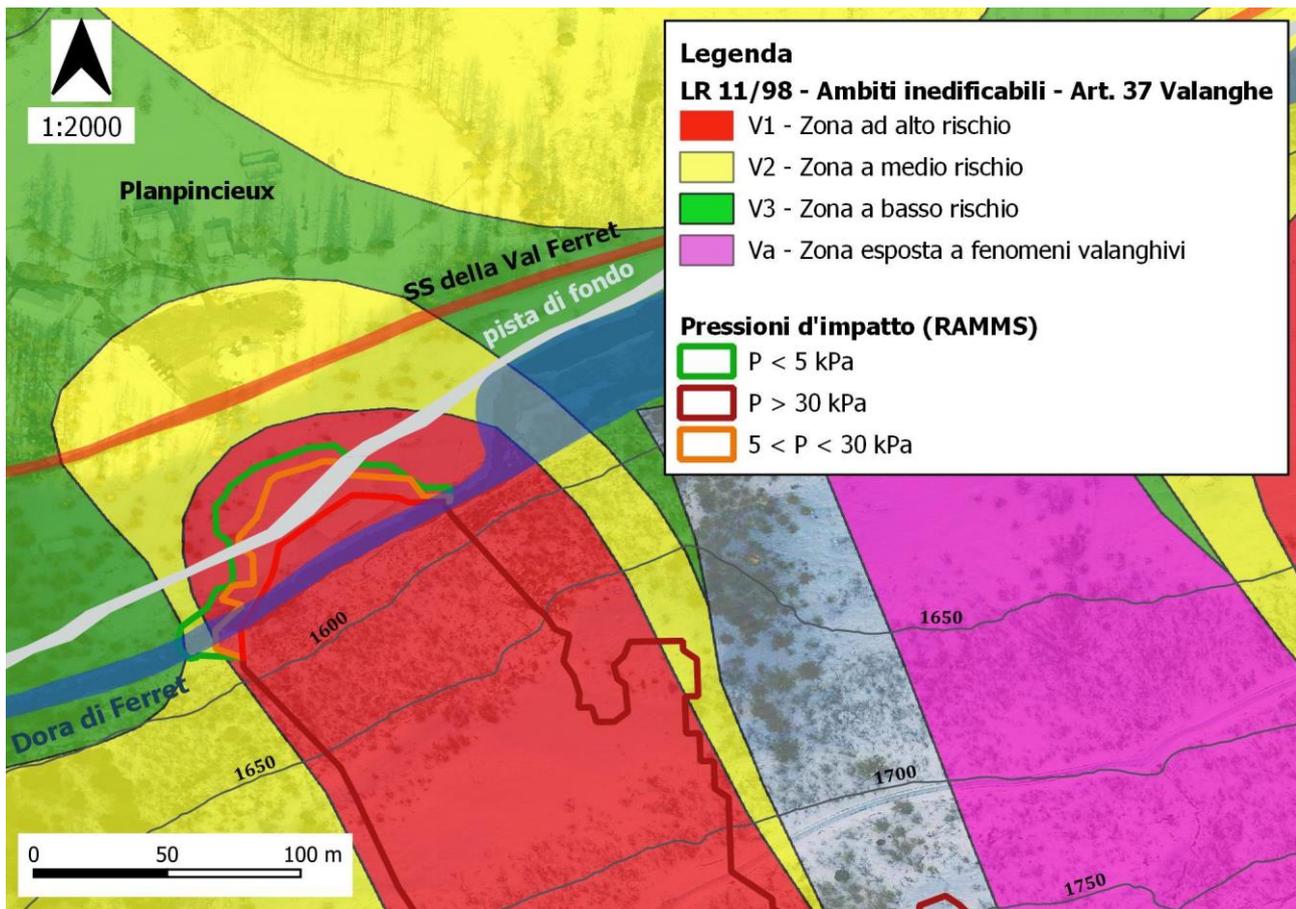


Figura 4.4-24: Prova 1 (taratura del modello) – Confronto tra le pressioni d'impatto ottenute con RAMMS e le aree definite dalla LR 11/98. Elaborazione personale con QGIS

Essendo i risultati ottenuti soddisfacenti, l'insieme dei parametri di input appena utilizzati definisce la valanga di progetto, i quali verranno utilizzati in seguito per le successive simulazioni.

4.4.6 Simulazioni

A seguito della fase di taratura, si è proceduto ad eseguire simulazioni sull'evento di progetto, le cui caratteristiche derivano dall'evento utilizzato per la taratura del modello. L'evento di progetto è dunque caratterizzato dalla stessa area di distacco e dallo stesso tempo di ritorno.

L'obiettivo delle simulazioni è stato quello di studiare le distanze di arresto al variare dello spessore di distacco, ed in particolare valutare l'interferenza della valanga con il fiume e la strada. Esse sono state svolte mantenendo fissi tutti i parametri di input, e variando soltanto l'altezza di distacco.

Consci del legame esistente tra altezza di distacco e tempo di ritorno della valanga, nelle simulazioni è stato tuttavia mantenuto il valore iniziale di tempo di ritorno di 100 anni.

Questa scelta per due motivi: in primo luogo per l'impossibilità su RAMMS Operational di correlare ogni valore di altezza di distacco al relativo valore del tempo di ritorno (si può scegliere solo tra quattro valori), così come definiti dall'applicativo di Barbolini e Ferro; in secondo luogo, la variazione

del tempo di ritorno nelle fasi di preparazione delle simulazioni, a causa di limitazioni del programma, avrebbe determinato importanti variazioni anche di altri parametri di input (parametri di attrito), e modificato radicalmente i risultati delle simulazioni. Si ritiene invece che i parametri di attrito relativi al tempo di ritorno di 100 anni fossero adeguati allo scenario valanghivo da rappresentare.

4.4.6.1 Input

Come appena detto, l'evento di progetto utilizzato per le seguenti simulazioni è stato caratterizzato dai parametri di input appena utilizzati per la taratura del modello. In particolare, mantenendo fissi tutti i parametri di input, nel corso delle diverse simulazioni è stata variata soltanto l'altezza di distacco.

Viene riportato di seguito un riassunto delle simulazioni effettuate, con la relativa categoria di volume delle valanghe ed i punti di arresto per ciascuna simulazione (*Tabella 4.4-6*).

Hd (cm)	Volume (mc)	categoria	arresto
60	22454.55	small	pendio
66	24700	small	pendio
67	25074.24	medium	tra pista e strada
70	26196.97	medium	tra pista e strada
80	29939.4	medium	tra pista e strada
100	37424.2	medium	tra pista e strada
120	44909.1	medium	tra pista e strada
142	52393.94	medium	tra pista e strada
160	59878.79	medium	tra pista e strada
161	60253.03	large	strada
180	67363.64	large	strada

Tabella 4.4-6: Riassunto dei punti di arresto ottenuti nelle diverse simulazioni con valanghe appartenenti a diverse categorie di volume in RAMMS. Elaborazione personale con Excel

4.4.6.2 Output – Hd < Hd₀

Inizialmente, a partire dall'altezza di distacco della valanga di progetto (Hd₀=142 cm) sono stati utilizzati valori inferiori, per valutare l'interferenza con il fiume.

Si può osservare nella figura seguente (*Figura 4.4-25*) che i risultati ottenuti riguardano simulazioni condotte con categoria di volume *medium*, corrispondente a volumi della valanga compresi tra 25000 mc e 60000 mc.

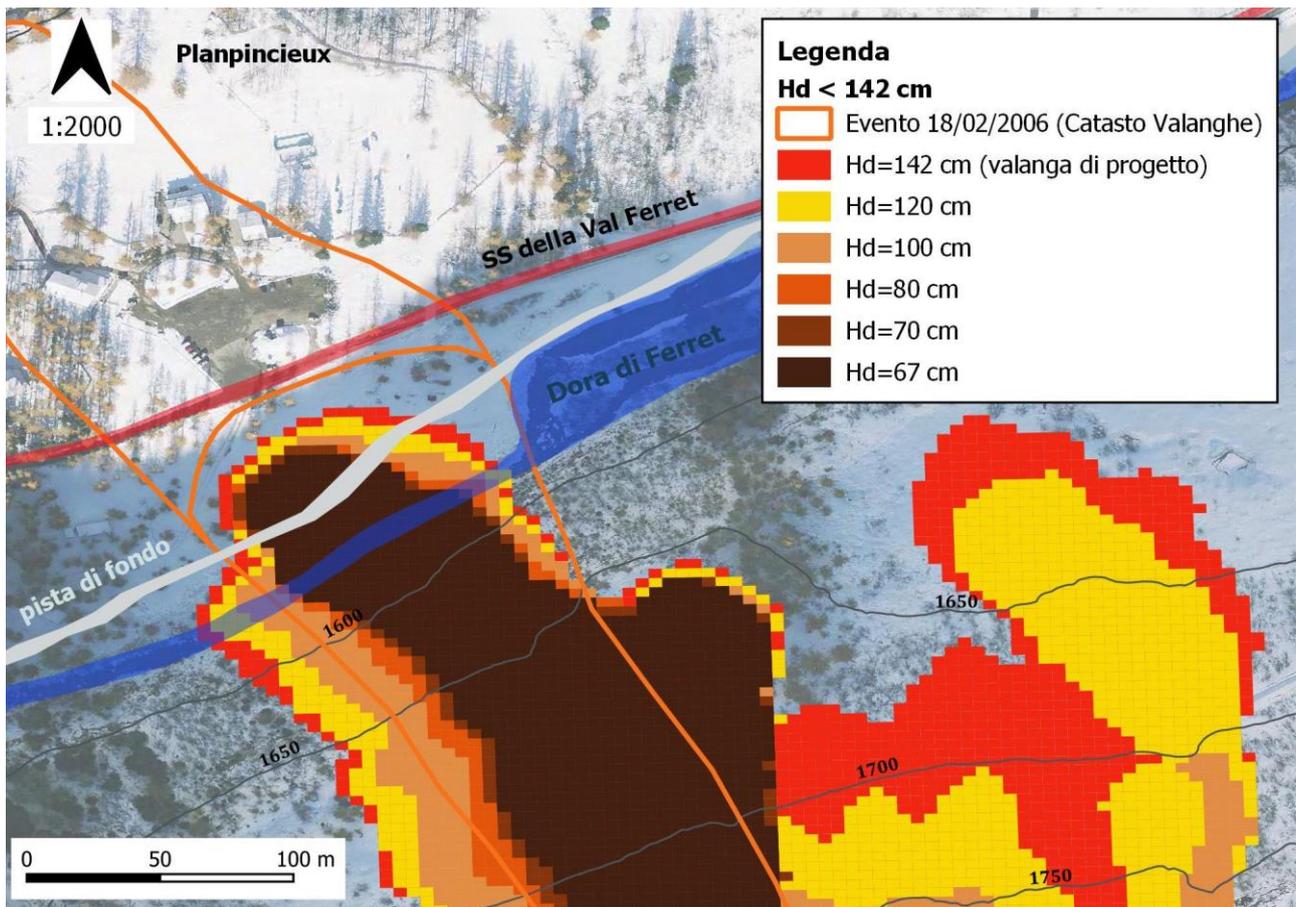


Figura 4.4-25: Simulazioni ($H_d < H_{D_0}$) – Confronto tra le impronte ottenute in RAMMS per valanghe di categoria medium. Elaborazione personale con QGIS

Le simulazioni restituiscono risultati molto simili tra loro, con tutte le zone di arresto estese oltre la Dora e la pista di fondo. In particolare l'altezza di distacco pari a 67 cm corrisponde al volume limite inferiore per la categoria medium, ovvero a 25000 mc.

Con il proposito di ottenere l'arresto nel fiume, sono stati utilizzati valori inferiori di altezza di distacco, corrispondenti alla categoria *small*.

Il primo valore di altezza di distacco corrispondente alla categoria *small* per l'area di distacco utilizzata è 66 cm, corrispondente ad un volume inferiore a 25000 mc. In questo caso, l'arresto è risultato oltremodo arretrato rispetto al caso precedente. Qui dunque è evidente l'effetto del cambio di parametri di attrito. Si osserva infatti che a quasi parità di altezza di distacco (di conseguenza anche i volumi variano di poco), le distanze di arresto siano assai diverse (Figura 4.4-26).

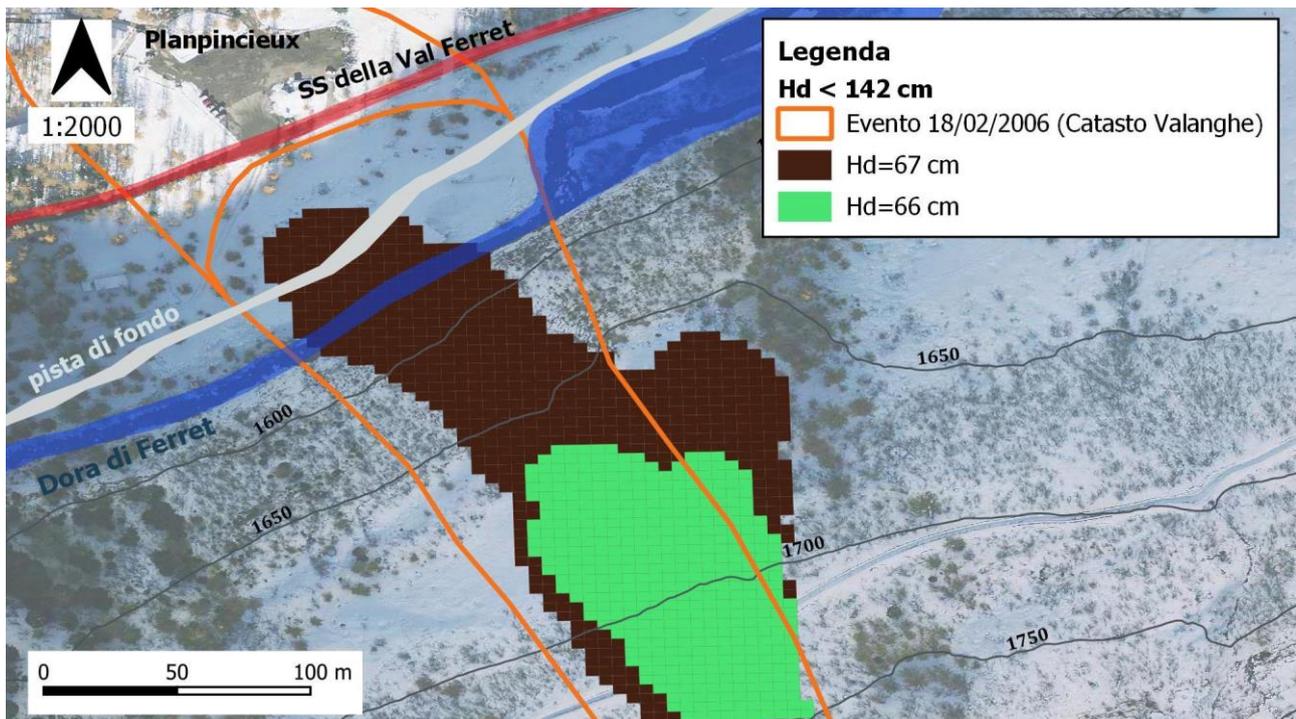


Figura 4.4-26: Simulazioni ($H_d < H_{d0}$) – Confronto tra le impronte ottenute in RAMMS per valanga di categoria medium e valanga di categoria small. Elaborazione personale con QGIS

4.4.6.3 Output – $H_d > H_{d0}$

Successivamente sono stati utilizzate altezze di distacco superiori a 142 cm.

L'altezza di distacco pari a 160 cm corrisponde ancora alla categoria medium, infatti si osserva che la distanza di arresto è molto vicina a quella della valanga di progetto. Si possono inoltre vedere i risultati ottenuti per valori corrispondenti alla categoria large, dei quali il primo possibile è 161 cm. Come accaduto per le altre due categorie, anche in questo caso il passaggio dalla categoria medium alla categoria large è caratterizzato da una forte differenza nell'area di deposito, certamente non dovuta alle altezze di distacco, quasi uguali tra loro (Figura 4.4-27).

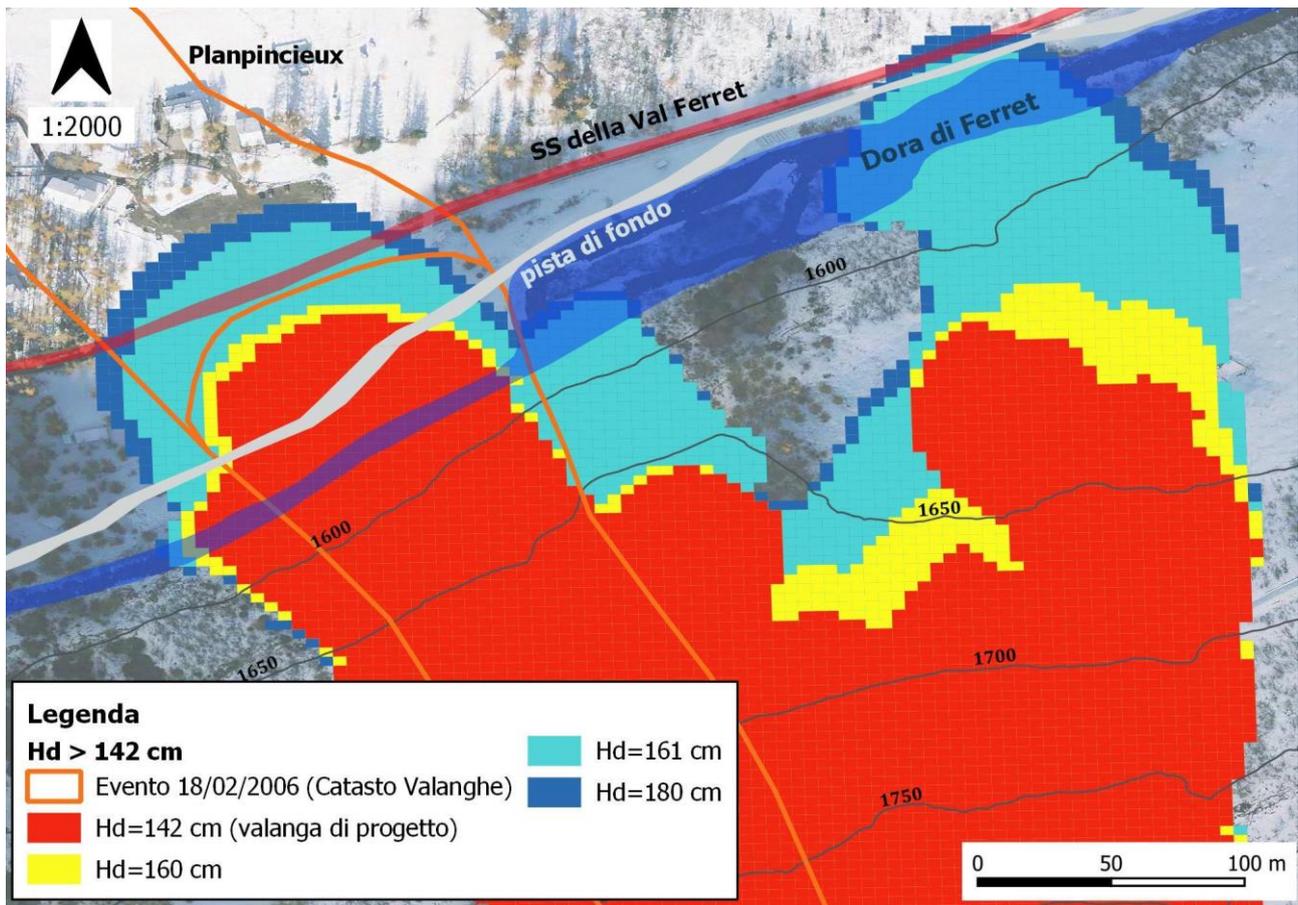


Figura 4.4-27: Simulazioni ($H_d < H_{d0}$) – Confronto tra le impronte ottenute in RAMMS per valanga di categoria medium e valanga di categoria large. Elaborazione personale con QGIS

Con questi risultati vengono quindi evidenziati l'influenza del modello sul risultato finale delle simulazioni e la sua incapacità di simulare in modo preciso piccoli incrementi di spessore a cavallo tra diverse categorie di volume. Si ricorda che è comunque possibile impostare manualmente la categoria di volume e modificarla senza seguire le impostazioni di default.

Di seguito (Figura 4.4-28) sono riportati i parametri di attrito, variabili per ciascuna categoria, presenti per le simulazioni con $H_d=161$ cm (*large*), $H_d=160$ cm (*medium*) e $H_d=66$ cm (*small*).

Open slope parameters: Mu: 0.200 - 0.180 - 0.165 Xi: 2000 - 2500 - 3000 Channelled parameters: Mu: 0.250 - 0.230 - 0.220 Xi: 1500 - 1750 - 2000 Gully parameters: Mu: 0.315 - 0.300 - 0.280 Xi: 1200 - 1350 - 1500 Flat parameters: Mu: 0.180 - 0.160 - 0.150 Xi: 3000 - 3500 - 4000 Forest parameters: Mu (delta): 0.020 - 0.020 - Xi: 400 - 400 - 400	Open slope parameters: Mu: 0.240 - 0.220 - 0.205 Xi: 1750 - 2100 - 2500 Channelled parameters: Mu: 0.290 - 0.280 - 0.260 Xi: 1350 - 1530 - 1750 Gully parameters: Mu: 0.370 - 0.340 - 0.330 Xi: 1100 - 1200 - 1350 Flat parameters: Mu: 0.220 - 0.200 - 0.180 Xi: 2500 - 2900 - 3250 Forest parameters: Mu (delta): 0.020 - 0.020 - 0.020 Xi: 400 - 400 - 400	Open slope parameters: Mu: 0.275 - 0.260 - 0.245 Xi: 1500 - 1750 - 2000 Channelled parameters: Mu: 0.320 - 0.310 - 0.290 Xi: 1200 - 1350 - 1500 Gully parameters: Mu: 0.410 - 0.390 - 0.380 Xi: 1000 - 1100 - 1200 Flat parameters: Mu: 0.255 - 0.240 - 0.225 Xi: 2000 - 2250 - 2500 Forest parameters: Mu (delta): 0.020 - 0.020 - 0.020 Xi: 400 - 400 - 400
RETURN PERIOD (y): 100 VOLUME category: Large	RETURN PERIOD (y): 100 VOLUME category: Medium	RETURN PERIOD (y): 100 VOLUME category: Small

Figura 4.4-28: Parametri di attrito per le tre diverse categorie di volume utilizzate (large a sinistra, medium al centro e small a destra). Fonte: RAMMS 1.7.20

In particolare passando da categoria *small* a *large*, come si può vedere, il parametro μ diminuisce mentre il parametro ξ aumenta. Nell'espressione della resistenza per attrito, il parametro μ si trova al numeratore mentre il parametro ξ si trova al denominatore. Di conseguenza, il passaggio da categoria *small* a categoria *large* risulta in una aumentata capacità di scorrimento ed espansione della valanga, poiché corrisponde ad una riduzione della resistenza dell'attrito.

Di seguito si riportano i depositi ottenuti con valanghe di diverse categorie di volume (Figura 4.4-29).

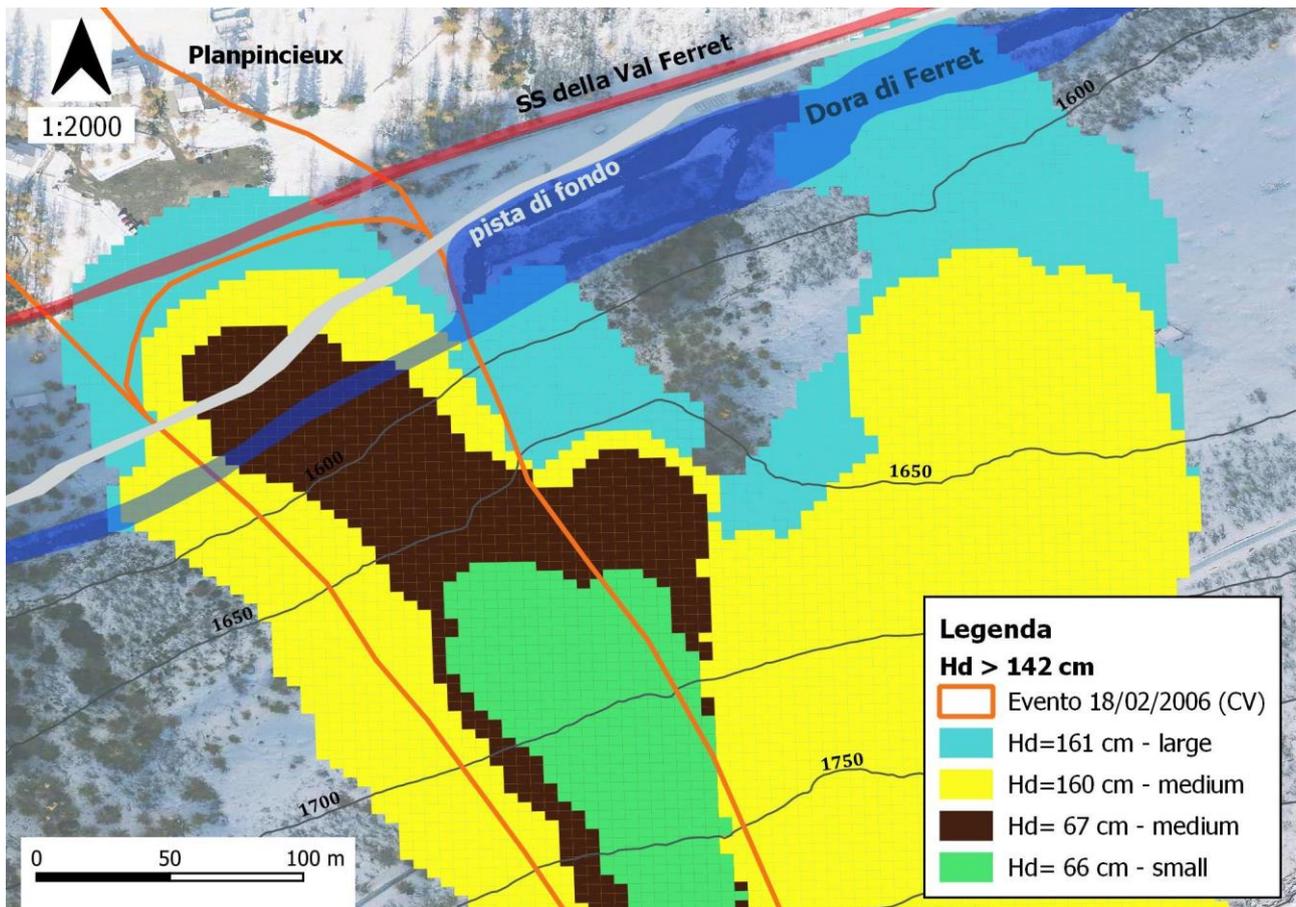


Figura 4.4-29: Simulazioni – Confronto tra le impronte ottenute in RAMMS per valanghe di categoria small, medium e large. Elaborazione personale con QGIS

Per le simulazioni corrispondenti all'arresto sulla strada è stato fatto il confronto tra i limiti della cartografia degli ambiti inedificabili con le pressioni ottenute tra gli output (Figura 4.4-30/Figura 2.1-1).

Si ricorda che la strada è stata raggiunta solo da valanghe con impostata la categoria *large*. Come si è appena visto, essendo i risultati fortemente influenzati dai parametri di attrito, diversi per ciascuna categoria di volume, non è stato possibile ottenere l'arresto preciso in corrispondenza della strada.

Per quanto riguarda la valanga di sinistra (Hd=180 cm), si osserva che le pressioni di impatto superiori a 30 kPa fuoriescono dal limite definito dalla cartografia e di poco non toccano la strada, mentre le pressioni comprese tra 5 kPa e 30 kPa sono interamente contenute nella zona gialla (a medio rischio) e ricadono sulla strada. Per quanto riguarda la valanga con altezza di distacco pari a 161 cm si nota che le pressioni superiori a 30 kPa sono completamente incluse nel confine della zona rossa, e le pressioni comprese tra 5 kPa e 30kPa raggiungono di poco la strada.

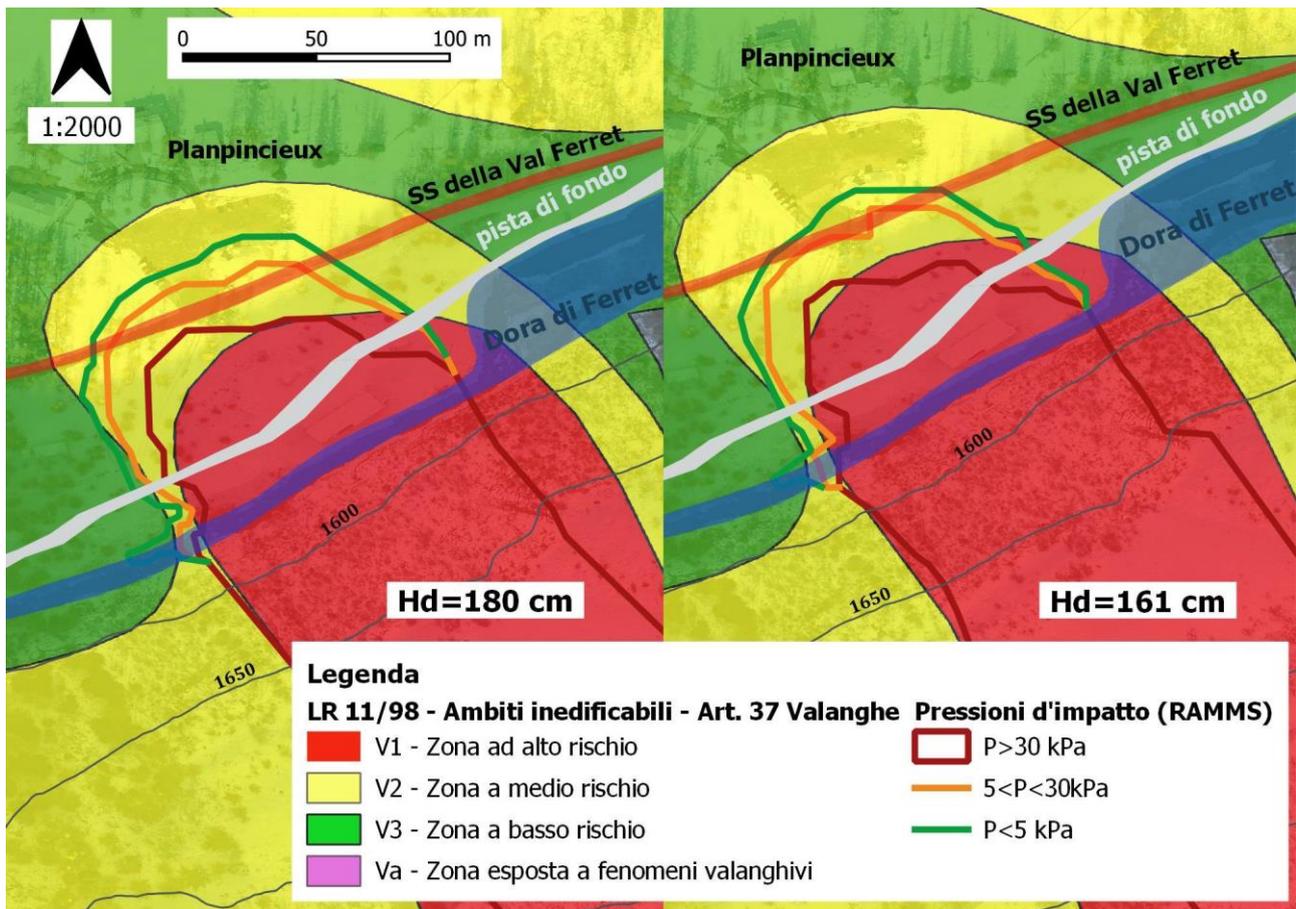


Figura 4.4-30: Simulazioni – Confronto tra le pressioni ottenute in RAMMS per valanghe di categoria large e le aree definite dalla LR 11/98. Elaborazione personale con QGIS

In questo caso una fuoriuscita rispetto alla zona rossa definita dalla LR 11/98 potrebbe essere collegata al fatto che le altezze di distacco considerate non corrispondono al tempo di ritorno di 100 anni impostato nelle simulazioni (poiché 142 cm è l'altezza di distacco corrispondente a $T_r=100$ anni, secondo lo studio di Barbolini e Ferro).

Ad esempio, secondo il portale per il calcolo dei parametri nivometrici di progetto di Barbolini e Ferro, per l'area di distacco considerata l'altezza di distacco corrispondente a $T_r=300$ anni sarebbe pari a 166 cm; questo potrebbe spiegare la non congruenza dei risultati ottenuti da quest'ultima soluzione con la cartografia.

Inoltre si sottolinea il fatto che le simulazioni svolte per la redazione della cartografia degli ambiti inedificabili sono state realizzate utilizzando un modello quasi-monodimensionale. Pertanto la spazializzazione dei valori di pressione, ottenuti lungo il profilo di simulazione, è stata svolta in modo manuale dall'operatore a differenza di quanto avviene tramite il software RAMMS.

4.5 Valutazione del rischio per gli utenti della strada La Palud

4.5.1 Generalità sul rischio

L'attività svolta finora costituisce la base di indagine del processo più ampio dell'analisi di rischio. La prima fase dell'indagine prevede infatti di indagare sulla possibilità che il distacco di valanghe possa interessare la strada; gli step di tale indagine prevedono uno studio dell'attività valanghiva pregressa attraverso dati storici, studio della morfologia, della copertura del suolo e infine lo studio della dinamica valanghiva, per poter prevedere la distanza di arresto e parametri quali il volume, la velocità della valanga e le pressioni d'impatto.

Ricapitolando i passaggi finora effettuati, dapprima attraverso l'analisi storica sono stati raccolti e analizzati gli eventi storici di interesse avvenuti per la valanga 18-030. Grazie a questi è stata individuata la zona di arresto; in aggiunta, lo studio delle pendenze e della vegetazione ha aiutato a individuare le zone di distacco e di arresto. Avendo concentrato l'attenzione sull'interferenza della valanga con la strada comunale, grazie al software RAMMS è stata studiata la dinamica della valanga al variare dell'altezza di distacco, ottenendo come risultati una discreta panoramica delle distanze di arresto e delle pressioni di impatto. In alcuni casi la valanga ha raggiunto la strada, occupandola per un tratto moderatamente lungo.

A questo punto, è di interesse determinare il livello di rischio connesso allo scenario valanghivo analizzato per il tratto di strada interessato dalla valanga.

Il rischio è definito come la probabilità di conseguenze dannose o perdite previste, risultanti dalle interazioni tra i rischi, o naturali o indotti dall'uomo, e le condizioni di vulnerabilità (Faculty of Geo-information Science and Earth Observation (ITC), University of Twente, 2014) e può essere definito come segue (17):

$$\text{Rischio} = \text{Pericolo} * \text{Vulnerabilità} * \text{Quantità di elementi a rischio} \quad (17)$$

In particolare, applicando il concetto di rischio ai fenomeni naturali, la definizione precedente può essere riformulata come segue (18):

$$R_S = P_{T;H_S} * P_{L;H_S} * V_{ES,H_S} * A_{ES} \quad (18)$$

Dove:

- R_S definisce il rischio specifico, ovvero le perdite attese in una data area e periodo di tempo (ad esempio, annuale) per uno specifico insieme di elementi a rischio, come conseguenza di uno specifico scenario di pericolo con un dato tempo di ritorno;
- $P_{T;H_S}$ è la probabilità temporale di accadimento di uno specifico scenario di pericolosità H_S con un dato periodo di ritorno in una certa area;

- $P_{L;Hs}$ è la probabilità spaziale di accadimento di uno specifico scenario di pericolo con un dato periodo di ritorno in un'area che incide sugli elementi a rischio.
- $V_{Es,Hs}$ è la vulnerabilità fisica, ovvero il grado di danneggiamento di uno specifico elemento a rischio E_s a seguito del verificarsi di uno scenario di pericolo H_s ;
- A_{Es} è la quantificazione della specifica tipologia di elemento a rischio valutato (es. numero di edifici)

La valutazione del rischio può essere: qualitativa, ovvero basata sull'utilizzo di scale di punteggio, in cui le probabilità di accadimento e le conseguenze non sono stimate numericamente; oppure quantitativa, se le varie componenti dell'equazione del rischio possono essere valutate quantitativamente (Faculty of Geo-information Science and Earth Observation (ITC), University of Twente, 2014). Tra i metodi quantitativi, il metodo dell'albero degli eventi (ETA) consente la modellazione di eventi che si susseguono con effetto a catena; nella valutazione quantitativa del rischio (QRA) vengono invece quantificate le singole componenti del rischio (probabilità spaziale e temporale di accadimento, la vulnerabilità e l'esposizione degli elementi a rischio) i singoli fattori. I metodi quantitativi necessitano però una base di dati precisi e affidabili. L'approccio qualitativo viene talvolta preferito per ovviare al grado di incertezza degli elementi da quantificare o alla mancanza di dati. Tra i metodi qualitativi, l'approccio a matrice di rischio valuta il rischio attraverso classi di frequenze di accadimento e di danno. Un altro metodo qualitativo è quello basato su indicatori spaziali, ovvero componenti della pericolosità, esposizione, vulnerabilità, valutati per diverse aree e poi scalati per permettere il confronto tra diversi ambiti territoriali.

4.5.2 Valutazione quantitativa del rischio

Il metodo di seguito utilizzato (Kristensen & Harbitz, 2003) è stato descritto nel dettaglio nel report completo NGI del 2003 (NGI, 2003) ed è un metodo per la valutazione quantitativa del rischio sociale, poiché gli elementi considerati a rischio sono, in questo caso, persone.

Come già introdotto precedentemente con la definizione di rischio, durante la valutazione del rischio è importante definire:

- L'intervallo di tempo nel quale si può verificare l'evento pericoloso
- L'area geografica nella quale si può verificare l'evento pericoloso
- Gli elementi a rischio
- Il tipo di incidente connesso all'evento pericoloso.

Riprendendo il filo della tesi, la situazione di rischio qui analizzata riguarda l'impatto tra una valanga e i veicoli transitanti lungo un tratto di strada soggetto al fenomeno valanghivo studiato, in cui gli elementi a rischio sono gli utenti della strada a bordo dei veicoli in movimento (*Figura 4.5-1*).

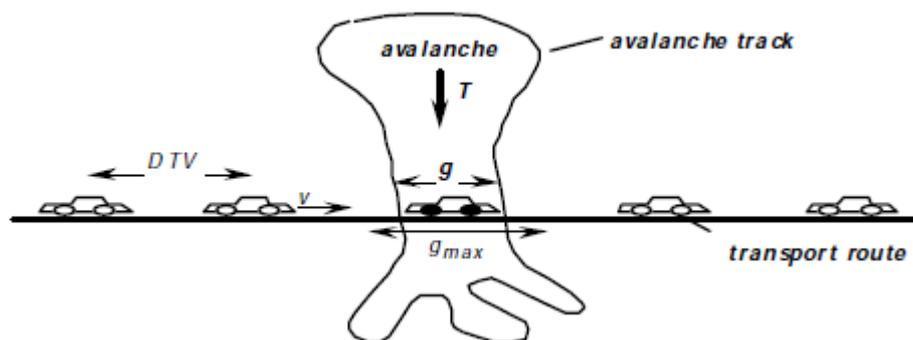


Figura 4.5-1: Modello per la valutazione del rischio valanghe su strade. Fonte (Wilhelm, 1998)

L'area geografica di interesse è costituita dal tratto di strada che, grazie allo studio della dinamica valanghiva, si è visto essere soggetto all'interferenza con la valanga.

Per quanto riguarda l'intervallo temporale nel quale può verificarsi l'evento valanghivo oggetto dello scenario considerato, nel caso del rischio valanghe è comune la valutazione della probabilità annua di interferenza tra valanghe e veicoli; in realtà, essendo la valutazione basata su un numero ristretto di dati, sarebbe corretto parlare di frequenze di accadimento e non di probabilità.

Le situazioni incidentali possono essere molteplici, con conseguenze dirette o anche indirette sulle persone. Per quanto riguarda il pericolo valanghe, tra le possibili situazioni si possono includere: l'impatto diretto di una valanga contro veicoli, la perdita di controllo del veicolo dovuta al disturbo dato dalla valanga in arrivo, il danneggiamento del corpo strada, l'isolamento prolungato di veicoli causato dall'ostruzione della strada da parte della valanga. Il blocco delle strade inoltre, andando ad arrestare temporaneamente le attività oltre ai veicoli, costituisce un'eventualità molto impattante sulla popolazione, anche dal punto di vista economico.

In questo caso sarà considerato il rischio di impatto e il rischio di morte dei passeggeri dei veicoli sepolti da valanghe. Nell'ordine, saranno considerati:

- Il numero medio annuo di veicoli colpiti da valanga (probabilità annuale di impatto tra valanga e veicoli)
- Numero medio annuo di morti a causa di impatto tra valanga e veicolo sulla strada.

Partendo dal primo termine riportato, il numero medio di veicoli colpiti da valanga all'anno dipende dal volume medio del traffico, dal tempo di ritorno della valanga, dalla velocità dei veicoli e dalla lunghezza totale di strada interessata dalla valanga; può essere espresso come segue (19):

$$p = \frac{T}{24 * 3600} * \frac{(L + S)}{R * v} \tag{19}$$

- T: traffico medio nel periodo suscettibile di valanghe (espresso in numero di veicoli al giorno);
- L: larghezza della valanga, ovvero la lunghezza media di strada coperta da valanga (m);
- S: distanza di arresto dei veicoli (m);
- R: tempo di ritorno per la valanga (anni);
- v: velocità veicoli (m/s);

Passando a valutare il rischio di morte per gli utenti della strada, il rischio collettivo annuale CR di avere delle fatalità, espresso in numero di morti all'anno (20), è dato dal prodotto tra la probabilità di impatto valanga-veicolo appena descritta e la probabilità che vi sia almeno un morto nell'impatto:

$$CR = p * \beta * \lambda$$

(20)

Dove:

- β : Numero medio di passeggeri per veicolo;
- λ : probabilità di morte in un veicolo colpito da valanga (da n incidenti stradali mortali).

Inoltre, essendo questi parametri calcolati per ogni tratto di strada omogeneo, in quanto a volume di traffico e probabilità di impatto da valanga, per pervenire al rischio relativo all'intera strada è sufficiente sommare i contributi relativi ai tratti che la compongono.

Bisogna ricordare che la probabilità di impatto tra valanga e veicolo esposta attraverso le espressioni appena descritte, sarebbe il prodotto della probabilità di distacco di valanga, della probabilità che la valanga raggiunga la strada e della probabilità che la valanga colpisca un veicolo una volta raggiunta la strada.

In questo caso, avendo indagato attraverso l'analisi storica e lo studio della dinamica della valanga proprio l'evento valanghivo interferente con la strada, è stato ricavato un tempo di ritorno che racchiude in sé i primi due contributi della probabilità di impatto.

Queste espressioni saranno anche utilizzate per valutare l'efficacia delle misure di protezione eventualmente presenti. Per il caso in esame, si ricorda che il calcolo del rischio tiene conto solamente della presenza dei ponti da neve nella zona di distacco.

Per avere un'indicazione sulla rilevanza del valore ottenuto, si può fare riferimento ai valori di rischio tollerabile forniti per smottamenti e frane da Fell e Hartford (Fell & Hartford, 1997) (Tabella 4.5-1).

Situazione	Rischio tollerabile (numero vittime/anno)
Pendii naturali	10^{-3}
Pendii su cui insistono opere di stabilizzazione	da 10^{-4} a 10^{-6}
Pendii su cui sono in progetto opere di stabilizzazione	da 10^{-5} a 10^{-6}

Tabella 4.5-1: Valori di rischio annuo tollerabile per pendii soggetti a fenomeni franosi. Fonte (Fell & Hartford, 1997)

Un'altra possibilità di confronto è fornita dalle norme Islandesi sulla zonazione del pericolo di valanghe e frane, basate sul rischio individuale come probabilità di morte a seguito di evento valanghivo o franoso (European Commission, 2009) (Tabella 4.5-2).

Zone	Lower level of local risk	Upper level of local risk	Building restrictions
C	$3 \cdot 10^{-4} \text{ yr}^{-1}$	–	No new buildings, except for summer houses ¹ , and buildings where people are seldom present.
B	$1 \cdot 10^{-4} \text{ yr}^{-1}$	$3 \cdot 10^{-4} \text{ yr}^{-1}$	Industrial buildings may be built without reinforcements. Homes have to be reinforced and hospitals, schools etc. can only be enlarged and have to be reinforced. The planning of new housing areas is prohibited.
A	$0.3 \cdot 10^{-4} \text{ yr}^{-1}$	$1 \cdot 10^{-4} \text{ yr}^{-1}$	Houses where large gatherings are expected, such as schools, hospitals etc., have to be reinforced. The planning of new housing areas is prohibited.

¹If the local risk is less than $5 \cdot 10^{-4}$ per year.

Tabella 4.5-2: zone a diversi livelli di rischio accettabile per le aree residenziali in Islanda. Fonte (European Commission, 2009)

Nella norma Islandese un valore di rischio pari a $0.3 \cdot 10^{-4}$ è ritenuto accettabile nelle aree residenziali, le quali sono suddivise secondo tre fasce caratterizzate da livelli crescenti di rischio locale accettabile. Il livello minimo di rischio tollerabile per la zona A è errato per un errore di stampa; esso dovrebbe essere pari a $0.3 \cdot 10^{-5}$.

4.5.3 Raccolta dati sul traffico veicolare



Figura 4.5-2: Tratto della strada comunale La Palud oggetto di studio; a sinistra della strada si trovano la pista di fondo ed il percorso pedonale; sulla destra si trova il piazzale di Planpincieux; la valanga è in arrivo da sinistra. Fonte (Google Maps)

L'area oggetto di studio, ovvero il tratto di strada con cui la valanga 18-030 interferisce, costituisce nel periodo invernale il tratto finale della strada comunale La Palud (Figura 4.5-2); la strada infatti, a seguito di abbondanti precipitazioni nevose, viene pulita fino al piazzale di Planpincieux, dove i veicoli sono obbligati a fare manovra e a tornare indietro verso valle.

Essendo la valle una meta turistica molto apprezzata, il traffico in inverno è prevalentemente composto da turisti e visitatori che salgono e scendono in giornata dalla valle, ma anche dagli operatori delle numerose attività turistiche (ristorazione, hotel, sport invernali, pista di fondo).

La zona quindi risulta molto trafficata, anche per la presenza di numerosi pedoni che attraversano la strada in più punti e, dalla zona del piazzale, si immettono nel percorso pedonale battuto sulla neve o sulla pista di fondo. Essendo quindi un tratto prossimo ad una zona di parcheggio e di manovra, e dato il traffico intenso nel periodo invernale in valle, si ritiene opportuno ipotizzare che i veicoli procedano a velocità molto bassa, quasi a passo d'uomo.

Il servizio navetta, potenziato in inverno, incrementa ulteriormente il numero di persone presenti in valle, anche se la fermata delle navette è appositamente collocata prima della fine della strada, con un idoneo spazio di manovra che permette di non interferire con il resto del traffico.

Grazie ai dati del Piano Urbano del Traffico (PUT) del comune di Courmayeur, sono disponibili i risultati di indagini riguardanti il traffico veicolare locale, nei giorni invernali 7 – 11 marzo 2019 (MIC Mobility In Chain, 2019-2020). Il conteggio è stato effettuato attraverso dispositivi a tecnologia radar doppler a microonde, in grado di contare i veicoli e distinguerli in base alla lunghezza e alla velocità di passaggio.

Essendo l'obiettivo del Piano la rilevazione dei flussi totali all'interno del territorio comunale, le registrazioni sono state effettuate attraverso sette dispositivi collocati in tutti i punti di accesso, considerando come riferimento il centro di Courmayeur. Nella figura seguente sono indicati i dispositivi utilizzati per il rilevamento del traffico nel periodo invernale (*Figura 4.5-3*).



Figura 4.5-3: Posizione dei diversi rilevatori invernali del traffico nell'abitato di Courmayeur e lungo la strada Larzey (R6) e la strada La Palud (R7). Fonte (MIC Mobility In Chain, 2019-2020)

Tra i sette dispositivi indicati, il punto di rilevamento considerato rappresentativo del traffico veicolare in Val Ferret è quello denominato come R7, posizionato lungo la strada La Palud di fronte all'omonimo ristorante, a circa 3 km dal piazzale di Planpincieux (*Figura 4.5-4*).



Figura 4.5-4: Postazione all'imbocco della Val Ferret (R7) lungo la strada La Palud: Fonte (MIC Mobility In Chain, 2019-2020)

Negli ultimi anni, è stata adottata una circolazione del traffico limitata ad alcune ore della giornata, lungo il tratto di strada compreso tra la frazione La Palud e la località Planpincieux, durante alcuni periodi festivi. Per lo svolgimento di questa tesi, si è invece ipotizzato che la circolazione fosse possibile in qualsiasi periodo dell'anno.

Inoltre, dal momento che lungo il tratto di strada considerato (rilevatore R7 – piazzale di Planpincieux) sono maggiormente presenti abitazioni o strutture ricettive, ed essendo lo svincolo per il traforo del Monte Bianco e per la funivia Skyway a valle del rilevatore, è stato ipotizzato che tutti i veicoli registrati dal rilevatore fossero diretti proprio verso il piazzale di Planpincieux, ovvero transitassero sul tratto di strada interessato dalla valanga 18-030.

Per quanto riguarda i risultati dell'indagine sul traffico veicolare effettuata nel periodo 7-11 marzo 2019, viene riportato che il giorno di misura invernale con maggiore affluenza complessiva è risultato essere sabato 9 marzo (40421 veicoli/giorno complessivamente), mentre il giorno con minor traffico è stato lunedì 11 marzo con 15694 veicoli registrati in un giorno.

Questi risultati riflettono generalmente quanto registrato dai singoli rilevatori; in particolare, per il rilevatore R7, che risulta essere quello con il minor numero complessivo di veicoli registrati, i giorni di maggiore e minore affluenza coincidono con quelli sopra citati, con 1771 veicoli registrati il 9 marzo e 587 veicoli registrati l'11 marzo (*Figura 4.5-5*).

Postazione	06/03/2019	07/03/2019	08/03/2019	09/03/2019	10/03/2019	11/03/2019	Totale complessivo
R1 - SS26dir	4074	8130	9882	9793	8324	4025	36129
R2	2025	3439	4138	4518	4665	1803	16760
R2 - A	1469	3135	3816	3439	2137	1415	12527
R2 - B	891	1701	2087	2084	1524	881	7396
R3 - VIA REGIONALE	1662	3302	3888	4027	2792	1514	14009
R4 - VIA MONTEBIANCO	2982	5224	6100	6393	4385	2761	22102
R5 - STRADA DOLONNE	2575	4590	5379	6001	3850	1840	19820
R6 - STRADA LARZEY-ENTREVES	1069	1792	2207	2395	1600	868	7994
R7 - STRADA LA PALUD	847	1179	1636	1771	1196	587	5782
	17594	32492	39133	40421	30473	15694	142519

Figura 4.5-5: Confronto dell'andamento dei flussi del traffico nei quattro giorni invernali di rilievo per le sette stazioni di misura. Fonte (MIC Mobility In Chain, 2019-2020)

Le ore di punta del traffico sono naturalmente le ore diurne nell'intervallo compreso tra le 8:00 del mattino e le 20:00 di sera, orari corrispondenti all'apertura degli impianti e al rientro serale. Durante questo intervallo di tempo il flusso orario non si discosta in modo importante dal massimo numero rilevato, ed il traffico risulta distribuito più omogeneamente nell'arco della giornata, al contrario di quanto rilevato nel periodo estivo. Nella figura seguente l'andamento orario del traffico è riferito all'insieme delle misure di tutti i rilevatori, ma è rappresentativo anche dell'andamento del dispositivo R7 (Figura 4.5-6).

Inverno		Estate		S/W
9/03 (PeakDay)		16/08 (PeakDay)		
Ora	Unità	Ora	Unità	
00-01	646	00-01	534	-17%
01-02	212	01-02	162	-24%
02-03	111	02-03	84	-24%
03-04	80	03-04	33	-59%
04-05	85	04-05	41	-52%
05-06	112	05-06	70	-38%
06-07	371	06-07	326	-12%
07-08	1316	07-08	940	-29%
08-09	2613	08-09	2106	-19%
09-10	2710	09-10	3757	39%
10-11	2771	10-11	4619	67%
11-12	2629	11-12	4644	77%
12-13	2514	12-13	3757	49%
13-14	2305	13-14	2604	13%
14-15	2512	14-15	2814	12%
15-16	2951	15-16	3526	19%
16-17	3538	16-17	4290	21%
17-18	3153	17-18	4981	50%
18-19	2610	18-19	5104	96%
19-20	2392	19-20	3965	66%
20-21	1475	20-21	2446	66%
21-22	1071	21-22	1548	45%
22-23	1022	22-23	1292	26%
23-24	1222	23-24	1143	-6%
	40421		54786	-26%

Figura 4.5-6: Confronto della distribuzione oraria dei flussi nel giorno di picco invernale (a sinistra) ed estivo (a destra). Fonte (MIC Mobility In Chain, 2019-2020)

Come già detto, i rilevatori hanno anche suddiviso i veicoli in classi di lunghezza: tra queste, la classe di veicoli di lunghezza inferiore a 5 m rappresenta le auto, quella con veicoli compresi tra la lunghezza di 5 m e 7.5 m rappresenta i van e furgoni per il trasporto di persone e merci, mentre la

categoria di veicoli di lunghezza compresa tra 7.5 m e 12.5 m di lunghezza include i minibus e autobus tradizionali per il trasporto turistico.

È interessante notare, nella figura seguente, che la postazione invernale R7 (strada La Palud) conta percentuali significative rispetto ad altri punti di misura, di veicoli alternativi alle auto, presumibilmente riconducibili alle navette del trasporto pubblico in esercizio in Val Ferret (Figura 4.5-7).

Postazioni Invernali	<5	5-7,5	7,5-12,5	12,5-16,5	>16,5	Totale
R1	87.5%	9.3%	2.1%	0.9%	0.2%	44228
R2	86.7%	11.2%	2.0%	0.2%	0.0%	20588
R2 -A	89.0%	10.1%	0.8%	0.1%	0.0%	15411
R2 -B	88.4%	8.9%	2.6%	0.1%	0.0%	9168
R3	87.6%	9.3%	2.2%	0.8%	0.1%	17185
R4	84.8%	12.4%	1.7%	0.9%	0.2%	27845
R5	88.1%	10.1%	1.7%	0.1%	0.0%	24235
R6	85.8%	9.2%	4.9%	0.0%	0.0%	9931
R7	78.2%	12.6%	2.8%	6.3%	0.1%	7216

Figura 4.5-7: Composizione dei flussi per categoria di veicoli. Fonte (MIC Mobility In Chain, 2019-2020)

Come riferito dal personale dell'Ufficio Tecnico Gestionale del comune di Courmayeur, il trend del traffico veicolare si mantiene abbastanza costante negli anni, senza subire importanti variazioni; per questo, si ritiene che i dati ricavati nell'anno 2019 possano rispecchiare la situazione riscontrata negli anni precedenti, seguenti, ma anche quella degli anni futuri.

4.5.4 Calcolo del rischio

4.5.4.1 Probabilità di impatto tra valanga e veicolo

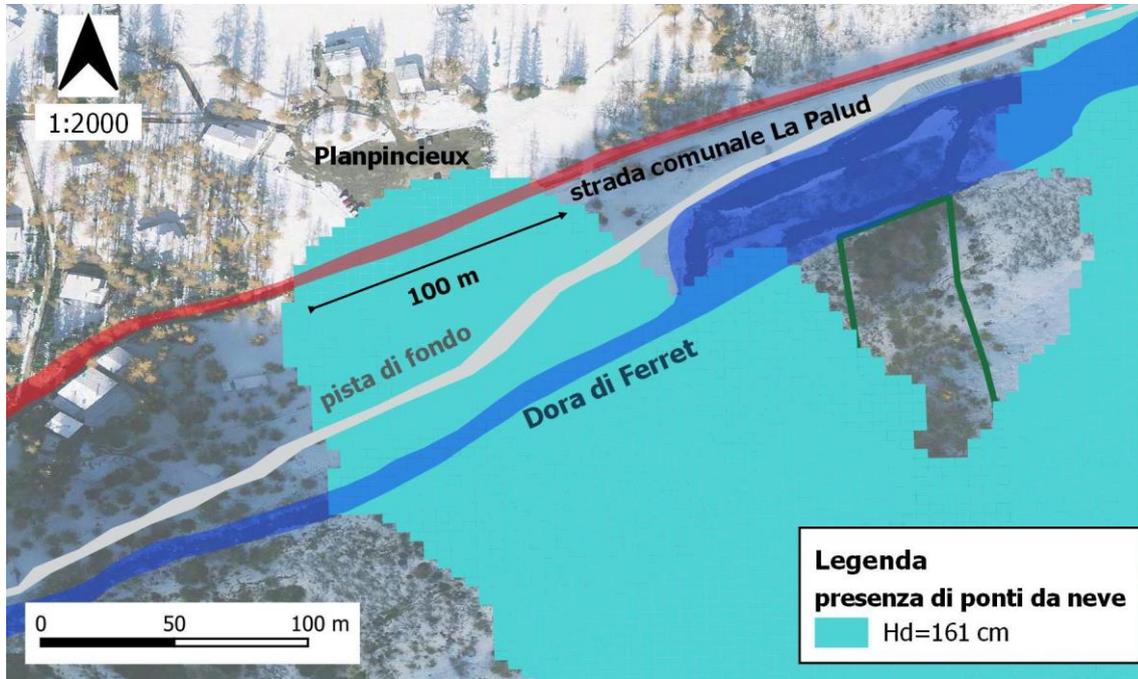


Figura 4.5-8: Larghezza del tratto di strada occupata dalla valanga nel caso di arresto sulla strada ($H_d = 161$ cm). Elaborazione personale con QGIS

È stato prima analizzato il rischio di impatto tra valanga e i veicoli in transito nel tratto di strada considerato.

Poiché il numero di veicoli colpiti da valanga viene calcolato su base annua, il valore minore tra quelli registrati dal rilevatore R7 è stato assunto come valore rappresentativo del volume di traffico medio annuo; è stato quindi utilizzato il numero totale di passaggi relativo a Lunedì 11 Marzo 2019, pari a 587 passaggi (veicoli) in un giorno.

Non è stato considerato per il calcolo del rischio il numero di passaggi in ingresso o in uscita, bensì il volume totale giornaliero del traffico, per la possibilità della valanga di colpire i veicoli sulla strada in entrambi i sensi di marcia.

Come visto nel paragrafo precedente, il traffico si concentra nelle ore diurne della giornata; allo stesso modo, si ritiene che anche il distacco di valanghe sia più probabile nelle medesime ore, a causa della forte influenza delle variazioni di temperatura sulla stabilità del manto nevoso. Ciò è avvalorato dalle informazioni riportate nel Catasto Valanghe Regionale.

Il tratto di strada considerato si trova a pochi metri dal piazzale di Planpincieux e corrisponde al termine del tratto di strada percorribile in inverno della Val Ferret. Per le considerazioni già espresse si ipotizza che la velocità dei veicoli sia molto bassa, pari a 10 km/h (2.77 m/s), e che essi procedano

“a passo d’uomo”. Altrettanto modesta risulta essere la distanza di arresto di tali veicoli, assunta pari a 3 m.

Per quanto riguarda la valanga insistente sulla strada, con lo scenario considerato nelle simulazioni relativo ad una valanga con altezza di distacco pari a 161 cm e tempo di ritorno fissato a 100 anni, era stato ottenuto che il tratto di strada coperto dalla valanga ha una lunghezza di circa 100 m (Figura 4.5-8).

Nonostante risultasse che l’altezza di distacco corrispondente all’arresto della valanga sulla strada corrispondesse, secondo l’applicativo di Barbolini e Ferro, ad un tempo di ritorno di circa 300 anni, si è scelto di mantenere per il calcolo del rischio il tempo di ritorno di 100 anni.

Di seguito sono riportati i valori dei parametri inseriti nel calcolo (Tabella 4.5-3).

Parametri di input		
Volume traffico (numero passaggi totale)	T (veicoli/giorno)	587
Velocità veicoli	V (m/s)	2.77
Distanza di arresto veicoli	L (m)	3
Larghezza valanga	S (m)	100
Tempo di ritorno valanga	R (anni)	100

Tabella 4.5-3: Dati di input per il calcolo del numero medio di veicoli colpiti dalla valanga all’anno per lo scenario valanghivo considerato. Elaborazione personale con Excel

Applicando la relazione (19) è stato ricavato il rischio collettivo annuo di impatto tra valanga e veicoli (Tabella 4.5-4).

Numero annuo di veicoli colpiti da valanga	p	2.53E-03
--	---	----------

Tabella 4.5-4: Numero medio di veicoli colpiti dalla valanga all’anno per lo scenario valanghivo considerato. Elaborazione personale con Excel

4.5.4.2 Probabilità di morte per impatto tra valanga e automobili

Successivamente è stato valutato il rischio di morte per persone sepolte nella propria automobile a seguito di impatto tra la valanga che ha raggiunto la strada e i veicoli.

Per il calcolo della probabilità di morte, come visto nei paragrafi precedenti, la probabilità di impatto viene moltiplicata per la probabilità di morte in un veicolo colpito da valanga λ e per il numero medio di passeggeri a bordo del veicolo β .

Questi due parametri possono variare per il tipo di veicolo considerato: la probabilità di morte a seguito di impatto con la valanga, ad esempio, è diversa per automobili e autobus, poiché le diverse caratteristiche dimensionali di questi veicoli possono condizionare in modo diverso l’impatto con la valanga. Anche il numero di passeggeri presenti a bordo di un’automobile è mediamente diverso

dal numero di passeggeri a bordo di un autobus. Per questo, si è scelto di applicare il calcolo seguente alle automobili.

In riferimento alle categorie di auto registrate dai rilevatori del traffico nell'ambito del Piano Urbano del Traffico di Courmayeur, sono stati considerati i veicoli di lunghezza inferiore a 5 m (classe 1). Le automobili sono, per tutte le stazioni di rilevamento, i veicoli maggiormente presenti. In particolare, presso il dispositivo R7 sulla strada La Palud, è stata rilevata la presenza di automobili con una percentuale, rispetto al totale dei veicoli, del 78%. È stata quindi applicata tale percentuale al numero di passaggi rilevati il giorno Lunedì 11 Marzo 2019 presso il dispositivo R7, per ottenere il numero medio giornaliero di automobili su base annua lungo il tratto di strada considerato.

Per quanto riguarda il numero di passeggeri a bordo di automobili (β), essendo la presenza di turisti e famiglie nel periodo suscettibile di valanghe prevalente al numero di lavoratori, si è scelto di assumere un numero medio di passeggeri pari a 3.

Infine, per la probabilità di morte in auto (λ) si è fatto riferimento ad uno studio relativo agli incidenti avvenuti sulle strade dei valichi alpini (Margreth, Stoffel, & Wilhelm, 2003), in cui la probabilità di morte all'interno di veicoli a seguito di impatto con valanghe è stata valutata sulla base degli incidenti avvenuti sulle strade delle Alpi Svizzere tra il 1946 ed il 1999, ed è indicata essere pari a 0.18.

Nella tabella seguente sono riportati i valori dei parametri utilizzati per il calcolo del rischio (Tabella 4.5-5).

Rischio di morte in auto – Parametri di input		
Volume traffico (numero passaggi totale)	T (veicoli/giorno)	587
Volume traffico auto (78% tot)	Ta (veicoli/giorno)	457.86
Numero medio passeggeri per auto	β	3
Probabilità di morte in auto sepolta da valanga	λ	0.18
Velocità auto	v (m/s)	2.77
Distanza di arresto veicoli	l (m)	3
Larghezza valanga	S (m)	100
Tempo di ritorno valanga	Ri (anni)	100

Tabella 4.5-5: Dati di input per il calcolo del numero medio di morti all'anno a causa di impatto tra la valanga e i veicoli per lo scenario valanghivo considerato. Elaborazione personale con Excel

Di conseguenza il rischio collettivo di morte, ovvero il numero di vittime all'anno per impatto di una valanga contro i veicoli, calcolato con attraverso l'espressione (20), risulta pari a (Tabella 4.5-6):

Numero annuo di automobili colpite da valanga	p	1.97E-03
Rischio collettivo annuale di morte (automobili)	CR (n° morti/anno)	1.06E-03

Tabella 4.5-6: Numero medio di morti all'anno a causa di impatto tra la valanga e i veicoli per lo scenario valanghivo considerato. Elaborazione personale con Excel

Il rischio così ottenuto risulta eccessivo rispetto al range di rischio tollerabile indicato dalla *Tabella 4.5-1* per pendii su cui insistono opere di protezione (compreso tra 10^{-4} e 10^{-6}).

Nei confronti del rischio accettabile previsto per le aree residenziali dalla normativa Islandese *Tabella 4.5-2*, la Val Ferret, pur non essendo per definizione un'area residenziale, è caratterizzata nella stagione invernale da grandi affollamenti di persone. Si può osservare quindi che il valore di rischio ottenuto non rispetta e supera il valore massimo di rischio accettabile indicato nella norma per le aree di categoria A, pari a $1 \cdot 10^{-4}$.

4.5.5 Confronto tra la situazione pre e post ponti da neve

Come già detto, le espressioni descritte nei paragrafi precedenti sono spesso utilizzate per la valutazione dell'efficacia delle misure di gestione del rischio. In questo caso, è stato valutato lo stesso rischio del paragrafo precedente, considerando però il pendio nelle sue condizioni naturali, ovvero in assenza di ponti da neve.

I ponti da neve, come indicato all'interno delle "Schede rilevazione paravalanghe" riportate al Capitolo 3, sono posizionati poco sotto la cresta del Mont de La Saxe presso la zona di distacco della valanga 18-030, coprendo una superficie di intervento di 1.2 ha. Per valutare il rischio in questa nuova condizione (in assenza di ponti da neve) è stato dunque necessario ripetere la simulazione con RAMMS, ridefinendo l'area di distacco in modo da considerare anche la porzione di pendio occupata dai ponti da neve.

È stata così individuata un'area di distacco compresa entro i limiti definiti dal Catasto Valanghe Regionale per la valanga 18-030, che coincidesse con quella precedentemente definita con la sola aggiunta della porzione di pendio occupata dai ponti da neve (*Figura 4.5-9*).

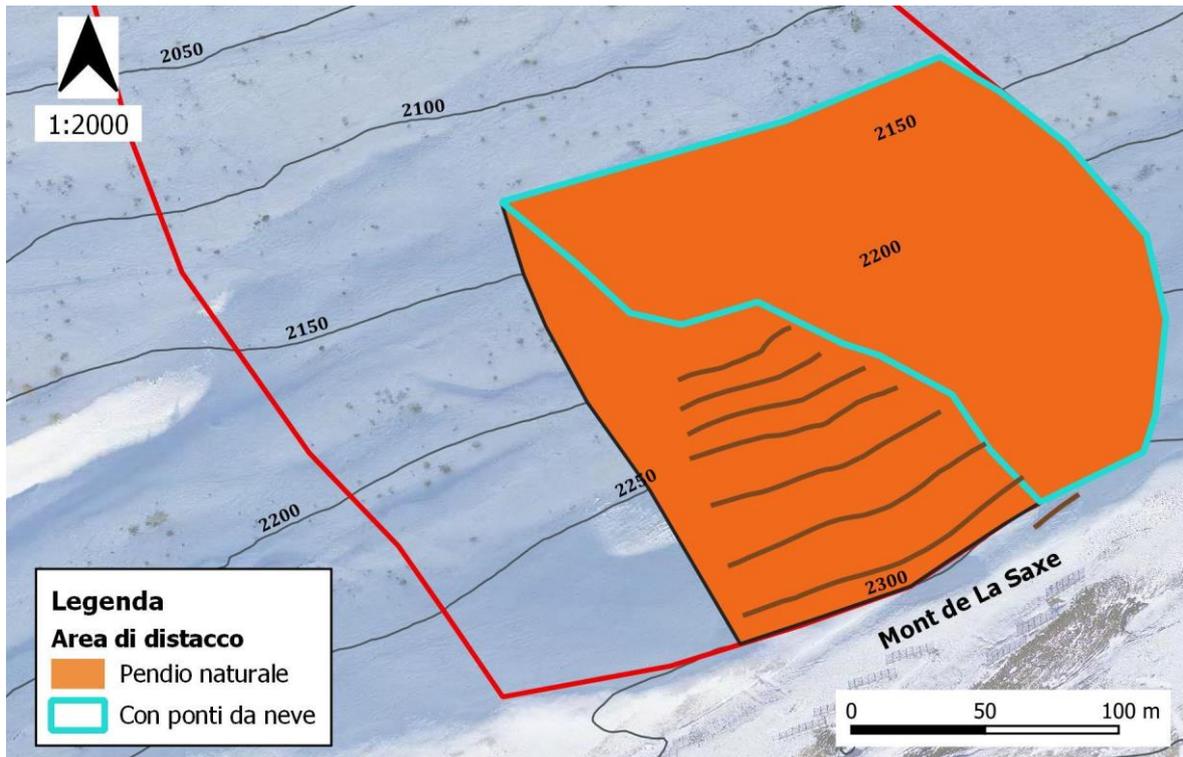


Figura 4.5-9: Area di distacco nel caso di assenza di ponti da neve. Elaborazione personale con QGis

I dati di input inseriti in RAMMS per la nuova simulazione (Tabella 4.5-7) sono rimasti invariati, ad eccezione del volume di distacco che, in virtù dell'area di distacco più estesa, è risultato essere maggiore e pari a 100434.0 m³ rispetto al caso precedente, in cui il volume della valanga in presenza di ponti da neve era pari a 60253 m³.

Pertanto si è passati da una categoria di volume *medium* ad una *large*.

DTM	5 m
Inclinazione media area di distacco	35°
Quota media area di distacco	2217
Tr Hd	100 anni
Hsd (sovraccarico da vento)	0
Hd	161 cm
Categoria di volume	<i>large</i>
Tr (μ , ξ)	100 anni
Bosco	si
ρ (kg/m ³)	300
Coesione (Pa) (neve asciutta)	100

Tabella 4.5-7: Dati di input per la simulazione con RAMMS in assenza di ponti da neve. Elaborazione personale con Excel

Il risultato di maggior rilievo per il calcolo del rischio ottenuto dalla simulazione con RAMMS è la larghezza della valanga, ovvero la lunghezza del tratto di strada occupato dalla valanga, che è risultato essere quasi pari al doppio del caso precedente, nonchè 190 m (Figura 4.5-10).

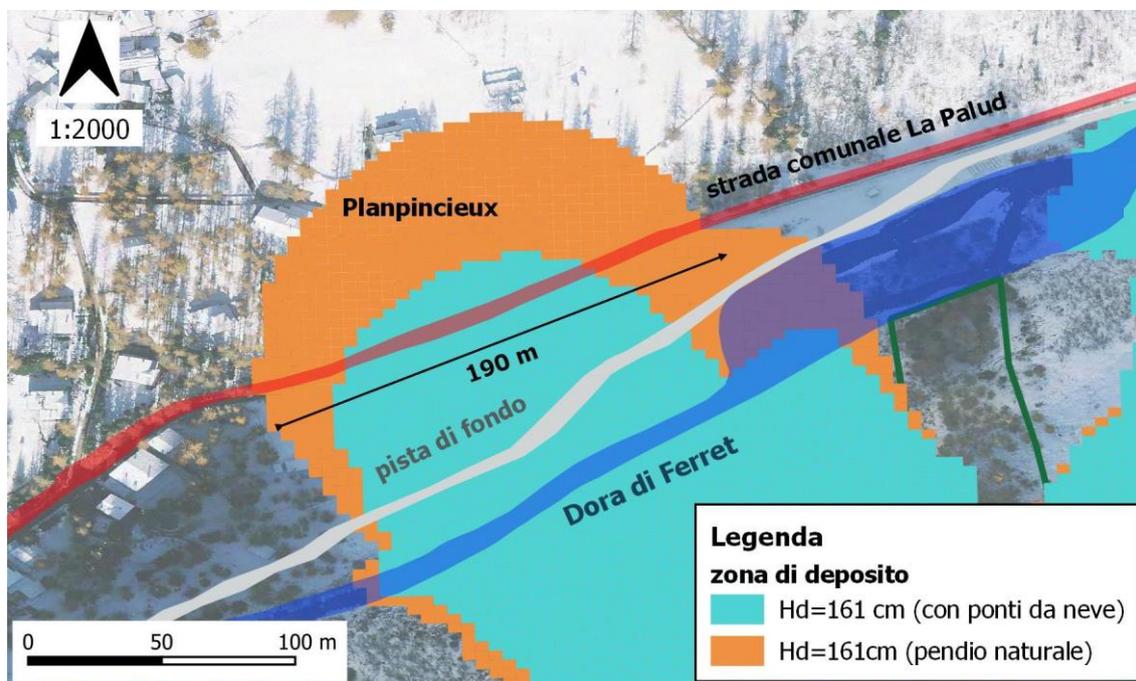


Figura 4.5-10: Simulazione in assenza di ponti da neve – Confronto tra il deposito ricavato in presenza di ponti da neve (azzurro) e il deposito ricavato in assenza di ponti da neve (arancione). Elaborazione personale con QGIS

È stato così ricalcolato dapprima il numero medio annuo di veicoli colpiti da valanga, e successivamente il numero medio annuo di morti all'interno di veicoli a causa dell'impatto (Tabella 4.5-8). I valori di tutti i parametri di calcolo sono rimasti invariati ad eccezione della lunghezza del tratto di strada considerato.

Numero annuo di automobili colpite da valanga	p	3.69E-03
Rischio collettivo annuale di morte (automobili)	CR (n° morti/anno)	1.99E-03

Tabella 4.5-8: Numero medio di veicoli colpiti dalla valanga all'anno e numero medio di morti all'anno a causa di impatto tra la valanga e i veicoli per lo scenario valanghivo considerato in assenza di ponti da neve. Elaborazione personale con Excel

Si osserva che il rischio così ottenuto è quasi doppio rispetto a quello relativo al pendio in cui sono presenti i ponti da neve. In accordo con il valore di rischio accettabile per pendii naturali della Tabella 4.5-1, il rischio risulta concorde con l'ordine di grandezza indicato, ma comunque elevato. Risulta invece troppo elevato rispetto ai valori indicati dalla normativa Islandese (Tabella 4.5-2).

4.5.6 Considerazioni sulla gestione del rischio

Nonostante la presenza dei ponti da neve provochi un dimezzamento del valore del rischio collettivo annuo di morte rispetto alla stessa condizione in assenza di opere di protezione, il rischio è di superiore al limite massimo di rischio tollerabile di 10^{-4} .

Va ricordato che il valore di rischio ottenuto corrisponde ad un unico scenario valanghivo, relativo ad un evento raro, ovvero ad una valanga radente con tempo di ritorno 100 anni.

D'altro canto, in confronto al rischio di morte all'interno di veicoli colpiti da valanga, quello relativo a pedoni e sciatori, non trattato in questa tesi, sarebbe assai maggiore, considerata la minore velocità degli stessi e dal momento che la circolazione in valle è limitata ai veicoli, ma non alle persone.

Nonostante sia stata considerata nel calcolo la sola presenza dei ponti da neve, numerose sono le misure attualmente adottate per la gestione del rischio valanghe in Val Ferret.

A partire dalle opere di protezione, oltre ai ponti da neve già citati, sulla cresta del Mont de La Saxe sono posizionati 77 deflettori in legno per evitare la formazione di accumuli da vento in prossimità della zona di distacco della valanga studiata e di quelle adiacenti (*Figura 4.5-11*).



Figura 4.5-11: Elementi frangivento sulla cresta del Mont de La Saxe. Foto: Giulia Venturato

Per quanto riguarda le misure di gestione del rischio in Val Ferret, l'amministrazione ricorre nella stagione invernale, come osservato nel paragrafo riguardante le indagini sul traffico, ad un fitto sistema di trasporto pubblico che aiuta ad alleggerire il traffico di veicoli in valle. Si è visto infatti che, oltre al normale servizio previsto durante l'anno, nei periodi festivi (Natale, Capodanno, Carnevale, Pasqua), il trasporto pubblico viene potenziato con l'incremento del numero di mezzi operativi, mentre la circolazione, con alcune eccezioni, viene vietata durante le ore diurne ai turisti con mezzi privati.

Inoltre è previsto per i giorni di traffico più intenso un servizio di supporto alla viabilità, all'informazione e alla vigilanza, grazie alla presenza di personale incaricato localizzato in punti strategici per la gestione del traffico.

La chiusura totale della strada viene attuata da parte del Sindaco a seguito di un confronto con la Commissione Locale Valanghe che monitora il territorio. La CLV infatti, ricevuto il Bollettino di criticità redatto a scala quasi regionale, individua il livello di criticità locale per il territorio di competenza e di conseguenza monitora, secondo diversi gradi operativi legati ai livelli di criticità, le condizioni del manto nevoso e meteorologiche in atto. Durante queste attività, la CLV trasmette al sindaco gli esiti delle valutazioni effettuate, incluse proposte di provvedimenti finalizzati a garantire la sicurezza sul territorio.

Da ciò deriva che le informazioni contenute nel Bollettino di criticità a scala di macroarea, seppur forniscano una prima informazione sul pericolo di valanghe, sono solo indicative e costituiscono in realtà il punto di partenza per una più intensa e prolungata attività di monitoraggio a livello locale.

Probabilmente la chiusura della strada è stata la prima tra le misure utilizzate in Val Ferret per la gestione del rischio valanghe. Il Catasto Valanghe riporta infatti che prima degli eventi del 23 gennaio 1995, del 5 marzo 2006 e del 28 gennaio 2021, i mezzi e le persone erano stati fatti evacuare e la strada era stata chiusa a seguito del rilevamento di elevata criticità.

L'evacuazione dell'area circostante alla strada La Palud viene anche disposta, previa consultazione tra la CLV e l'amministrazione comunale, quando viene attivato il Piano Operativo di Gestione del Pericolo Valanghe attraverso il distacco artificiale tramite esplosivo, per la gestione del rischio valanghe sul bacino del Rochefort (lato Monte Bianco). Attualmente, se le condizioni lo permettono, la prima opzione di intervento considerata quando vengono superate determinate soglie di altezza neve è la bonifica attraverso il distacco artificiale; nel caso in cui non sia possibile attuare il distacco artificiale, viene invece disposta la chiusura totale della strada.

A differenza delle opere di protezione che, pur abbassando il rischio, producono un rischio residuo anche non accettabile, la chiusura totale della strada, così come il PIDAV, vietando la circolazione di mezzi e persone nella zona pericolosa, è una misura che elimina il rischio fisico, ovvero il rischio di morte o di infortunio per le persone.

Tuttavia, la chiusura della strada comporta per il settore turistico importanti perdite dal punto di vista economico. I turisti sono richiamati dalla bellezza dell'ambiente montano ed accorrono in valle per praticare lo sci di fondo presso la pista che si sviluppa nel fondovalle tra le località di Planpincieux e Lavachey, oppure per passeggiare lungo il percorso pedonale che corre lungo la pista di fondo e percorre l'intero fondovalle. Lungo questi percorsi si trovano anche numerose strutture alberghiere e ricettive a servizio dei turisti.

Per quanto riguarda la pista di fondo, la relazione conclusiva della Società Cooperativa Sociale O.N.L.U.S. sulla gestione delle piste nella stagione 2021/2022 ha evidenziato un incasso totale pari a 55.216.81 €, per il periodo compreso tra il 7 dicembre 2021 e il 3 aprile 2022 (CO.SER.CO, 2022). La stagione è stata positiva per la scarsità di neve nelle altre stazioni sciistiche e per le poche giornate di chiusura per pericolo valanghe o per pista inagibile. L'andamento risulta in linea con le stagioni precedenti.

Grazie alle informazioni reperite dal personale impiegato delle piste da sci, è emerso che in una delle giornate di maggiore afflusso dell'intera stagione, la pista ha contato la presenza di 270 persone. Il costo del biglietto intero giornaliero è di 9 € mentre il costo dello stesso biglietto è di 6 € per i residenti in Valdigne. La relazione conclusiva ha evidenziato un rapporto tra i biglietti interi ed i biglietti ridotti venduti di 2/1. Il ricavato della giornata festiva è stato perciò intorno a 2160 €. Ciò evidenzia che, se la chiusura della strada coincidesse con una tra le giornate più proficue per la stazione sciistica, la perdita sarebbe ingente, pari quasi al 4% del ricavo totale.

Assumendo invece una presenza media nei weekend di 150 persone al giorno, il ricavato e quindi la perdita in caso di chiusura della strada sarebbero intorno a 1200 €, ovvero pari al 2% rispetto al ricavo totale. La perdita sarebbe ridotta rispetto al caso precedente ma relativa a circa 35 giorni dell'intera stagione.

Nei giorni feriali si ipotizza una prevalenza sulle piste di residenti con biglietto ridotto o di sciatori muniti di biglietti stagionali, il cui acquisto viene saldato anticipatamente all'inizio della stagione sciistica, per cui esso comporta un guadagno assicurato per la società; la chiusura della strada in questi giorni comporterebbe una perdita esigua di ricavo.

Tale stima indicativa non tiene conto delle numerose variabili meteorologiche che spesso minacciano le giornate invernali, tra le quali la temperatura troppo rigida, precipitazioni, vento forte anche in una giornata serena. Considerando nella stima anche questi fattori la perdita appena calcolata sarebbe ancora maggiore.

Non vengono qui considerate le perdite per i ristoranti e gli alberghi, che confidano nella presenza degli sciatori ma anche e soprattutto dei frequentatori del percorso pedonale, il quale conta nei giorni più "caldi" la presenza di circa 4000 persone. Questo permette di comprendere che la chiusura totale della strada è una misura necessaria per la sicurezza delle persone ma anche potenzialmente molto dannosa per un'area in cui il turismo è praticamente l'unica fonte di reddito per la popolazione.

La possibilità di falsi allarmi è inoltre molto alta. Il verificarsi di un evento valanghivo è frutto dell'interazione di molteplici fattori; spesso quindi si verificano situazioni incerte in cui la chiusura totale della strada, adottata in via precauzionale, non viene seguita dall'evento valanghivo.

Va ricordato che la chiusura totale della strada può durare alcuni giorni ma anche poche ore, portando un impatto negativo ridotto all'economia della valle. Le ordinanze sono emesse dalle amministrazioni comunali, le quali sono supportate nelle decisioni dalle Commissioni Locali Valanghe (CLV), organi costituiti da soggetti competenti che grazie alla propria conoscenza dell'area e delle tematiche valanghive valutano volta per volta il rischio a partire dalle informazioni riportate nel bollettino di criticità e dai dati registrati dalla rete nivometeorologica, nonché durante sopralluoghi in campo. A loro supporto è stata realizzata una piattaforma virtuale che fornisce metodologie uniformi per la conduzione delle fasi di previsione a breve termine delle condizioni meteorologiche e di stabilità del manto nevoso, valutazione delle possibilità di intervento, sorveglianza, allerta e gestione delle emergenze. Questa piattaforma, nata in fase sperimentale dalla collaborazione tra la Regione Autonoma Valle d'Aosta ed il progetto europeo MAP3 (P.O. Territorial European Cooperation for France/Italy (Alps) 2007-2013 (Segor, et al., 2014), è stata confermata e attivata per le diciassette Commissioni Locali Valanghe del territorio valdostano.

Permette attualmente la visualizzazione e l'archiviazione da parte dei componenti delle CLV dei dati nivometrici, meteorologici, valanghivi, la raccolta di misure e rilievi in campo e la registrazione di tutte le operazioni effettuate.

5. Conclusioni

Il lavoro svolto in questa tesi ha permesso di affrontare passo dopo passo tutti gli step dell'analisi di rischio applicata al fenomeno delle valanghe, con l'obiettivo specifico di valutare il rischio per gli utenti della strada La Palud a bordo di veicoli.

Con l'analisi di dati storici è stata studiata l'attività pregressa della valanga ed in particolare la presenza di eventi valanghivi arrestatisi sulla strada. Verificata la presenza storica di un evento raro con arresto in prossimità della strada, attraverso l'analisi delle pendenze e della vegetazione sono state individuate le zone di distacco, scorrimento e arresto della valanga.

Il passo successivo ha riguardato l'analisi della dinamica valanghiva attraverso il software RAMMS. Grazie alle informazioni disponibili sul distacco e sul deposito riguardanti l'evento raro depositato in prossimità della strada, si è potuto procedere alla taratura del modello; lo spessore di distacco di progetto è stato ricavato grazie all'applicativo fornito dalla Regione Valle d'Aosta per la definizione di parametri nivometrici standard per la prevenzione del rischio valanghivo sul territorio valdostano.

È stata di seguito studiata la dinamica valanghiva di un evento interferente con la strada con l'intento di analizzare le distanze di arresto al variare dell'altezza di distacco, nonché la lunghezza del tratto di strada occupato dalla valanga.

Quest'ultimo parametro ricavato è stato utilizzato per il successivo calcolo, attraverso numerose ipotesi spiegate all'interno della tesi, di un indice utilizzato per la determinazione quantitativa del rischio e per la valutazione dell'efficienza delle opere di protezione presenti in zona di distacco.

Valutata l'entità del rischio in relazione allo scenario valanghivo considerato, sono state richiamate brevemente le misure attualmente in vigore per la gestione del rischio valanghe in Val Ferret, evidenziando i rispettivi effetti positivi per la sicurezza fisica delle persone ma anche negativi per l'economia della valle.

Durante lo svolgimento del lavoro sono emersi alcuni aspetti di criticità, che possono ritenersi comuni ad altri studi analoghi di analisi di rischio.

Innanzitutto, l'analisi storica è stata resa possibile grazie alla presenza di dettagliati resoconti sugli eventi valanghivi storici raccolti all'interno del Catasto Valanghe Regionale. Questo strumento è stato creato per la catalogazione delle informazioni riguardanti i principali bacini valanghivi presenti sul territorio regionale. In altre regioni, in cui la problematica valanghiva non sia così diffusa e non vi sia dedicata la stessa attenzione a causa della scarsa rilevanza della tematica, questa ricerca di dati storici sarebbe stata più complessa e faticosa, lunga e laboriosa.

L'analisi delle pendenze è stata svolta tramite il software QGis mentre l'analisi della vegetazione con l'osservazione del materiale fotografico presente all'interno del Catasto Valanghe Regionale e con immagini aeree disponibili sul geoportale SCT di dati cartografici regionale. Successivamente un sopralluogo sul posto ha permesso di acquisire un quadro più completo della morfologia del versante e della vegetazione: è presente infatti nella parte bassa del pendio una fitta fascia di specie arbustive, non visibile nelle immagini consultate in quanto non aggiornate.

Quanto ai parametri nivometrici di progetto, i dati disponibili per l'analisi statistica derivano dalle misurazioni delle stazioni meteorologiche posizionate su tutto il territorio. Un'analisi di dettaglio avrebbe richiesto una serie di dati lunga e consistente, ma la mancanza di numerose registrazioni ha portato alla decisione di affidarsi allo studio regionale svolto da Barbolini e Ferro, che ha agevolato notevolmente il lavoro.

Questo strumento utilizzato nell'ambito del lavoro di tesi è anche sfruttato per altre applicazioni ingegneristiche quali la progettazione di opere di protezione.

Anche questo strumento, insieme al Catasto Valanghe Regionale, è stato promosso dalla Regione per l'utilizzo su tutto il territorio regionale. Le stesse indagini svolte in un'altra regione sarebbero risultate più complicate e laboriose.

Lo studio della dinamica valanghiva attraverso il software RAMMS ha permesso in primo luogo di ottenere una discreta panoramica di distanze di arresto ottenute al variare dello spessore di distacco; anche in questa fase, la presenza di dati sugli eventi storici è stata determinante per la validazione dei risultati ottenuti con le simulazioni.

In secondo luogo, l'utilizzo del software ha messo in evidenza alcune peculiarità e limiti dello stesso. Il modello numerico utilizzato è adatto a studiare le valanghe radenti. La scelta dello scenario valanghivo da rappresentare nel modello è stata quindi in parte condizionata dal tipo di software utilizzato. Sarebbe stato interessante anche analizzare le valanghe nubiformi, anch'esse molto presenti nell'area di studio; queste, più veloci ed in grado di raggiungere distanze di arresto maggiori rispetto alle valanghe radenti, hanno nel corso degli anni causato danni rilevanti agli elementi a rischio.

Si è visto che i risultati possono dipendere dalle impostazioni dei parametri di input della simulazione, da definire con attenzione e cognizione. Si è visto infatti come piccoli cambiamenti nello spessore di distacco (parametro legato nelle impostazioni del modello alla classe di volume della valanga e, di conseguenza, ai parametri di attrito del terreno) possano produrre grosse differenze in quanto a distanze di arresto ottenute; si sottolinea tuttavia la possibilità di forzare manualmente l'impostazione dei parametri di input. Nonostante ciò, essendo un modello numerico bidimensionale che scorre su un terreno tridimensionale, si riconosce in RAMMS un valido e prezioso strumento per la previsione di distanze di arresto, velocità e pressioni di impatto di valanghe. È inoltre importante ricordare che, oltre alle caratteristiche del manto nevoso, per una definizione completa di uno scenario valanghivo si dovrebbe tenere conto anche delle condizioni meteorologiche, quali la temperatura e il vento.

Il successivo calcolo del rischio, applicato al particolare aspetto della sicurezza per gli utenti della strada, è stato determinato considerando la sola presenza di opere di protezione nella zona di distacco. Per questo calcolo, dal Piano Urbano del Traffico del comune di Courmayeur è stato estratto il dato relativo al volume del traffico rilevato dal dispositivo più prossimo all'area di interesse.

Il valore ottenuto ha così fornito un'indicazione generale sul livello di rischio. Nonostante il risultato ricavato abbia evidenziato un dimezzamento del rischio rispetto alla condizione di pendio naturale in assenza di ponti da neve, questo calcolo ha fatto emergere la necessità di misure ulteriori rispetto alle opere di protezione esistenti.

Innanzitutto, per alleggerire il traffico sulla strada, l'amministrazione prevede nel periodo invernale un servizio di trasporto pubblico potenziato; in caso di elevato pericolo valanghe, viene invece disposta la chiusura totale della strada. Quest'ultima misura in particolare elimina il rischio per l'incolumità delle persone ma comporta una perdita per l'economia della valle, alla quale si può aggiungere, in caso di falso allarme, la sfiducia e l'insoddisfazione della popolazione verso gli organi con funzione decisionale.

Per valutare in modo oggettivo la necessità di aggiungere delle misure gestionali per fare fronte al rischio valanghe anche su altri siti, potrebbe essere utile utilizzare un procedimento analogo all'attività svolta in questa tesi.

Si dovrebbe dunque valutare anticipatamente tutti i possibili scenari e determinare per ogni bacino valanghivo, attraverso modelli analoghi a RAMMS, distanze di arresto e pressioni di impatto al variare di tutti i parametri che possono influenzare il moto della valanga, per ottenere un inventario di scenari valanghivi con relative soglie di altezza di distacco da tenere in considerazione nel contesto del sistema di allerta ai fini di protezione civile.

Tuttavia questa procedura, se applicata ad ogni bacino suscettibile di valanghe, risulterebbe lunga e laboriosa e dovrebbe essere accompagnata da misure in tempo reale di altezza e caratteristiche della neve al suolo registrate in prossimità delle aree di distacco; richiederebbe un onere computazionale enorme e un impiego di risorse economiche eccessivo.

Inoltre, bisognerebbe comunque tenere in considerazione che gli scenari, se svolti con software commerciali come RAMMS, non potrebbero tenere conto del fenomeno dell'erosione della neve, che comporta un aumento anche di 10 volte del volume iniziale della valanga, delle variazioni di velocità e coesione all'interno del flusso, né si potrebbero differenziare le valanghe di neve fredda da quelle di neve umida. Per questo, RAMMS Operational non è ancora idoneo ad essere impiegato in applicazioni pratiche. Alcune delle funzioni di cui RAMMS Operational è carente sono invece implementate nella versione RAMMS Extended.

Per quanto riguarda la determinazione del rischio, in questa tesi il rischio per gli utenti della strada è stato calcolato a valle di numerose ipotesi, sulla base di dati relativi a un ristretto periodo di tempo; per una valutazione più precisa, sarebbero più adeguate allo scopo misure giornaliere del traffico, effettuate per tutto il corso dell'anno. In aggiunta, sarebbe opportuno avere la misura registrata in corrispondenza del tratto di strada da studiare (i dati utilizzati in questa tesi sono stati registrati a qualche chilometro di distanza)

In un'analisi completa del rischio inoltre si dovrebbero considerare tutti gli elementi vulnerabili, dai beni alle persone; in questo caso è stata considerata solo la categoria degli utenti della strada, trascurando, ad esempio, sciatori e pedoni.

Si ritiene che l'area studiata, caratterizzata da una rilevante pressione turistica, venga già gestita adeguatamente rispetto al rischio valanghe con le misure attualmente adottate, grazie all'attenzione verso la problematica valanghiva presente in tutto il territorio regionale, e alla grande esperienza dei tecnici delle commissioni valanghe.

La tendenza degli ultimi anni, positiva per le economie degli ambienti montani, è di una sempre maggiore frequentazione turistica della montagna. Parallelamente purtroppo, le condizioni

climatiche in rapida evoluzione, segnate da un progressivo incremento della temperatura, stanno mettendo a dura prova le montagne.

Queste condizioni in costante evoluzione richiederanno parallelamente continui aggiornamenti delle misure di gestione esistenti per garantire la sicurezza di persone e beni. Ciò costituisce una sfida per il futuro dell'ambiente montano e per il mondo della neve in particolare, così ricco di fascino, ma su cui c'è ancora tanto da studiare e comprendere.

Bibliografia e sitografia

- Autorità di Bacino del fiume Po. (2001). Linee generali di assetto idrogeologico e quadro degli interventi. *Bacino della Dora Baltea*. Parma: Autorità di Bacino del fiume Po.
- Barbolini, M. (a.a. 2004/2005). Corso neve e valanghe. *Modelli per il calcolo delle valanghe*. Università degli Studi di Pavia.
- Barbolini, M., & Ferro, F. (2005). *Definizione dei valori di progetto di parametri nivometrici standard per la prevenzione del rischio valanghivo sul territorio valdostano*.
- Bartelt et al. (2017). *RAMMS: User Manual v.1.7.0 AVALANCHE*. WSL Istituto per lo studio della neve e delle valanghe SLF.
- Bocca, M., Bovio, M., Passerin d'Entreves, P., Poggio, L., & Tutino, S. (2006). *Natura 2000 in Valle d'Aosta*. Regione Autonoma Valle d'Aosta.
- Bruno, E., Maggioni, M., Freppaz, M., & Zanini, E. (2012). *Distacco artificiale di valanghe: linee guida per la procedura operativa, metodi e normativa*. Regione Autonoma Valle d'Aosta.
- Camerano, P., Terzuolo, P., & Varese, P. (2007). I Tipi forestali della Valle d'Aosta. pp. 240. Arezzo: Compagnia delle Foreste.
- Christen, M., Kowalski, J., & Bartelt, P. (2010, August). RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. *Cold Regions Science and Technology* 63, p. 1-14.
- CO.SER.CO. (2022). Stagione 2021-2022. *Gestione delle piste di fondo della Val Ferret, relazione conclusiva*.
- CORINE Land Cover. (s.d.). Tratto da Copernicus: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>
- Cresta, R. (2012, Febbraio). Piccolo territorio, grandi variabili. *Skialper*, p. 54-55.
- Cunnane, C. (1989). *Statistical Distribution for Flood Frequency Analysis*. WMO-Operational Hydrology Report, No. 33, 61 pp.
- Dai, F., Lee, C., & Ngai, Y. (2001, Agosto). *Landslide risk assessment and management: an overview*. Tratto da ELSEVIER: <https://www.eu.elsevierhealth.com/>
- Dipartimento di Protezione Civile, AINEVA. (2007). Convenzione tra la Presidenza del Consiglio dei Ministri - Dipartimento di Protezione Civile e AINEVA. *Indirizzi metodologici per le strutture di protezione civile, deputate alla previsione, al monitoraggio e alla sorveglianza in campo valanghivo nell'ambito del sistema nazionale dei Centri Funzionali*. (G. Tecilla, A cura di) Trento: AINEVA. Tratto da <https://pai.adbpo.it/index.php/documentazione-pai/>
- European Commission. (2009). *The design of avalanche protection dams*.
- Faculty of Geo-information Science and Earth Observation (ITC), University of Twente. (2014). *CHARIM Caribbean Handbook on Risk Information Management*. World Bank Group.
- Fell, R., & Hartford, D. (1997). Landslide Risk Management. In D. Cruden, *Landslide Risk Assessment (1st ed.)* (p. 384). London: Routledge.
- Giani, G. (2014, Novembre 8). *Classificazione e tipologia delle valanghe di neve*. Tratto da Researchgate: https://www.researchgate.net/publication/266491131_Classificazione_e_tipologia_delle_valanghe_di_neve_1

- Giardino, M., & Ratto, S. (2005, Dicembre). 6. Analisi del dissesto da frana in Valle d'Aosta. Regione Autonoma Valle d'Aosta.
- Google. (s.d.). Tratto da Google Maps: <https://www.google.it/maps/>
- Greenwood, J., Landwehr, J., Matalas, N., & Wallis, J. (1979). *Probability Weighted Moments: Definition and Relation to Parameters of Several Distribution Expressible in Inverse Form*. *Water Resources Research*, 15(5), 1049-1054.
- Hosking, J., & Wallis, J. (1997). *Regional Frequency Analysis*. Cambridge, U.K., 224 pp.: Cambridge University Press.
- Houghton, J. (1978). *Birth of a parent: the Wakeby Distribution for Modelling Flood Flows*. *Water Resources Research*, 14(6), 1105-1109.
- ISPRA. (s.d.). Note illustrative della Carta Geologica d'Italia. *Foglio 090 AOSTA*. (R. Polino, M. Malusà, Martin S., F. Carraro, F. Gianotti, & F. Bonetto, A cura di) Regione Autonoma Valle d'Aosta.
- ISPRA. (s.d.). Note illustrative della Carta Geologica d'Italia. *Foglio 089 COURMAYEUR*. (P. Perello, F. Gianotti, & B. Monopoli, A cura di)
- Istituto federale di ricerca per la foresta, la neve e il paesaggio WSL. (s.d.). Tratto da WSL - Istituto per lo studio della neve e delle valanghe SLF: <https://www.wsl.ch/it/chi-siamo/sedi/slf-davos.html>
- Kite, G. (1988). *Frequency and Risk analysis i Hydrology*. Littleton, CO: Water Resources Publications, No. 224.
- Kristensen, K., & Harbitz, C. (2003, March). *Road traffic and avalanches - Methods for risk evaluation and risk management*. Netherlands: Norwegian Geotechnical Institute.
- Landwehr, J., Matalas, N., & Wallis, J. (1979 b). *Estimation of parameters and quantiles of Wakeby Distribution: unknown lower bounds*. *Water Resources Research*, 15(6), 1373-1379.
- Landwehr, J., Matalas, N., & Wallis, J. (1979-a). *Estimation of parameters and quantiles of Wakeby Distribution: Known lower Bounds*. *Water Resources Research*, 15(6), 1361-1372.
- Maione, U., & Moisello, U. (1993). *Elementi di statistica per l'idrologia*. Pavia, 299 pp: La Goliardica Pavese Ed.
- Margreth, S. (2007). *Costruzione di opere di premunizione contro le valanghe nella zona di distacco. Direttiva tecnica: aiuto all'esecuzione. Pratica ambientale n. 0704*, 137 p. Berna: Ufficio federale dell'ambiente, Berna, WSL Istituto Federale per lo Studio della Neve e delle Valanghe SNV, Davos.
- Margreth, S., Stoffel, L., & Wilhelm, C. (2003). *Winter opening of high alpine pass roads - analysis and case studies from the Swiss Alps(37)*, 467-482. *Cold Regions Science and Technology*.
- MIC Mobility In Chain. (2019-2020). *Analisi Piano Urbano del Traffico*. Comune di Courmayeur.
- NGI. (2003). *Road traffic and avalanches - Methods for risk evaluation and risk management(report no. 20001289-4)*. Norwegian Geotechnical Institute.
- Piattaforma italiana sul dissesto idrogeologico IdroGEO*. (s.d.). Tratto da ISPRA: <https://idrogeo.isprambiente.it/app/>
- Pierantonio, M., & Vezzoli, L. (1995). *Val Ferret*. Milano: Ediarch.
- Praolini, A., Tognoni, G., Turrone, E., & Valt, M. (2019). *Le valanghe*. AINEVA.

- Praolini, A., Tognoni, G., Turrone, E., & Valt, M. (2021). La neve. AINEVA.
- Regione Autonoma Valle d'Aosta. (2006). Piano regionale di tutela delle acque. *Monografie di bacino*. Regione Autonoma Valle d'Aosta. Tratto da <https://appweb.regione.vda.it/dbweb/pta/faqpta.nsf/Presentazione?OpenForm&lng=ita>
- Regione Autonoma Valle d'Aosta. (2006). Piano regionale di tutela delle acque. *Quadro conoscitivo: Aspetti generali - Uso del suolo*. Regione Autonoma Valle d'aosta.
- Regione Autonoma Valle d'Aosta. (2010, Novembre). *RENDICONTO IDRO-METEOROLOGICO 2000-2009 Pioggia, temperatura, neve e dissesti - 10 anni di dati*. Aosta: Tipografia Valdostana S.p.A.
- Regione Autonoma Valle d'Aosta. (2013, Dicembre). *Disposizioni e procedure operative per l'attivazione della direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 27 Febbraio 2004 (supp. G.U. n.59 dell'11 Marzo 2004) e successive modifiche e integrazioni*.
- Regione Autonoma Valle d'Aosta. (s.d.). *Catasto Valanghe Regionale SCT*. Tratto da <https://catastovalanghe.partout.it/>
- Regione Autonoma Valle d'Aosta. (s.d.). *Centro Funzionale Regione Autonoma Valle d'Aosta*. Tratto da https://cf.regione.vda.it/allerte_meteo.php
- Regione Autonoma Valle d'Aosta. (s.d.). *Definizione dei valori di progetto di parametri nivometrici standard per la prevenzione del rischio valanghivo sul territorio valdostano*. Tratto da <https://www.regione.vda.it/territorio/territorio/parametrinivometrici/pages/Informazioni.htm>
- Regione Autonoma Valle d'Aosta. (s.d.). *Geoportale SCT Sistema delle Conoscenze Territoriali*. Tratto da <https://geoportale.regione.vda.it/>
- Regione Autonoma Valle d'Aosta, R. P. (2006). *SELVICOLTURA NELLE FORESTE DI PROTEZIONE Esperienze e indirizzi gestionali in Piemonte e in Valle d'Aosta*. Arezzo: Compagnia delle Foreste.
- Segor, V., Dellavedova, P., Pitet, L., Bovet, E., Durand, N., Frigo, B., . . . Torretta, F. (2014). *Avalanches on the roads: operational and research aspects for the management of risk within the project ALCOTRA n. 144 "MAP3"*. Banff, AB: International Snow Science Workshop .
- Wilhelm, C. (1998). *Quantitative risk analysis for evaluation of avalanche protection projects*. Swiss Federal Institute of Snow and Avalanche Research.
- WSL - Istituto per lo studio della neve e delle valanghe SLF. (2017, Novembre). *RAMMS AVALANCHE User Manual. User Manual v.1.7.0 - Avalanche*.

RINGRAZIAMENTI

In primo luogo vorrei ringraziare di cuore la Professoressa Barbara Frigo e la Dottoressa Eloïse Bovet, che con professionalità e disponibilità, nonostante la distanza mi hanno seguita e aiutata nello svolgimento della tesi. Le ringrazio anche per avermi permesso di frequentare, nel Luglio 2020, il corso di formazione AINEVA per lo studio della dinamica delle valanghe attraverso l'utilizzo dei software RAMMS e AVAL-1D (SL-1D); oltre ad essere stata molto utile per il lavoro di tesi, questa esperienza ha contribuito ad accrescere in me la curiosità e l'interesse verso gli argomenti trattati.

Ringrazio il personale del team RAMMS del WSL - Istituto per lo studio della neve e delle valanghe SLF di Davos, per aver fornito il software utilizzato in questa tesi.

Ringrazio il personale dell'Ufficio Tecnico Gestionale del Comune di Courmayeur per l'interesse mostrato verso la tesi e per il reperimento dei dati sul traffico veicolare del Comune di Courmayeur e dei dati riguardanti la gestione delle piste di fondo in Val Ferret.

Vorrei anche ringraziare il personale delle piste di fondo della Val Ferret per la disponibilità nel condividere informazioni sull'attività di gestione delle piste, e in generale sul turismo in Val Ferret.

Non posso dimenticare tutte le persone che mi hanno sostenuto durante questo percorso impegnativo ma anche bellissimo. Vorrei esprimere un sincero ringraziamento alla mia famiglia, a tutti gli amici Ossolani e a quelli di Torino, compagni e coinquilini, che hanno reso l'esperienza al Politecnico di Torino speciale.

Infine il più grande ringraziamento va ai miei genitori e a mio fratello, per avermi spronato dal primo all'ultimo giorno e per avermi permesso di intraprendere e concludere questo percorso.