



# **UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di laurea magistrale in Scienze Forestali e Ambientali

## **Elaborazione delle mappe del pericolo da colata detritica sul bacino del Rio Gadria (BZ)**

*Relatore:*

Dott. Martino Bernard

*Correlatore:*

Ing. Matteo Barbini

*Laureando:*

Leonardo Bressan

*Matricola n°:*

2130014

ANNO ACCADEMICO 2024-2025



# Indice

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Riassunto.....                                                                             | 1  |
| Abstract.....                                                                              | 3  |
| 1 Colate detritiche .....                                                                  | 5  |
| 1.1 Introduzione alle colate detritiche.....                                               | 5  |
| 1.2 Genesi e sviluppo delle colate detritiche .....                                        | 5  |
| 1.2.1 Zona di innesco .....                                                                | 6  |
| 1.2.2 Zona di scorrimento .....                                                            | 9  |
| 1.2.3 Zona di deposito.....                                                                | 11 |
| 2 Quadro normativo .....                                                                   | 15 |
| 2.1 Storia della normativa in Italia.....                                                  | 16 |
| 2.2 Piano di Gestione del Rischio Alluvioni .....                                          | 17 |
| 2.3 Strumenti di pianificazione del pericolo nella Provincia Autonoma di Bolzano .....     | 20 |
| 2.3.1 Piano Generale per l’Utilizzazione delle Acque Pubbliche e rapporto con il PGRA..... | 20 |
| 2.3.2 Piani delle Zone di Pericolo .....                                                   | 21 |
| 2.4 Mappatura del pericolo in Italia .....                                                 | 22 |
| 2.5 Carte delle Zone di Pericolo secondo il PZP .....                                      | 24 |
| 3 Obiettivi .....                                                                          | 29 |
| 4 Area di studio .....                                                                     | 31 |
| 4.1 Inquadramento territoriale .....                                                       | 31 |
| 4.2 Bacino del Rio Gatria.....                                                             | 32 |

|       |                                                                                   |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.1 | Descrizione del bacino idrografico.....                                           | 32 |
| 4.2.2 | Sottobacini idrografici.....                                                      | 40 |
| 4.2.3 | Collettore principale.....                                                        | 42 |
| 4.2.4 | Parametri morfometrici .....                                                      | 43 |
| 4.3   | Conoide alluvionale.....                                                          | 47 |
| 4.4   | Storia del bacino e del conoide.....                                              | 50 |
| 4.5   | Sistema di monitoraggio.....                                                      | 53 |
| 5     | Calcolo degli idrogrammi solido-liquidi d'innescio.....                           | 57 |
| 5.1   | Determinazione della Linea Segnatrice di Possibilità Pluviometrica.....           | 57 |
| 5.2   | Modellazione idrologica.....                                                      | 60 |
| 5.3   | Modellazione per l'individuazione degli idrogrammi di innescio .....              | 61 |
| 6     | Modello a celle per la propagazione idraulica di colate detritiche (D.F.R.M.) ... | 67 |
| 6.1   | Equazioni di governo del moto .....                                               | 69 |
| 6.1.1 | Conservazione della massa e della quantità di moto .....                          | 69 |
| 6.1.2 | Equazioni di governo dei processi di erosione e deposito.....                     | 70 |
| 6.2   | Schema numerico e condizioni interne ed al contorno.....                          | 71 |
| 6.3   | Processi di controllo della propagazione.....                                     | 75 |
| 6.3.1 | Resistenza al moto.....                                                           | 75 |
| 6.3.2 | Processi di erosione e deposito.....                                              | 77 |
| 6.3.3 | Validazione del modello .....                                                     | 78 |
| 7     | Applicazione del modello D.F.R.M. al caso di studio.....                          | 81 |
| 7.1   | Processo di taratura del modello D.F.R.M. al bacino del Rio Gatria .....          | 83 |
| 7.1.1 | Descrizione degli eventi usati per la taratura del modello .....                  | 84 |
| 7.1.2 | Individuazione degli idrogrammi di input al bacino per gli eventi di taratura     | 86 |
| 7.1.3 | Interventi sull'uso del suolo .....                                               | 88 |
| 7.1.4 | Configurazione della briglia filtrante .....                                      | 90 |

|       |                                                                       |     |
|-------|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.2   | Implementazione al bacino del Rio Gatria.....                         | 90  |
| 7.2.1 | Dominio di calcolo del bacino .....                                   | 92  |
| 7.2.2 | Sezioni interne del bacino .....                                      | 93  |
| 7.2.3 | Condizioni al contorno e idrogrammi sintetici del bacino.....         | 94  |
| 7.2.4 | Uso suolo del bacino .....                                            | 97  |
| 7.3   | Implementazione al conoide alluvionale .....                          | 100 |
| 7.3.1 | Dominio del conoide.....                                              | 101 |
| 7.3.2 | Sezioni interne .....                                                 | 101 |
| 7.3.3 | Condizioni al contorno e idrogrammi di ingresso del conoide.....      | 101 |
| 7.3.4 | Uso suolo del conoide .....                                           | 103 |
| 8     | Risultati del modello .....                                           | 107 |
| 8.1   | Risultati della taratura del D.F.R.M. sul bacino del Rio Gatria ..... | 107 |
| 8.1.1 | Evento 26 luglio 2019.....                                            | 108 |
| 8.1.2 | Evento 10 agosto 2020.....                                            | 110 |
| 8.2   | Mappe del pericolo .....                                              | 113 |
| 8.2.1 | Mappe del pericolo risultanti dalla modellazione.....                 | 114 |
| 8.2.2 | Mappa del pericolo validata.....                                      | 119 |
| 8.2.3 | Confronto con la Carta delle Zone di Pericolo .....                   | 121 |
| 9     | Conclusioni .....                                                     | 125 |
|       | Bibliografia .....                                                    | 129 |



# Indice delle figure

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 – Schema concettuale del sistema bacino-canale di scorrimento-conoide di deposizione (D’Agostino, 2022).....          | 6  |
| Figura 1.2 – Schema di formazione del flusso solido-liquido dovuto alla saturazione del suolo da parte dell’acqua.....           | 7  |
| Figura 1.3 – Profilo longitudinale di una colata detritica matura (Pierson, 1986).....                                           | 8  |
| Figura 1.4 – Schema deposito laterale lungo il canale (Johnson & Rodine, 1984) .....                                             | 9  |
| Figura 1.5 – Schema di un conoide di deposizione (VanDine, 1996).....                                                            | 12 |
| Figura 2.1 – Matrice del pericolo della Provincia Autonoma di Bolzano; modificata da BUWAL (Heinimann & Hollenstein, 1998) ..... | 26 |
| Figura 4.1 – Inquadramento territoriale rispetto alla Provincia Autonoma di Bolzano .....                                        | 31 |
| Figura 4.2 – Inquadramento del bacino e del conoide rispetto ai Comuni di Lasa e Silandro .....                                  | 32 |
| Figura 4.3 – Mappa altimetrica del bacino del Rio Gadria.....                                                                    | 33 |
| Figura 4.4 – Distribuzione delle aree del bacino del Rio Gadria.....                                                             | 33 |
| Figura 4.5 – Curva ipsografica dimensionale .....                                                                                | 34 |
| Figura 4.6 – Curva ipsometrica adimensionale.....                                                                                | 35 |
| Figura 4.7 – Gradi di evoluzione di un bacino idrografico .....                                                                  | 35 |
| Figura 4.8 – Mappa delle pendenze in gradi (°) del bacino del Rio Gadria .....                                                   | 36 |
| Figura 4.9 – Distribuzione delle pendenze del bacino del Rio Gadria .....                                                        | 36 |
| Figura 4.10 – Mappa dell’esposizione del bacino del Rio Gadria.....                                                              | 37 |
| Figura 4.11 – Kame presenti nel bacino del Rio Gadria (Comiti et al., 2014) .....                                                | 38 |
| Figura 4.12 – Mappa dell’uso del suolo del bacino del Rio Gadria (Provincia Autonoma di Bolzano, 2025c) .....                    | 39 |
| Figura 4.13 – Mappa dei tipi forestali (Provincia Autonoma di Bolzano, 2025b).....                                               | 40 |
| Figura 4.14 – Sottobacini del Rio Gadria .....                                                                                   | 40 |

|                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.15 – Foto area della sezione di chiusura del quarto sottobacino.....                                                                                       | 41 |
| Figura 4.16 – Mappa del reticolo idrografico.....                                                                                                                   | 42 |
| Figura 4.17 – Profilo longitudinale del collettore principale .....                                                                                                 | 43 |
| Figura 4.18 – Mappa dell’altimetria del conoide (Provincia Autonoma di Bolzano, 2025d).....                                                                         | 47 |
| Figura 4.19 – Mappa delle pendenze in gradi (°) del conoide .....                                                                                                   | 48 |
| Figura 4.20 – Mappa dell’esposizione del conoide .....                                                                                                              | 48 |
| Figura 4.21 – Mappa di uso del suolo del conoide (Provincia Autonoma di Bolzano, 2025c).....                                                                        | 49 |
| Figura 4.22 – Profilo longitudinale del torrente Alliz .....                                                                                                        | 50 |
| Figura 4.23 – N° eventi dal 1400 a oggi (Raich, 2011; UniBZ, 2025) .....                                                                                            | 51 |
| Figura 4.24 – Evoluzione temporale dei canali di scorrimento del bacino del Rio Gadria .....                                                                        | 52 |
| Figura 4.25 – Briglia filtrante posta a chiusura del piazzale di deposito .....                                                                                     | 53 |
| Figura 4.26 – Localizzazione del sistema di monitoraggio installato presso i bacini del Rio Gadria e del Rio Strimm (Comiti et al., 2014) .....                     | 54 |
| Figura 4.27 – Idrometro D2.....                                                                                                                                     | 55 |
| Figura 5.1 – LSPP per il tempo di ritorno di 30 anni .....                                                                                                          | 59 |
| Figura 5.2 – LSPP per il tempo di ritorno di 100 anni .....                                                                                                         | 59 |
| Figura 5.3 – LSPP per il tempo di ritorno di 300 anni .....                                                                                                         | 60 |
| Figura 6.1 – Andamento di $C$ rispetto a $QT$ in esperimenti di laboratorio .....                                                                                   | 76 |
| Figura 6.2 – Andamento della conduttanza ( $C$ ) rispetto alla concentrazione volumetrica di sedimento ( $c$ ) nelle colate detritiche di laboratorio e reali ..... | 77 |
| Figura 7.1 – Intensità e pioggia cumulata dell’evento del 26/07/2019 .....                                                                                          | 84 |
| Figura 7.2 – Intensità e pioggia cumulata dell’evento del 10/08/2020 .....                                                                                          | 85 |
| Figura 7.3 – Area occupata dagli eventi di taratura presso il piazzale di deposito .....                                                                            | 86 |
| Figura 7.4 – Idrogrammi di input dell'evento del 26 luglio 2019.....                                                                                                | 87 |
| Figura 7.5 – Idrogrammi di input dell'evento del 10 agosto 2020 .....                                                                                               | 88 |
| Figura 7.6 – Morfologia e litologia dei versanti lungo il tratto analizzato del Rio Gadria; quota di 1500 m s.l.m. a sinistra, quota di 1600 m s.l.m. a destra..... | 89 |
| Figura 7.7 – Sezione della briglia filtrante .....                                                                                                                  | 90 |
| Figura 7.8 – Inquadramento dei file di input del D.F.R.M. relativi al bacino del Rio Gadria; con il tratto bianco tratteggiato si evidenziano gli estratti.....     | 91 |

|                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 7.9 – Estratti del dominio di calcolo del bacino del Rio Gatria.....                                                 | 92  |
| Figura 7.10 – Estratti delle sezioni interne del bacino del Rio Gatria .....                                                | 93  |
| Figura 7.11 – Estratti delle condizioni al contorno del bacino del Rio Gatria.....                                          | 94  |
| Figura 7.12 – Idrogrammi di ingresso nel bacino del Rio Gatria per TR30P .....                                              | 95  |
| Figura 7.13 – Idrogrammi di ingresso nel bacino del Rio Gatria per TR30V .....                                              | 95  |
| Figura 7.14 – Idrogrammi di ingresso nel bacino del Rio Gatria per TR100P .....                                             | 96  |
| Figura 7.15 – Idrogrammi di ingresso nel bacino del Rio Gatria per TR100V .....                                             | 96  |
| Figura 7.16 – Idrogrammi di ingresso nel bacino del Rio Gatria per TR300P .....                                             | 96  |
| Figura 7.17 – Idrogrammi di ingresso nel bacino del Rio Gatria per TR300V .....                                             | 97  |
| Figura 7.18 – Estratti dell’uso del suolo del bacino del Rio Gatria .....                                                   | 98  |
| Figura 7.19 – Inquadramento dei file di input del D.F.R.M. relativi al conoide<br>alluvionale.....                          | 100 |
| Figura 7.20 – Idrogrammi solido-liquidi transitanti per la Sezione 1010 del Rio Gatria<br>corrispondenti al TR30.....       | 102 |
| Figura 7.21 – Idrogrammi solido-liquidi transitanti per la Sezione 1010 del Rio Gatria<br>corrispondenti al TR100.....      | 102 |
| Figura 7.22 – Idrogrammi solido-liquidi transitanti per la Sezione 1010 del Rio Gatria<br>corrispondenti al TR300.....      | 103 |
| Figura 7.23 – Mappa di uso del suolo del conoide .....                                                                      | 104 |
| Figura 8.1 – Idrogramma della portata solido-liquida dell’evento del 26/07/2019<br>transitante per le sezioni interne ..... | 108 |
| Figura 8.2 – Idrogramma della portata solida dell’evento del 26/07/2019 transitante per<br>le sezioni interne .....         | 109 |
| Figura 8.3 – Volumi transitanti durante l’evento del 26/07/2019 per ognuna delle<br>sezioni interne .....                   | 110 |
| Figura 8.4 – Idrogramma della portata solido-liquida dell’evento del 10/08/2020<br>transitante per le sezioni interne ..... | 111 |
| Figura 8.5 – Idrogramma della portata solida dell’evento del 10/08/2020 transitante per<br>le sezioni interne .....         | 111 |
| Figura 8.6 – Volumi transitanti durante l’evento del 10/08/2020 per ognuna delle<br>sezioni interne .....                   | 112 |
| Figura 8.7 – Mappa del pericolo non validata per lo scenario TR30.....                                                      | 115 |
| Figura 8.8 – Mappa del pericolo non validata per lo scenario TR100.....                                                     | 116 |
| Figura 8.9 – Mappa del pericolo non validata per lo scenario TR300.....                                                     | 117 |

|                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 8.10 – Mappa del pericolo non validata complessiva .....                                                                     | 118 |
| Figura 8.11 – Mappa del pericolo validata complessiva .....                                                                         | 120 |
| Figura 8.12 – Estratto della Carta delle Zone di Pericolo dei Comuni di Lasa e Silandro<br>.....                                    | 122 |
| Figura 8.13 – Confronto fra l’estratto della CZP e la mappa del pericolo validata<br>complessiva elaborata nel presente studio..... | 123 |

# Indice delle tabelle

|                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabella 1.1 – Classificazione della magnitudo delle colate detritiche (Jakob, 2005).                                                                       | 13  |
| Tabella 2.1 – Probabilità di accadimento per gli eventi alluvionali espressa in tempo di ritorno; modificata da BUWAL (Heinimann & Hollenstein, 1998)..... | 25  |
| Tabella 2.2 – Valori soglia e parametri di definizione dell'intensità per le colate detritiche; modificata da BUWAL (Heinimann & Hollenstein, 1998) .....  | 25  |
| Tabella 4.1 – Parametri morfometrici del bacino del Rio Gatria e dei suoi sottobacini .....                                                                | 46  |
| Tabella 4.2 – Strumentazione installata presso i bacini del Rio Gatria e del Rio Strimm (Comiti et al., 2014).....                                         | 54  |
| Tabella 7.1 – Valori di riferimento degli eventi registrati utili alla taratura del modello .....                                                          | 85  |
| Tabella 7.2 – Confronto tra i parametri di riferimento e quelli risultati a seguito della taratura del modello sul bacino del Rio Gatria .....             | 89  |
| Tabella 7.3 –Caratteristiche di uso del suolo del bacino del Rio Gatria; sopra (a) la descrizione, sotto (b).....                                          | 99  |
| Tabella 7.4 – Caratteristiche di uso del suolo del bacino de conoide; sopra (a) la descrizione, sotto (b).....                                             | 105 |



# RIASSUNTO

I territori montani sono teatro di un'ampia serie di fenomeni morfologici che contribuiscono a modellare incessantemente il paesaggio. Tuttavia, alcuni di questi processi costituiscono spesso una fonte di pericolo per le comunità che popolano tali ambienti, provocando danni rilevanti alle persone e alle infrastrutture. Tra i fenomeni che spiccano in termini di magnitudo si distinguono le colate detritiche, per via della loro elevata intensità e del potenziale impatto che possono causare al territorio.

Le colate detritiche rappresentano un fenomeno gravitativo di natura idrogeologica, originato da una serie combinata di fattori predisponenti, quali elevate pendenze e disponibilità di sedimento movimentabile, e scatenanti, rappresentati spesso da piogge intense. In termini concreti, esse si manifestano come un flusso eterogeneo di materiale solido e acqua, che scorre lungo i versanti e che si deposita quando l'energia cinetica della massa viene dissipata a causa degli attriti interni al fluido e con il fondo.

Lo studio e il monitoraggio di tali processi hanno consentito nel tempo di sviluppare strategie di mitigazione del rischio, reso più critico dai cambiamenti climatici e da scelte antropiche non sempre sostenibili nell'uso del suolo. L'attuale quadro normativo di riferimento è rappresentato dalla Direttiva Alluvioni 2007/60/CE dell'Unione Europea, recepita in Italia con il D.Lgs. 49/2010, che attribuisce la responsabilità della valutazione e gestione del rischio idrogeologico alle Autorità di Bacino Distrettuali, rispettando tuttavia la competenza esclusiva in tale materia alle Regioni e alle Provincie Autonome. Sulla base di ciò, la Provincia Autonoma di Bolzano gestisce il proprio territorio con il Piano Generale per l'Utilizzazione delle Acque Pubbliche (PGUAP), condividendo i propositi del Piano di Bacino Distrettuale imposti dalla Direttiva.

Il presente lavoro ha come obiettivo l'elaborazione delle mappe del pericolo, per il bacino del Rio Gadria (BZ), secondo quanto previsto dalle indicazioni fornite dai Piani delle Zone di Pericolo (PZP), ed il loro confronto con la Carta delle Zone di Pericolo

(CZP). A tal fine è stato utilizzato il modello “D.F.R.M.” sviluppato da Gregoretti et al. (2019).

La descrizione del bacino del Rio Gadria e del suo reticolo idrografico è stata ricavata mediante elaborazioni GIS a partire dal modello digitale del terreno (DTM) con risoluzione di 1 m fornito dalla Provincia Autonoma di Bolzano. La fase di taratura del modello, necessaria per adattarlo al contesto geografico, geologico, morfologico e idrologico in cui è situato il bacino oggetto di studio, è stata condotta utilizzando come parametri di riferimento il volume depositato nel bacino di ritenuta terminale e la portata di picco di alcuni eventi passati, registrati dal sistema di monitoraggio presente.

Infine, il processo di realizzazione delle mappe del pericolo si è basato sulla simulazione di eventi caratterizzati da differenti tempi di ritorno, valutati sulla base dei dati pluviometrici locali.

# ABSTRACT

Mountainous areas are subject to a wide range of morphological phenomena that constantly shape the landscape. However, some of these processes often pose a threat to the communities that inhabit these environments, causing significant damage to people and infrastructure. Among the phenomena that stand out in terms of magnitude are debris flows, due to their high intensity and the potential impact they can have on the territory.

Debris flows are a hydrogeological phenomenon caused by gravity, originating from a combination of predisposing factors, such as steep slopes and the availability of movable sediment, and triggering factors, often represented by heavy rainfall. In concrete terms, they manifest themselves as a heterogeneous flow of solid material and water, which flows down slopes and deposits itself when the kinetic energy of the mass is dissipated due to internal friction within the fluid and with the ground.

The study and monitoring of these processes have made it possible over time to develop risk mitigation strategies, made more critical by climate change and anthropogenic choices that are not always sustainable in terms of land use. The current regulatory framework is represented by the European Union's Floods Directive 2007/60/EC, implemented in Italy by Legislative Decree 49/2010, which assigns responsibility for the assessment and management of hydrogeological risk to the District Basin Authorities, while respecting the exclusive competence of the Regions and Autonomous Provinces in this matter. On this basis, the Autonomous Province of Bolzano manages its territory with the General Plan for the Use of Public Waters (PGUAP), sharing the objectives of the District Basin Plan imposed by the Directive.

The aim of this study is to develop hazard maps for the Rio Gaderia basin (BZ), in accordance with the guidelines provided by the Hazard Zone Plans (PZP), and to

compare them with the Hazard Zone Map (CZP). To this end, the “D.F.R.M.” model developed by Gregoret et al. (2019).

The description of the Rio Gader basin and its hydrographic network was obtained using GIS processing based on the digital terrain model (DTM) with a resolution of 1 m provided by the Autonomous Province of Bolzano. The model calibration phase, necessary to adapt it to the geographical, geological, morphological, and hydrological context in which the basin under study is located, was conducted using as reference parameters the volume deposited in the terminal retention basin and the peak flow of some past events, recorded by the monitoring system in place.

Finally, the process of creating hazard maps was based on the simulation of events characterized by different return periods, assessed on the basis of local rainfall data.

# 1 COLATE DETRITICHE

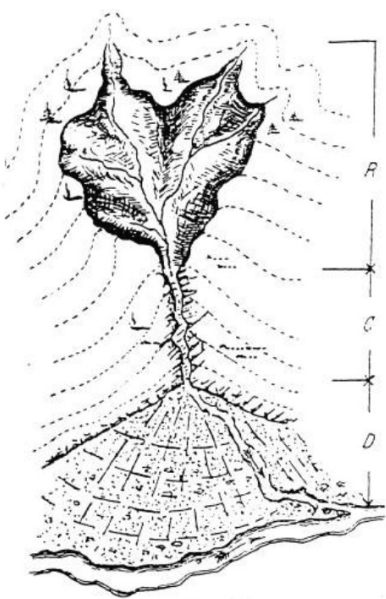
## 1.1 Introduzione alle colate detritiche

Le colate detritiche (o *debris flow*) consistono in flussi eterogenei composti da acqua e materiale solido che scorrono lungo un pendio governati dalle forze gravitazionali. Essi sono caratterizzati da una concentrazione solida tale da non poter più assimilare il loro movimento a quello dell'acqua. Ciò è dovuto all'elevata viscosità presente, la quale assume ordini di grandezza ben superiori (D'Agostino, 2024).

L'elemento fondamentale che distingue le colate detritiche dai differenti fenomeni solido-liquidi che possono interessare i pendii montani, quali ad esempio ondate d'acqua con trasporto solido di fondo, correnti iperconcentrate e colate di fango, è la concentrazione solida. Essa viene espressa in forma di percentuale di volume solido occupato all'interno del flusso eterogeneo e per le colate detritiche solitamente assume un valore medio del 50%, che varia tra un minimo del 25% e ad un massimo del 70% (D'Agostino, 2024).

## 1.2 Genesi e sviluppo delle colate detritiche

Le colate detritiche compiono il proprio processo all'interno di un sistema complesso che si compone da tre settori principali: la zona di innesco (R), dove i differenti fenomeni di generazione delle colate detritiche prendono principalmente luogo, la zona di scorrimento (C), lungo la quale la colata ha modo di svilupparsi, alterando la configurazione del canale precedentemente inciso, ed infine la zona di deposito (D), presso la quale il flusso termina il proprio percorso, interessando talvolta le attività antropiche (Figura 1.1) (D'Agostino, 2022).



*Figura 1.1 – Schema concettuale del sistema bacino-canale di scorrimento-conoide di deposizione (D'Agostino, 2022)*

In riferimento a quanto sopra affermato, risulta doveroso specificare che le colate detritiche consistono in fenomeni che si possono verificare potenzialmente in qualsiasi zona del sistema, purché siano presenti le condizioni favorevoli alla loro genesi. Lo stesso concetto si applica anche alla fase di deposito, in quanto la colata può incontrare ostacoli invalicabili o deviare il proprio percorso generando delle avulsioni. L'altra componente che rende questi fenomeni così pericolosi è che, oltre ad essere imprevedibili da punto di vista spaziale, lo sono anche da quello temporale, dato che dipendono dall'evoluzione e dalla concentrazione delle precipitazioni durante gli eventi piovosi (in Gregoretti, 2023).

### **1.2.1 Zona di innesco**

Le condizioni necessarie perché un fenomeno da colata detritica avvenga consistono nella presenza di materiale reclutabile, pendenze elevate (superiori ai 15°) ed infine da una fonte di innesco.

La zona di innesco costituisce spesso la parte del bacino idrografico in cui è più probabile ritrovare la presenza contemporanea delle caratteristiche sopra elencate. In essa sono infatti comuni convergenze topografiche, che consentono di concentrare

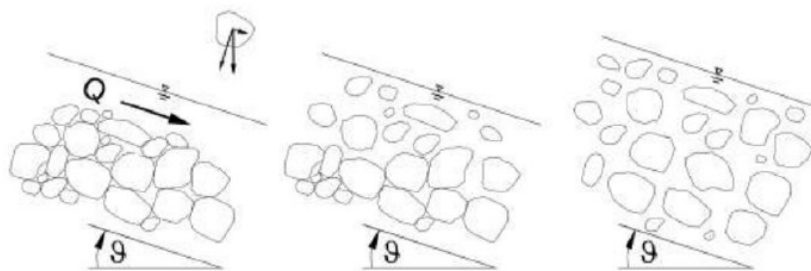
un'elevata quantità di acqua negli strati superficiali del suolo, traducendosi in un flusso con maggiore capacità di trasporto dei sedimenti.

Oltre alla topografia, è necessario considerare anche la disponibilità dei sedimenti movimentabili, che può variare a seconda che il bacino sia ad alimentazione solida limitata o illimitata. Nel primo caso i tempi di ricarica dei depositi non sono sufficientemente rapidi per consentire che i volumi di sedimento superino la soglia necessaria a formare una colata detritica. Al contrario, per i bacini caratterizzati da una disponibilità di sedimenti illimitata, la genesi di eventi solido-liquidi risulta controllata direttamente dall'entità e dalla frequenza degli eventi (de Haas et al., 2024).

I processi che concorrono alla formazione di un evento da colata detritica sono differenti. Essi possono essere generati da diverse cause, tra cui lo scioglimento nivale, il collasso di un invaso di acqua, dai terremoti o dalle eruzioni vulcaniche. Tuttavia, il fenomeno d'innescò più comune è rappresentato dalle precipitazioni intense.

Uno dei meccanismi principali d'innescò delle colate detritiche avviene a causa della veloce infiltrazione dell'acqua negli strati superficiali del suolo, che presto si saturano per via della loro ridotta capacità di smaltire il flusso liquido. In questo modo la falda cresce, sino a saturare completamente la massa di sedimenti. Ciò che si è osservato, infatti, è che l'acqua necessaria alla mobilitazione dei sedimenti è spesso presente al momento del cedimento (Iverson, 1997).

L'azione cinetica di impatto della massa d'acqua, e la riduzione della coesione nel composto solido-liquido, porta ad una riduzione dell'angolo di attrito del terreno, il quale si traduce nell'innescò del fenomeno (Figura 1.2). Il materiale reclutato, proveniente dalla falda a monte, dal fondo o dalle sponde, si muove dettato dalla topografia del terreno, dalla geologia dei sedimenti e dagli attriti interni al flusso (Gregoretto, 2023).



*Figura 1.2 – Schema di formazione del flusso solido-liquido dovuto alla saturazione del suolo da parte dell'acqua*

Questo processo può verificarsi in una moltitudine di casi, contraddistinti da differenti peculiarità morfologiche. Un noto esempio di una configurazione comune nella zona di innesco consiste nella presenza di detriti posti al piede di ripide pareti rocciose, sulle quali si concentra il deflusso superficiale derivante dalle precipitazioni, provocando così l'effetto idrante. Ciò che avviene, consiste in una progressiva destabilizzazione dei sedimenti ed in una conseguente rapida trasformazione del processo da trasporto solido di fondo a colata detritica (Tognacca & Bezzola, 1997).

Una volta innescata, la colata viaggia lungo i ripidi versanti in roccia, prima attraversando una fase immatura, contraddistinta dalla concentrazione degli elementi solidi solamente nella parte inferiore del flusso, ed in seguito evolvendosi in una fase matura. A quest'ultima è associato un profilo della massa in movimento spesso caratterizzato da quattro macro-parti (Figura 1.3):

- Il picco precursore, costituito da un'onda prevalentemente liquida che anticipa il flusso;
- Il fronte, che rappresenta il picco della colata detritica. È composto dai sedimenti di maggiore diametro, i quali, a causa della loro elevata massa, raggiungono più velocemente il fronte;
- Il corpo, al quale si associa la componente centrale del flusso. È caratterizzata da una maggiore omogeneità dei sedimenti se comparata al fronte, e dimostra una forma maggiormente allungata, contraddistinta da fenomeni di galleggiamento dei sedimenti di maggiori dimensioni, i quali occupano la parte più superficiale;
- La coda, cui si associa la parte terminale della colata detritica. Essa presenta spesso la concentrazione solida minore, costituita dal materiale più fino.

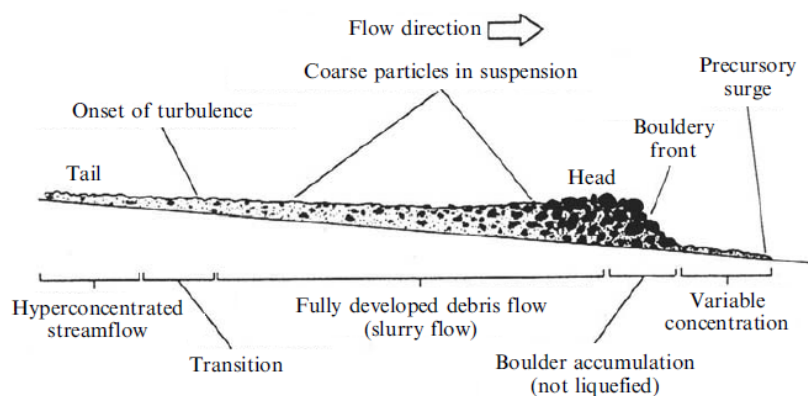


Figura 1.3 – Profilo longitudinale di una colata detritica matura (Pierson, 1986)

Il profilo appena descritto è associato alle colate costituite prevalentemente da sedimenti pietrosi e granulari, i quali conferiscono il rigonfiamento al fronte. Nel caso in cui invece la colata fosse composta da detriti di minori dimensioni o da fango, il profilo assume un andamento più regolare, caratterizzato da un tirante più omogeneo lungo il flusso (D'Agostino, 2024).

### 1.2.2 Zona di scorrimento

La zona di scorrimento rappresenta la parte del bacino in cui la colata transita, fino a raggiungere il conoide di deposizione. Durante il proprio percorso, caratterizzato in media da pendenze comprese tra i  $3^\circ$  e i  $15^\circ$ , è possibile che si verifichino dei fenomeni di erosione e deposizione localizzati lungo gli argini laterali (Figura 1.4). Ciò si verifica in presenza di sezioni di scorrimento incapaci di contenere l'intera portata o in corrispondenza di curve lungo il tracciato (D'Agostino, 2024).

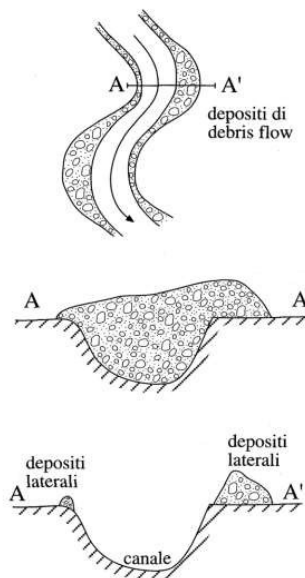


Figura 1.4 – Schema deposito laterale lungo il canale (Johnson & Rodine, 1984)

La sezione di transito e l'assetto planimetrico del canale di scorrimento non sono gli unici elementi che concorrono alla formazione di erosione o deposito di materiale. La pendenza, l'angolo di attrito dei grani e la portata liquida di innesco, sono le ulteriori variabili da prendere in considerazione. Esse determinano l'entità del materiale asportato, che può venire rimosso al momento dell'innesco e durante il transito. Se infatti la colata possiede una capacità di trasporto superiore alla concentrazione solida

con cui è partita, essa tenderà a reclutare ulteriore materiale fino a raggiungere la concentrazione di equilibrio. Quest'ultima si mantiene costante fin tanto che le condizioni estrinseche e intrinseche si mantengono inalterate, quindi in assenza di cambi repentini della pendenza del fondo, di immissioni di acqua da tributari successivi o di sedimenti provenienti da parte di ulteriori frane in atto (D'Agostino, 2024).

Per descrivere il moto di una colata detritica è necessario considerare anche il regime con il quale essa si sviluppa. A tale scopo risulta utile definire il concetto di viscosità di insieme, il quale è associato alla combinazione dei tre sforzi complessivi che si verificano nella massa solido-liquida in movimento:

- Attrito-frizione, che corrisponde all'attrito che si verifica tra gli elementi che scorrono uno di fianco all'altro. Lo sforzo avviene in maniera parallela tra i grani;
- Urti, che rappresentano lo scontro tra i sedimenti in senso radiale. Essi rappresentano una forma di dissipazione dell'energia che aumenta con il quadrato del diametro dei clasti stessi;
- Viscosità del fluido interstiziale.

Da essi si possono generare due differenti regimi di moto, ovvero il regime inerziale e il regime macroviscoso. Nel primo, il flusso è condizionato dagli urti che si verificano tra le particelle a contatto, mentre nel secondo, la colata è condizionata dalla viscosità del fluido che circonda le particelle.

Questa distinzione è stata utilizzata da Takahashi, 2007 per effettuare una classificazione delle colate detritiche. Di seguito se ne presentano le cinque classi da lui individuate.

- *Debris flow macroviscoso*: si manifesta come moto laminare e si può instaurare in due differenti casistiche. La prima si verifica quando il fluido interstiziale è rappresentato prevalentemente da acqua, mentre la componente solida, che occupa almeno il 45-50% del volume, è costituita da grani di grosse dimensioni. La seconda si verifica quando il fluido interstiziale è molto viscoso, quindi mescolato con un'elevata quantità di materiale fine. Per questo ultimo caso, la concentrazione solida minima cala fino al 27-30%;

- *Stony debris flow*: la turbolenza non risulta eccessiva a causa delle interazioni tra le particelle e il moto si avvicina al regime laminare. Il sedimento è distribuito sull'intera profondità della corrente e, a causa della discreta concentrazione del sedimento (almeno pari al 25%) e delle pressioni esistenti tra le particelle, i grani di maggiori dimensioni vengono sospinti verso l'alto per effetto di processi di segregazione granulare. Lo sforzo tangenziale dovuto ai contatti fra la componente solida provoca una viscosità di insieme molto elevata;
- *Debris flood*: conosciuta anche con i termini “*immature debris flow*” o “piena di detrito”, è una corrente turbolenta bifasica caratterizzata dalla presenza del materiale solido prevalentemente nello strato inferiore del flusso, sovrastato dalla componente liquida in cui sono presenti le particelle più fini. Esso si può presentare per l'intera durata dell'evento, nel caso in cui avvengano delle diluizioni lungo il percorso oppure quando incontra superfici che favoriscono i processi di decelerazione;
- *Turbulent mud flow*: il flusso è caratterizzato da un regime turbolento monofase, in quanto il materiale che lo compone è prevalentemente a grana fine e viaggia a velocità sostenute;
- *Hybrid of stony and muddy debris flow*: si presenta con una distinzione tra la parte inferiore, in cui prevalgono i piccoli massi, e una parte superiore, dove il materiale più fino si trova sospeso in corrente ad un'elevata turbolenza.

### 1.2.3 Zona di deposito

Come precedentemente anticipato, il deposito può avvenire in qualsiasi zona del sistema, a patto che siano presenti le condizioni per cui il rallentamento del flusso possa avvenire.

La macro-morfologia a cui spesso si associa la zona di deposito è il conoide di deposizione, anche detto di deiezione (Figura 1.5). Esso si genera alla base di un bacino idrografico, e spesso assume una forma conica.

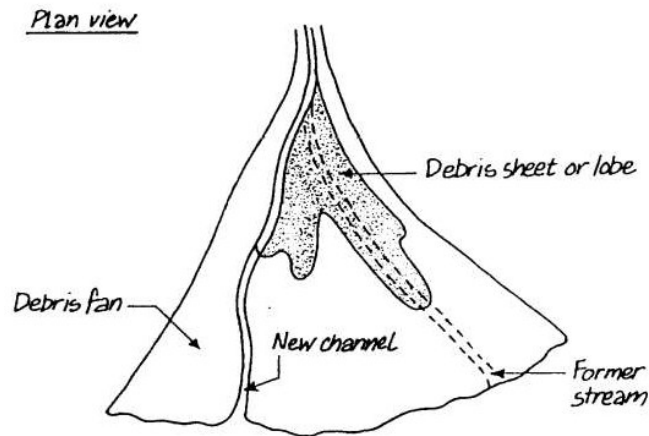


Figura 1.5 – Schema di un conoide di deposizione (VanDine, 1996)

Le pendenze che presenta sono variabili a seconda del processo che lo ha formato. Ad esempio, per conoidi derivanti da eventi da colata detritica, i valori osservati variano da un minimo di  $1^{\circ}$ - $2^{\circ}$  ad un massimo di  $30^{\circ}$ , con valori medi compresi nel range  $5^{\circ}$ - $15^{\circ}$ , di cui generalmente i maggiori si presentano nella parte più alta, mentre i minori nella fascia inferiore (de Haas et al., 2024).

Diversi autori hanno individuato quali sono le condizioni topografiche per cui il processo di arresto ha inizio. In particolare, Hungr et. al. (1984) hanno distinto la deposizione a seconda che il flusso sia confinato o meno, utilizzando come valore di riferimento il rapporto tra la base ( $b$ ) e l'altezza del flusso ( $h$ ). Essi hanno stimato che il deposito ha inizio su piani aventi pendenza inferiore a  $8^{\circ}$ - $12^{\circ}$  nel caso di  $b/h < 5$ , mentre, per situazioni aventi  $b/h > 5$ , la colata detritica comincia a rallentare su superfici caratterizzate da pendenza inferiore a  $10^{\circ}$ - $14^{\circ}$  (Hungr et al., 2011).

Questo comportamento è dovuto al fatto che per sezioni poco confinate, quali possono essere canali con argini bassi e con alveo allargato, il tirante si abbassa, e così anche la sua massa unitaria, comportando una riduzione della sua velocità inerziale. Inoltre, la superficie a contatto con il fondo incrementa, esercitando una forza di attrito distribuita su una porzione maggiore del flusso.

Tali fattori combinati portano la componente liquida a disperdersi con maggiore facilità verso valle, facendo così incrementare drasticamente la concentrazione solida, la quale fa aumentare a sua volta gli attriti interni, portando la colata a dissipare molta più energia e così ad arrestarsi (D'Agostino, 2024).

La stima della lunghezza che ogni evento percorre dall'inizio del proprio rallentamento, sino al momento in cui si ferma completamente, avviene attraverso la determinazione della distanza di arresto. Questo aspetto risulta fondamentale al fine di prevedere quali possono essere le aree che vengono interessate dal passaggio della colata detritica (Jakob & Hungr, 2005).

Tra gli ulteriori parametri che vengono impiegati per descrivere le colate detritiche, vi sono quelli utilizzati da Jakob (2005) per la realizzazione della propria classificazione della magnitudo. Esso ha suddiviso gli eventi in dieci classi totali, considerando il volume finale depositato [ $m^3$ ], la portata del fronte [ $m^3/s$ ] e l'area coinvolta [ $m^2$ ]. Inoltre, ad ognuna di esse ha poi associato una breve descrizione delle potenziali conseguenze attese (Tabella 1.1).

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

Tabella 1.1 – Classificazione della magnitudo delle colate detritiche (Jakob, 2005)



## 2 QUADRO NORMATIVO

Gli eventi atmosferici si manifestano da sempre sul nostro pianeta, innescando una moltitudine di processi fisici e chimici capaci di alterare completamente lo stato e la configurazione dell'ambiente colpito.

L'uomo ha cominciato a convivere con questi fenomeni naturali a partire dalla propria esistenza, agendo sul territorio per cercare di proteggersi e limitare i potenziali danni.

Negli ultimi cento anni, le attività antropiche hanno subito un incremento mai accaduto in passato, che ha portato ad uno squilibrio dei processi che concorrono alla formazione di suddetti eventi. In particolare, si evidenziano l'alterazione del ciclo idrologico globale e l'impermeabilizzazione del suolo, la cui combinazione risulta fatale per le popolazioni esposte alle alluvioni e al dissesto idrogeologico (IPCC, 2021).

Tra i fenomeni che risultano di maggiore impatto in ambiente montano, ci sono le colate detritiche, in quanto rappresentano eventi catastrofici che spesso interessano le comunità che abitano le zone poste nelle aree vulnerabili. Gli elementi che rendono questi eventi così pericolosi consistono in una periodicità irregolare e variabile, una scarsa percezione del rischio negli alvei privi di deflusso e tempi di risposta rapidi agli eventi meteorici.

Per quanto riguarda il contesto italiano, nel 2021 la superficie totale esposta a pericolosità idraulica o da frana, corrispondeva a poco più di 100 mila km<sup>2</sup>, pari a circa il 33% del territorio nazionale. Secondo quanto riportato da ISPRA, risultavano circa 12.3 milioni gli abitanti esposti a scenari di pericolosità/probabilità bassa per eventi alluvionali, mentre 5.7 milioni le persone risiedenti in aree a rischio frane (Trigila et al., 2021).

La strategia che ad oggi risulta applicata per cercare di mitigare i rischi derivanti da suddetti eventi, si basa sul trattamento dello stato attuale e perciò sulla disposizione di

leggi specifiche atte a definire come trattare il rischio idrogeologico. Esse mirano a fornire indicazioni su come applicare una corretta pianificazione territoriale e come attuare le misure di intervento attive e passive.

A questi ultimi strumenti si aggiunge poi l'impegno globale, incentrato sulla riduzione delle emissioni di anidride carbonica, supportato dal costante studio delle variabili coinvolte (IPCC, 2023).

## 2.1 Storia della normativa in Italia

Lo stato attuale della pianificazione territoriale e del quadro normativo che regolano il rischio idrogeologico in Italia ha attraversato diverse tappe. Di seguito si riporta in forma riassuntiva il susseguirsi delle norme che hanno caratterizzato la storia legislativa nazionale in materia, ponendo evidenza sulle novità più importanti.

Prima tra esse è il R.D.L. 30 dicembre 1923, n. 3267, anche noto come “Legge Serpieri”, il quale costituisce la prima comparsa del vincolo idrogeologico nel contesto normativo nazionale e riconosce il ruolo di protezione del bosco. Infatti, questa legge sottopone a vincolo *“i terreni di qualsiasi natura e destinazione che, per effetto di forme di utilizzazione contrastanti [...] possono, con danno pubblico subire denudazioni, perdere la stabilità o turbare il regime delle acque”* (R.D.L. 3267/1923).

Il passo successivo è rappresentato dalla Legge 18 maggio 1989, n. 183 “Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo”. Essa si poneva come scopo di *“assicurare la difesa del suolo, il risanamento delle acque, la fruizione e la gestione del patrimonio idrico per gli usi di razionale sviluppo economico e sociale, la tutela degli aspetti ambientali ad essi connessi.”* (Legge 183/1989). Inoltre, istituiva per la prima volta le Autorità di Bacino, con il compito di gestire e coordinare gli obiettivi imposti dalla legge stessa, tramite l'elaborazione di Piani di Bacino, in seguito integrati e ulteriormente concentrati sul rischio idraulico da parte della Legge 11 dicembre 2000, n. 365, attraverso la quale sono stati istituiti i Piani di Assetto Idrogeologico (PAI).

In risposta alla Direttiva Europea 2000/60/CE, nota anche come Direttiva Quadro sulle Acque, l'Italia ha raccolto le leggi precedentemente emanate nel Testo Unico dell'Ambiente, rappresentato dal D. L.g.s. 3 aprile 2006, n. 152. L'obiettivo di questo

Decreto è quello di promuovere la qualità della vita umana, attraverso un uso razionale delle risorse e la salvaguardia dell'ambiente (Direttiva 2000/60/CE; D.Lgs. 152/2006). Il decreto si articola in sei parti, ciascuna dedicata a un ambito specifico. In particolare, nella “Parte Terza – Norme in materia di difesa del suolo e lotta alla desertificazione, di tutela delle acque dall'inquinamento e di gestione delle risorse idriche”, vengono istituite, in sostituzione alle precedenti Autorità di Bacino, le Autorità di Bacino Distrettuali. Ad esse, spetta l'elaborazione del Piano di Bacino e del piano stralcio di Assetto Idrogeologico (PAI), specifico per la tutela e la prevenzione delle aree a rischio idrogeologico e che riprende i contenuti della Legge 18 maggio 1989, n. 183 (D.Lgs. 152/2006).

L'ultimo elemento che costituisce l'assetto normativo oggi esistente è rappresentato dal D. Lgs. 23 febbraio 2010, n. 49, relativo all'attuazione della Direttiva Alluvioni 2007/60/CE. Infatti, questo Decreto risponde alla Direttiva Europea emanata nel 2007 riguardante la valutazione e la gestione dei rischi derivanti dalle alluvioni (Direttiva 2007/60/CE). Essa assegna la gestione del rischio alluvioni alle Autorità di Bacino Distrettuali, le quali al contempo operano per la realizzazione del precedentemente citato PAI. Le stesse, a seguito di una valutazione preliminare, procedono all'individuazione delle zone a rischio potenziale, che vengono successivamente riportate all'interno delle Mappe della Pericolosità e del Rischio Alluvioni. Sulla base delle mappe appena citate vengono predisposti infine i piani di gestione, che assumono il nome di Piani di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA) (D.L.gs. 49/2010).

## **2.2 Piano di Gestione del Rischio Alluvioni**

Il Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA) nasce dal recepimento da parte dello stato italiano tramite il D.Lgs. 49/2010, della direttiva alluvioni 2007/60/CE, il cui scopo è quello di *“istituire un quadro per la valutazione e la gestione dei rischi di alluvioni volto a ridurre la conseguenze negative per la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche connesse con le alluvioni all'interno della Comunità”* (Direttiva 2007/60/CE).

Esso si struttura in una prima valutazione preliminare del rischio di alluvioni, nella quale vengono valutati i rischi potenziali sulla base dei dati storici e sugli studi

riguardanti lo stato futuro, influenzato anche dai cambiamenti climatici. Dopodiché vengono individuate le potenziali aree a rischio, le quali vengono in seguito riportate all'interno delle mappe della pericolosità e del rischio di alluvioni. Le prime indicano le aree che potrebbero essere interessate da alluvioni secondo 3 scenari di frequenza (scarsa, media e elevata probabilità), per ciascuno dei quali vengono specificate l'estensione dell'inondazione ( $A$ ), l'altezza idrica ( $h$ ), la velocità ( $v$ ) e la portata del deflusso ( $Q$ ). Le seconde, invece, indicano le potenziali conseguenze negative, classificate secondo 4 classi di rischio espresse in termini di numero di abitanti, infrastrutture e altri elementi di interesse coinvolti (D.Lgs. 49/2010, s.d.).

Come precedentemente accennato, tale Direttiva trova in Italia un contesto normativo già sviluppato in materia di difesa dal rischio idrogeologico, costituito dal D.Lgs. 152/2006, il quale istituisce le Autorità di Bacino Distrettuali e regola il piano stralcio di Assetto Idrogeologico (PAI), sulla base della passata Legge 183/1989.

Un aspetto di rilievo nei confronti del PGRA riguarda i cicli di aggiornamento che subisce ogni 6 anni, al fine di adattarsi alle mutazioni del territorio, influenzate anche dai cambiamenti climatici. Il primo ciclo si è compiuto tra il 2015 e il 2021, mentre il secondo, ad oggi ancora in elaborazione, interessa il periodo compreso tra il 2021 e il 2027.

Il ciclo attuale, sulla medesima ottica applicata a quello precedente, promuove le seguenti azioni, in conformità con quanto indicato nella Direttiva Alluvioni (PGRA, 2021a):

1. Uniformare gli strumenti di pianificazione (PAI) esistenti nell'area distrettuale, che seppur simili presentano comunque delle differenze significative;
2. Identificare e mappare gli scenari di pericolosità e di rischio alluvione nella rete idrografica, al fine ulteriore di effettuare una migliore campagna di informazione e preparazione;
3. Individuare le misure strutturali e non strutturali atte a promuovere la coerenza con gli altri piani di bacino, tra cui il Piano di Gestione delle Acque;
4. Definire le azioni di mitigazione degli impatti negativi derivanti da un'alluvione, chiarendo il ruolo di ciascuna amministrazione locale o nazionale nella fase di attuazione del Piano;
5. Garantire la sinergia con la Protezione civile.

Con particolare riferimento al punto 1 dell'elenco sopra riportato, la delibera n.3 del 2021 sancisce che con l'aggiornamento del Piano dell'Autorità di Bacino Distrettuale delle Alpi Orientali, cessano di avere efficacia i PAI per la parte di pericolo idraulico, che diventa competenza del PGRA (Delibera 3/2021). Nonostante ciò, il PAI rimane il piano di riferimento per quanto riguarda l'individuazione delle aree soggette a pericolo geologico e valanghivo.

Gli obiettivi del piano fanno riferimento all'art. 7 della Direttiva Europea sopra citata e si concentrano quindi sulla riduzione delle conseguenze negative data dalle alluvioni per la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche (PGRA, 2021b).

Il loro raggiungimento si basa su quattro misure di azione fondamentali:

- Prevenzione: mira alla riduzione della vulnerabilità e dell'esposizione dei beni, ovvero la propensione a subire danneggiamenti o la possibilità di ricadere in aree allagabili;
- Protezione: agisce sulla pericolosità, ovvero sulla probabilità che accadano degli eventi alluvionali, e si articola nell'attuazione di misure sia strutturali che non strutturali;
- Preparazione: agisce sull'esposizione con il fine di migliorare la capacità di risposta dell'amministrazione nel gestire le persone ed i beni esposti. Essa viene perseguita attraverso il potenziamento dei sistemi di allertamento e l'istruzione della popolazione dal punto di vista delle procedure da attuare in caso di emergenza;
- Ripristino: agisce a seguito dell'evento alluvionale, mirando a riportare lo stato del territorio nelle sue condizioni iniziali e raccogliendo al contempo informazioni per lo sviluppo ulteriore delle conoscenze in materia.

## **2.3 Strumenti di pianificazione del pericolo nella Provincia Autonoma di Bolzano**

Come precedentemente accennato, con la Legge 183/1989, vennero istituite per la prima volta le Autorità di Bacino, le quali furono incaricate di realizzare il proprio Piano di Bacino per la gestione della risorsa idrica e la difesa del suolo.

Questa pianificazione però non venne applicata alla Provincia Autonoma di Bolzano in quanto lo statuto speciale, acquisito nel 1972, ne conferì allora la competenza primaria in materia.

Infatti, il secondo Statuto di Autonomia ottenuto da parte della Provincia di Bolzano conferì ad essa potestà legislativa e amministrativa su differenti ambiti, tra cui l'utilizzazione e gestione delle acque, e la difesa del suolo.

### **2.3.1 Piano Generale per l'Utilizzazione delle Acque Pubbliche e rapporto con il PGRA**

Nacque così il Piano Generale per l'Utilizzazione delle Acque Pubbliche (PGUAP), approvato ai sensi dell'art. 14 del DPR. 670/1972, allo scopo di *“programmare l'utilizzazione delle acque per i diversi usi”* e contenere *“le linee fondamentali per una sistematica regolazione dei corsi d'acqua, con particolare riguardo alle esigenze di difesa del suolo, e per la tutela delle risorse idriche”* (PGUAP, 2017), il quale costituì fin da subito per la Provincia Autonoma di Bolzano quello che in seguito venne definito Piano di Bacino.

Con l'avvento della Direttiva Acque, la quale istituì le Autorità di Bacino Distrettuali, venne stabilito che il PGUAP dovesse ottemperare agli obblighi derivanti dalla Direttiva stessa e concorrere alla formazione del Piano di Bacino Distrettuale delle Alpi Orientali (PGUAP, 2017). Ciò significa che il Piano provinciale continua a sostituire interamente il Piano di Bacino Distrettuale, ed i suoi stralci, ma deve comunque tenere luogo degli obiettivi e dei contenuti imposti dall'Europa.

La Direttiva Alluvioni impose in seguito la realizzazione di un nuovo piano stralcio da aggiungere al Piano di Bacino Distrettuale, ovvero il PGRA. Come già descritto in precedenza, quest'ultimo si concentra unicamente sul rischio idraulico, e per questo, tramite la delibera CIP n.2 del 2022, venne rimossa la competenza in materia al PAI, in quanto precedente strumento di pianificazione responsabile del rischio idrogeologico; esso rimane comunque di riferimento per il pericolo geologico e valanghivo (Delibera CIP 2/2022).

Nonostante il PGRA, la delibera chiarisce che alle Province Autonome di Trento e Bolzano restano riservate le competenze attribuite dallo Statuto speciale e che quindi i loro Piani non subiscono alterazioni.

### **2.3.2 Piani delle Zone di Pericolo**

Il PGUAP di Bolzano gestisce le aree soggette a pericolo idrogeologico con i Piani comunali delle Zone di Pericolo (PZP), i quali risultano compatibili con la Direttiva Alluvioni e costituiscono, nel loro insieme, il piano stralcio relativo al rischio idrogeologico per la Provincia di Bolzano. Esso corrisponde al PAI del Piano distrettuale per la parte di pericolo geologico e valanghivo, e al PGRA per la parte di pericolo idraulico.

I PZP vennero introdotti per la prima volta dall'art. 22-bis della L.P. 13/1997, successivamente abrogata e sostituita dalla L.P. 9/2018, che ne prevede la redazione agli art. 55 e 56 (L.P. 9/2018).

I PZP rappresentano un piano sovraordinato ai piani comunali e si applicano ad essi dettando prescrizioni in merito agli interventi non consentiti, o attuabili con determinate limitazioni. Tali interventi sono disciplinati dal "Regolamento di esecuzione" (D.P.P. 23/2019), che rappresenta l'equivalente delle Norme Tecniche di Attuazione del PGRA, le quali non hanno alcuna valenza nel territorio alto atesino. Pertanto, per quanto riguarda l'applicazione dei vincoli, la Provincia Autonoma di Bolzano segue la propria normativa, che fa riferimento al PGUAP, in quanto corrispondente al Piano di Bacino.

Il Piano prevede una suddivisione del territorio basata sulla categoria urbanistica, alla quale viene associato il grado di studio corrispondente, con lo scopo di agevolare i tempi e i costi di realizzazione dello stesso (DPG n.989/2016).

- Categoria a, alla quale appartengono le aree molto urbanizzate e da urbanizzare, nonché le aree di emergenza di protezione civile. In esse la zonizzazione considera tutti i processi, studiati in modo dettagliato ed esaustivo. Non sono ammesse aree non valutate;
- Categoria b, alla quale appartengono le aree singolarmente edificate, per qualsiasi uso. In questo caso, la zonizzazione tiene conto almeno dei processi di cui si abbia testimonianza e lo studio può essere condotto con un grado di dettaglio minore;
- Categoria c, alla quale appartengono le aree che non sono di interesse urbanistico ai fini della pianificazione del pericolo, quali ad esempio le zone naturali non edificate e le infrastrutture di interesse secondario. Per quest'ultime la zonizzazione non è prevista, così come lo studio dei processi (salvo casi di necessità).

Le aree sopra descritte, per le quali è richiesta una valutazione del pericolo ma se ne verifica l'assenza, vengono classificate in cartografia come non soggette a pericolo.

## **2.4 Mappatura del pericolo in Italia**

Come indicato nel capitolo relativo all'introduzione del PGRA, la Direttiva Alluvioni richiede la classificazione delle proprie mappe del pericolo e del rischio espressa in termini rispettivamente di valori di tirante ( $h$ ), estensione ( $A$ ) e velocità ( $v$ ) del flusso, e del numero di abitanti e altri elementi di valore storico, culturale ed economico esposti al rischio idrogeologico per tre scenari a probabilità decrescente (Tempo di Ritorno di 30, 100 e 300 anni) (Direttiva 2007/60/CE).

Quindi, per la classificazione del pericolo a livello europeo viene semplicemente richiesto che gli Stati membri elaborino dei prodotti che evidenzino le aree coinvolte e che siano capaci di descrivere in maniera fisica la manifestazione del processo in esse.

Questo aspetto lascia la possibilità alle amministrazioni pubbliche di poter elaborare tali prodotti a seconda delle esigenze, come ad esempio dare indicazione alla Protezione Civile e al Corpo dei Vigili del Fuoco sull'entità dei fenomeni attesi. La classificazione secondo una serie di codici, i quali rappresentano l'intersezione delle informazioni dei livelli sopra indicati ( $h$ ,  $A$  e  $v$ ), è una questione solamente italiana (Macconi, 2025).

Le mappe del pericolo del PGRA in Italia applicano infatti una classificazione differente rispetto a quella richiesta dall'Unione Europea (UE), in quanto, al fine di armonizzare il nuovo piano stralcio dell'autorità di bacino, si è adottata la classificazione del pericolo precedentemente utilizzata per il PAI e che quindi si basa sull'intersezione dei prodotti richiesti dall'UE, rappresentati da un codice alfanumerico, sia per le mappe del pericolo (P), che per le mappe del rischio (R). Lo stesso vale anche per i PZP, in quanto diretti dal PGUAP nato anch'esso prima della Direttiva Alluvioni.

La perimetrazione delle aree, e pertanto la metodologia per la definizione delle superfici soggette a pericolo, vede una prima indagine incentrata sull'analisi degli eventi passati di cui si abbia testimonianza e sulle caratteristiche morfologiche del territorio analizzato. Ad essa segue la seconda fase, incentrata sull'applicazione di modelli matematici utili a stimare le aree coinvolte dagli eventi studiati. Essa consta inizialmente nella modellazione idrologica, per la determinazione della componente liquida, seguita dalla modellazione idraulica al fine di definire la propagazione del flusso. I modelli utilizzati, devono essere validi e riconosciuti dal punto di vista scientifico, e si devono adattare alle caratteristiche morfologiche del corso d'acqua analizzato e al tipo di processo atteso.

Le suddette elaborazioni permettono di ottenere i prodotti richiesti dalla Direttiva, i quali vengono in seguito intersecati tra loro per ottenere le mappe di pericolosità e del rischio. Mentre la Direttiva europea per la descrizione del pericolo si concentra sulle alluvioni e identifica nel tirante ( $h$ ) la variabile da considerare, l'adattamento della normativa al contesto italiano, e, nello specifico, al caso delle colate detritiche, ha generato l'esigenza di affidarsi ad un parametro differente, che potesse descrivere i fenomeni da colata detritica ai quali il nostro territorio è più soggetto ( $M$ ). Nel presente caso studio, al fine di considerare uno scenario maggiormente cautelativo, con

“spessore” si farà riferimento al valore massimo raggiunto dalla somma fra tirante e spessore di deposito ( $h + M$ ).

Il perimetro delle aree deve essere validato attraverso rilievi di campo, i quali permettono di rendere maggiormente realistiche le stime fatte in fase di modellazione. Il tecnico incaricato di verificare tali aree assume un ruolo di forte responsabilità, in quanto le scelte che esso assume si riflettono sulla pianificazione urbanistica locale. Infatti, i PZP si applicano in maniera diretta ai piani comunali, per i quali vengono definiti nel dettaglio gli interventi che non si possono realizzare, o che devono seguire determinate prescrizioni e indicazioni (DPG n. 989/2016).

Per quanto riguarda il confronto con le mappe del pericolo elaborate nel presente studio, verrà utilizzata la Carta delle Zone di Pericolo, quale elaborato grafico dei PZP, disponibile presso il geoportale della Provincia. Per confermare il perimetro delle aree individuate tramite la modellazione numerica, le valutazioni previste dalla normativa dei PZP verranno effettuate sulla base del contesto urbanistico, topografico e morfologico del territorio analizzato.

## **2.5 Carte delle Zone di Pericolo secondo il PZP**

La Direttiva Alluvioni definisce la pericolosità da alluvioni come *“la probabilità di accadimento di un evento alluvionale in un intervallo temporale prefissato e in una certa area”*, concetto che si estende anche alle colate detritiche (Direttiva 2007/60/CE).

Come precedentemente descritto, in Italia, essa viene elaborata in maniera differente rispetto a quanto richiesto dalla Direttiva Europea, in quanto si adatta alla classificazione del pericolo già in vigore per i Piani stralcio di Assetto Idrogeologico.

La classificazione utilizza la metodologia BUWAL (Heinimann & Hollenstein, 1998), che viene ottenuta dalla relazione tra la probabilità di accadimento del fenomeno e la sua intensità. Il criterio su cui essa si basa vede la salvaguardia della vita umana e delle sue attività come elementi posti al primo piano.

Il primo elemento è rappresentato dai tempi di ritorno considerati, e riportati nella Tabella 2.1 (DPG n. 989/2016).

| Probabilità di accadimento |                        | Tempo di ritorno ( $T_R$ ) |                 |
|----------------------------|------------------------|----------------------------|-----------------|
|                            | calcolata per 50 anni: | espresso in anni:          |                 |
| elevata                    | 100% fino a 82%        | $T_R \leq 30$              | molto frequente |
| media                      | 82% fino a 40%         | $30 < T_R \leq 100$        | frequente       |
| bassa                      | 40% fino a 15%         | $100 < T_R \leq 300$       | raro            |
| molto bassa                | 15%                    | $T_R > 300$                | molto raro      |

Tabella 2.1 – Probabilità di accadimento per gli eventi alluvionali espressa in tempo di ritorno; modificata da BUWAL (Heinimann & Hollenstein, 1998)

Mentre per quanto riguarda il secondo, esso si affida alla definizione della colata detritica, classificata sulla base dello spessore del deposito ( $M$ ) e sulla velocità di scorrimento del miscuglio ( $v$ ) (Tabella 2.2) (DPG n. 989/2016).

| Processo         | Valori soglia                                       | Intensità |                        |                     |
|------------------|-----------------------------------------------------|-----------|------------------------|---------------------|
|                  |                                                     | Bassa     | Media                  | Alta                |
| Colata detritica | - Conc. materiale solido 30-70%<br>- Pendenza > 15% | non noto  | $M \leq 1 \text{ m}$   | $M > 1 \text{ m}$   |
|                  |                                                     |           | opp.                   | e                   |
|                  |                                                     |           | $v \leq 1 \text{ m/s}$ | $v > 1 \text{ m/s}$ |

Tabella 2.2 – Valori soglia e parametri di definizione dell'intensità per le colate detritiche; modificata da BUWAL (Heinimann & Hollenstein, 1998)

In riferimento alla tabella soprastante, per “non noto” si intende che il fenomeno di colata detritica non prevede condizioni di bassa intensità e lo scenario di intensità minima considerato è l'intensità media.

Sulla base delle componenti usate per la classificazione secondo la matrice di BUWAL sopra descritte, è possibile distinguere quattro classi di pericolo, individuate dalla Provincia Autonoma di Bolzano come segue (DPG n. 989/2016):

- Pericolo molto elevato (H4), al quale sono associati possibili conseguenze come la perdita di vite umani e l'apporto di lesioni gravi alle persone, danni agli edifici e agli altri elementi del territorio di importanza ambientale e socio-economica;
- Pericolo elevato (H3), al quale sono associati possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni di rilievo ad edifici, infrastrutture e alle attività socio-economiche;

- Pericolo medio (H2), al quale sono associate conseguenze che non pregiudicano l'incolumità delle persone e che non provano danni alle cose tali da comprometterne l'agibilità;
- Pericolo residuo (H1), il quale viene associato ad eventi molto rari, caratterizzati da un'intensità definibile come "infinita". Nel PZP non vengono rappresentati ma se ne tiene conto nella relazione a corredo del piano stesso.

Le classi appena descritte vengono rappresentate graficamente nel PZP tramite la Carta delle Zone di Pericolo idrogeologico (CZP), secondo lo schema riportato in Figura 2.1. Le aree su cui viene studiato il processo, ma che non presentano segnali di pericolo H4-H2 vengono rappresentate in cartografia con il colore grigio chiaro. Le aree che non sono di interesse urbanistico, invece, non vengono riportate.

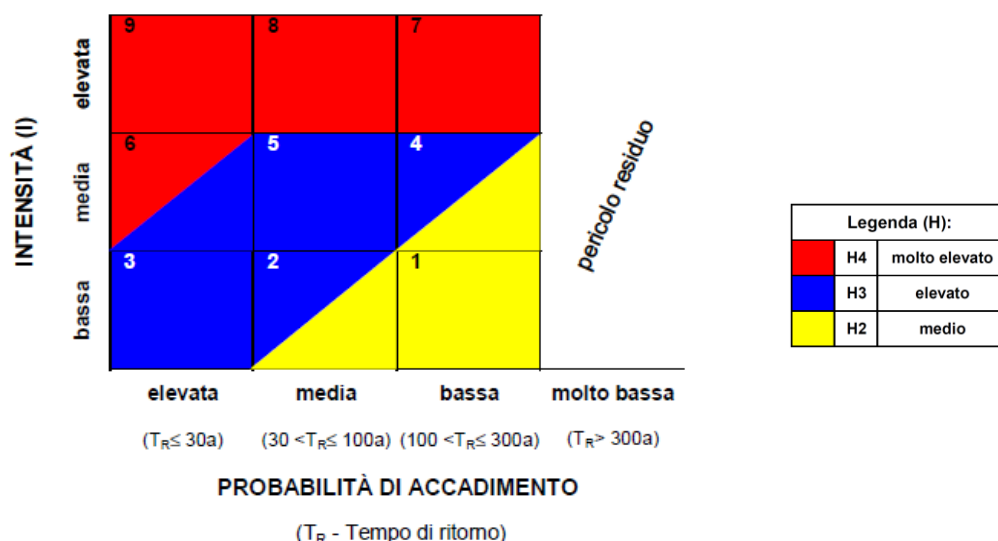


Figura 2.1 – Matrice del pericolo della Provincia Autonoma di Bolzano; modificata da BUWAL (Heinimann & Hollenstein, 1998)

I valori di intensità individuati tramite la metodologia sopra descritta, risultano utili alla realizzazione delle Carte delle Zone di Rischio Specifico (CZR), definite dalle classi di rischio secondo la seguente formula:

$$R = H * V \quad (2.1)$$

dove  $H$  Intensità del fenomeno  
 $V$  Vulnerabilità al fenomeno

In particolare, per vulnerabilità si intende l'attitudine di un elemento a rischio, a subire danni per effetti di un evento.

L'elaborato ottenuto dall'intersezione tra la CZP e la carta della vulnerabilità, ovvero la CZRs, ha come scopo principale la messa in sicurezza degli elementi da tutelare, e assume un'utilità in ambito di pianificazione urbanistica principalmente per indicare le priorità di intervento.

Dal momento che viene costantemente aggiornata, in quanto rappresenta lo stato in cui essa è stata realizzata, è da considerarsi come un "indicatore per le misure di salvaguardia", che si esprime in termini di interventi passivi non strutturali e/o attivi strutturali.

Ciò significa che lo strumento che impone vincoli e prescrizioni alla pianificazione territoriale a livello comunale è la CZP, in quanto non tiene conto della vulnerabilità e per questo risulta maggiormente cautelativo.



### 3 OBIETTIVI

Il presente studio si propone di elaborare le mappe del pericolo per il bacino del Rio Gatria, situato nella Provincia Autonoma di Bolzano, in conformità a quanto previsto dai Piani delle Zone di Pericolo (PZP), e di effettuare un successivo confronto con l'attuale Carta delle Zone di Pericolo (CZP) dell'area.

Come descritto nel capitolo precedente, i PZP costituiscono il piano stralcio dell'assetto idrogeologico del Piano di Gestione per l'Utilizzazione delle Acque Pubbliche (PGUAP), redatto dalla Provincia Autonoma di Bolzano. Il PGAUP si integra con gli obiettivi imposti dalla Direttiva 2007/60/CE, che istituisce il Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA), quale piano stralcio del Piano di Bacino Distrettuale dedicato interamente al rischio idraulico.

Per l'elaborazione delle mappe si è adottato il modello "D.F.R.M.", sviluppato da Gregoretti et al. (2019). L'applicazione del modello ha previsto una preliminare fase di taratura, finalizzata ad adattarlo allo specifico contesto geografico, geologico, morfologico e idrologico del bacino oggetto di studio, parzialmente differente rispetto ai casi studi finora investigati con tale modello presenti in letteratura. La validazione è stata eseguita utilizzando come parametri di riferimento il volume depositato nel bacino di ritenuta terminale e la portata di picco di alcuni eventi passati registrati dal sistema di monitoraggio presente nel bacino.

La descrizione del bacino idrografico e la base topografica necessaria all'applicazione del modello sono state ricavate tramite elaborazioni GIS effettuate a partire dal modello digitale del terreno (DTM) a risoluzione 1 m fornito dalla Provincia Autonoma di Bolzano.

Le mappe del pericolo sono state elaborate per gli scenari di precipitazione a probabilità decrescente in conformità con le indicazioni fornite dalla Direttiva 2007/60/CE e dal quadro normativo nazionale.



## 4 AREA DI STUDIO

### 4.1 Inquadramento territoriale

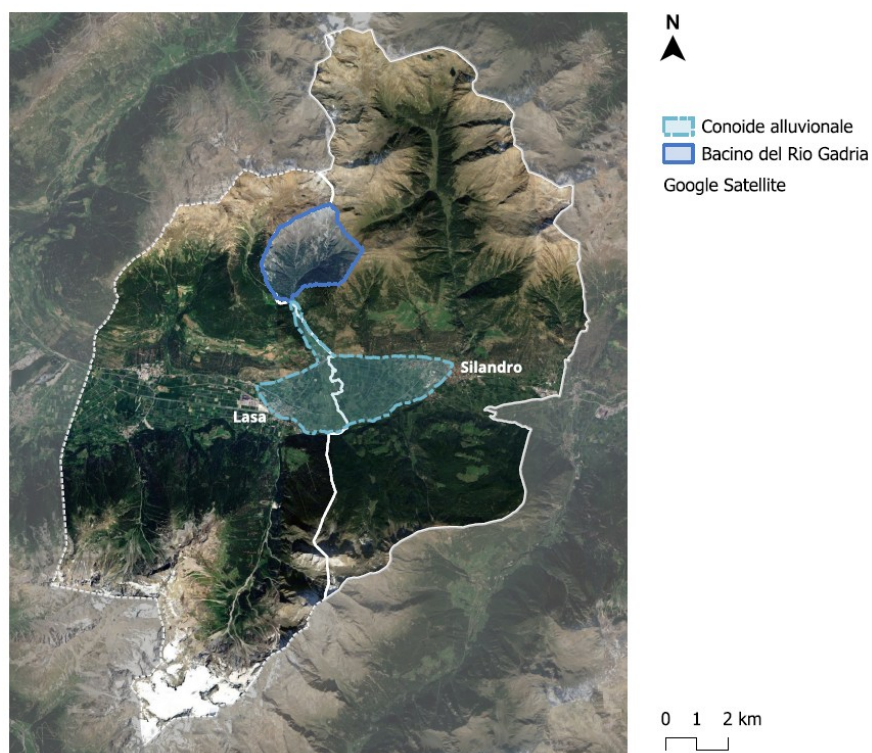
Il bacino idrografico del Rio Gadria si trova nella parte occidentale del Comune di Silandro, al confine con il Comune di Lasa, e più precisamente si colloca nel contesto geografico della Val Venosta, posta a nord-ovest rispetto al capoluogo della Provincia Autonoma di Bolzano (Figura 4.1).



*Figura 4.1 – Inquadramento territoriale rispetto alla Provincia Autonoma di Bolzano*

A valle del bacino è situato un conoide alluvionale, sul quale sorgono parte dei centri abitati di Lasa e Silandro, e un'ampia distesa di meleti (Figura 4.2).

I due paesi ospitano rispettivamente 4'178 e 6'403 abitanti, per un valore complessivo di poco più di 10'500 cittadini esposti ai potenziali fenomeni che si possono verificare presso il bacino di studio (Comune di Lasa, 2024; Comune di Silandro, 2024).



*Figura 4.2 – Inquadramento del bacino e del conoide rispetto ai Comuni di Lasa e Silandro*

Inoltre, quest'area risulta di rilievo nazionale per via della produzione della famosa mela della Val Venosta e per le bellezze rappresentate delle montagne circostanti.

Il conoide alluvionale sopra citato costituisce il risultato del susseguirsi degli eventi solido-liquidi che si sono verificati nel tempo, originati dal sistema composto dal Rio Gadia e del Rio Strimm.

Questi due collettori confluiscono in corrispondenza della briglia filtrante posta all'apice del conoide, convogliandosi in un unico corso d'acqua che assume il nome di torrente Alliz, il quale si immette infine nel fiume Adige.

## **4.2 Bacino del Rio Gadia**

### **4.2.1 Descrizione del bacino idrografico**

Il bacino del Rio Gadia si estende per una superficie di 6.26 km<sup>2</sup>, distribuendosi su un dislivello complessivo di 1'154.10 m, compreso tra la quota superiore di 2'944.94 m

s.l.m. e la quota inferiore di 1'390.84 m s.l.m., alla quale corrisponde la sezione di chiusura del bacino stesso (Figura 4.3).

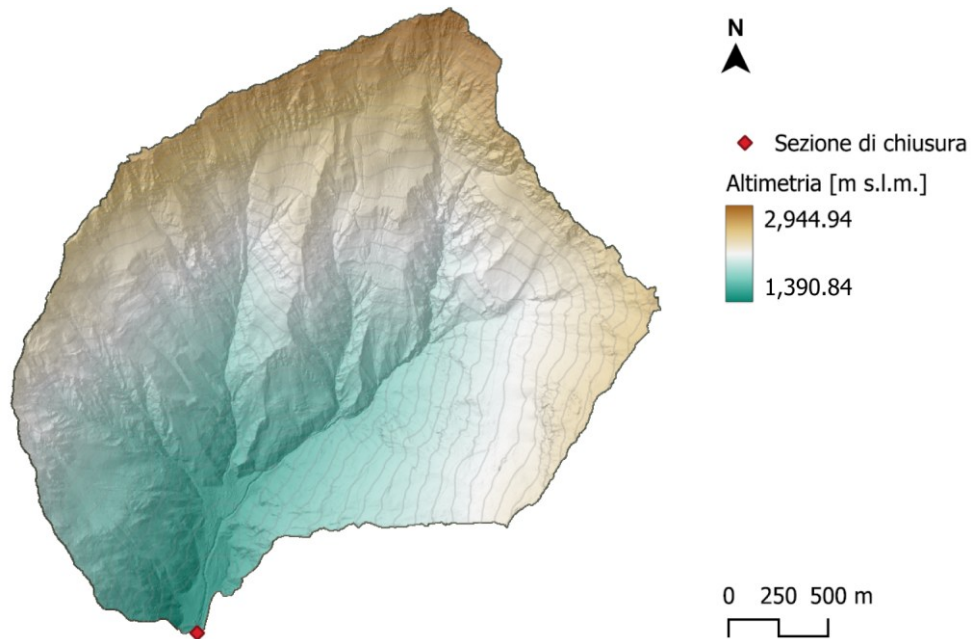


Figura 4.3 – Mappa altimetrica del bacino del Rio Gatria

Esso presenta una distribuzione delle aree che cresce in maniera graduale fino a raggiungere il valore massimo alla fascia di quota compresa tra 2'151 e 2'200 m s.l.m., riprendendo un andamento decrescente per le quote superiori (Figura 4.4).

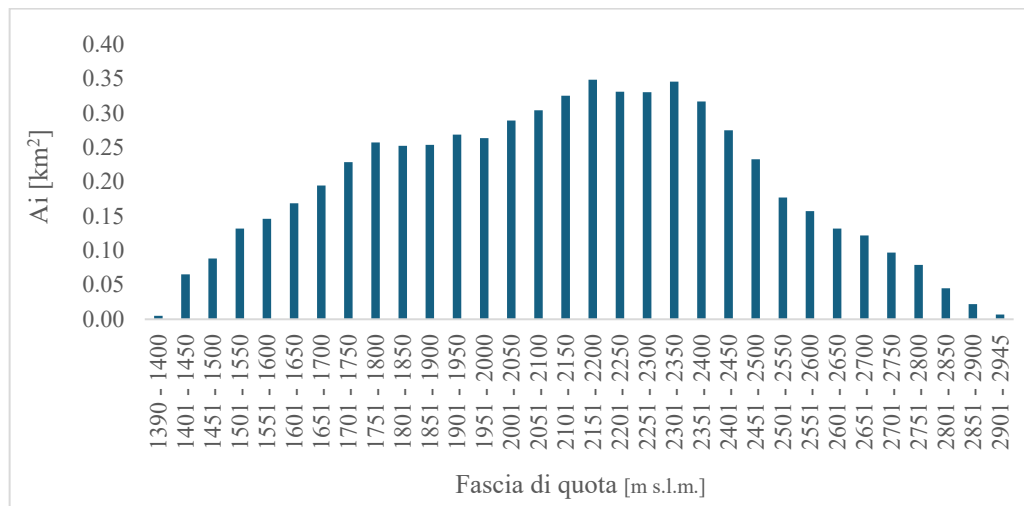


Figura 4.4 – Distribuzione delle aree del bacino del Rio Gatria

Al fine di fornire una descrizione maggiormente dettagliata riferita al rapporto presente tra la distribuzione delle superfici e le diverse fasce altimetriche, si presenta di seguito la curva ipsografica dimensionale del bacino oggetto di studio (Figura 4.5). Essa

permette di attribuire ad ogni quota, il corrispettivo valore di superficie presente a monte di quest'ultima.

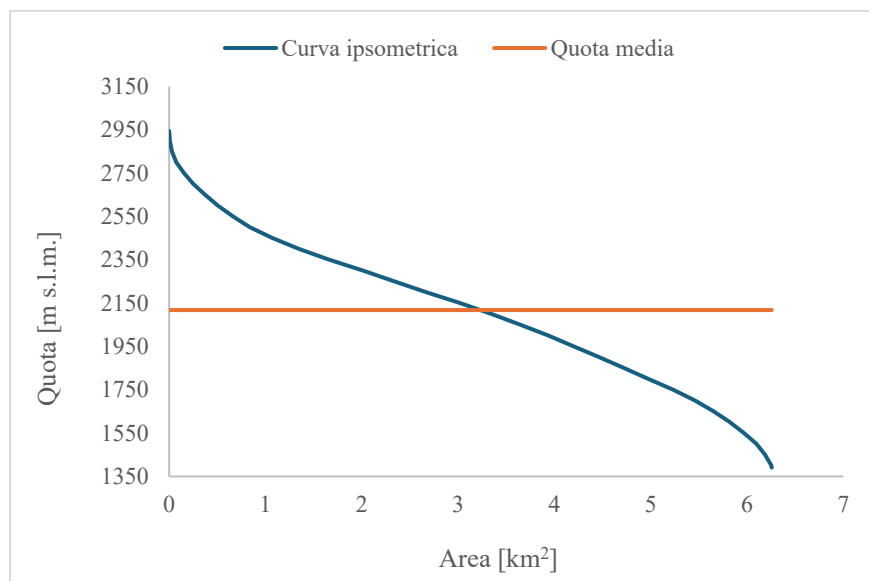


Figura 4.5 – Curva ipsografica dimensionale

Un ulteriore dato che è possibile ricavare dalla curva soprastante, è la quota media del bacino ponderata sull'area totale, attraverso l'applicazione della seguente formula:

$$h_m = \frac{\sum (h_i - A_i)}{A_{tot}} \quad (4.1)$$

dove  $h_i$       Altitudine media dell'intervallo di quota i-esimo [m]  
 $A_i$         Area del bacino compresa nell'intervallo di quota i-esimo [km²]  
 $A_{tot}$       Area totale del bacino [km²]

La quota media individuata è risultata essere pari a 2'118.15 m s.l.m..

Attraverso la curva ipsografica dimensionale non è possibile però effettuare confronti diretti con l'andamento di altri bacini. Per questo motivo, si è realizzata anche la sua versione adimensionale, i cui assi variano nell'intervallo compreso tra 0 e 1 (Figura 4.6).

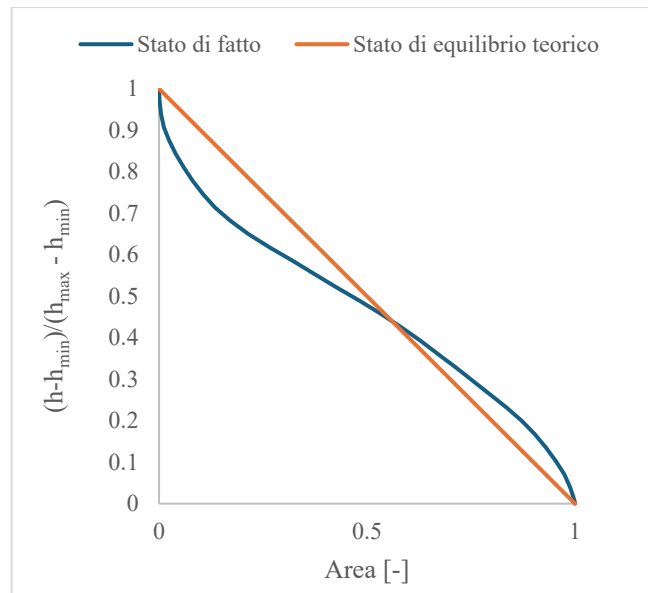


Figura 4.6 – Curva ipsometrica adimensionale

La curva ipsometrica, oltre a permettere il confronto con altri bacini, consente inoltre di valutare il grado di evoluzione del bacino stesso. Esso, infatti, si può trovare in tre macro-fasi: giovanile (a), matura (b) o senile (c) (Figura 4.7), le quali vengono rapportate con lo stato di equilibrio teorico.

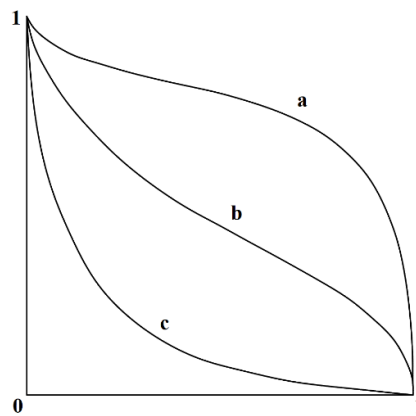


Figura 4.7 – Gradi di evoluzione di un bacino idrografico

La prima (a) e la terza (c) curva, sono associate rispettivamente ad un'elevata e ad una ridotta attività erosiva, mentre la curva riferita allo stato di maturità rappresenta un'attività erosiva intermedia, che descrive un equilibrio dinamico tra processi di erosione e deposito.

Il bacino del Rio Gadria si trova in uno stato di equilibrio, in quanto assume un andamento simile a quello rappresentato dalla seconda curva (b) della Figura 4.7.

Per quanto riguarda invece le pendenze presenti nel bacino oggetto di studio, esse assumono un valore minimo di  $0.08^\circ$  ed uno massimo di  $85.96^\circ$ , con un valore medio ponderato sull'area di  $40.06^\circ$  (0.84%) (Figura 4.8).

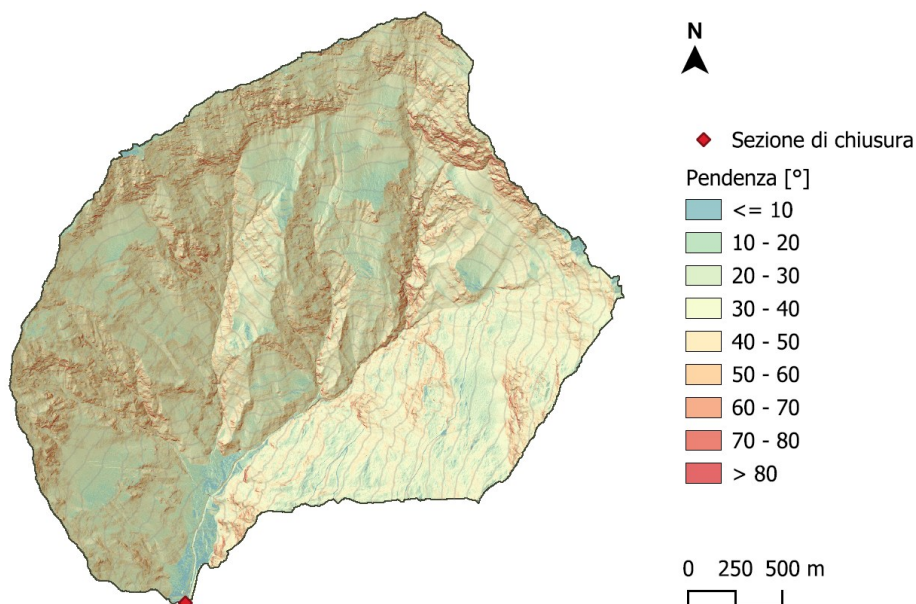


Figura 4.8 – Mappa delle pendenze in gradi ( $^\circ$ ) del bacino del Rio Gadria

Com'è possibile notare dal grafico seguente (Figura 4.9), il bacino è caratterizzato da pendenze ridotte nelle prime fasce di quota, che successivamente assumono valori più o meno costanti compresi tra i  $35^\circ$  e  $45^\circ$ , i quali si estendono fino alla linea dello spartiacque.

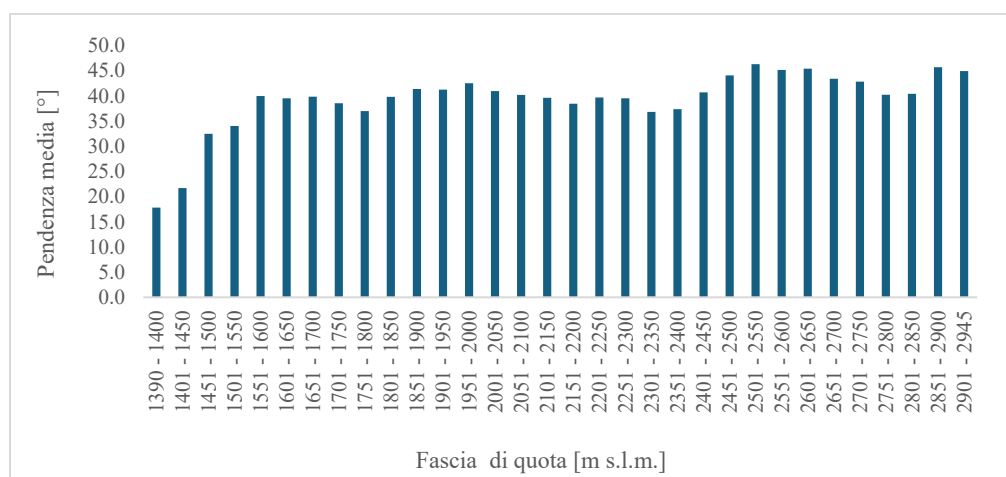
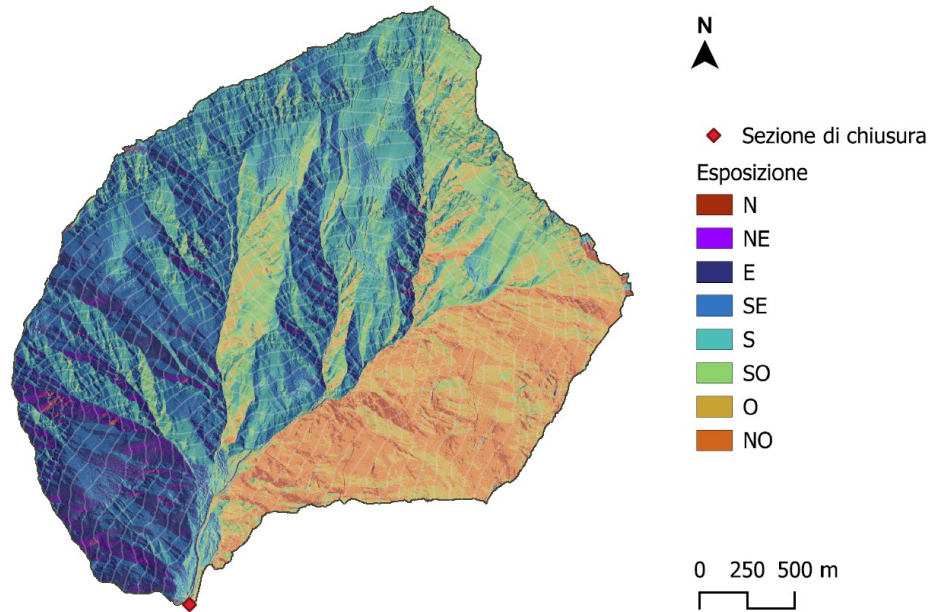


Figura 4.9 – Distribuzione delle pendenze del bacino del Rio Gadria

Dalla Figura 4.8 è infatti possibile notare come le pendenze maggiori, che superano i  $70^\circ$ , sono situate lungo il tratto di monte del canale e nella parte superiore del bacino.

In queste aree i processi erosivi sono dominanti, risultando sensibili anche agli eventi di minore entità (Cavalli et al., 2025).

Dal punto di vista dell'esposizione, il bacino oggetto di studio presenta un'esposizione media rivolta verso sud-ovest, pur mantenendo una componente consistente rivolta a nord-ovest (Figura 4.10).



*Figura 4.10 – Mappa dell'esposizione del bacino del Rio Gadia*

Questo aspetto risulta di rilievo nella comprensione dei processi che rendono il bacino del Rio Gadia così interessante sotto il punto di vista della formazione di eventi da colata detritica. L'orientamento topografico, infatti, condiziona l'esposizione al sole e ai venti, i quali a loro volta influenzano i processi erosivi dovuti alle precipitazioni e al crioclastismo.

Oltre all'esposizione e alla pendenza, risulta utile considerare anche l'assetto litologico e geomorfologico.

La litologia mostra la presenza di rocce metamorfiche, in particolare di paragneiss e ortogneiss, formatesi durante i periodi del Permiano e del Cretaceo, le quali risultano particolarmente sensibili agli agenti atmosferici. Tra gli elementi morfologici di rilievo, si distinguono le estese terrazze originatesi nella parte superiore del bacino a seguito del ritiro del ghiacciaio una volta presente, che assumono il nome di kame (Figura 4.11).



*Figura 4.11 – Kame presenti nel bacino del Rio Gadria (Comiti et al., 2014)*

Tali morfologie, situate in corrispondenza delle ripide pareti in testata, poggiano su superfici rocciose estremamente alterate e fratturate, caratterizzate da forre profonde e morfologie simili ai calanchi. Questo assetto fornisce una fonte pressoché illimitata di sedimento, il quale si traduce in un'attività cronica di colate detritiche pari a 1-2 eventi all'anno (dato riferito agli eventi registrati a partire dal 2003) (Comiti et al., 2014).

In relazione invece alla componente superficiale del suolo (Figura 4.12), il bacino presenta cinque principali tipologie di uso, secondo la definizione offerta da parte della Provincia Autonoma di Bolzano (Provincia Autonoma di Bolzano, 2025c).

Disposte prevalentemente nella parte superiore, sono presenti rocce e zone detritiche prive di vegetazione, rispettivamente corrispondenti al 6.5% e 15.5% dell'area totale. Distribuite invece spesso al piede delle superfici composte prevalentemente da elementi inerti, si trovano le aree prative, costituenti il 27.6% della superficie totale. La copertura del suolo meno presente è invece rappresentata da prati e pascoli alberati, i quali occupano solamente il 2.9%. Mentre, infine, l'elemento presente in quantità maggiore, corrisponde al bosco, il quale ricopre una superficie pari al 47.5%.

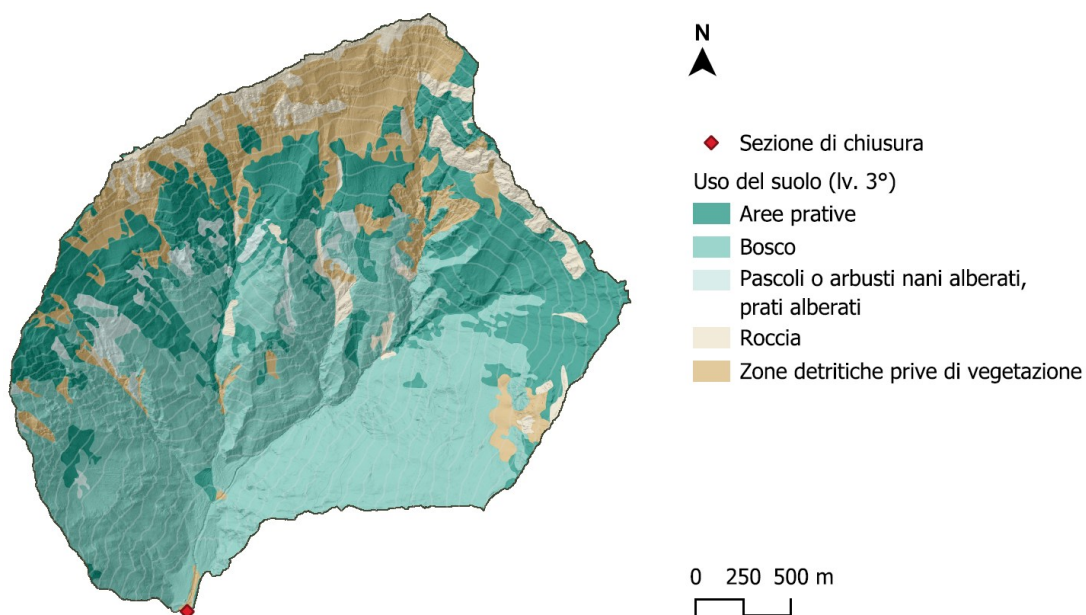
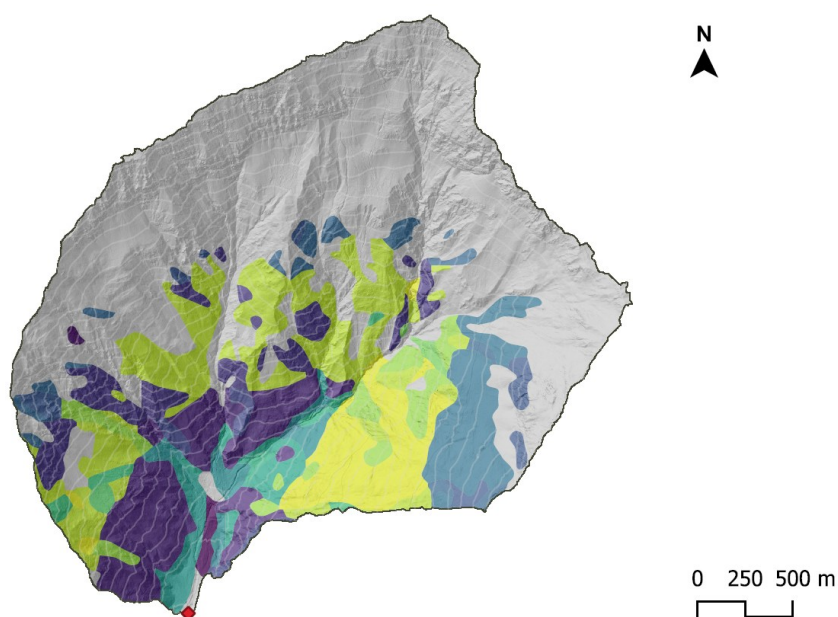


Figura 4.12 – Mappa dell'uso del suolo del bacino del Rio Gader (Provincia Autonoma di Bolzano, 2025c)

All'interno del bosco sopra citato, è possibile riconoscere differenti tipi forestali. In particolare, si individua una discreta presenza di pecceta subalpina silicatica e lariceto montano, distribuita nella fascia intermedia del bacino. Nella parte superiore sono presenti invece formazioni costituite da larici-cembrete, specialmente nel versante orientale. La parte più prossima all'alveo del canale principale è popolata infine da peccete montane e formazioni ripariali del piano montano (Figura 4.13).



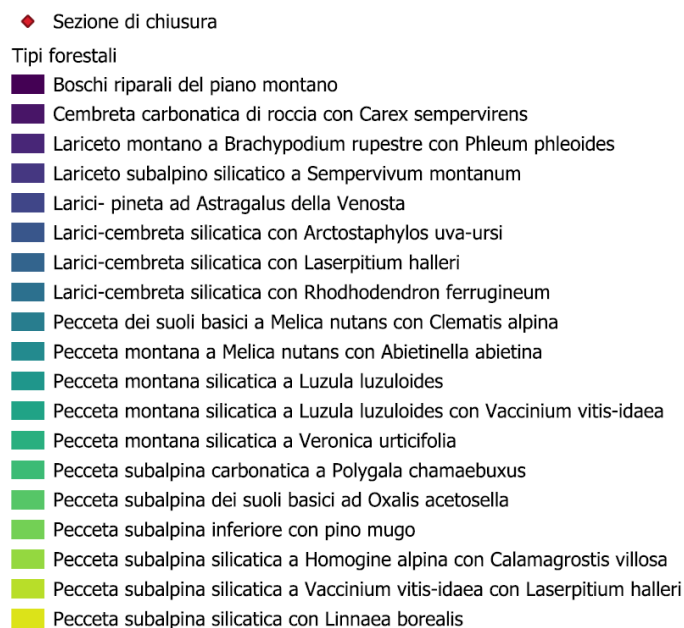


Figura 4.13 – Mappa dei tipi forestali (Provincia Autonoma di Bolzano, 2025b)

## 4.2.2 Sottobacini idrografici

All'interno del bacino del Rio Gatria è possibile riconoscere i principali sottobacini che concorrono alla formazione dell'onda di piena che attraversa la briglia filtrante posta a valle (Figura 4.14).

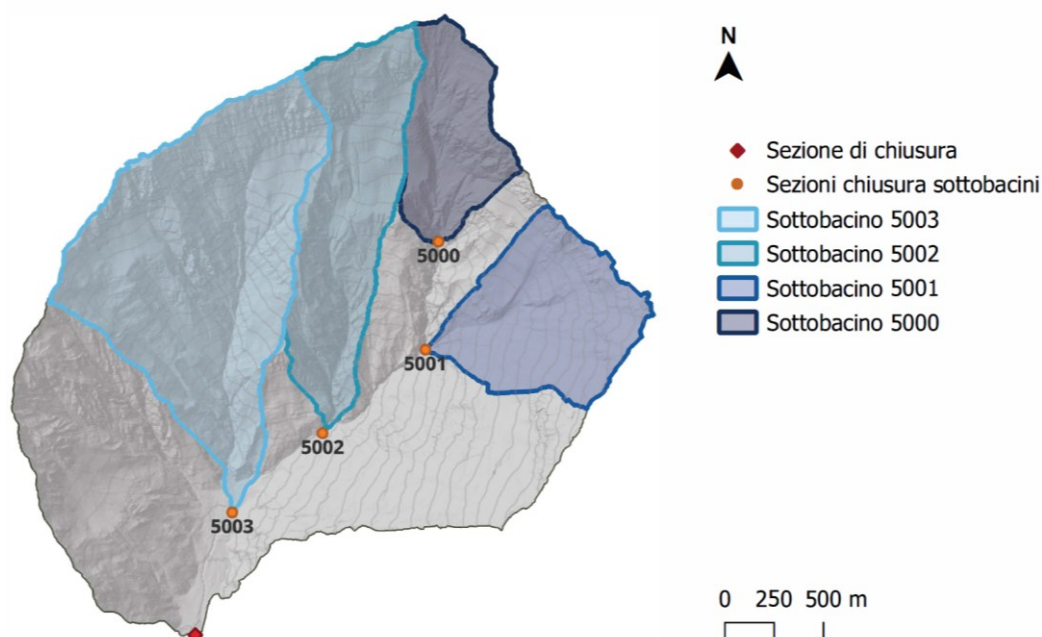


Figura 4.14 – Sottobacini del Rio Gatria

Il riconoscimento di suddetti elementi risulta utile per la taratura del modello, in quanto permette di distribuire con maggiore capillarità i contributi idrologici delle differenti aree del bacino.

La loro individuazione si è basata sull'analisi delle immagini catturate da drone, fornite dalla Provincia Autonoma di Bolzano, e dei rilievi effettuati in campo durante le giornate del 6 e 7 settembre 2025 (Bressan, 2025).

Il primo input è posto nella parte superiore del collettore, e descrive il contributo della testa del bacino. Il secondo invece, posto poco più a valle, riporta l'unico contributo in sinistra idrografica di cui si è riconosciuto l'apporto significativo, in quanto presenta geomorfologie incise e superfici maggiormente esposte per via della ridotta presenza di alberi. Il terzo si trova a metà del collettore principale e rappresenta il secondo sottobacino per estensione. L'ultimo input si trova infine nella piana posta circa alla quota di 1'500 m s.l.m., costituendo il sottobacino più grande.

In particolare, grazie ai rilievi di campo, è stato possibile apprezzare il contributo non solo liquido ma anche solido del quarto sottobacino, come ben visibile nell'immagine seguente (Figura 4.15).

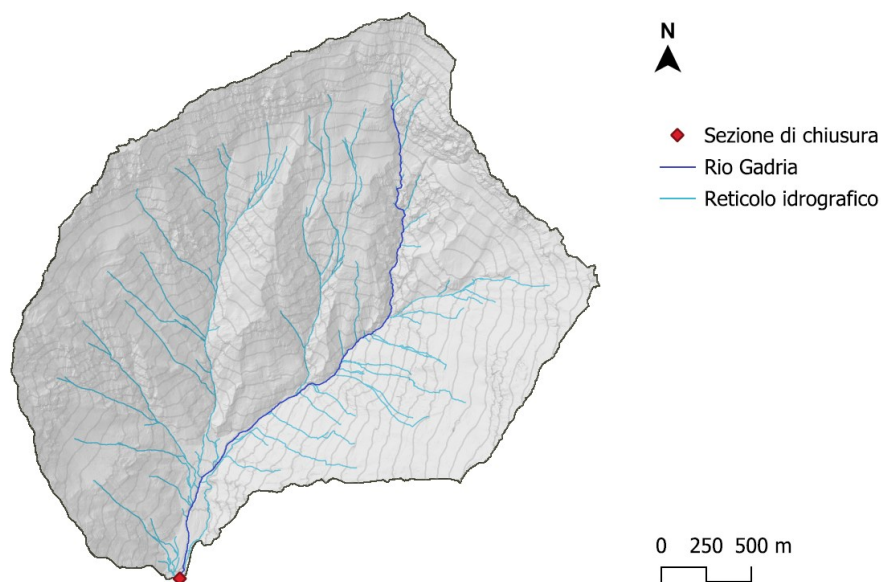


*Figura 4.15 – Foto area della sezione di chiusura del quarto sottobacino*

### 4.2.3 Collettore principale

Il bacino del Rio Gatria è costituito da un complesso reticolo idrografico che contribuisce ad alterare l'assetto morfologico del territorio (Figura 4.16).

Esso rappresenta il risultato dell'equilibrio dinamico tra deposito ed erosione, influenzato da variabili intrinseche, quali quota, pendenza, esposizione e geologia, e variabili estrinseche, come ad esempio il regime di precipitazioni locale. Gioca inoltre un ruolo di rilievo anche la componente biotica, la quale si articola nelle differenti formazioni arboree, arbustive ed erbacee distribuite prevalentemente nella parte inferiore del bacino (Iovino et al., 2009).

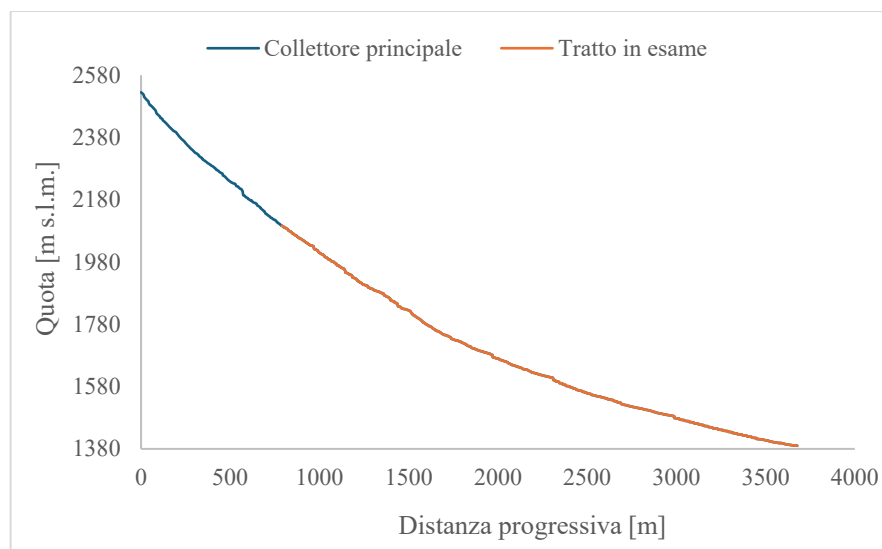


*Figura 4.16 – Mappa del reticolo idrografico*

Il presente studio si concentra prevalentemente sull'asta principale e sugli apporti derivanti dai sottobacini individuati nel capitolo 4.2.2..

In particolare, per quanto riguarda il collettore, esso si estende dalla quota di 2'524.97 m s.l.m. sino alla quota di 1'390.46 m s.l.m., sviluppandosi su una distanza orizzontale totale di 3'677.78 m, con una pendenza media di  $17.15^\circ$  (30.87%).

Dal momento però che il punto di innesco degli eventi da colata simulati è stato individuato più a valle della sorgente del Rio Gatria, il tratto studiato si riduce assumendo una lunghezza di 2'888.5 m, che si sviluppa con una pendenza media di  $13.75^\circ$  (24.74%) e che raggiunge la quota massima di 2'096.72 m s.l.m. (Figura 4.17).



*Figura 4.17 – Profilo longitudinale del collettore principale*

Dall'immagine soprastante si può notare che il canale principale non dimostra tratti caratterizzati da elevate pendenze, seppur risultino comunque visibili i salti dettati dalla presenza delle briglie situate lungo l'alveo.

Infatti, a causa della frequente attività del bacino, in passato sono stati realizzati diversi tratti sistemati tramite serie di briglie di trattenuta. In particolare, esse si suddividono in 3 macro-tratti: il primo appartiene alla parte inferiore del bacino e si estende fino alla piana situata alla quota di 1'500 m s.l.m., il secondo interessa il tratto compreso tra le sezioni di chiusura del secondo e terzo sottobacino, mentre l'ultimo si colloca nella metà superiore del canale.

Dato che però le analisi di campo non hanno potuto confermare la presenza della totalità delle briglie, sono state considerate solamente quelle rilevate in campo, in quanto alcune delle opere segnalate dal catasto della Provincia Autonoma di Bolzano, non risultavano più in sede.

#### **4.2.4 Parametri morfometrici**

I parametri morfometrici di un bacino consistono in indici di tipo numerico che esprimono la forma del bacino e del reticolo idrografico in esso presente. Queste informazioni risultano di particolare utilità in quanto permettono di rendere comparabili tra loro i differenti bacini studiati.

La forma di un bacino viene espressa con il coefficiente di forma di Gravellius (4.2), il quale si basa sul rapporto esistente tra il perimetro e la radice quadrata dell'area del bacino studiato assimilata a quella di un cerchio (D'Agostino, 2022).

$$F = 0.28 \frac{P}{A^{0.5}} \quad (4.2)$$

dove  $P$  Perimetro [m]  
 $A$  Area [m<sup>2</sup>]

Valori elevati indicano una forma più allungata, caratterizzata quindi da una maggiore lunghezza del collettore principale. La forma del bacino influenza quindi anche la configurazione del reticolo idrografico che in esso si può formare. Il bacino del Rio Gatria presenta un coefficiente pari a 1.57 [-], venendo classificato come “bislungo” in quanto superiore al valore soglia di 1.50 [-].

Un ulteriore parametro per descrivere in maniera assoluta la forma di un bacino è l'indice di compattezza (4.3). Esso rappresenta il rapporto tra la lunghezza del collettore principale e la radice quadrata dell'area del bacino (D'Agostino, 2022).

$$I_c = \frac{L_c}{A^{0.5}} \quad (4.3)$$

dove  $L_c$  Lunghezza del collettore principale [m]  
 $A$  Area [m<sup>2</sup>]

In maniera analoga a quanto descritto per il coefficiente di forma di Gravellius, anche per questo indice si associano forme allungate a valori superiori a 1. Per questo dato, il bacino oggetto di studio assume un valore di 1.47 [-].

Per quanto riguarda invece la propensione di un bacino a generare colate detritiche, si utilizza il numero di Melton (4.4). Esso è ottenuto dal rapporto tra il dislivello presente tra la quota maggiore del bacino e la quota della sezione di chiusura, e la radice quadrata dell'area del bacino (D'Agostino, 1996).

$$Me = \frac{\Delta H}{A^{0.5}} \quad (4.4)$$

dove  $\Delta H$  Dislivello bacino [m]  
 $A$  Area [m<sup>2</sup>]

Per valori inferiori a 0.5 [-] si attendono fenomeni di alluvionamento rapido, composti da acqua e fango, mentre per valori superiori a 0.5 [-] si attendono eventi contraddistinti da una viscosità maggiore. Il bacino del Rio Gatria ha restituito un valore di 0.62 [-], suggerendo la sua propensione a generare eventi solido-liquidi di natura tendenzialmente viscosa.

Infine, l'ultimo parametro utilizzato per descrivere il bacino oggetto di studio è rappresentato dalla densità di drenaggio (4.5). Essa esprime il rapporto esistente tra la lunghezza complessiva del reticolo idrografico e l'area del bacino. I fattori che concorrono all'estensione con la quale si sviluppa un reticolo idrografico sono differenti, come ad esempio la topografia, litologia e la presenza di copertura vegetale (D'Agostino, 2022).

$$D_r = \frac{L_r}{A} \quad (4.5)$$

dove  $L_r$  Lunghezza del reticolo idrografico [m]  
 $A$  Area [m<sup>2</sup>]

Per il presente caso studio, il bacino osservato possiede una densità di drenaggio di 5.71 km/km<sup>2</sup>, ponendosi in posizione intermedia tra i valori di riferimento, i quali variano tra 1-10 km/km<sup>2</sup>.

Le analisi dei parametri morfometrici sono state eseguite sia per il bacino del Rio Gatria, che per i sottobacini presentati nel capitolo 4.2.2, utilizzati per la taratura del modello.

Nella Tabella 4.1, in cui vengono riportati i valori dei parametri morfometrici, vengono presentati in forma riassuntiva anche i dati esposti nel capitolo 4.2.1.

| Parametro                                                               | Sigla      | Bacino  |         | Sottobacino |         |         |                  |
|-------------------------------------------------------------------------|------------|---------|---------|-------------|---------|---------|------------------|
|                                                                         |            | Gadria  | A       | B           | C       | D       |                  |
| Superficie                                                              | A          | 6.26    | 0.44    | 0.66        | 0.80    | 1.56    | km <sup>2</sup>  |
| Perimetro                                                               | P          | 14.03   | 3.91    | 4.70        | 6.47    | 7.87    | km               |
| Quota massima                                                           | $h_{max}$  | 2944.94 | 2524.97 | 2417.23     | 2507.71 | 2350.97 | m s.l.m.         |
| Quota media                                                             | $h_m$      | 2118.15 | 2528.69 | 2297.49     | 2288.20 | 2221.51 | m s.l.m.         |
| Quota sezione di chiusura                                               | $h_0$      | 1390.84 | 1389.84 | 2096.72     | 1844.70 | 1622.41 | m s.l.m.         |
| <b>Bacino idrografico</b><br>Rilievo del bacino                         | $\Delta h$ | 1554.10 | 1135.14 | 320.50      | 663.01  | 728.56  | m                |
| Pendenza media del bacino                                               | $i_m$      | 40.06   | 45.60   | 37.51       | 39.42   | 41.22   | °                |
| Pendenza media del bacino                                               | $i_m$      | 84.08   | 102.13  | 76.75       | 82.21   | 87.60   | %                |
| Coefficiente di forma di Gravelius                                      | F          | 1.57    | 1.66    | 1.62        | 2.03    | 1.76    | [-]              |
| Indice di compattezza                                                   | $I_c$      | 1.47    | 1.31    | 1.31        | 2.06    | 1.55    | [-]              |
| Numero di Melton                                                        | Me         | 0.62    | 1.72    | 0.40        | 0.74    | 0.58    | [-]              |
| Lunghezza del reticolo idrografico                                      | $L_r$      | 35.76   | 2.02    | 2.42        | 5.43    | 8.57    | km               |
| Densità di drenaggio                                                    | $D_r$      | 5.71    | 4.63    | 3.67        | 6.81    | 5.47    | km <sup>-1</sup> |
| Lunghezza del collettore principale                                     | $L_c$      | 3.68    | 0.86    | 1.06        | 1.84    | 1.94    | km               |
| <b>Reticolo idrografico</b><br>Pendenza media del collettore principale | $i_{nc}$   | 17.15   | 26.42   | 28.29       | 25.70   | 23.78   | °                |
| Pendenza media del collettore principale                                | $i_{nc}$   | 30.87   | 49.69   | 53.82       | 48.13   | 44.07   | %                |
| Lunghezza del tratto in esame                                           | $L_t$      | 2.89    | -       | -           | -       | -       | km               |
| Pendenza media del tratto in esame                                      | $i_{nt}$   | 13.75   | -       | -           | -       | -       | °                |
| Pendenza media del tratto in esame                                      | $i_{nt}$   | 24.47   | -       | -           | -       | -       | %                |

Tabella 4.1 – Parametri morfometrici del bacino del Rio Gadria e dei suoi sottobacini

## 4.3 Conoide alluvionale

La morfologia generata dal susseguirsi degli eventi di colata detritica e di altri fenomeni di trasporto solido assume il nome di conoide alluvionale o conoide di deiezione. Per il presente caso studio, esso rappresenta il secondo maggiore conoide della Val Venosta, in quanto si estende per una superficie di circa 10 km<sup>2</sup>, ed è costituito da un volume di circa 1'350 milioni di metri cubi di materiale (Jarman et al., 2011).

Il conoide ha origine a partire dalla sezione di chiusura dei bacini del Rio Gatria e del Rio Strimm alla quota di 1'390.84 m s.l.m., sviluppandosi per il primo tratto condizionato dai rilievi montuosi. Una volta terminato il confinamento, il conoide occupa il fondovalle, fino a raggiungere le pendici delle catene montuose situate a sud. Qui, incontra il fiume Adige, che ne delimita il margine inferiore e gli conferisce un andamento sinuoso influenzato dalla dinamica del fiume stesso.

I propri confini laterali invece si estendono, nella sezione massima, per circa 6'350 m a partire dalla zona artigianale di Lasa, sino al centro abitato di Silandro, luogo dove raggiunge la quota minima pari a 714.90 m s.l.m. (Figura 4.18).

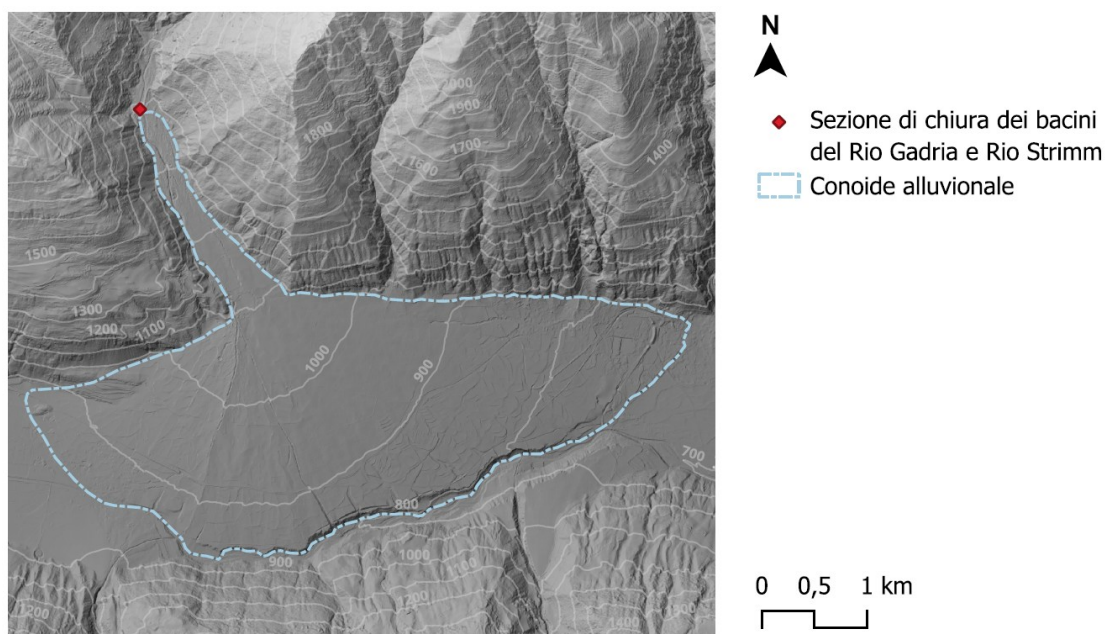


Figura 4.18 – Mappa dell'altimetria del conoide (Provincia Autonoma di Bolzano, 2025d)

Per quanto riguarda la pendenza, il conoide presenta un valore medio pari a  $7.65^\circ$ , che varia tra un minimo di  $0^\circ$  nelle aree urbanizzate di Lasa, ad un massimo di  $70.97^\circ$  in corrispondenza del fiume Adige (Figura 4.19).

In riferimento invece all'esposizione, esso si presenta orientato prevalentemente a SE, nonostante dimostri comunque una superficie consistente orientata verso SO-O posta nell'area occidentale (Figura 4.20).

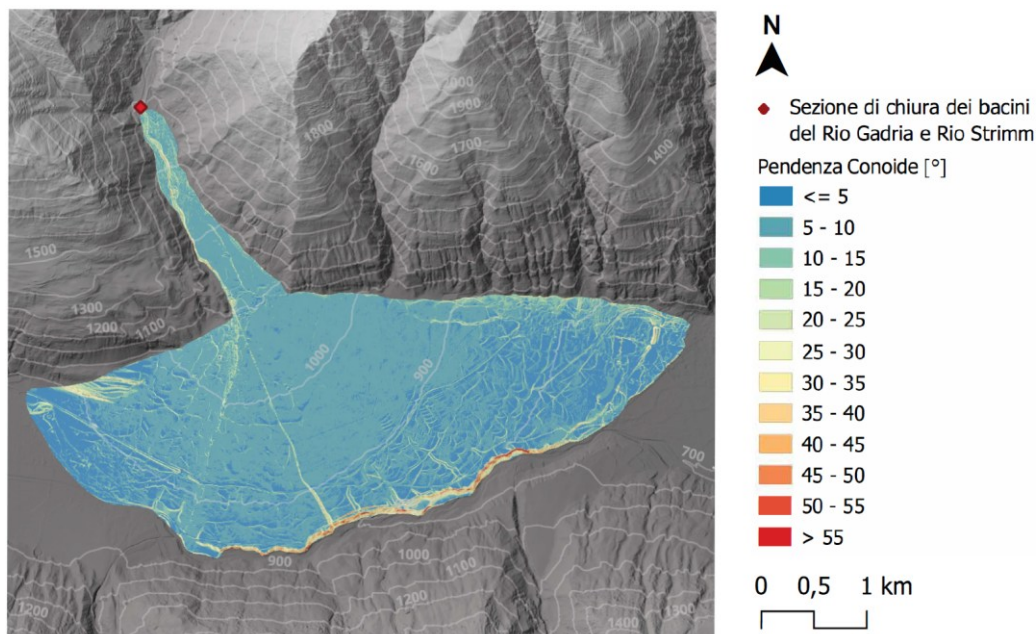


Figura 4.19 – Mappa delle pendenze in gradi ( $^\circ$ ) del conoide

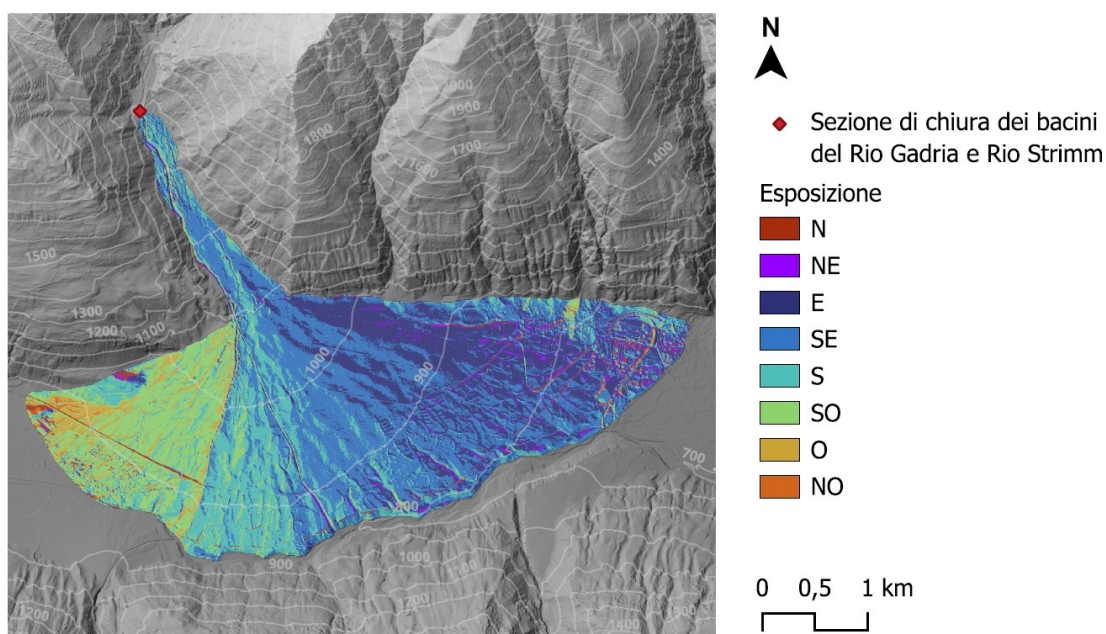


Figura 4.20 – Mappa dell'esposizione del conoide

L'uso del suolo si dimostra maggiormente eterogeneo rispetto a quanto presentato per la descrizione del bacino del Rio Gatria in quanto la presenza delle attività antropiche nel fondovalle è agevolata dalle ridotte pendenze. Su di esso si sviluppano parte dei centri abitati di Lasa e Silandro e le frazioni di Alliz e Corces. La restante superficie è impiegata per uso agricolo come seminativo e per la coltivazione di mele (Figura 4.21).

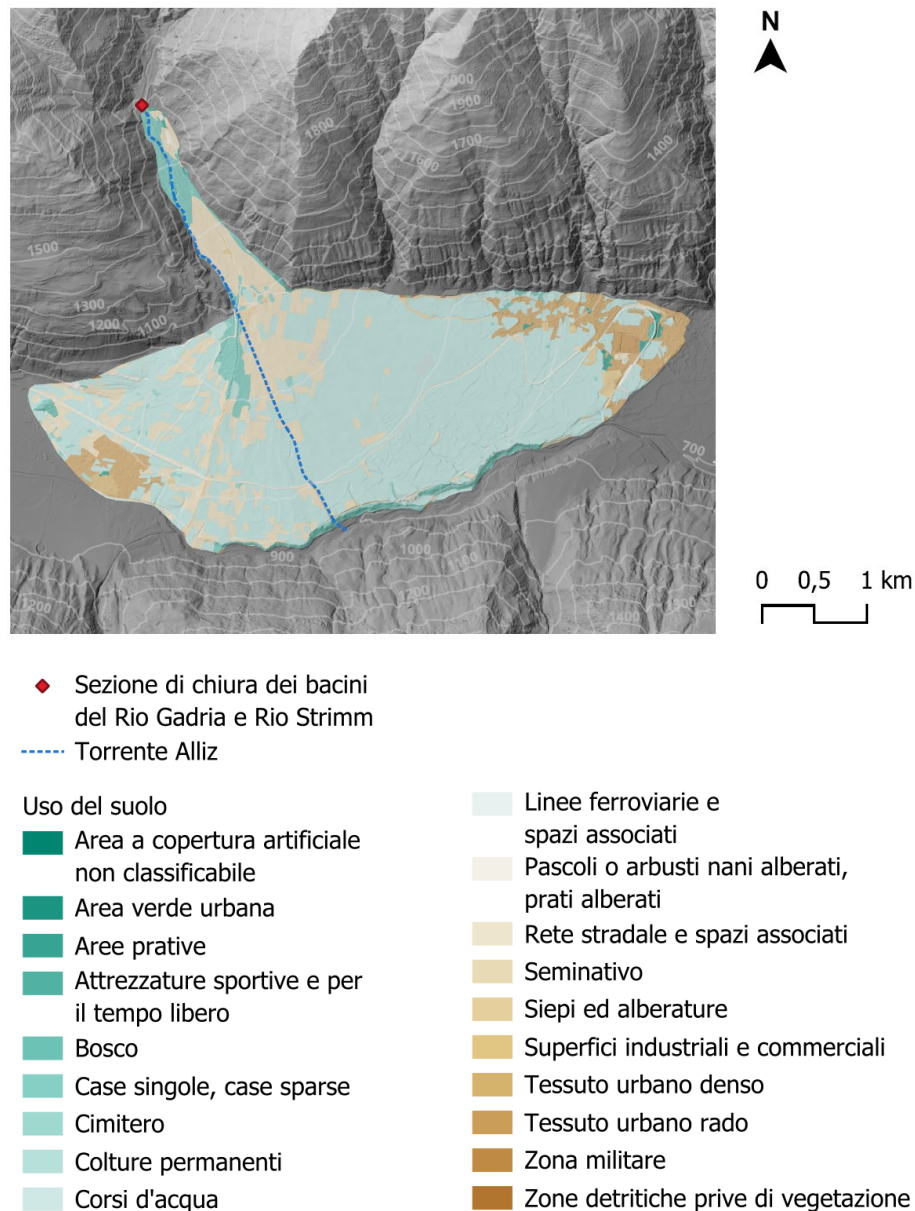
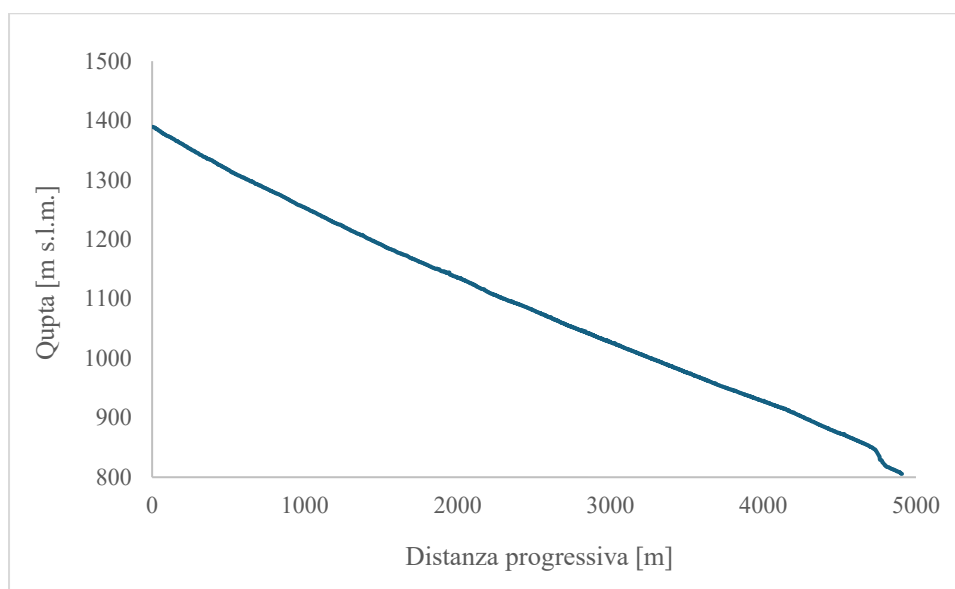


Figura 4.21 – Mappa di uso del suolo del conoide (Provincia Autonoma di Bolzano, 2025c)

Su di esso scorre il canale di smaltimento dei bacini del Rio Gatria e del Rio Strimm, che fluisce in maniera pseudo rettilinea nel fiume Adige (Figura 4.21). Il torrente Alliz, che nasce in corrispondenza della briglia filtrante posta all'apice del conoide, si

sviluppa per una distanza orizzontale di circa 5'000 m e si suddivide in due macro-tratti in corrispondenza dell'omonima località: il primo contraddistinto da un andamento naturale e sistemato con una serie di briglie di trattenuta, il secondo caratterizzato da una sezione più profonda e confinata, che presenta fondo e sponde artificiali.

Nel suo complesso, la pendenza del torrente assume un valore medio dell'11.90% (6.78°), originandosi alla quota di 1'390.84 m s.l.m. e confluendo nell'Adige alla quota di 805.66 m s.l.m. (Figura 4.22).



*Figura 4.22 – Profilo longitudinale del torrente Alliz*

## 4.4 Storia del bacino e del conoide

Il bacino del Rio Gatria è contraddistinto da una storia ricca di eventi, che nel corso degli anni hanno modellato il paesaggio del fondovalle, interessando spesso le attività umane.

Come descritto nel capitolo precedente, ad oggi il Rio Gatria convoglia con il Rio Strimm a monte della località di Alliz, dove nasce l'omonimo torrente, che scorre verso valle sfociando infine nel fiume Adige.

Il territorio attraversato da questo torrente è il risultato del susseguirsi di un'elevata serie di eventi solido-liquidi, che nel tempo si sono accumulati gli uni sugli altri (Figura 4.23).

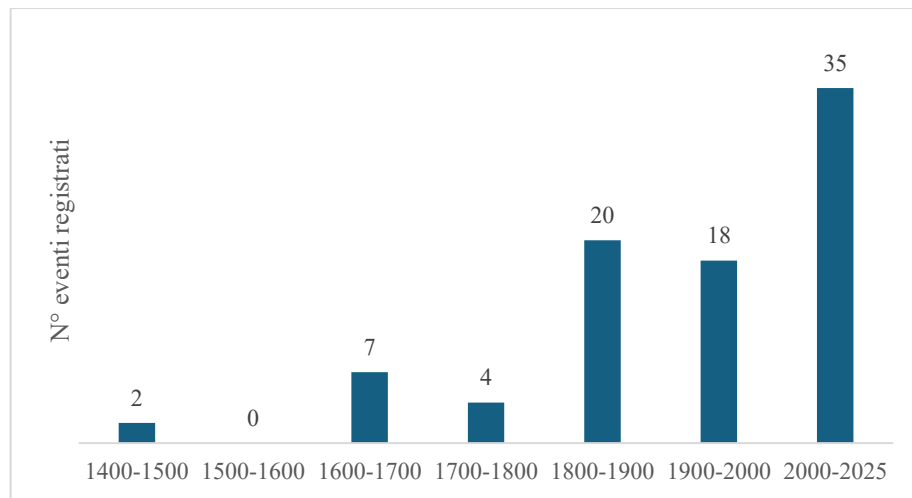


Figura 4.23 – N° eventi dal 1400 a oggi (Raich, 2011; UniBZ, 2025)

Dal grafico soprastante si può notare una tendenza positiva, che ha raggiunto il culmine nell'ultimo periodo. Seppur si possa attribuire parte dell'aumento della frequenza ai cambiamenti climatici (IPCC, 2021), bisogna comunque considerare la crescita della conoscenza nei confronti delle colate detritiche e del conseguente sviluppo di nuove tecnologie atte ad acquisire maggiori informazioni verso quest'ultime (4.5). Per questo motivo è necessario valutare anche la componente antropica e sociale, la quale fino a pochi decenni fa si basava unicamente sugli avvistamenti degli abitanti coinvolti.

Presso l'area oggetto di studio si sviluppano parte dei Comuni di Lasa e di Silandro, i quali cominciarono a collaborare diversi secoli fa per la gestione delle acque derivanti dai bacini a monte.

Più precisamente, i primi interventi vennero realizzati a seguito della formazione del nuovo canale di scorrimento del Rio Gatria (*Fassatgraben*), verificatosi a causa di un evento di forte magnitudo avvenuto nei primi anni del 1400 (Figura 4.24).

Numerosi furono poi gli interventi che interessarono la parte finale del canale di scorrimento dei due corsi d'acqua, i quali spesso consistettero unicamente nello sgombero del materiale presente in alveo.

Fu solo all'inizio del 1800 che vennero realizzate le prime opere idrauliche. L'intervento che ebbe il maggiore impatto sulla configurazione del canale di scorrimento terminale venne attuato nel 1888, attraverso la creazione di un nuovo tracciato (*Markgraben*) con lo scopo di allontanare i deflussi dall'abitato di Lasa (Figura 4.24) (Raich, 2011).

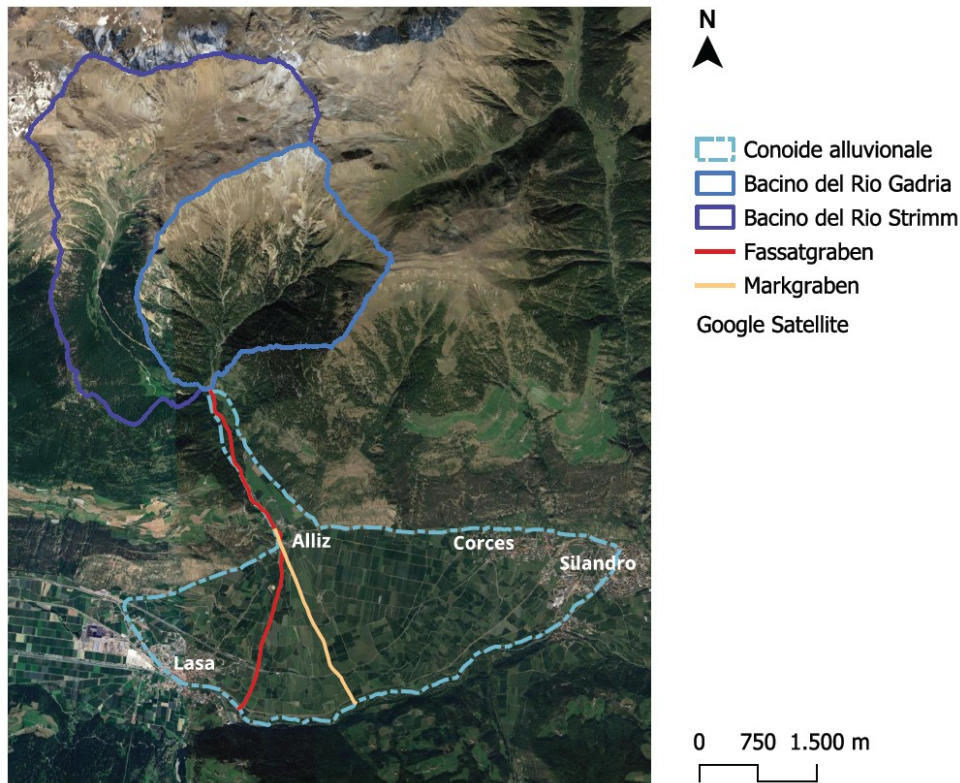


Figura 4.24 – Evoluzione temporale dei canali di scorrimento del bacino del Rio Gadria

Durante il 1900 vennero eseguiti i primi interventi nella parte superiore del bacino tramite sbarramenti, lavori di stabilizzazione della falda, rimboschimenti e briglie di consolidamento. Anche negli anni successivi si procedette con ulteriori interventi, mirati al consolidamento dei versanti, i quali permisero una diminuzione dei processi detritici.

Nel 1975 venne realizzata la briglia filtrante a chiusura del Rio Gadria e del Rio Strimm con un bacino di trattenuta capace di ospitare fino ad un massimo di 70'000 m<sup>3</sup> di materiale (Figura 4.25). Il filtro della briglia è costituito da setti orizzontali posti ad interdistanze differenti, e presenta una geometria trapezoidale, che si sviluppa per un'altezza di 9 m, una base inferiore di 2 m ed una superiore di 4 m (Raich, 2011).



*Figura 4.25 – Briglia filtrante posta a chiusura del piazzale di deposito*

La costruzione di quest'ultima ha impedito ad ogni evento di colata detritica successivo di raggiungere l'abitato di Alliz (Macconi, 2025). Per questo motivo, durante il processo di realizzazione delle mappe del pericolo del presente caso studio, non verranno considerati gli eventi storici accaduti lungo il canale di smaltimento. Tali eventi, infatti, non sono più considerabili rappresentativi della condizione attuale, in quanto con la presenza della briglia questi vengono mitigati completamente più a monte.

## **4.5 Sistema di monitoraggio**

Nel bacino oggetto di studio è presente un sistema di monitoraggio installato nel 2011 da parte della Protezione Civile e del dipartimento di Ingegneria Idraulica della Provincia Autonoma di Bolzano, supportato dal contributo dell'Università di Bolzano e di Bologna, con lo scopo di raccogliere informazioni sui fenomeni da colata detritica che si verificano in esso (Comiti et al., 2014; DeAndreis, 2021).

Il sistema di monitoraggio interessa anche il bacino del Rio Strimm, ma dal momento che la maggior parte degli eventi da colata detritica si verificano nel Rio Gadria, la strumentazione è concentrata prevalentemente lungo quest'ultimo (Comiti et al., 2014).

Di seguito si presenta la localizzazione (Figura 4.26) e la tipologia (Tabella 4.2) della totalità degli strumenti installati nella primavera del 2011, presentata nello studio di Comiti et al. (2014).

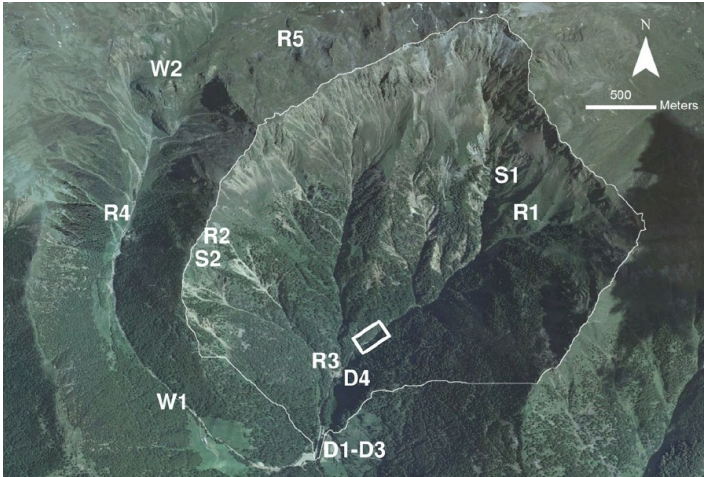


Figura 4.26 – Localizzazione del sistema di monitoraggio installato presso i bacini del Rio Gatria e del Rio Strimm (Comiti et al., 2014)

| Tipo di strumento        | Marca e modello        | Locazione      | Numero | Intervallo di tempo |
|--------------------------|------------------------|----------------|--------|---------------------|
| Pluviometro              | Lambrecht 1518         | R1, R2, R3, R4 | 4      | 1 min               |
| Pluviometro              | Campbell Arg 100       | R5             | 1      | 10 min              |
| Sensore radar            | Vegapulse 68           | D2, D3, D4     | 3      | 1 s                 |
| Geofono                  | Pasi 10 HZ SIS-902-050 | D2, D3, D4     | 5      | 1 s                 |
| Videocamera              | Mobotix M12            | D1, D2         | 3      | 10 fps              |
| Trasduttore di pressione | Keller DCX-22 VG       | W1, W2, S2     | 8      | 10 min              |
| Trasduttore di pressione | OTR OG200/R            | S1             | 6      | 10 min              |
| Sonda di umidità FDR     | Spectrum SMIOO         | S2             | 28     | 10 min              |

Tabella 4.2 – Strumentazione installata presso i bacini del Rio Gatria e del Rio Strimm (Comiti et al., 2014)

Per quanto riguarda il presente caso studio, sono stati utilizzati come riferimento per la fase di taratura del modello, i dati acquisiti dal pluviometro R5 (osservato essere il più gravoso in termini di precipitazioni registrate) e dall'idrometro radar D2, situati rispettivamente nella parte superiore del bacino Strimm e nella parte inferiore del bacino presso il “Campo base” (Figura 4.27).

In particolare, quest’ultimo strumento (D2) consta in un sensore radar capace di emettere degli impulsi che gli permettono di analizzare l’eco ricevuto dal target, rappresentato dal fondo dell’alveo o dalla superficie della colata. Da esso risulta quindi possibile determinare la distanza del sensore dal target e di conseguenza lo spessore della massa transitante (DeAndreis, 2021).

Il sensore viene sospeso al di sopra del corso d'acqua tramite un'apposita piastra detta "slitta", sostenuta e attraversata da due cavi in acciaio, i quali permettono di ritirare lo strumento con facilità in caso di interventi di manutenzione.



*Figura 4.27 – Idrometro D2*



## 5 CALCOLO DEGLI IDROGRAMMI SOLIDO-LIQUIDI D'INNESCO

La determinazione degli idrogrammi solido-liquidi d'innescò rappresenta il passaggio che consente di applicare la precipitazione al bacino. Nel presente caso studio, le tipologie di precipitazione utilizzate sono state due: piogge registrate da eventi realmente accaduti utilizzati per la fase di taratura del modello D.F.R.M., e piogge regolarizzate che derivano dallo studio statistico-probabilistico delle precipitazioni, il quale permette di restituire un'altezza di precipitazione cumulata, corrispondente ad una qualsiasi durata, per i tempi di ritorno richiesti dalla normativa (2.5).

### 5.1 Determinazione della Linea Segnalatrice di Possibilità Pluviometrica

Prima di parlare della Linea Segnalatrice di Possibilità Pluviometrica (LSPP), risulta necessario definire il concetto di Tempo di Ritorno (TR). Esso corrisponde al numero di anni entro il quale un evento di precipitazione assume una probabilità di essere eguagliato o superato ( $F'(x)$ ) mediamente una sola volta (D'Agostino, 2022).

$$TR = \frac{1}{F'(x)} = \frac{1}{1 - P(x)} \quad (5.1)$$

dove  $F'(x)$  Probabilità di eguagliamento o superamento  
 $P(x)$  Probabilità di non eguagliamento o superamento

Da essa si può quindi affermare che:

$$P(x) = \frac{TR - 1}{TR} \quad (5.2)$$

La LSPP rappresenta la funzione che permette di individuare il valore di precipitazione atteso di un evento, in relazione alla sua durata, per un determinato tempo di ritorno.

$$h = a * t^n \quad (5.3)$$

dove  $t$  Durata della precipitazione  
 $a$  e  $n$  Parametri derivanti dall'analisi statistico-probabilistica dei massimi di precipitazione osservati per le durate considerate e che dipendono da TR

Nel presente caso studio, l'analisi delle piogge è stata condotta attraverso l'utilizzo dell'approccio MEV (Metastatistical Extreme Value), introdotto da Marani & Ignaccolo (2015). La metodologia da essi proposta utilizza tutti i dati di precipitazione disponibili, differendo così dalle altre classiche assunzioni che invece si concentrano sugli eventi estremi.

Essa, quindi considera come variabili stocastiche sia i parametri che definiscono le funzioni di distribuzione cumulata, le quali risultano utili a descrivere gli eventi ordinari che accadono con frequenza annuale, sia il loro relativo numero di occorrenze.

In riferimento a quanto sopra descritto, la distribuzione secondo l'approccio MEV si articola come di seguito:

$$\zeta(x) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M [W(x, \lambda_j, k_j)]^{n_j} \quad (5.4)$$

dove  $x$  Intensità oraria di precipitazione  
 $M$  Numero di anni del database  
 $W(x, \lambda_j, k_j)$  Funzione di distribuzione cumulata di Weibull adattata sugli  $n_j$  eventi ordinari dal j-esimo anno

La distribuzione di Weibull viene adattata mediante il metodo degli L-Momenti ai dati annuali osservati. In seguito, il quantile corrispondente al tempo di ritorno scelto viene determinato attraverso l'inversione numerica della distribuzione MEV.

Per il presente caso studio, di seguito si presentano le LSPP individuate attraverso l'applicazione del procedimento sopra descritto (Figura 5.1, Figura 5.2, Figura 5.3).

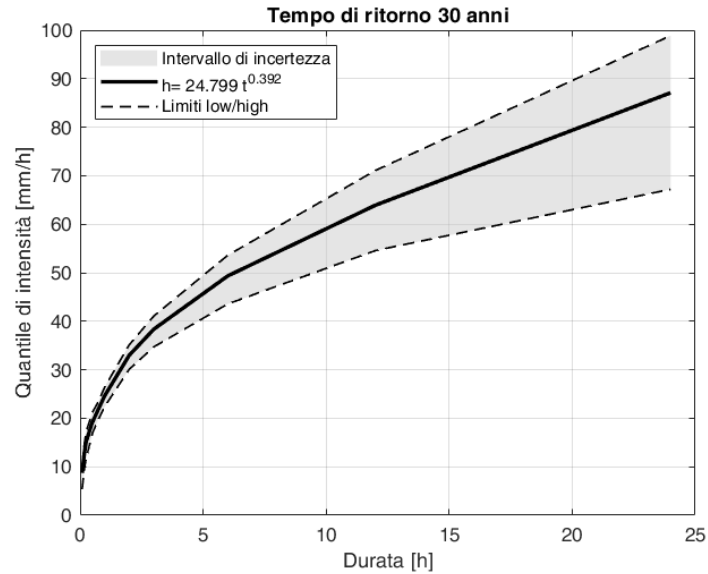


Figura 5.1 – LSPP per il tempo di ritorno di 30 anni

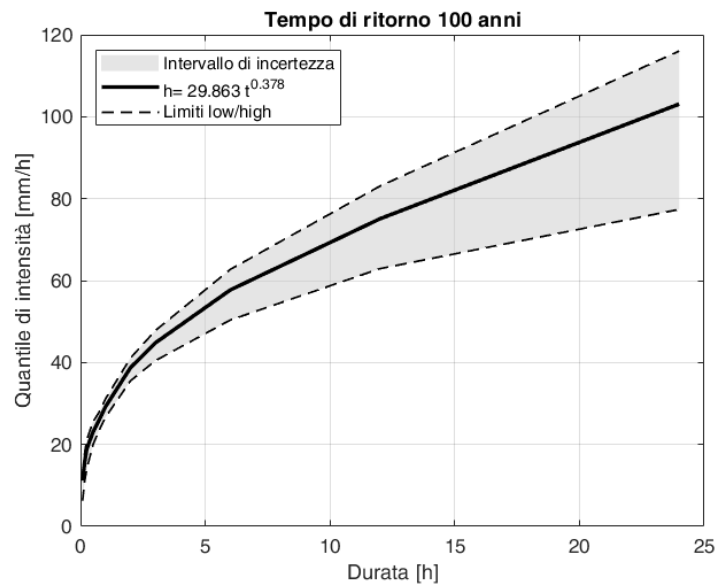


Figura 5.2 – LSPP per il tempo di ritorno di 100 anni

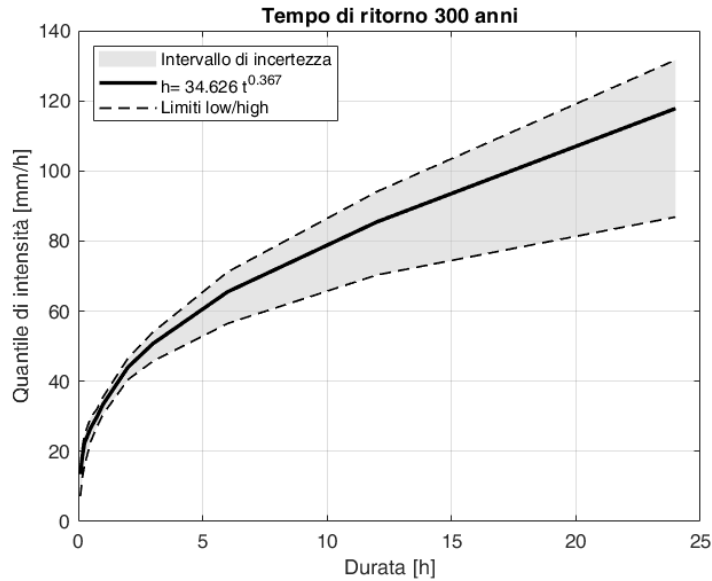


Figura 5.3 – LSPP per il tempo di ritorno di 300 anni

## 5.2 Modellazione idrologica

La precipitazione determinata dalla LSPP, oppure registrata dal pluviometro R5 presente nel bacino del Rio Gadria, viene utilizzata in seguito nella fase di modellazione idrologica, al fine di individuare l'idrogramma che si genera alla sezione di chiusura del bacino, il quale risulta fondamentale per la successiva determinazione dell'innescò della colata detritica e del conseguente idrogramma solido-liquido.

Le componenti su cui si basa la modellazione idrologica ad evento sono il calcolo della pioggia efficace e la propagazione di quest'ultima verso la sezione di chiusura.

I metodi ad oggi maggiormente utilizzati per la determinazione della prima componente sono quelli dell'SCS-CN (Borga et al., 2007; Botter & Rinaldo, 2003; Grimaldi et al., 2012) e di Green-Ampt (Grimaldi et al., 2013; Rengers et al., 2016). In ambiente alpino, essi faticano a simulare correttamente l'andamento impulsivo degli idrogrammi misurati, portando talvolta ad una sottostima del valore del picco, in condizioni di parità di volume, del 50-75%.

La risoluzione di questo problema è stata proposta da Gregoretti et al. (2016) e Bernard et al. (2025), sulla base del precedente approccio elaborato da Grimaldi et al. (2013). Esso si basa sull'accoppiamento del metodo SCS-CN, con l'equazione di infiltrazione

di Horton semplificata al solo termine asintotico, la quale simula il contributo al deflusso superficiale della precipitazione che non si infila.

Questa nuova procedura, che assume il nome di SCS-CNH, produce deflusso superficiale nel momento in cui l'intensità di precipitazione ( $i$ ) supera la capacità di infiltrazione del terreno ( $f_c$ ), mentre il metodo SCS-CN in caso opposto.

Per quanto riguarda invece la seconda componente del modello, la propagazione del flusso viene differenziata a seconda che questo scorra su:

- Versante, dove la velocità di scorrimento dipende dalla scabrezza del terreno, e il percorso intrapreso viene determinato da ogni singola cella basandosi sulla sua direzione di massima pendenza;
- Reticolo, dove la propagazione segue il modello dell'onda cinematica diffusa proposto da Orlandini & Rosso (1996).

## 5.3 Modellazione per l'individuazione degli idrogrammi di innesco

Come descritto nel capitolo 1, perché avvenga l'innesco di una colata detritica c'è bisogno della presenza di un'onda di piena liquida, la quale provoca la mobilitazione del sedimento ad un determinato valore di portata, definito come portata critica ( $Q_{CRIT}$ ). Quest'ultimo dipende da differenti variabili, tra cui anche la pendenza del fondo e il diametro dei sedimenti.

Dallo studio condotto da Gregoretti & Dalla Fontana (2008), è emerso che  $q_{CRIT}$ , ovvero la portata di innesco per unità di larghezza del canale di scorrimento, corrisponde a quanto segue:

$$q_{CRIT} = 0.78 \frac{d_M^{1.5}}{\tan \vartheta^{1.27}} \quad (5.5)$$

|      |             |                                       |
|------|-------------|---------------------------------------|
| dove | $q_{CRIT}$  | Portata critica unitaria              |
|      | $d_M$       | Diametro medio dei sedimenti al fondo |
|      | $\vartheta$ | Pendenza del fondo                    |

I valori di progetto che vengono considerati per descrivere una colata detritica, utilizzati con lo scopo di dimensionare correttamente le opere volte alla sua gestione e contenimento, si basano sulla conoscenza del massimo valore al picco di portata ( $Q_p$ ), associato a precipitazioni di breve durata e di alta intensità, e sul massimo volume solido-liquido generato dall'evento, ottenuto da precipitazioni di lunga durata e di bassa intensità.

Il primo viene ottenuto utilizzando la relazione di (Lanzoni et al., 2017), sulla quale si è basato l'idrogramma proposto da Gregoretti et al. (2019), che segue il profilo triangolare assunto dal fenomeno durante il suo scorrimento (Figura 1.3).

$$Q_P = \frac{c_*}{c_* - c_F} Q_{PL} \quad (5.6)$$

|      |          |                                                                                                          |
|------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| dove | $Q_{PL}$ | Valore di picco dell'idrogramma liquido                                                                  |
|      | $c_*$    | Concentrazione volumetrica dei sedimenti a riposo sul fondo                                              |
|      | $c_F$    | Concentrazione volumetrica dei sedimenti al fronte (Lanzoni et al., 2017; aggiornata da Takahashi, 2007) |

$$c_F = \frac{\rho \tan \vartheta}{(\rho_s - \rho)(\tan \varphi_{qs} - \tan \vartheta)} Q_{PL} \quad (5.7)$$

|      |             |                                                             |
|------|-------------|-------------------------------------------------------------|
| dove | $\vartheta$ | Valore di picco dell'idrogramma liquido                     |
|      | $\varphi$   | Concentrazione volumetrica dei sedimenti a riposo sul fondo |

Per quanto riguarda il calcolo del volume solido-liquido ( $V_{SL}$ ), esso viene ottenuto dalla sommatoria della componente liquida, composta dal volume della pioggia efficace, dalla componente solida, rappresentata dai sedimenti reclutati, e dal volume liquido di saturazione:

$$V_{SL} = V_L + \frac{V_S}{c_*} \quad (5.8)$$

dove  $V_L$  Volume liquido derivante dalla pioggia efficace  
 $V_S$  Volume solido dei sedimenti nel flusso

La durata dell'idrogramma  $t_1$  corrispondente risulta pari a:

$$t_1 = \frac{2V_{SL}}{Q_P} \quad (5.9)$$

In riferimento invece alla concentrazione volumetrica solida ( $c$ ), essa viene considerata massima ( $c_F$ ) e costante fino al momento in cui si raggiunge il picco ( $t_p$ ), mentre a seguito di quest'ultimo le si associa un andamento decrescente in maniera lineare. Il valore medio della concentrazione una volta superato il picco di portata, risulta:

$$c_m = \frac{V_S - 0.5 c_F Q_P t_p}{V_{SL} - 0.5 Q_P t_p} Q_{PL} \quad (5.10)$$

Sulla base di quanto sopra descritto, il valore della concentrazione al tempo  $t_1$ , risulta quindi pari a:

$$c_1 = c_m - (c_F - c_m) = 2c_m - c_F \quad (5.11)$$

Se però le condizioni in cui scorre la colata detritica non le consentono di mantenere una concentrazione solida per tutta la durata del fenomeno, si può assistere ad un cambiamento di fase, tramite il quale diventa completamente liquida. L'istante in cui il miscuglio perde la propria componente solida ( $t_c$ ) è determinabile con la seguente formula:

$$t_c = 2 \frac{V_S - 0.5 c_F Q_P t_p}{c_F (V_{SL} - 0.5 Q_P t_p)} \quad (5.12)$$

Il secondo tipo di idrogramma, ovvero quello che massimizza il volume solido-liquido, deriva da un idrogramma di deflusso superficiale praticamente costante per tutta la sua

durata. Dal momento che quest'ultimo possiede dei valori ben inferiori rispetto a quello utilizzato per massimizzare il picco, la velocità del flusso, e così la velocità di erosione, non risulta tale da formare un fronte carico di sedimenti, e per questo l'idrogramma solido-liquido assume lo stesso andamento di quello riferito alla componente liquida, caratterizzato da un andamento della concentrazione solida costante.

Quest'ultima caratteristica permette di esprimere la portata solido-liquida come segue:

$$Q = \frac{V_{SL}}{V_L} Q_L \quad (5.13)$$

Il rapporto  $V_{SL}/V_L$  può essere espresso in funzione anche della concentrazione volumetrica di sedimento  $c = V_s/V_{SL}$ :

$$Q = \frac{V_L + V_s/c_*}{V} Q_L = \left(1 + \frac{V_s}{c_* V_L}\right) Q_L \quad (5.14)$$

$$Q = \frac{V_s/c}{V_L} Q_L = \frac{V/c}{V/c - V_s/c_*} Q_L = \frac{c_*}{c_* - c} Q_L \quad (5.15)$$

Nel presente caso studio, per la determinazione della precipitazione sono stati utilizzati i valori registrati dal sistema di monitoraggio presente nel bacino per la fase di taratura del modello. Mentre, le precipitazioni usate per l'elaborazione delle mappe del pericolo, sono state ottenute tramite l'utilizzo delle rispettive LSPP.

Per quanto riguarda invece le concentrazioni solide volumetriche degli idrogrammi associati alle sezioni di ingresso dalla 5000 alla 5003, queste sono state considerate costanti, sulla base delle conoscenze e valutazioni effettuate in campo durante il sopralluogo effettuato. Mentre in relazione alla modellazione dell'idrogramma di ingresso della sezione 5004, rappresentante il contributo del bacino Strimm considerato per la fase di individuazione dell'onda di piena da propagare lungo il conoide, si è applicato il metodo sopra descritto.

Infine, gli scenari rappresentati rispettivamente dall'idrogramma che massimizza il picco e dall'idrogramma che massimizza il volume solido-liquido, hanno costituito la base su cui è stata realizzata la mappatura del pericolo, dal momento che il primo

permette di restituire il massimo valore di velocità ( $v$ ), mentre il secondo il massimo valore derivante dalla sommatoria tra deposito e tirante nello stesso istante ( $h + M$ ) per ogni pixel del dominio. Ciò significa che per ogni scenario associato ai TR considerati sono stati applicati due differenti idrogrammi, allo scopo di individuare le aree soggette a pericolo da colata detritica.



## **6 MODELLO A CELLE PER LA PROPAGAZIONE IDRAULICA DI COLATE DETRITICHE (D.F.R.M.)**

Il Debris Flow Routing Model (D.F.R.M.) consiste in un modello a celle capace di simulare gli eventi di colata detritica, attraverso la semplificazione del fenomeno in un composto bifase di cui se ne considerano i processi di deposito ed erosione, tenendo conto dell'eventuale presenza di superfici inerosibili (Bernard et al., 2019). Il moto verso valle può verificarsi in più direzioni e viene calcolato sulla base del modello digitale del terreno (DEM), il quale si è dimostrato generare risultati scudenti per le risoluzioni pari o superiori a 4 x 4 m, mentre risultati più precisi per maglie a 1 x 1 m.

Il D.F.R.M. è stato sviluppato da Gregoretti et al. (2019) tramite il Dipartimento di Territorio e Sistemi Agro-Forestali (TESAF) dell'Università degli Studi di Padova e risulta disponibile presso il Sistema Informativo per la Gestione ed il Monitoraggio delle Informazioni e dei procedimenti Ambientali della Direttiva Alluvioni (SIGMA), gestito dall'Autorità di Bacino Distrettuale delle Alpi Orientali. Infatti, esso risulta applicabile solamente a questi territori in quanto è stato validato attraverso la simulazione di eventi noti avvenuti presso le Dolomiti bellunesi e trentine.

La modalità con la quale viene rilasciato risulta applicabile in ambiente QGIS (v. 2.x.x.), dal momento che l'interfaccia è stata sviluppata tramite il linguaggio Python. Per quanto riguarda invece il presente studio, le elaborazioni sono state effettuate con la versione eseguibile, aggiornata da Barbini et al. (2024), che comunque fa riferimento al contenuto dei manuali disponibili in allegato alla versione scaricabile online (Gregoretti et al., 2019).

Lo sviluppo del modello si è basata su una serie di assunzioni e ipotesi che vengono di seguito riportate:

1. la superficie libera in una cella è assunta orizzontale;
2. il volume solido-liquido in una cella risulta funzione della profondità della corrente od altezza del deflusso nella cella;
3. le direzioni di deflusso possibili sono 8;
4. il deflusso avviene sempre per dislivello topografico della superficie libera, ovvero da una cella con quota della superficie più alta ad una cella con quota della superficie libera più bassa;
5. le connessioni idrauliche sono il deflusso per gravità a moto uniforme per pendenze positive ed a stramazzo nel caso di contropendenza;
6. gli scambi di flusso e quantità di moto tra le celle avvengono in contemporanea.

Il lavoro di Gregoretti et al. (2019) si inserisce all'interno di un contesto che trova le proprie fondamenta nel modello realizzato da Zanobetti et al. (1970), elaborato per la simulazione dell'inondazione di aree rurali molto estese. La base su cui esso si fonda è la suddivisione del campo di moto in aree omogenee, chiamate celle, connesse idraulicamente tra loro mediante equazioni che descrivono il moto del miscuglio transitante.

In seguito, Chiang et al. (2012) hanno proposto un modello per la simulazione di eventi di colata detritica senza che venissero considerati i fenomeni di erosione e deposito. I percorsi intrapresi dal flusso seguono la massima pendenza determinata in base al DEM, il quale deve essere corretto tramite il riempimento delle eventuali depressioni presenti in esso.

## 6.1 Equazioni di governo del moto

### 6.1.1 Conservazione della massa e della quantità di moto

Il principio di conservazione della massa stabilisce che la variazione di massa o volume che si verifica in una cella è derivante dalla differenza tra la massa o volume entrante ed uscente. Di seguito si presentano le equazioni in forma differenziale della massa del miscuglio e della fase solida alla scala dell'unità fondamentale (cella) nell'ipotesi che la velocità della fase solida e liquida siano pari (Rosatti & Begnudelli, 2013):

$$A \frac{d(h + z)}{dt} = Q_E - Q_U \quad (6.1)$$

$$A \frac{d(ch + c_*z)}{dt} = cQ_E - cQ_U \quad (6.2)$$

|      |       |                                                             |
|------|-------|-------------------------------------------------------------|
| dove | $A$   | Area della cella $(\Delta x)^2$                             |
|      | $t$   | Tempo                                                       |
|      | $z$   | Quota del fondo                                             |
|      | $h$   | Profondità della corrente (altezza del flusso nella cella)  |
|      | $c$   | Concentrazione volumetrica della fase solida o di sedimento |
|      | $c_*$ | Concentrazione volumetrica dei sedimenti sul fondo          |
|      | $Q_E$ | Portata entrante dalle celle contigue                       |
|      | $Q_U$ | Portata uscente verso le celle contigue                     |

Le connessioni idrauliche tra celle sono regolate da due equazioni della conservazione della quantità di moto: la prima è quella del moto uniforme nel caso in cui il deflusso avviene a gravità (6.3), mentre la seconda è quella dello stramazzo in parete grossa (6.4).

$$Q = \Delta x C h w \sqrt{g h \sin \vartheta} \quad (6.3)$$

$$Q = \Delta x C_q s \sqrt{2g} (h - p)^{1.5} \quad (6.4)$$

|      |             |                                                                              |
|------|-------------|------------------------------------------------------------------------------|
| dove | $\Delta x$  | Lato della cella ( $A^{0.5}$ )                                               |
|      | $\vartheta$ | Angolo di inclinazione del fondo                                             |
|      | $C$         | Coefficiente di conduttanza (parametro che controlla la resistenza al moto)  |
|      | $C_q$       | Coefficiente di portata pari a quello dell'acqua (0.385)                     |
|      | $g$         | Accelerazione gravitazionale ( $9.81 \frac{m}{s^2}$ )                        |
|      | $w, s$      | Funzioni di peso necessarie per ripartire il flusso uscente in più direzioni |

### 6.1.2 Equazioni di governo dei processi di erosione e deposito

L'interazione tra i sedimenti presenti al fondo e la corrente, si riferisce alle equazioni di Exner e alla versione modificata di Egashira & Ashida (1987).

L'equazione di Exner (6.5), di seguito presentata, esprime la variazione della quota del fondo in funzione della differenza tra la velocità di deposizione (D) e di erosione (E) dello stesso:

$$\frac{dz}{dt} = D - E \quad (6.5)$$

La differenza tra innalzamento e abbassamento viene modellata adattando la relazione empirica di Egashira & Ashida (1987) così come segue:

$$E - D = K[(\sin \alpha_{max} - \sin \alpha_{LIM})V_{max}] \quad (6.6)$$

|      |                               |                                                                                                                       |
|------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| dove | $K$                           | Costante empirica compresa tra 0 e 1                                                                                  |
|      | $\alpha = \vartheta$          | In caso di deflusso a gravità                                                                                         |
|      | $\alpha = \theta + \vartheta$ | In caso di deflusso a stramazzo, con $\theta$ angolo di inclinazione della superficie libera rispetto all'orizzontale |
|      | $V_{max}$                     | Velocità di riferimento per il calcolo del deposito e dell'erosione                                                   |
|      | $\alpha_{max}$                | Angolo di inclinazione di massima pendenza                                                                            |
|      | $\alpha_{LIM}$                | Valore limite di $\alpha_{max}$ sopra e sotto il quale avvengono deposito ed erosione                                 |

Il deposito e l'erosione vengono calcolati solo se  $V_{max}$  e  $\alpha_{max}$  sono rispettivamente inferiori o superiori ai valori limite  $V_{LIM}$  e  $\vartheta_{LIM}$ .

In particolare, si ha:

- deposito se  $V_{max} < V_{LIM}$  e  $\alpha_{max} < \vartheta_{LIM}$
- erosione se  $V_{max} > V_{LIM}$  e  $\alpha_{max} > \vartheta_{LIM}$ .

I valori limite  $V_{LIM}$  e  $\vartheta_{LIM}$  acquisiscono valori differenti per il deposito ( $V_{LIM-D}$ ,  $\vartheta_{LIM-D}$ ) e l'erosione ( $V_{LIM-E}$ ,  $\vartheta_{LIM-E}$ ).

Erosione e deposito, vengono determinati lungo la direzione della massima velocità del flusso. Tale metodologia è stata applicata con lo scopo di evitare che si verifichino nello stesso momento entrambi i fenomeni in una stessa cella, e che si abbiano processi di deposito nella direzione trasversale a quella di massima pendenza, dove la velocità e l'inclinazione del fondo possono assumere valori molto bassi.

## 6.2 Schema numerico e condizioni interne ed al contorno

Il modello utilizza uno schema numerico esplicito, il quale calcola le portate uscenti e la variazione del fondo. Ciò avviene avendo note, per ogni cella attraversata dal flusso (bagnata) al tempo  $t$ , la profondità e la quota del fondo stesso. La velocità in ogni unità viene poi individuata mediando la quantità di moto con le portate transittanti associate.

Per ciascuna cella nell'intervallo di tempo successivo, vengono poi calcolati i valori di profondità, attraverso l'utilizzo dei valori di profondità, di variazione del fondo e della portata attraverso il loro inserimento nell'equazione di continuità.

Le portate uscenti vengono calcolate tramite la discretizzazione delle equazioni precedentemente esposte (6.3) e (6.4):

$$Q_{i,k} = \Delta x w_{i,k} C h_i \sqrt{g h_i \sin \vartheta_{i,k}} \quad z_i > z_k \quad (6.7)$$

$$Q_{i,k} = \Delta x s_{i,k} C_q \sqrt{2g} (h_i + z_i - z_k)^{1.5} \quad z_i < z_k \quad (6.8)$$

In cui  $w_{i,k}$ ,  $s_{i,k}$  e  $\sin\vartheta_{i,k}$ :

$$w_{i,k} = \frac{\sin \theta_{i,k}}{\sum_{k=1}^n \sin \theta_{i,k}} \quad (6.9)$$

$$s_{i,k} = \frac{h_i + z_i - z_k}{\sum_{k=1}^n (h_i + z_i - z_k)} \quad (6.10)$$

$$\sin\vartheta_{i,k} = \frac{z_i - z_k}{L_{i,k}} \quad (6.11)$$

dove  $Q_{i,k}$  Portata uscente dalla cella  $i$  e diretta verso la cella  $k$   
 $h_i$  Altezza del deflusso nella cella  $i$ ,  $z_i, z_k$  (quote del fondo delle celle  $i$  e  $k$ )  
 $L_{i,k}$  Distanza nello spazio tra i centri delle celle  $i$  e  $k$

Il volume di sedimento scambiato con il fondo nell'unità di tempo e per unità di area viene calcolato discretizzando l'equazione (6.6), assumendo che i fenomeni di deposito ed erosione siano controllati esclusivamente dal deflusso lungo la direzione dove si ha la massima velocità per la cella  $k$  ( $V_{max} = U_{i,k}$ ;  $\alpha_{max} = \alpha_{i,k}$ ) (6.12, 6.13):

$$D_i = -K_D (U_{LIM-D} - U_{i,k}) (\sin \alpha_{i,k} - \sin \alpha_{LIM-D}), \quad (6.12)$$

$$U_{i,k} \leq U_{LIM-D}, \sin \alpha_{i,k} \leq \sin \alpha_{LIM-D}$$

$$E_i = K_E U_{i,k} (\sin \alpha_{i,k} - \sin \alpha_{LIM-E}), \quad (6.13)$$

$$U_{i,k} \geq U_{LIM-E}, \sin \alpha_{i,k} \geq \sin \alpha_{LIM-E}$$

dove  $D_{i,k}, E_{i,k}$  Velocità di deposito ed erosione in funzione della velocità massima uscente  $U_{i,k}$  che si ha tra le celle  $i$  e  $k$   
 $U_{LIM-D}, U_{LIM-E}$  Velocità limite sotto e sopra le quali possono avvenire il deposito e l'erosione  
 $\alpha_{LIM-D}, \alpha_{LIM-E}$  Valori dell'angolo limite sotto e sopra le quali possono avvenire il deposito e l'erosione

con  $\alpha_{i,k}$  espressa dalla seguente equazione nel caso in cui il deflusso abbia moto uniforme:

$$\alpha_{i,k} = \tan^{-1} \frac{z_i - z_k}{cc \Delta x} \quad z_i > z_k \quad (6.14)$$

mentre secondo la seguente equazione nel caso in cui si abbia deflusso a stramazzo:

$$\alpha_{i,k} = \tan^{-1} \frac{z_i - z_k}{cc \Delta x} + \tan^{-1} \frac{h_i + z_i - h_k - z_k}{cc \Delta x} \quad z_i < z_k \quad (6.15)$$

dove  $cc \Delta x$  Distanza nel piano orizzontale tra i centri delle celle  $i$  e  $k$   
 $cc = 1$  Se la direzione fra la cella  $i$  e la cella  $k$  è parallela all'orizzontale od alla verticale  
 $cc = \sqrt{2}$  Se la direzione è a  $45^\circ$

Le equazioni di conservazione della massa del miscuglio (6.16) e della fase solida (6.17) integrate nel tempo si sviluppano rispettivamente come segue:

$$h_i^{t+\Delta t} = h_i^t + [E_i - D_i - \frac{1}{\Delta x^2} \sum_{k=1}^8 Q_{i,k}] \Delta t \quad (6.16)$$

$$c_i^{t+\Delta t} = \frac{1}{h_i^t + \Delta t} [c_i^t h_i^t + c_*(E_i - D_i) - \frac{1}{\Delta x^2} \sum_{k=1}^8 c_{i,k} Q_{i,k}] \Delta t \quad (6.17)$$

dove  $Q_{i,k}$  Portata scambiata tra la cella  $i$  e quella contigua  $k$  che è assunta positiva se uscente, negativa se entrante  
 $c_*$  Concentrazione volumetrica della fase solida al fondo  
 $c_i$  Concentrazione volumetrica della fase solida nella cella  $i$   
 $c_{i,k}$  Concentrazione volumetrica della fase solida relativa alla portata scambiata tra le due celle contigue  $i$  e  $k$   
 $\Delta t$  Passo temporale di calcolo

Il fondo viene assunto saturo, e con concentrazione volumetrica della fase solida pari a  $c_*$ , sia per erosione che per deposito. Il passo temporale di calcolo è determinato

attraverso l'imposizione della condizione di stabilità, usando un numero di Courant pari a 0.95 (Courant et al., 1967):

$$(U_{i,k} + \sqrt{gh_i}) \frac{\Delta t}{\Delta x} = 0.95 \quad , \quad \Delta t = 0.95 \frac{\Delta x}{U_{i,k} + \sqrt{gh_i}} \quad (6.18)$$

Ciò permette di rispettare la fisica della propagazione: un'onda in  $\Delta t$  non può oltrepassare  $\Delta x$ . Il calcolo di  $\Delta t$  viene eseguito ad ogni step per tutte le celle che propagano deflusso, e sulla base del risultato, si sceglie il valore minimo da attribuirgli.

Oltre a questo calcolo, esiste un controllo che viene effettuato sull'erosione e deposito a monte dell'applicazione dell'equazione (6.5) utilizzato per evitare che la colata non possa erodere o depositare in maniera indefinita. Questa verifica si basa sulla concentrazione volumetrica della fase solida ( $c$ ) presente in una cella. Infatti, per  $c > 0.9 c^*$ , ovvero il valore di concentrazione massimo ammissibile (Takahashi, 2007), l'erosione non viene più consentita, mentre per  $c < 0.05$  il deposito viene impedito. Al di sotto di questo valore,  $c$  potrebbe divenire negativa nel caso di un deposito consistente.

Ai controlli precedenti, si aggiunge quello basato sullo studio di Berger et al. (2011), i quali hanno osservato che l'erosione avviene principalmente durante il passaggio del fronte. Ciò risulta ragionevole perché esso è caratterizzato dalla profondità massima del flusso, che si traduce in un maggiore sforzo esercitato al fondo.

Perciò, l'erosione viene consentita solamente in presenza della condizione  $dh/dt > 0$ , che si verifica appunto al passaggio del fronte. Il controllo dell'oscillazione numerica viene effettuato tramite la seguente imposizione: la superficie libera della cella ricevente il deflusso non può superare, o al limite pareggiare, quella della cella di partenza da cui il deflusso si propaga.

In riferimento invece alle condizioni al contorno, queste differiscono a seconda che si tratti dell'entrata o dell'uscita, ma entrambe non sono soggette a deposito ed erosione.

Le celle si distinguono infatti in tre tipologie: celle in entrata, celle di propagazione, celle di uscita.

La propagazione dell'evento avviene a partire dalle celle di ingresso ( $i$ ), sulle quali viene distribuito il volume dell'idrogramma di riferimento. Al time step successivo, calcolato tramite l'equazione (6.18), il deflusso appena generato si dirige verso le celle adiacenti ( $i+1$ ), mentre al contempo le celle di ingresso, da cui quest'ultimo proveniva, si riempiono nuovamente. In maniera analoga a quanto avvenuto in precedenza, al terzo passo temporale, le celle ( $i+2$ ) vengono interessate dal volume derivante dalle celle ( $i+1$ ), le quali a loro volta ricevono il nuovo deflusso generato dalle celle  $i$ , che nel frattempo si sono nuovamente riempite.

Infine, il deflusso dalle celle di uscita verso l'esterno avviene a moto uniforme od a stramazza seguendo un'unica direzione, la quale può corrispondere alla massima pendenza (6.3) o al massimo dislivello topografico della superficie libera (6.4) (Bates & Roo, 2000). La direzione di massima pendenza, dal momento che il deflusso avviene verso l'esterno, viene determinata come la massima pendenza tra le celle di propagazione contigue alla cella contorno e quest'ultima.

## 6.3 Processi di controllo della propagazione

La propagazione idraulica di una colata detritica dipende dalla resistenza al moto e dai processi di deposito ed erosione. La prima controlla direttamente la velocità di propagazione, e indirettamente influisce anche sui fenomeni di deposito ed erosione. I secondi invece controllano direttamente il volume di sedimento trasportato, ed indirettamente la resistenza al moto tramite la concentrazione volumetrica solida ( $c$ ).

### 6.3.1 Resistenza al moto

La resistenza al moto dipende dal coefficiente di conduttanza ( $C$ ), il quale corrisponde al rapporto esistente tra la velocità media ( $U$ ) e la velocità di attrito ( $u_* = \sqrt{gh \sin \theta}$ ), ed è influenzato dai profili di velocità e dalla concentrazione solido-liquida della corrente. Nel caso di *stony debris flows* (1.2.2),  $C$  dipende dalla concentrazione della

fase solida, dal rapporto tra la profondità del deflusso ( $h$ ) e il diametro caratteristico dei sedimenti ( $d$ ), e dalla portata di deflusso superficiale innescante.

Tognacca (1999) e Lanzoni et al. (2017), osservano in laboratorio che la velocità e l'erosione dipendono dalla portata liquida con cui le colate detritiche hanno origine ( $Q_T$ ), purché esista parità delle altre condizioni. Dalla Figura 6.1 è possibile notare la proporzionalità diretta tra la conduttanza e la portata liquida di innesco, a seconda della pendenza del fondo.

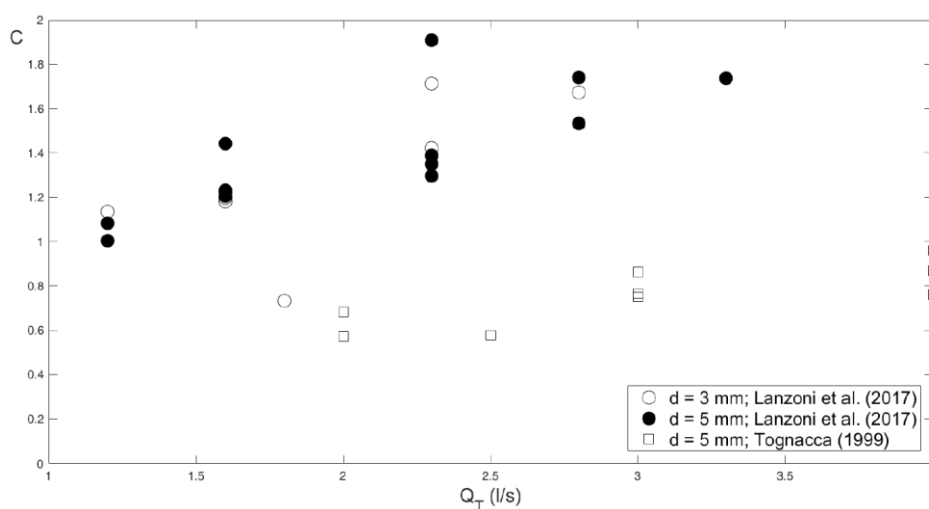


Figura 6.1 – Andamento di  $C$  rispetto a  $Q_T$  in esperimenti di laboratorio

Ciò che si osserva è che per un'inclinazione del fondo costante, la portata liquida di innesco aumenta, comportando un sensibile incremento della velocità e un lieve aumento della profondità, mentre la concentrazione volumetrica della fase solida rimane pressoché stabile.

Le osservazioni reali e gli esperimenti di laboratorio di Lanzoni et al. (2017) mostrano inoltre che il coefficiente di conduttanza diminuisce con la concentrazione volumetrica di sedimento (Figura 6.2).

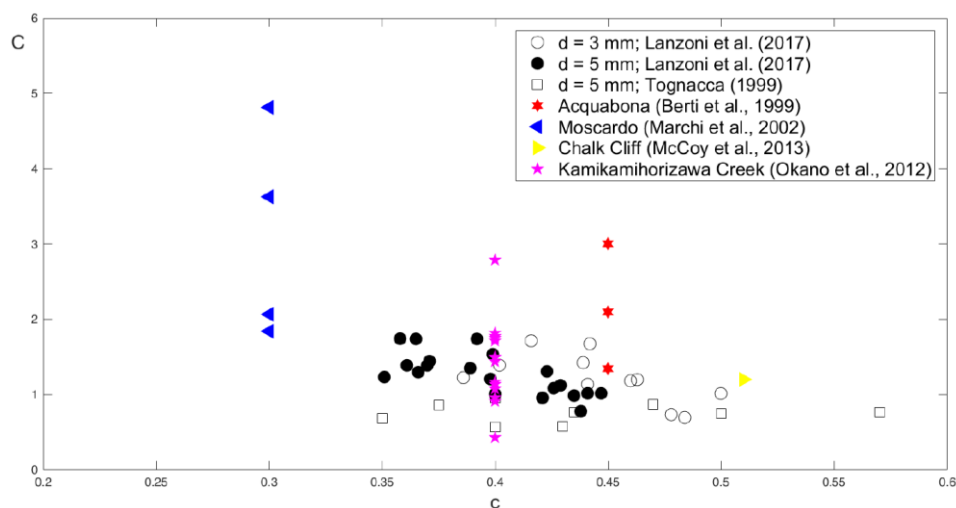


Figura 6.2 – Andamento della conduttanza ( $C$ ) rispetto alla concentrazione volumetrica di sedimento ( $c$ ) nelle colate detritiche di laboratorio e reali

I valori rappresentati nelle due figure precedenti (Figura 6.1, Figura 6.2) sono riferiti a colate detritiche di media magnitudo transistanti in un canale, sia di laboratorio che reali.

Nei casi di colate detritiche mature, i risultati variano da 1 a 3, mentre per quanto riguarda gli eventi a regime granulo inerziale, essi variano a seconda che il flusso sia canalizzato o meno, dimostrando rispettivamente un valore di  $C$  pari a 5 e a 3 (Bernard et al., 2019; Gregoret et al., 2016, 2018, 2019). Quest'ultimo è giustificato dalla dispersione del flusso, il quale comporta una riduzione del rapporto  $h/d$ .

### 6.3.2 Processi di erosione e deposito

I processi di deposito ed erosione vengono in genere modellati secondo tre approcci:

- Meccanico, il quale si fonda sul bilancio delle forze e della massa al fondo. In esso, la velocità di deposizione ed erosione ( $dz/dt$ ) è funzione della differenza tra lo sforzo tangenziale della massa sul fondo e lo sforzo di resistenza di quest'ultimo (Medina et al., 2007).

Nella sua versione semplificata non si considera la quantità di moto offerta al fondo da parte della corrente. Il limite di questo approccio consta nell'introduzione di valori empirici per l'ottenimento di alcuni parametri relativi ai bilanci delle forze alla conservazione della massa, in quanto per essi non esistono ancora espressioni di determinazione valide.

- Capacità di trasporto, per il quale si impone l'adattamento della concentrazione di equilibrio pari alla capacità di trasporto in condizioni di moto uniforme (Armanini et al., 2009). In questo caso la velocità di deposizione ed erosione risulta proporzionale alla differenza tra la concentrazione di sedimento della corrente e quella di equilibrio. Questo approccio ha l'inconveniente di produrre risultati poco realistici alla coda o quando viene utilizzato al di fuori del suo intervallo di validità.
- Leggi empiriche, che legano  $dz/dt$  a fattori di controllo quali la velocità e la concentrazione della fase solida della corrente (Brufau et al., 2000; Egashira et al., 2001; Frank et al., 2015). Come nel caso dell'approccio meccanico, anche in questo, vengono introdotti dei coefficienti empirici, validi strettamente per i casi studiati.

Il presente modello adotta un approccio empirico basato sui fattori di controllo che maggiormente condizionano i processi di deposito ed erosione, ovvero la velocità della corrente e l'inclinazione del fondo. I valori limite dipendono, invece, dalla reologia, dal tipo di deflusso (canalizzato o disperdente) e dal tipo di fondo. Per colate canalizzate in regime granulo-inerziale, gli studi di Lanzoni et al. (2017) e le osservazioni di campo di Jordan (1995), individuano valori limite di inclinazione del fondo per deposito ed erosione pari rispettivamente  $14^\circ$  e  $16^\circ$ .

I rilievi pre e post-evento delle colate avvenute a Rovina di Cancia (Borca di Cadore, BL) evidenziano l'esistenza di una forte correlazione tra i fenomeni di deposito ed erosione e l'inclinazione del fondo, confermando inoltre i valori limite proposti da Lanzoni et al. (2017). Infine, si osserva che la presenza di volumi di deposito ed erosione per valori rispettivamente superiori ed inferiori a  $15^\circ$  non è significativa. Ciò dipende dal valore della pendenza locale e dalla dinamica della propagazione.

### 6.3.3 Validazione del modello

La validazione del modello è avvenuta tramite la riproduzione di eventi noti, di cui è possibile conoscere le variabili coinvolte nel processo. In particolare, si sono analizzate

le colate detritiche avvenute sul Rio Lazer (Siror, TN) il 4/11/1966, a Rovina di Cancia (Borca di Cadore, BL) il 18/7/2009 e sul Ru Secco (San Vito di Cadore, BL) il 4/8/2015.

Dal confronto tra eventi reali e simulati, i risultati si dimostrano soddisfacenti, specialmente per quanto riguarda i valori di altezza di deposito ed erosione.

Anche gli indici  $F$  (Bates & Roo, 2000) e  $\Omega$  (Scheidl & Rickenmann, 2009; generalizzato da Gregoret et al., 2019) utilizzati per un'ulteriore verifica della similarità dei risultati, esprimono un esito positivo.

$$F = \frac{A_{OS_D} + A_{OS_E}}{A_{OS_D} + A_{O_D} + A_{S_D} + A_{OS_E} + A_{O_E} + A_{S_E}} \quad (6.19)$$

$$\Omega_\Psi = \frac{[(\Psi_{OS})_D + (\Psi_{OS})_E] - [(\Psi_S)_D + (\Psi_S)_E] - [(\Psi_O)_D + (\Psi_O)_E]}{(\Psi_{OS} + \Psi_O)_D + (\Psi_{OS} + \Psi_O)_E} \quad (6.20)$$

dove  $D, E$  Deposito ed erosione

$\Psi$  Area  $A$  o volume  $V$

con  $OS, O, S$  area osservata e simulata, area osservata e non simulata,  
area simulata e non osservata

L'indice  $F$  esprime la sovrapposizione tra simulato ed osservato, variando tra 0 ed 1, con 0.5 quale valore che rappresenta una corrispondenza intermedia tra simulato ed osservato. L'indice  $\Omega$  valuta l'accuratezza della simulazione, distinguendola tra positiva  $(A_{OS})_D$ , negativa  $(A_S)_D$  e mancante  $(A_O)_D$  (Scheidl & Rickenmann, 2009). Esso assume valore massimo 1 quando vi è totale corrispondenza, mentre 0 per rappresentare una situazione intermedia. Il limite inferiore per cui non esiste corrispondenza è negativo ma non è definito in quanto non esiste un rapporto stabilito tra  $\Psi_O$  e  $\Psi_S$ .



## 7 APPLICAZIONE DEL MODELLO D.F.R.M. AL CASO DI STUDIO

La simulazione degli eventi tramite il modello D.F.R.M. per la realizzazione delle mappe del pericolo sul conoide del bacino del Rio Gatria viene suddivisa in due domini differenti. Il primo serve per comprendere il comportamento del bacino ed estrarre la portata transitante attraverso la briglia filtrante posta alla fine di quest'ultimo, mentre il secondo serve per protrarre la portata sopra simulata al resto del collettore, il quale termina nel fiume Adige.

L'applicazione del caso studio al D.F.R.M. prevede la realizzazione di una serie di input, i quali si suddividono in raster di tipo TIFF o *floating raster* (costituito da file raster \*.flt e file di georeferenziazione \*.hdr) e file di testo \*.txt. Per quanto riguarda i raster, il modello esige che i file inseriti abbiano tutti quanti la stessa estensione e siano costituiti da una maglia di celle della stessa dimensione (Gregoretti et al., 2019).

In particolare, per l'applicazione del modello sono necessari i seguenti input:

- Dominio di calcolo (\*.flt e \*.hdr): costituisce lo spazio discretizzato in una griglia regolare di celle all'interno del quale viene propagato il flusso. Concretamente, è composto dal DEM, che fornisce una rappresentazione semplificata della morfologia del terreno, di cui è possibile conoscere la quota, la pendenza e l'esposizione di ogni unità che lo compone.  
Nel contesto della modellazione idraulica, l'estensione del dominio di calcolo viene limitata alla superficie che viene interessata dall'evento simulato, al fine di evitare di allungare inutilmente le tempistiche di simulazione.
- Condizioni al contorno (\*.flt e \*.hdr): definiscono gli afflussi e i deflussi del sistema modellato ai limiti del dominio di calcolo attraverso le sezioni di ingresso (o di input), identificate dalla numerazione progressiva che parte da

5000, e le sezioni di uscita (o di output), identificate dalla numerazione progressiva che parte da 9000. Ad ogni sezione di ingresso viene associato un idrogramma di input, il quale rappresenta l'apporto idrologico derivante dal bacino a monte.

Il presente modello necessita che le sezioni di input e output siano costituite da una serie contigua di celle che segue le direzioni cardinali.

- Idrogramma di input (\*.txt): all'interno del file, che risulta unico per l'intero raster di condizioni al contorno, vengono associati gli idrogrammi a ciascuna sezione di ingresso. Il \*.txt è strutturato in tre colonne, la prima riferita al tempo (secondi), la seconda alla portata solido-liquida ( $m^3/s$ ) e la terza alla concentrazione solida (-). Gli idrogrammi vengono riportati gli uni di seguito agli altri, intervallati dal nome della "Sezione". La conclusione degli idrogrammi viene segnata attraverso la scritta "END", posta alla fine dell'ultima riga, separata da una riga vuota.
- Uso del suolo (\*.flt e \*.hdr): segue la stessa struttura del dominio di calcolo, però le celle identificano ognuna un codice di uso suolo.
- Caratteristiche di uso del suolo (\*.txt): è il file associato al raster di "Uso del suolo". La prima riga contiene l'intestazione della tabella, mentre quelle successive riportano i dati associati ad ogni uso del suolo. Tali dati rappresentano i parametri caratteristici di descrizione del comportamento idraulico del flusso per ogni cella, e sono:
  1. Coefficiente di conduttanza ( $C$ ), ovvero parametro che controlla la resistenza al moto: maggiore è il coefficiente di conduttanza, minore è la resistenza al moto;
  2. Identificativo per fondo ( $M$ ), mobile (1.0) o fondo fisso (0.0);
  3. Angolo inferiore limite per l'erosione ( $EI_A$ ), ovvero l'angolo ( $^\circ$ ) sopra il quale può avvenire il fenomeno di erosione;
  4. Velocità limite per l'erosione ( $EI_V$ ), ovvero la velocità (espressa in  $m/s$ ) minima necessaria per avere erosione;
  5. Angolo superiore limite per il deposito ( $DS_A$ ), ovvero l'angolo ( $^\circ$ ) sotto il quale può avvenire il fenomeno di deposito;
  6. Velocità limite per il deposito ( $DS_V$ ), ovvero la velocità (espressa in  $m/s$ ) massima ammissibile per avere deposito;

7. Valore della concentrazione solida del fondo ( $C_{fondo}$ );
  8. Identificativo per stabilire l'erosibilità del suolo ( $E_{lim}$ ), dove 0 suolo erodibile, 1 suolo inerosibile;
  9. Deposito inferiore ( $D_{inf}$ ), che rappresenta il coefficiente moltiplicativo da utilizzare nel calcolo del deposito inferiore. Se posto pari a 0, il deposito rimane condizionato da pendenza e velocità, mentre se assume valore maggiore di 0, allora esso viene calcolato nelle aree aventi pendenza inferiore alla pendenza indicata nel presente campo;
  10. Strutture ( $Str$ ), il quale permette di individuare le strutture di cui si vogliono calcolare gli sforzi di impatto e tangenziali del miscuglio;
  11. Ponti ( $Pon$ ), ovvero il parametro che indica la presenza di ponti o briglie. Se pari a 0, non vengono considerate le opere, se pari a 1, ne indica la presenza, mentre se maggiore di 2, utilizza l'apposito algoritmo probabilistico per stimare l'intasamento delle aperture;
  12. Note, le quali spesso riportano la descrizione dell'uso del suolo.
- Sezioni interne (\*.flt e \*.hdr): rappresentano le sezioni che registrano il passaggio del flusso attraverso le celle che le costituiscono. Ogni sezione viene nominata in maniera progressiva a partire da 1000. Le celle che non appartengono alle sezioni, in maniera analoga alle condizioni al contorno, possiedono valore *NoData*.

## 7.1 Processo di taratura del modello D.F.R.M. al bacino del Rio Gatria

Come descritto nel capitolo precedente, il modello D.F.R.M. è stato validato su eventi avvenuti presso le Dolomiti bellunesi e trentine. Da questo processo sono state sviluppate le conoscenze relative alla descrizione del comportamento di questi territori nei confronti delle colate detritiche che non risultano quindi applicabili ad altri contesti.

Per questo motivo, il processo di applicazione del D.F.R.M. al presente caso studio ha dovuto attraversare una fase di taratura, allo scopo di calibrare i parametri che concorrono alla determinazione del moto del flusso.

Al fine di poter individuare i corretti parametri per la modellazione idraulica, si sono utilizzati degli eventi noti, di cui sono stati rilevati il volume sedimentato in piazzale e il picco di portata rilevato dal sistema di monitoraggio presente nel bacino (4.5). In particolare, il procedimento di calibrazione si è sviluppato inizialmente solo sul primo evento considerato, il quale ha permesso di definire i parametri dell'uso del suolo e degli apporti dei sottobacini contribuenti. Quanto valutato per questo evento, è stato in seguito confermato sull'evento dell'anno precedente, mostrando pertanto una buona coerenza e stabilità dei parametri calibrati.

### 7.1.1 Descrizione degli eventi usati per la taratura del modello

Gli eventi utilizzati per la taratura del modello sul bacino del Rio Gatria sono riferiti alle colate detritiche avvenute nelle date 26/07/2019 e 10/08/2020. Tali eventi sono stati scelti per il processo di calibrazione in quanto rientrano all'interno della selezione effettuata da parte dell'Università degli Studi di Bolzano, che gestisce il sistema di monitoraggio presente nel bacino.

Il primo si è verificato tra le 11:35 e le 12:30, per una durata complessiva di 55 minuti. La precipitazione ha assunto una distribuzione a campana simmetrica, raggiungendo il picco a mezzogiorno, con un valore di 4.5 mm, e accumulando un'altezza di pioggia complessiva di 16.4 mm. Il tempo di ritorno associabile all'evento è di circa 10 anni per la precipitazione caduta nei 30 minuti più intensi (Figura 7.1).

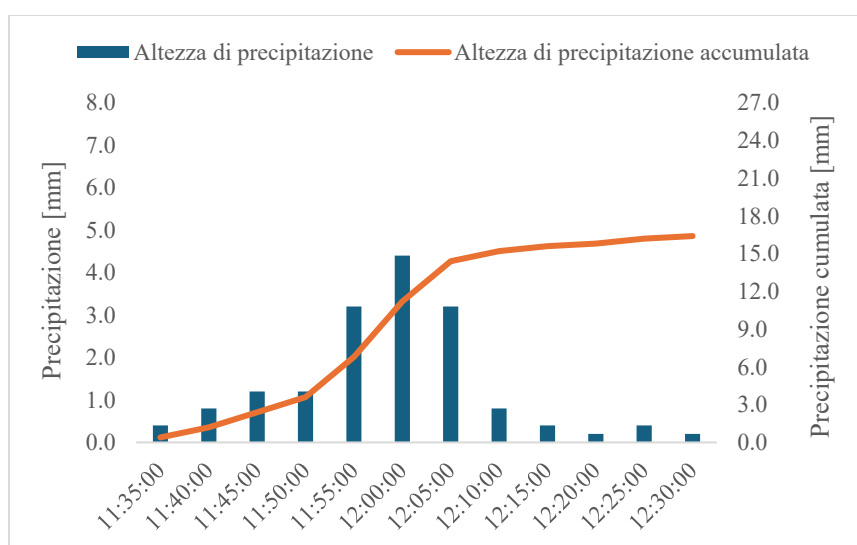


Figura 7.1 – Intensità e pioggia cumulata dell'evento del 26/07/2019

Il secondo invece è cominciato alle 17:30 ed è terminato alle 18:25, manifestandosi per la stessa durata dell'evento precedente. A differenza di quest'ultimo però, la precipitazione del 10/08/2020 ha assunto una distribuzione gaussiana asimmetrica verso destra. Il picco è stato raggiunto alle 17:45, assumendo un valore di 7.4 mm, e l'altezza di pioggia complessiva accumulata è risultata pari a 24.6 mm. Il tempo di ritorno associabile a questo evento è di circa 100 anni considerando la precipitazione caduta nei 30 minuti più intensi (Figura 7.2).

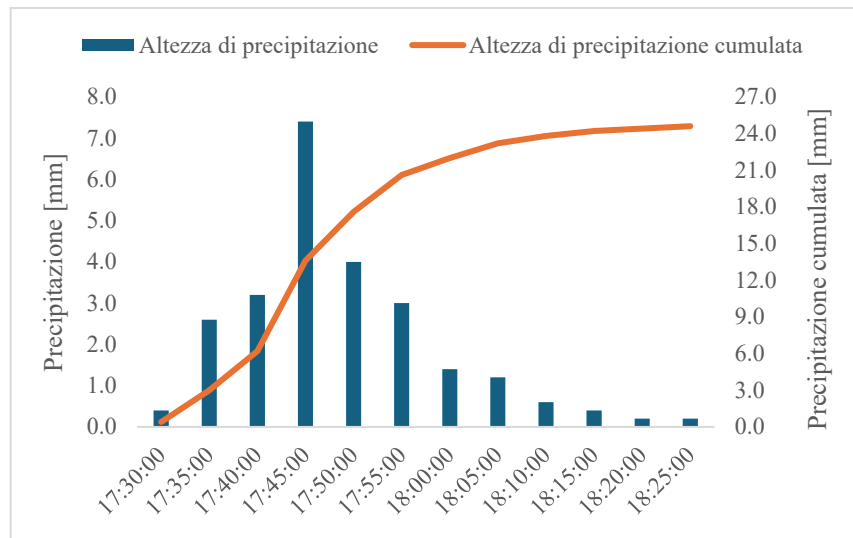


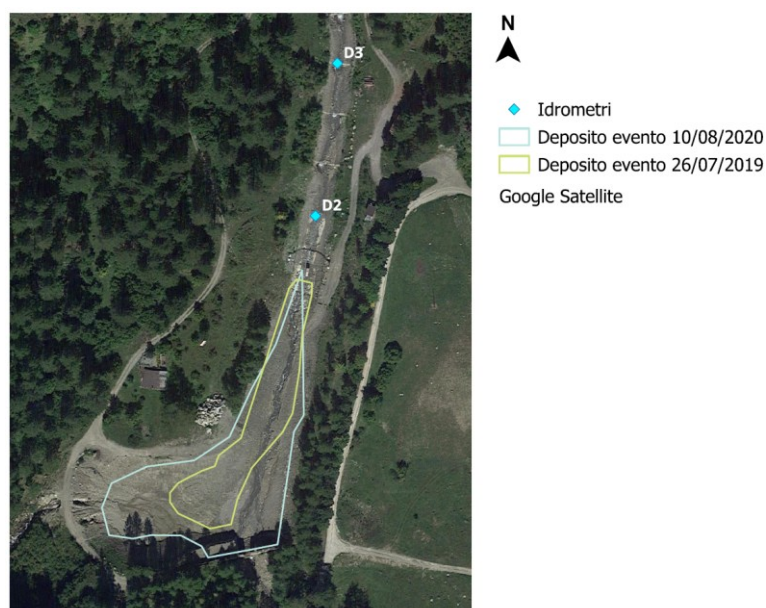
Figura 7.2 – Intensità e pioggia cumulata dell'evento del 10/08/2020

I parametri utilizzati come riferimento per la taratura sono il volume invasato nel piazzale di deposito ( $V_d$ ) e il picco di portata ( $Q_p$ ) rilevato dall'idrometro D2 (Provincia Autonoma di Bolzano, 2025a).

Oltre ad essi, si riportano di seguito, in forma sia tabellare (Tabella 7.1) che grafica (Figura 7.3), ulteriori dati utili a comprendere l'entità degli eventi, quali la superficie occupata nel piazzale e lo spessore del sedimento.

| ID   | Data       | Area              | $Q_p$ D2            | $V_d$             | $h_d$ |
|------|------------|-------------------|---------------------|-------------------|-------|
| [-]  | [-]        | [m <sup>2</sup> ] | [m <sup>3</sup> /s] | [m <sup>3</sup> ] | [m]   |
| 3085 | 26/07/2019 | 2344.61           | 16                  | 6700              | 0.1-1 |
| 3806 | 10/08/2020 | 5176.78           | 31                  | 15350             | < 1   |

Tabella 7.1 – Valori di riferimento degli eventi registrati utili alla taratura del modello



*Figura 7.3 – Area occupata dagli eventi di taratura presso il piazzale di deposito*

### **7.1.2 Individuazione degli idrogrammi di input al bacino per gli eventi di taratura**

In riferimento a quanto precedentemente accennato nel capitolo 7.1, il processo di taratura si è concentrato inizialmente in maniera esclusiva sull'evento del 10 agosto 2020. Una volta raggiunto il valore di target per questo evento, si è passati in seguito a quello del 26 luglio 2019.

L'applicazione degli input derivanti dalla modellazione idrologica degli eventi descritti in precedenza, avviene attraverso le condizioni al contorno, e più precisamente dalle sezioni di ingresso. Esse corrispondono alla sezione di chiusura dei sottobacini descritti nel capitolo 4.2.2 e permettono di propagare verso valle l'onda di piena generatasi a monte.

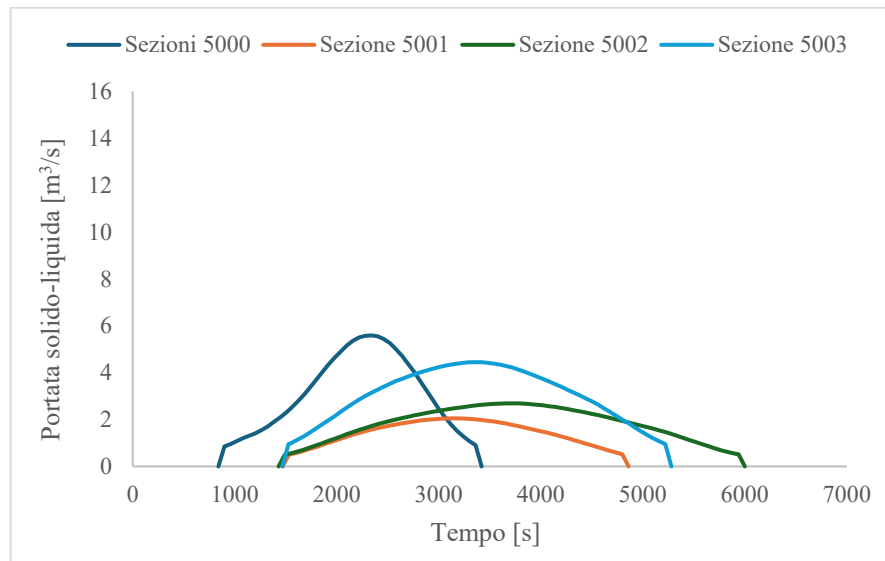
Le prime simulazioni di taratura vedevano solamente la presenza di due input, il 5000 e il 5002, in quanto erano le principali sezioni che erano state riconosciute dal punto di vista degli apporti.

A seguito dei primi risultati delle simulazioni, i cui valori si dimostravano ben inferiori rispetto ai target di riferimento (Tabella 7.1), e acquisite le nuove conoscenze ottenute dai rilievi di campo, si è deciso di inserire ulteriori sezioni di input, ovvero la 5001 e la

5003, le quali hanno consentito di raggiungere dei valori di  $V_d$  e  $Q_p$  accettabili. Tale decisione è stata condotta tenendo conto anche della morfologia descritta dal DEM.

La modellazione idrologica dei contributi generati da ogni bacino è stata effettuata seguendo la procedura indicata nel capitolo 5 e ha restituito i seguenti idrogrammi (Figura 7.4 e Figura 7.5).

Per l'evento del 26/07/2019, i valori della concentrazione solida costante degli idrogrammi a partire dalla Sezione 5000, fino alla Sezione 5003, risultano rispettivamente: 0.3, 0.0, 0.0 e 0.15.



*Figura 7.4 – Idrogrammi di input dell'evento del 26 luglio 2019*

Invece, per l'evento del 10/08/2020, i valori della concentrazione solida costante degli idrogrammi a partire dalla Sezione 5000, fino alla Sezione 5003, risultano rispettivamente: 0.5, 0.0, 0.0 e 0.15.

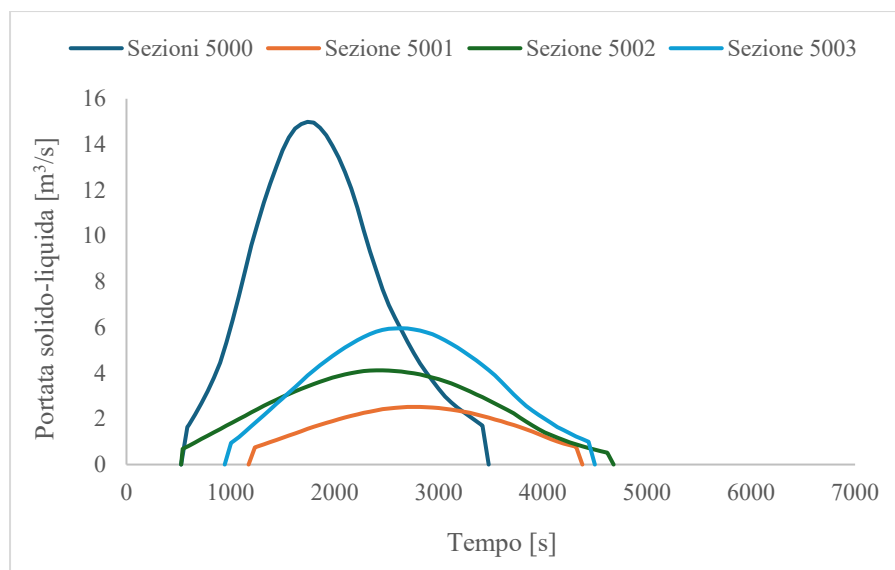


Figura 7.5 – Idrogrammi di input dell'evento del 10 agosto 2020

### 7.1.3 Interventi sull'uso del suolo

I parametri associati all'uso del suolo corrispondono alle variabili che vengono utilizzate dal modello per determinare il moto del flusso e per questo motivo risultano di fondamentale importanza.

La classificazione dell'uso del suolo si è basata sul progetto Corine Land Cover (CLC) dell'Unione Europea (Unione Europea, 2018). Ad essa, si sono poi integrati gli usi del suolo specifici per l'area studiata (Tabella 7.3).

Per il processo di taratura si sono utilizzati come riferimento i valori associati all'uso del suolo dei territori su cui è stato validato il modello D.F.R.M., i quali sono stati in seguito aggiornati in base ai risultati ottenuti da ogni simulazione.

Gli interventi sui valori di riferimento si sono concentranti prevalentemente sul coefficiente di conduttanza ( $C$ ), sull'angolo ( $EI_A$ ) e velocità ( $EI_V$ ) inferiori di erosione, e sull'angolo superiore di deposito ( $DS_A$ ) (Tabella 7.2).

La corrispondenza dei codici di uso suolo di seguito presentati è riportata nella Tabella 7.3 riportata nel capitolo 7.2.4.

| Codice | C          |             | EI <sub>A</sub> |              | EI <sub>V</sub> |               | DS <sub>A</sub> |              |
|--------|------------|-------------|-----------------|--------------|-----------------|---------------|-----------------|--------------|
|        | Pre<br>[-] | Post<br>[-] | Pre<br>[°]      | Post<br>[°]  | Pre<br>[m/s]    | Post<br>[m/s] | Pre<br>[°]      | Post<br>[°]  |
| 12     | 1.00       | 1.00        | 20.00           | <b>14.00</b> | 3.00            | <b>2.00</b>   | 12.00           | <b>10.00</b> |
| 13     | 1.00       | 1.00        | 20.00           | <b>14.00</b> | 3.00            | <b>2.00</b>   | 12.00           | <b>10.00</b> |
| 14     | 1.00       | 1.00        | 20.00           | <b>14.00</b> | 3.00            | <b>2.00</b>   | 12.00           | <b>10.00</b> |
| 16     | 4.00       | <b>2.50</b> | 20.00           | 20.00        | 2.00            | 2.00          | 14.00           | <b>8.00</b>  |
| 19     | 3.00       | <b>4.00</b> | 16.00           | <b>12.00</b> | 1.80            | 1.80          | 14.00           | <b>8.00</b>  |

*Tabella 7.2 – Confronto tra i parametri di riferimento e quelli risultati a seguito della taratura del modello sul bacino del Rio Gadia*

Il primo parametro è stato abbassato nella piazza di deposito in modo tale da favorire la sedimentazione, mentre è stato alzato nell'alveo al fine di aumentare il volume di sedimento reclutabile.

Il secondo è stato abbassato per tutti gli usi del suolo che rientrano all'interno dell'alveo bagnato, per cui sono stati diminuiti anche i valori dei versanti, caratterizzati da sedimenti medi e fini. Questa modifica è stata apportata con lo scopo di aumentare la quantità di superfici erodibili.

Il terzo è stato invece abbassato nell'alveo per aiutare la propagazione del flusso verso valle ed è stato diminuito nel piazzale per evitare che si verificassero rigurgiti a monte.



*Figura 7.6 – Morfologia e litologia dei versanti lungo il tratto analizzato del Rio Gadia; quota di 1500 m s.l.m. a sinistra, quota di 1600 m s.l.m. a destra*

### 7.1.4 Configurazione della briglia filtrante

L'ultima variabile analizzata utile al raggiungimento dei valori è stata la configurazione dell'apertura della briglia filtrante posta alla sezione di chiusura dei bacini del Rio Gatria e del Rio Strimm (4.3).

Durante il processo di taratura si è infatti deciso di ipotizzare che il filtro in essa presente venisse prima completamente otturato, e poi sgomberato, in modo tale da poter rappresentare due situazioni differenti ma ugualmente utili allo studio.

La configurazione con il filtro chiuso ha permesso di verificare in maniera più accurata il volume depositato nel piazzale, risultando quindi utile al processo di taratura fino ad ora descritto. La configurazione con il filtro aperto invece è stata scelta in quanto rappresentativa di uno scenario più pericoloso e perciò maggiormente cautelativa ai fini della realizzazione delle mappe del pericolo.

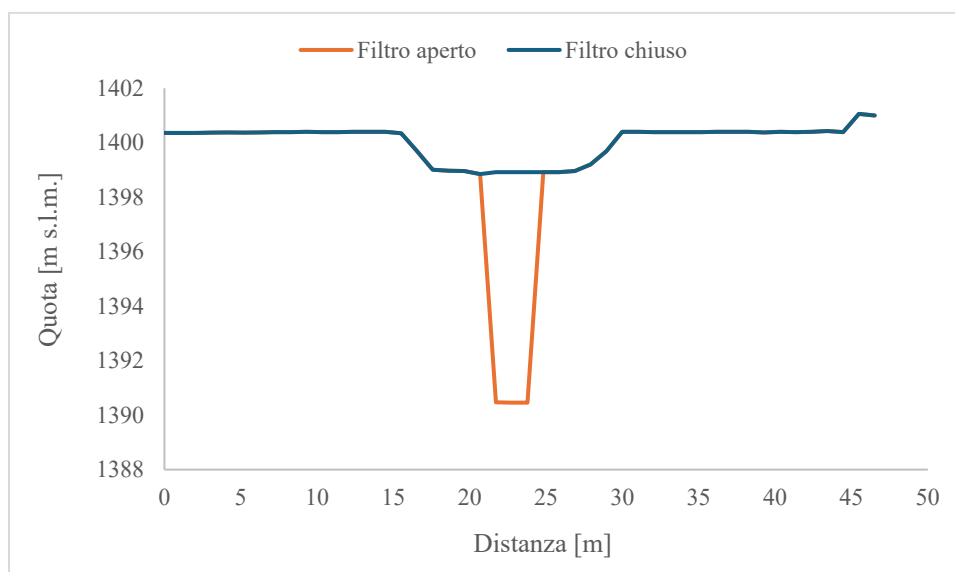


Figura 7.7 – Sezione della briglia filtrante

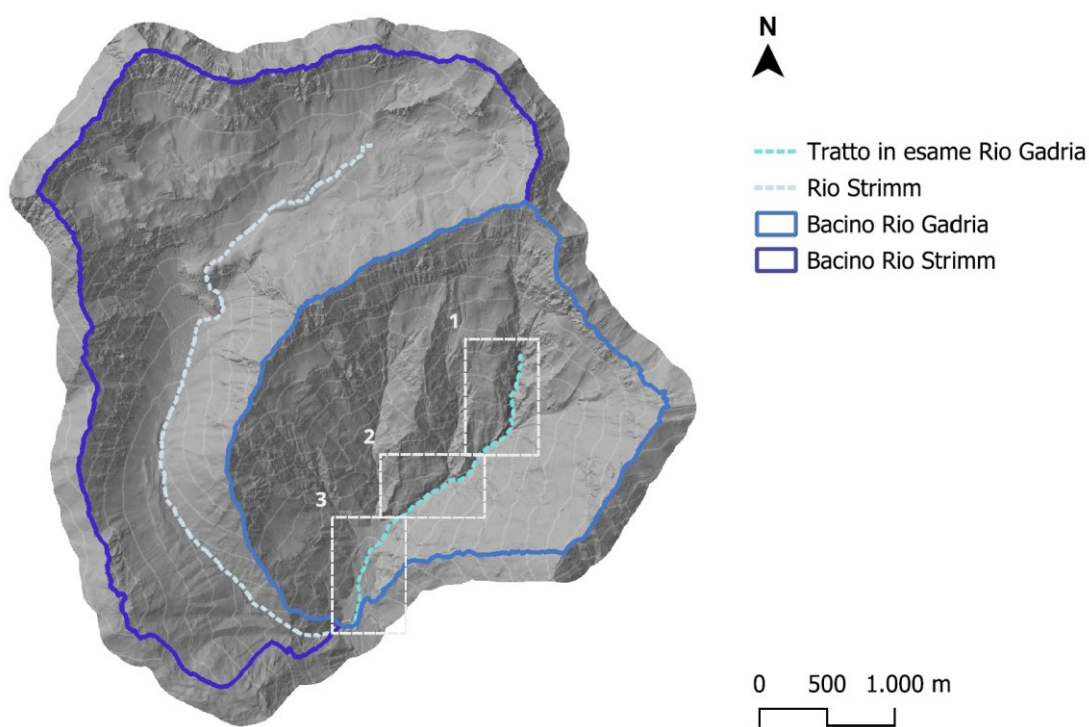
## 7.2 Implementazione al bacino del Rio Gatria

Grazie al processo di taratura sopra descritto è stato possibile definire gli input utili alla corretta descrizione del comportamento del bacino del Rio Gatria nei confronti delle

colate detritiche. Essi presentano tutti la stessa estensione e sono costituiti dalla medesima griglia di pixel di dimensione 1 x 1 m.

Di seguito si presentano quindi i file necessari al D.F.R.M. per poter simulare gli eventi sintetici riferiti alle precipitazioni regolarizzate dei tempi ritorno di 30, 100 e 300 anni utili alla realizzazione delle mappe del pericolo del conoide a valle. Essi sono stati inizialmente realizzati in formato \*.shp, per poi essere convertiti in \*.flt tramite QGIS (v.3.34.12) (QGIS, 2024).

Dal momento però che il Rio Gatria presenta un alveo piuttosto confinato, si riporta di seguito l'inquadramento dell'intero bacino del Rio Gatria, rispetto anche al bacino del Rio Strimm, nel quale si evidenziano i riquadri estratti utili a fornire una visione di maggior dettaglio e che verranno presentati nei capitoli relativi alla descrizione dei singoli file (Figura 7.8).

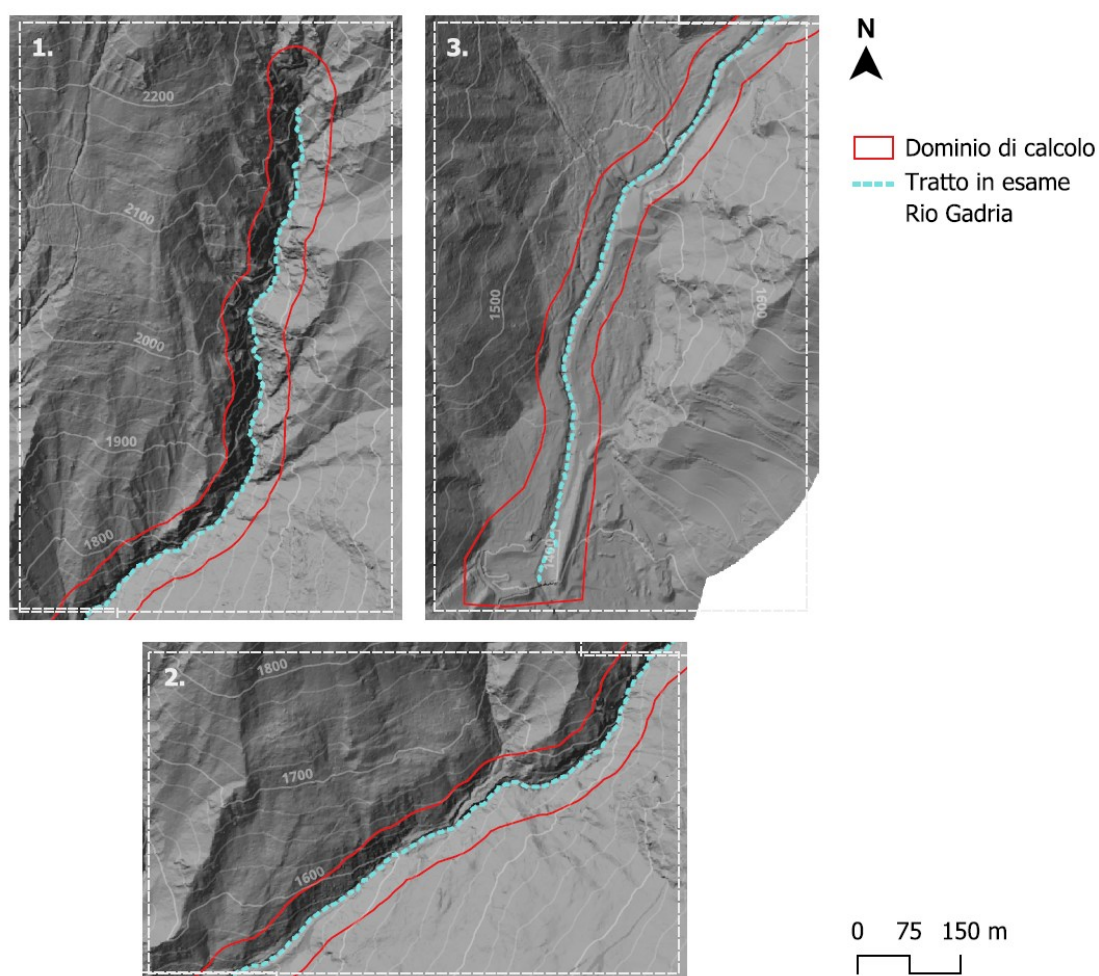


*Figura 7.8 – Inquadramento dei file di input del D.F.R.M. relativi al bacino del Rio Gatria; con il tratto bianco tratteggiato si evidenziano gli estratti*

### 7.2.1 Dominio di calcolo del bacino

Il dato DEM è stato ottenuto da parte dell'Università di Bolzano ed il sistema di riferimento su cui è stato proiettato è il ETRS89 / UTM zone 32N (EPSG: 25832).

Al fine di evitare di appesantire e allungare inutilmente le tempistiche di simulazione, è buona pratica ritagliare il DEM solamente nell'area interessata dallo scorrimento del flusso. Per il presente caso si è mantenuto un buffer costante di 40 m per lato, che è stato successivamente adattato alla forma della piazza di deposito posta nella parte finale del collettore (Figura 7.9).



*Figura 7.9 – Estratti del dominio di calcolo del bacino del Rio Gadia*

## 7.2.2 Sezioni interne del bacino

Le sezioni interne rilevano il passaggio dell'onda di piena registrando la portata transitante. Da esse è possibile quindi controllare e verificare la propagazione della colata detritica, dal momento che permettono anche di distinguere la portata solido-liquida da quella solo solida (Figura 7.10).

Il posizionamento delle sezioni interne segue la locazione degli altri input utili al modello, come le sezioni di ingresso, ma anche la morfologia del terreno e gli eventuali elementi artificiali posizionati lungo l'alveo. In particolare, per il presente caso studio, la Sezione 1008 ha assunto un ruolo di rilievo, in quanto rappresenta l'idrometro D2. Infatti, grazie ad essa è stato possibile rendere comparabile il valore relativo al picco di piena di riferimento introdotto precedentemente nella Tabella 7.1.

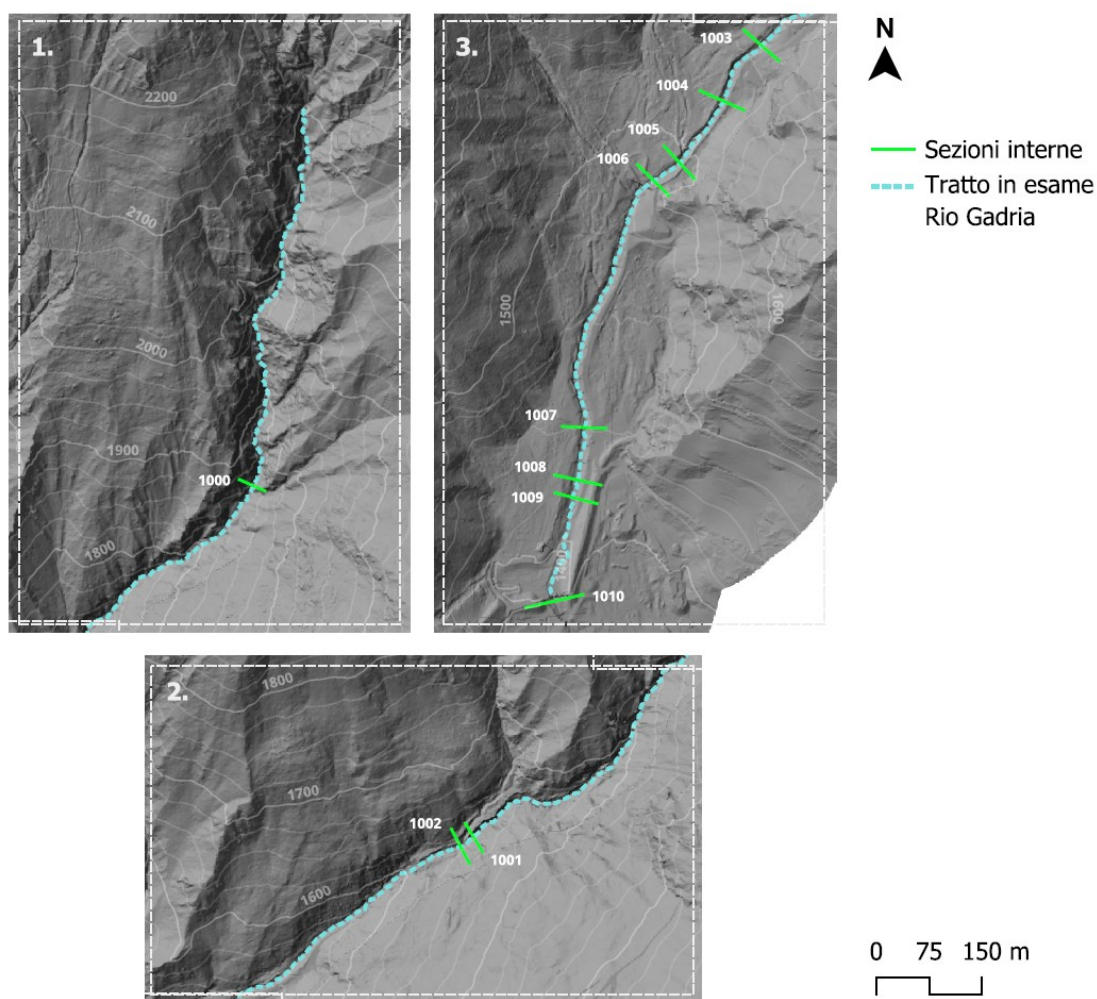


Figura 7.10 – Estratti delle sezioni interne del bacino del Rio Gadia

### 7.2.3 Condizioni al contorno e idrogrammi sintetici del bacino

Le condizioni al contorno sono poste in corrispondenza delle sezioni di chiusura dei sottobacini riportati nella Figura 4.14 (Serie 5000) e della parte terminale del dominio di calcolo (serie 9000).

In aggiunta alle sezioni individuate nella fase di taratura, è stata inserita una nuova sezione di ingresso (5004), che rappresenta il contributo del bacino del Rio Strimm. Questo intervento risulta di fondamentale importanza in quanto permette di considerare un ulteriore apporto che contribuisce all'individuazione delle aree a rischio che si trovano sul conoide a valle (Figura 7.11).

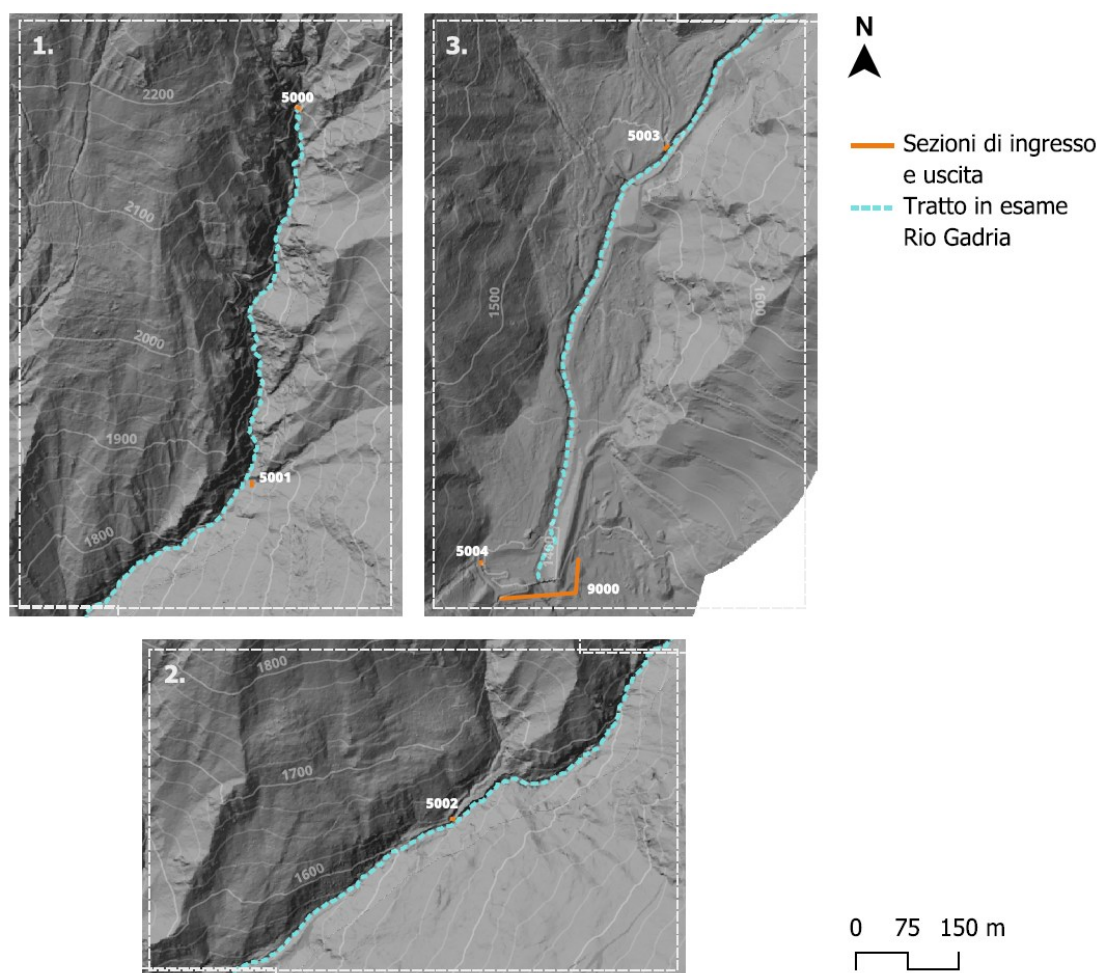


Figura 7.11 – Estratti delle condizioni al contorno del bacino del Rio Gadia

Come descritto nel capitolo 5.3, per ogni tempo di ritorno (30, 100 e 300 anni), sono previsti due differenti idrogrammi, i quali mirano a massimizzare il picco ( $P$ ) e il volume ( $V$ ). L'apporto derivante da quest'ultimi verrà utilizzato come input di ingresso per il torrente Alliz, al fine di individuare le aree esposte al pericolo lungo il conoide.

Di seguito si presentano gli idrogrammi utilizzati per ognuno degli scenari sopra indicati, applicati ai sottobacini individuati e quindi alle sezioni di ingresso appartenenti al dominio del bacino del Rio Gatria (Figura 7.11). Per quanto riguarda i valori di concentrazione volumetrica solida, questi seguono quelli indicati nella parte di taratura, a parte per la nuova sezione di ingresso 5004, la quale invece si affida a quanto descritto nel capitolo 5.

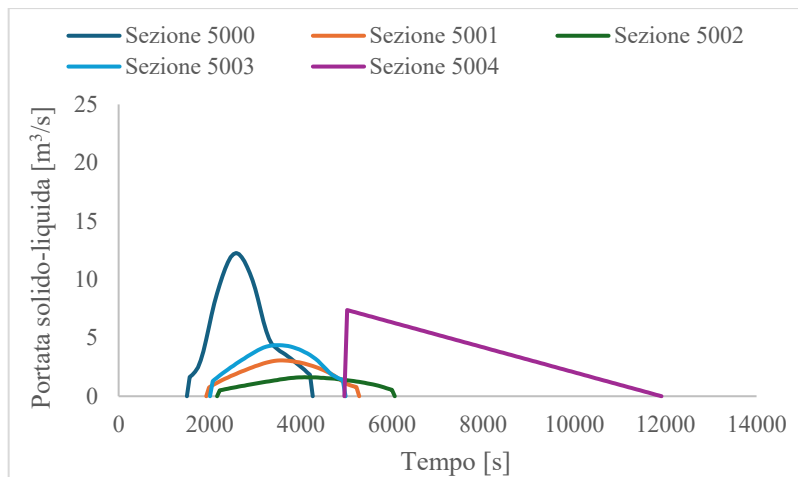


Figura 7.12 – Idrogrammi di ingresso nel bacino del Rio Gatria per TR30P

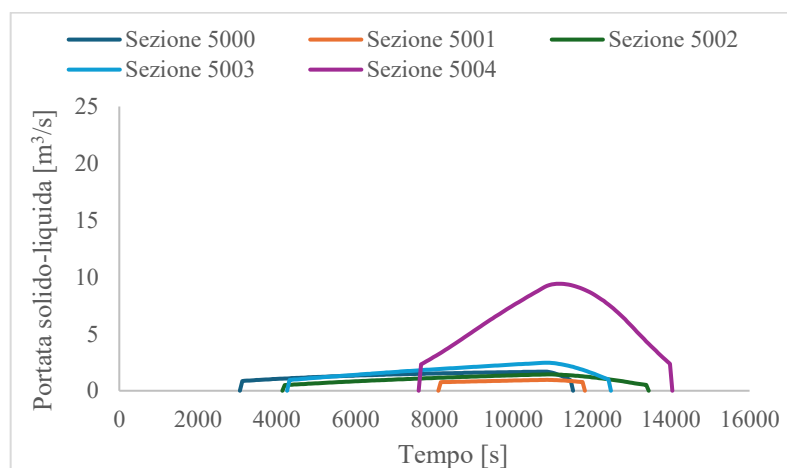


Figura 7.13 – Idrogrammi di ingresso nel bacino del Rio Gatria per TR30V

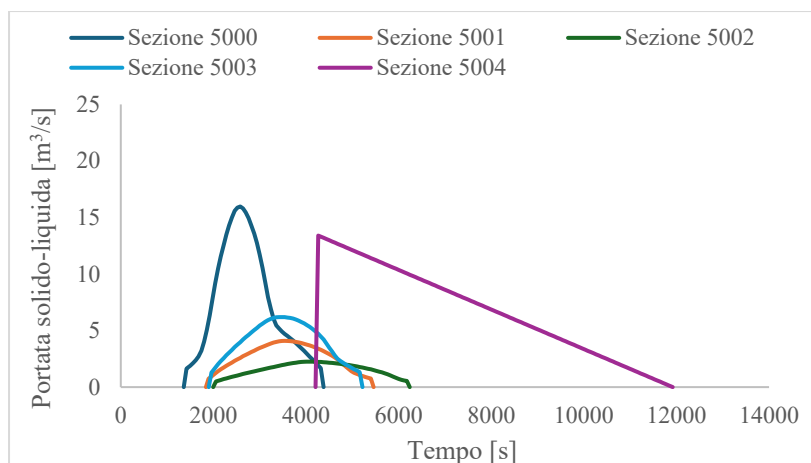


Figura 7.14 – Idrogrammi di ingresso nel bacino del Rio Gadia per TR100P

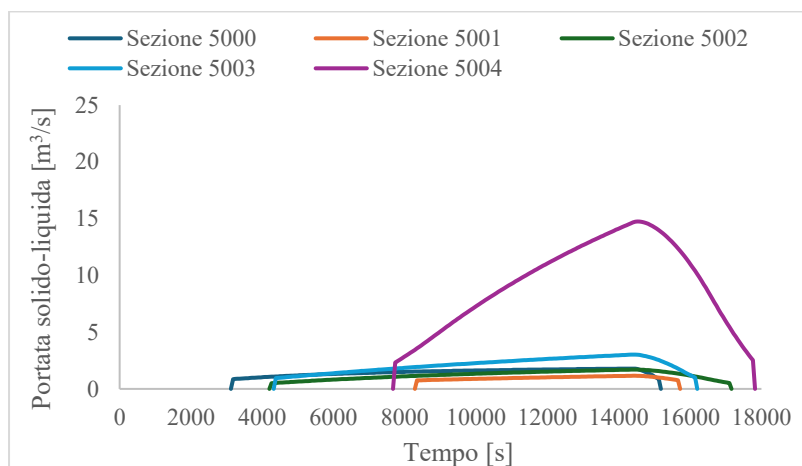


Figura 7.15 – Idrogrammi di ingresso nel bacino del Rio Gadia per TR100V

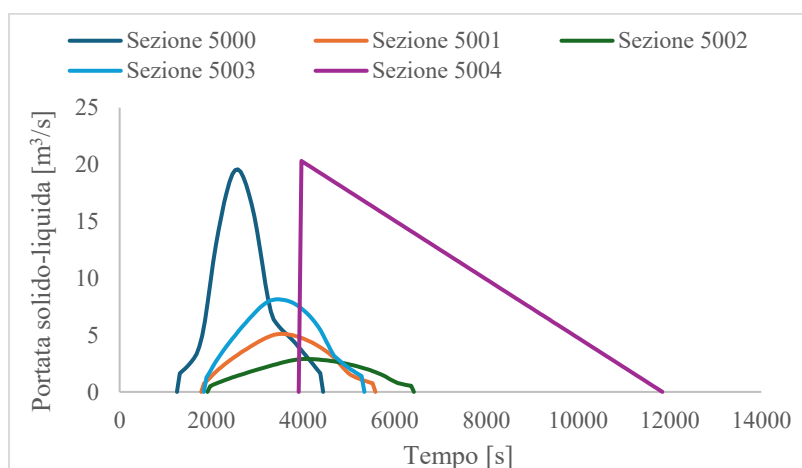


Figura 7.16 – Idrogrammi di ingresso nel bacino del Rio Gadia per TR300P

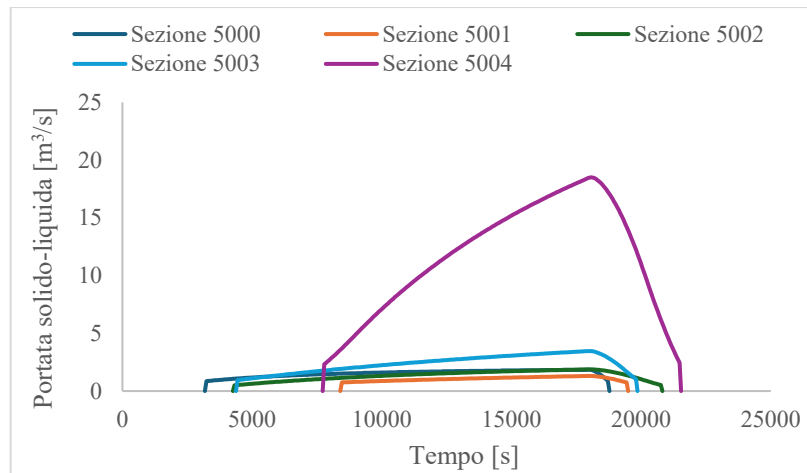
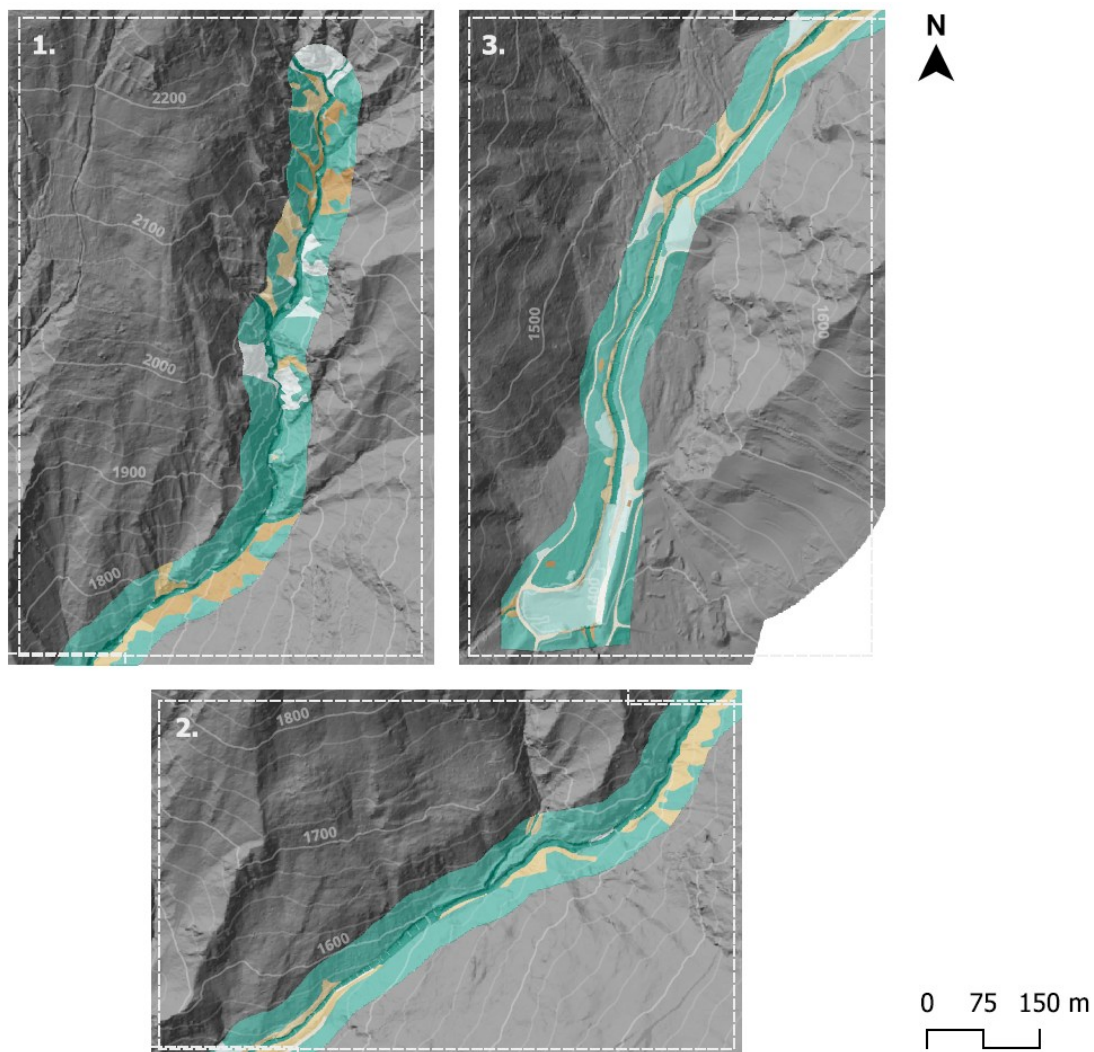


Figura 7.17 – Idrogrammi di ingresso nel bacino del Rio Gatria per TR300V

## 7.2.4 Uso suolo del bacino

Come precedentemente descritto, per la suddivisione dell'uso del suolo ci si è affidati ai criteri imposti dalla Corine Land Cover (Unione Europea, 2018). Ad essa si sono poi aggiunti gli usi del suolo, con relativo nuovo codice uso suolo e nome, degli usi specifici dell'area del caso studio.

La codifica per l'implementazione al modello però è stata convertita in una serie di numeri crescenti da 1 a 19, in quanto è possibile applicare la numerazione che più si preferisce. Per questo motivo i valori dei pixel appartenenti al raster variano all'interno di tale intervallo e non fanno riferimento al sistema della CLC (Figura 7.18).



#### Uso del suolo

- Alveo
- Aree a pascolo naturale e praterie
- Aree con vegetazione rada
- Boschi di conifere
- Briglie
- Massi ciclopici
- Piazza di deposito
- Praterie continue
- Praterie discontinue
- Scogliere
- Strade sterrate
- Strade sterrate in terra
- Terreni con prevalenza di sedimenti fini con assenza di vegetazione
- Terreni con prevalenza di sedimenti fini con presenza di vegetazione
- Terreni con prevalenza di sedimenti medi con assenza di vegetazione
- Zone residenziali a tessuto discontinuo e rado

*Figura 7.18 – Estratti dell'uso del suolo del bacino del Rio Gadia*

Ad ogni uso del suolo è associata una serie di undici parametri, esclusa la descrizione dell'uso (Tabella 7.3), che regolano il comportamento della colata su ogni cella. Di seguito si presenta la tabella delle caratteristiche di uso del suolo quale risultato del processo di taratura descritto nel capitolo 7.1.3 (Tabella 7.3). Per facilitare la lettura dei dati, si suddivide in due tabelle, nonostante per l'implementazione al D.F.R.M. il file consti in un'unica tabella che segue la configurazione della tabella (b) a cui in ultima colonna si riporta la descrizione della tabella (a).

a.

| Cod. | C    | M    | EIA   | EIV  | DSA   | DSV  | Dinf | Cfondo | Elim | Str  | Pon  |
|------|------|------|-------|------|-------|------|------|--------|------|------|------|
| 1    | 1.00 | 1.00 | 89.00 | 9.00 | 14.00 | 1.00 | 1.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2    | 1.00 | 1.00 | 89.00 | 9.00 | 14.00 | 1.00 | 1.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 3    | 1.00 | 1.00 | 89.00 | 9.00 | 14.00 | 1.00 | 1.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 4    | 1.00 | 1.00 | 20.00 | 3.00 | 12.00 | 0.80 | 1.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 5    | 3.00 | 1.00 | 20.00 | 2.00 | 14.00 | 1.00 | 1.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 6    | 3.00 | 1.00 | 20.00 | 2.00 | 14.00 | 1.00 | 1.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 7    | 3.00 | 1.00 | 14.00 | 2.00 | 10.00 | 1.00 | 1.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 8    | 3.00 | 1.00 | 18.00 | 0.90 | 14.00 | 0.50 | 0.00 | 0.75   | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| 9    | 3.00 | 1.00 | 18.00 | 0.90 | 14.00 | 0.50 | 0.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 10   | 3.00 | 1.00 | 18.00 | 0.90 | 14.00 | 0.50 | 0.00 | 0.75   | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| 11   | 3.00 | 1.00 | 16.00 | 1.80 | 14.00 | 1.00 | 0.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 12   | 1.00 | 1.00 | 14.00 | 2.00 | 10.00 | 0.80 | 0.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 13   | 1.00 | 1.00 | 14.00 | 2.00 | 10.00 | 0.80 | 0.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 14   | 1.00 | 1.00 | 14.00 | 2.00 | 10.00 | 0.80 | 0.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 15   | 3.00 | 1.00 | 18.00 | 0.90 | 14.00 | 0.50 | 0.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 16   | 2.50 | 1.00 | 20.00 | 2.00 | 8.00  | 1.00 | 0.00 | 0.75   | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| 17   | 3.00 | 1.00 | 18.00 | 0.90 | 14.00 | 0.50 | 0.00 | 0.75   | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| 18   | 1.00 | 1.00 | 20.00 | 3.00 | 12.00 | 0.80 | 0.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 19   | 4.00 | 1.00 | 12.00 | 1.80 | 8.00  | 1.00 | 0.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

b.

| Descrizione                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------|
| 11200 Zone residenziali a tessuto discontinuo e rado                         |
| 12210 Strade sterrate                                                        |
| 12211 Strade sterrate in terra                                               |
| 31200 Boschi di conifere                                                     |
| 32100 Aree a pascolo naturale e praterie                                     |
| 32110 Praterie continue                                                      |
| 32120 Praterie discontinue                                                   |
| 33200 Rocce nude, falesie, rupi, affioramenti                                |
| 33231 Massi ciclopici                                                        |
| 33232 Scogliere                                                              |
| 33241 Terreni con prevalenza di sedimenti fini con assenza di vegetazione    |
| 33242 Terreni con prevalenza di sedimenti fini con presenza di vegetazione   |
| 33243 Terreni con prevalenza di sedimenti medi con assenza di vegetazione    |
| 33244 Terreni con prevalenza di sedimenti medi con presenza di vegetazione   |
| 33246 Terreni con prevalenza di sedimenti grossi con presenza di vegetazione |
| 33247 Piazza di deposito                                                     |
| 33251 Briglie                                                                |
| 33300 Aree con vegetazione rada                                              |
| 51110 Alveo                                                                  |

Tabella 7.3 –Caratteristiche di uso del suolo del bacino del Rio Gadria; sopra (a) la descrizione, sotto (b)

## 7.3 Implementazione al conoide alluvionale

In maniera analoga a quanto riportato per il capitolo 7.2, verranno ora descritti i file utilizzati per l'implementazione del conoide alluvionale al DFRM. La modellazione di quest'area permette di individuare le zone potenzialmente esposte al pericolo da colata detritica nei centri abitati in essa presenti.

Per la presentazione grafica dei file di input implementati nel modello relativi al conoide, si adotta una modalità differente rispetto a quella utilizzata per il bacino. Di seguito si presentano in una stessa immagine il dominio di calcolo, le sezioni interne e le condizioni al contorno, che verranno successivamente descritti nei capitoli dedicati (Figura 7.19).

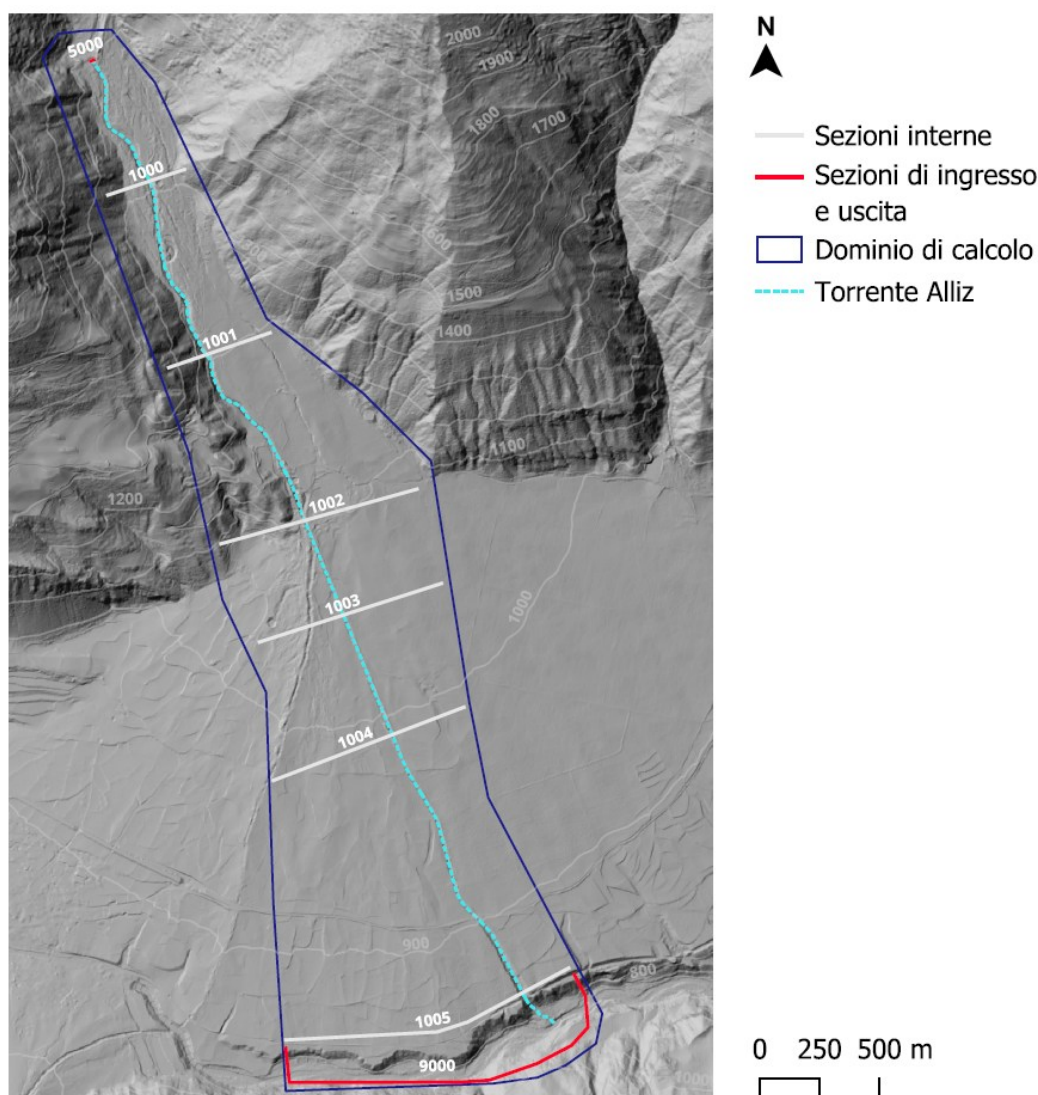


Figura 7.19 – Inquadramento dei file di input del D.F.R.M. relativi al conoide alluvionale

### **7.3.1 Dominio del conoide**

Anche in questo caso il dato DEM è stato ottenuto dal geoportale della Provincia Autonoma di Bolzano ed il sistema di riferimento corrisponde a quello utilizzato per il bacino del Rio Gatria.

Per quanto riguarda invece la perimetrazione dell'area del dominio di calcolo si è adottato un approccio differente rispetto a quello descritto in precedenza. Il criterio si è basato sulla considerazione delle aree già classificate come a rischio da parte dei PZP dei Comuni di Lasa e Silandro, in modo tale da rendere più facilmente comparabili le mappe del pericolo realizzate nel presente studio (Figura 7.19).

### **7.3.2 Sezioni interne**

Le sezioni interne sono state collocate lungo il torrente Alliz nei punti che si sono ritenuti essere più critici. Dalla Figura 7.19 si nota in maniera ancora più evidente come esse si estendano quanto più possibile verso i confini del dominio di calcolo, al fine di rilevare il passaggio di eventuali avulsioni o fuoriuscite di flusso dal canale.

### **7.3.3 Condizioni al contorno e idrogrammi di ingresso del conoide**

Al fine di realizzare le mappe del pericolo, è necessario simulare due differenti scenari di precipitazione per ogni TR considerato, ovvero quello che massimizza la velocità ( $v$ ), derivante dall'idrogramma che massimizza il picco di portata, e quello che massimizza la sommatoria tra il tirante e lo spessore del deposito ( $h + M$ ), ottenuto dall'idrogramma che massimizza il volume solido-liquido, i quali vengono prima applicati al bacino del Rio Gatria e poi propagati al conoide.

La propagazione avviene attraverso il trasferimento della portata transitante per la Sezione 1010 del dominio del Gatria, alla Sezione 5000 del dominio del conoide.

Quest'ultima si colloca appena a valle della briglia filtrante, mentre la sezione di uscita, ovvero la Sezione 9000, si trova al piede del conoide in corrispondenza del fiume Adige.

Di seguito si riportano gli idrogrammi solido-liquidi di suddetta Sezione 1010 provenienti dal bacino del Rio Gatria, ottenuti per ogni scenario sintetico considerato, e poi propagati lungo il torrente Alliz (Figura 7.20, Figura 7.21, Figura 7.22).

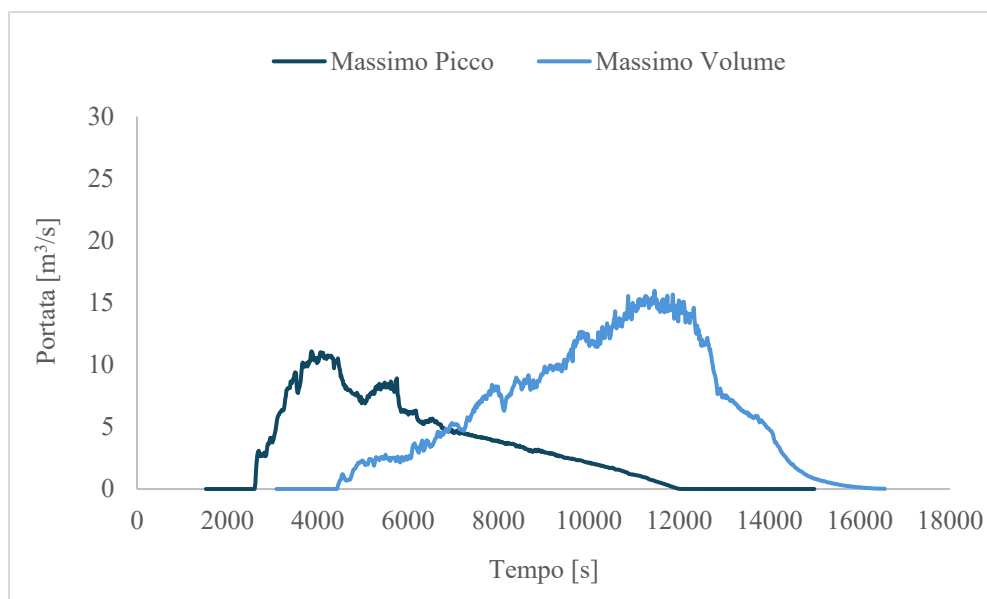


Figura 7.20 – Idrogrammi solido-liquidi transitanti per la Sezione 1010 del Rio Gatria corrispondenti al TR30

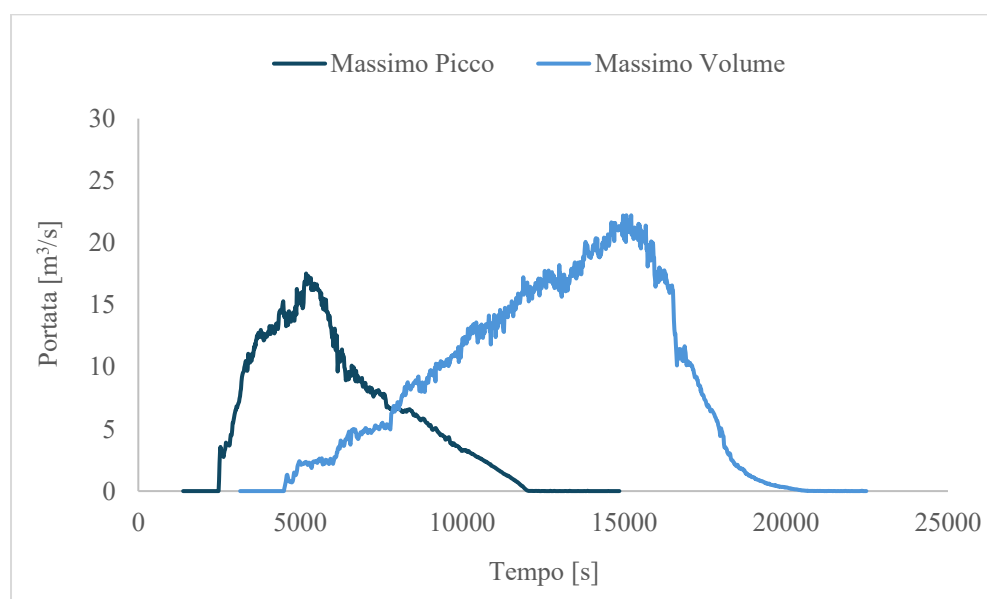
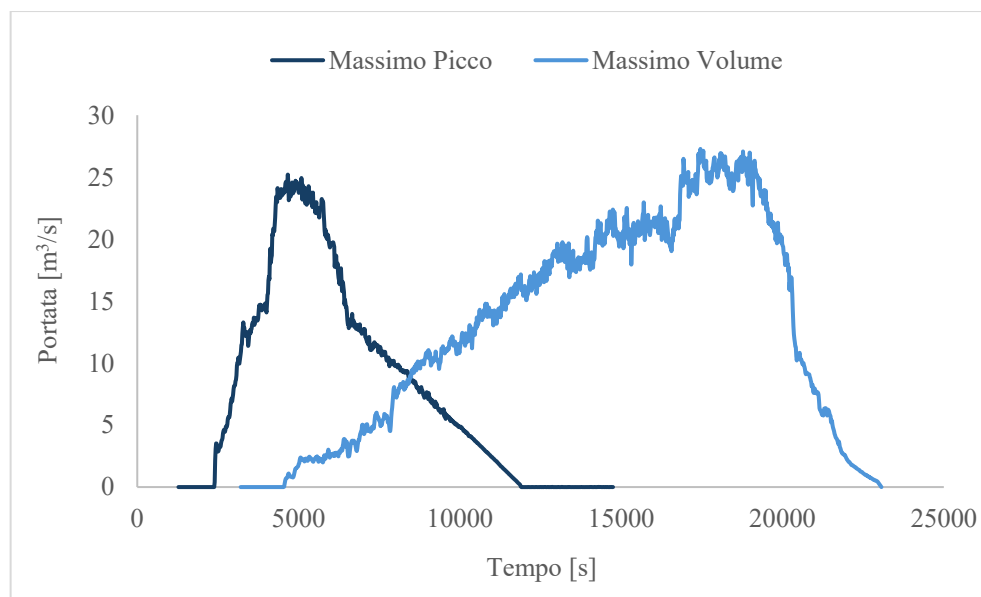


Figura 7.21 – Idrogrammi solido-liquidi transitanti per la Sezione 1010 del Rio Gatria corrispondenti al TR100



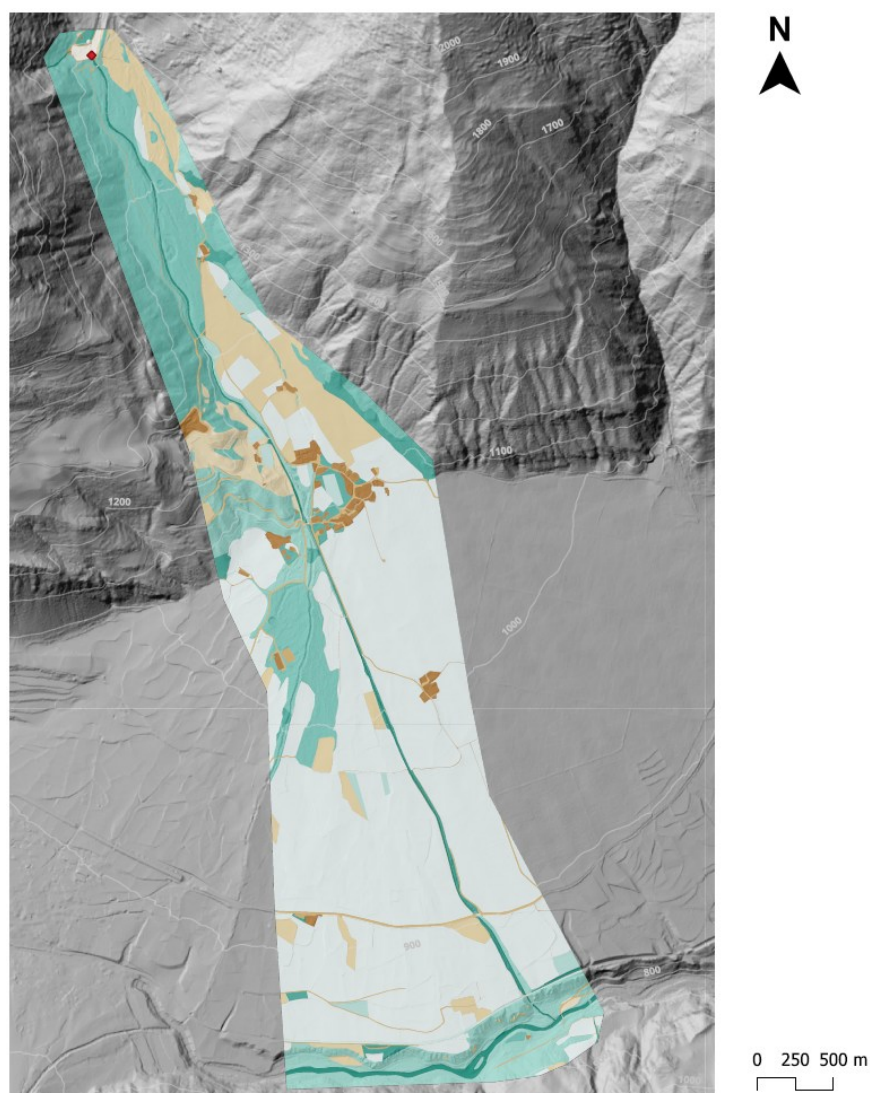
*Figura 7.22 – Idrogrammi solido-liquidi transitanti per la Sezione 1010 del Rio Gadria corrispondenti al TR300*

Dai grafici soprastanti si osserva che la portata transitante per l'apertura della briglia generata dagli idrogrammi che massimizzano il volume trasportato, risulta superiore rispetto a quella derivante dagli idrogrammi che massimizzano il picco di piena. Tale differenza è plausibilmente legata alla diversa distribuzione temporale delle portate e agli effetti di laminazione esercitati dall'opera presente. Ad ogni modo, per completezza, si sono eseguite le simulazioni utilizzando gli idrogrammi di entrambe le condizioni, così da valutare l'evoluzione delle grandezze idrauliche e morfologiche a valle in entrambe le situazioni.

### **7.3.4 Uso suolo del conoide**

Dal momento che il conoide interessa una superficie più ampia e caratterizzata da differenti usi del suolo rispetto al bacino del Rio Gadria, gli usi complessivi sono ora rappresentati da un intervallo compreso tra 1 e 28, il quale segue la stessa impostazione utilizzata per il dominio a monte. Tuttavia, poiché il criterio di attribuzione del codice per l'implementazione al modello segue l'ordine della CLC, i codici dei due domini non corrispondono allo stesso numero, ma le caratteristiche associate ad ogni uso sono state mantenute inalterate.

Di seguito si riportano la mappa dell'uso del suolo elaborata per il conoide (Figura 7.23), e successivamente le tabelle relative ai rispettivi parametri che regolano lo scorrimento dal flusso simulato (Tabella 7.4).



| Uso del suolo                                          |                                                                     |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Alveo                                                  | Piazzale di deposito                                                |
| Alveo consolidato                                      | Ponti                                                               |
| Aree a vegetazione boschiva ed arbustiva in evoluzione | Praterie continue                                                   |
| Aree con vegetazione rada                              | Praterie discontinue                                                |
| Aree verdi urbane                                      | Prati stabili                                                       |
| Bacini d'acqua                                         | Rocce nude, falesie, rupi e affioramenti                            |
| Boschi di conifere                                     | Scogliere                                                           |
| Boschi di latifoglie                                   | Strade asfaltate                                                    |
| Boschi misti di conifere e latifoglie                  | Strade sterrate                                                     |
| Briglie                                                | Terreni con prevalenza di sedimenti fini con assenza di vegetazione |
| Campo arato incolto                                    | Terreni con prevalenza di sedimenti medi con assenza di vegetazione |
| Colture intensive                                      | Zone residenziali a tessuto continuo                                |
| Ferrovie                                               | Zone residenziali a tessuto discontinuo e rado                      |
| Frutteti e frutti minori                               |                                                                     |
| Massi ciclopici                                        |                                                                     |

*Figura 7.23 – Mappa di uso del suolo del conoide*

| Cod.  | C    | M    | EIA   | EIV  | DSA   | DSV  | Dinf | Cfondo | Elim | Str  | Pon  |
|-------|------|------|-------|------|-------|------|------|--------|------|------|------|
| 1     | 1.00 | 1.00 | 89.00 | 9.00 | 14.00 | 1.00 | 1.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2     | 1.00 | 1.00 | 89.00 | 9.00 | 14.00 | 1.00 | 1.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 3     | 1.00 | 1.00 | 89.00 | 9.00 | 14.00 | 1.00 | 1.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 4     | 1.00 | 1.00 | 89.00 | 9.00 | 14.00 | 1.00 | 1.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 5     | 1.00 | 1.00 | 89.00 | 9.00 | 14.00 | 1.00 | 1.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 6     | 3.00 | 1.00 | 14.00 | 2.00 | 10.00 | 1.00 | 1.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 7     | 3.00 | 1.00 | 20.00 | 2.00 | 14.00 | 1.00 | 1.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 8     | 3.00 | 1.00 | 16.00 | 1.80 | 14.00 | 1.00 | 0.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 9     | 3.00 | 1.00 | 20.00 | 2.00 | 14.00 | 1.00 | 1.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 10    | 3.00 | 1.00 | 20.00 | 2.00 | 14.00 | 1.00 | 1.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 11    | 1.00 | 1.00 | 20.00 | 3.00 | 12.00 | 0.80 | 1.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 12    | 1.00 | 1.00 | 20.00 | 3.00 | 12.00 | 0.80 | 1.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 13    | 1.00 | 1.00 | 20.00 | 3.00 | 12.00 | 0.80 | 1.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 14    | 3.00 | 1.00 | 20.00 | 2.00 | 14.00 | 1.00 | 1.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 15    | 3.00 | 1.00 | 14.00 | 2.00 | 10.00 | 1.00 | 1.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 16    | 1.00 | 1.00 | 20.00 | 3.00 | 12.00 | 0.80 | 1.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 17    | 3.00 | 1.00 | 18.00 | 0.90 | 14.00 | 0.50 | 0.00 | 0.75   | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| 18    | 3.00 | 1.00 | 18.00 | 0.90 | 14.00 | 0.50 | 0.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 19    | 3.00 | 1.00 | 18.00 | 0.90 | 14.00 | 0.50 | 0.00 | 0.75   | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| 20    | 3.00 | 1.00 | 16.00 | 1.80 | 14.00 | 1.00 | 0.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 21    | 1.00 | 1.00 | 14.00 | 2.00 | 10.00 | 0.80 | 0.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 22    | 2.50 | 1.00 | 20.00 | 2.00 | 8.00  | 1.00 | 0.00 | 0.75   | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| 23    | 3.00 | 1.00 | 18.00 | 0.90 | 14.00 | 0.50 | 0.00 | 0.75   | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| 24    | 4.00 | 1.00 | 12.00 | 1.80 | 8.00  | 1.00 | 0.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 25    | 1.00 | 1.00 | 20.00 | 3.00 | 12.00 | 0.80 | 0.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 26    | 4.00 | 1.00 | 12.00 | 1.80 | 8.00  | 1.00 | 0.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 27    | 4.00 | 1.00 | 12.00 | 1.80 | 8.00  | 1.00 | 0.00 | 0.75   | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| a. 28 | 4.00 | 1.00 | 12.00 | 1.80 | 8.00  | 1.00 | 0.00 | 0.75   | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

|                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------|
| Descrizione                                                               |
| 11100 Zone residenziali a tessuto continuo                                |
| 11200 Zone residenziali a tessuto discontinuo e rado                      |
| 12210 Ferrovie                                                            |
| 12220 Strade asfaltate                                                    |
| 12230 Strade sterrate                                                     |
| 14100 Aree verdi urbane                                                   |
| 21110 Colture intensive                                                   |
| 21400 Campo arato incolto                                                 |
| 22200 Frutteti e frutti minori                                            |
| 23100 Prati stabili                                                       |
| 31100 Boschi di latifoglie                                                |
| 31200 Boschi di conifere                                                  |
| 31300 Boschi misti di conifere e latifoglie                               |
| 32110 Praterie continue                                                   |
| 32120 Praterie discontinue                                                |
| 32400 Aree a vegetazione boschiva ed arbustiva in evoluzione              |
| 33200 Rocce nude, falesie, rupi, affioramenti                             |
| 33231 Massi ciclopici                                                     |
| 33232 Scogliere                                                           |
| 33241 Terreni con prevalenza di sedimenti fini con assenza di vegetazione |
| 33243 Terreni con prevalenza di sedimenti medi con assenza di vegetazione |
| 33247 Piazzale di deposito                                                |
| 33251 Briglie                                                             |
| 33252 Ponti                                                               |
| 33300 Aree con vegetazione rada                                           |
| 51110 Alveo                                                               |
| 51120 Alveo consolidato                                                   |
| b. 51200 Bacini d'acqua                                                   |

Tabella 7.4 – Caratteristiche di uso del suolo del bacino de conoide; sopra (a) la descrizione, sotto (b)



## **8 RISULTATI DEL MODELLO**

L'elaborazione delle mappe del pericolo per il conoide posto a valle dei bacini del Rio Gatria e del Rio Strimm ha dovuto attraversare una prima fase di taratura del modello D.F.R.M. utilizzato per l'ottenimento dei prodotti relativi alla determinazione dell'intensità degli eventi per ogni tempo di ritorno considerato.

Di seguito si presentano quindi i risultati delle simulazioni finali derivanti dal processo di taratura descritto nel capitolo 7.1, i quali rappresentano i valori che sono stati considerati ad ogni simulazione effettuata. Infatti, per la calibratura del modello, non si sono verificati solamente i valori presentati nella Tabella 7.1, ma si sono anche controllati gli idrogrammi transitati per ogni sezione interna del bacino, e i rispettivi volumi coinvolti.

Sulla base dei risultati ottenuti, affiancati agli interventi effettuati negli altri file di input del modello (capitolo 7.1), si sono elaborate le mappe del pericolo lungo il torrente Alliz per i tempi di ritorno previsti dalla normativa (2.5).

### **8.1 Risultati della taratura del D.F.R.M. sul bacino del Rio Gatria**

Come sopra indicato, sulla base degli interventi descritti nei capitoli precedenti, si riportano di seguito i risultati delle simulazioni che si sono ritenute aver raggiunto i valori target per entrambi gli eventi considerati (Tabella 7.1), ovvero:

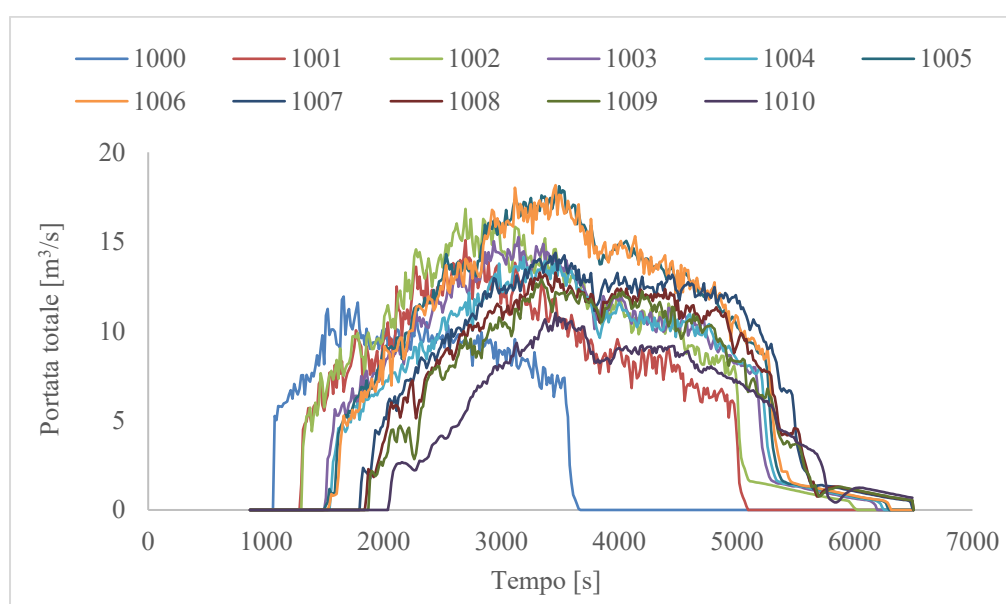
- Evento del 26/07/2029;
- Evento del 10/08/2020.

I risultati presentati riportano gli idrogrammi solido-liquidi e solo solidi delle sezioni interne appartenenti al dominio di calcolo del bacino del Rio Gatria, indicando inoltre i volumi transitati. Infine, si riporta il prodotto relativo alle aree di erosione e deposito generato dal D.F.R.M..

### 8.1.1 Evento 26 luglio 2019

L'evento in questione, il quale presenta in generale dei valori inferiori rispetto a quello del 10/08/2020, raggiunge il proprio picco massimo di  $18.16 \text{ m}^3/\text{s}$  a circa 3'500 secondi, in corrispondenza della Sezione 1006.

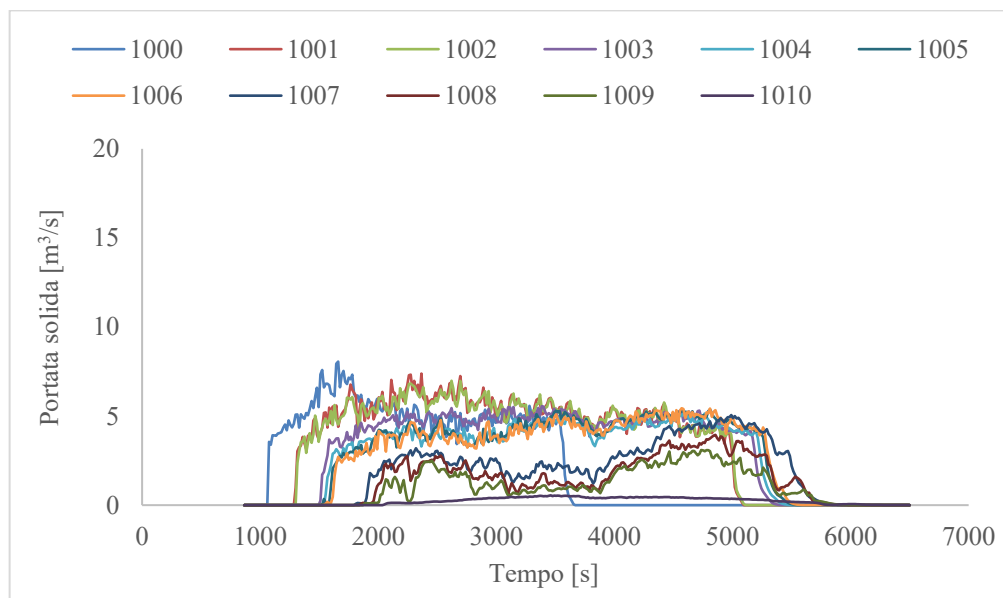
Il valore di riferimento per questo parametro, rappresentato da  $16 \text{ m}^3/\text{s}$  alla Sezione 1008, raggiunge invece i  $13.28 \text{ m}^3/\text{s}$ , discostandosi di poco meno di  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  (differenza del 16%).



*Figura 8.1 – Idrogramma della portata solido-liquida dell'evento del 26/07/2019 transitante per le sezioni interne*

In relazione invece alla sola componente solida, in Figura 8.2 è possibile apprezzare il deposito del sedimento verificatosi tra le ultime due sezioni. Infatti, la Sezione 1010, posta appena a valle della briglia filtrante, presenta una portata solida praticamente

assente, proprio a causa dell'abbassamento della pendenza e dell'allargamento dell'alveo.



*Figura 8.2 – Idrogramma della portata solida dell'evento del 26/07/2019 transitante per le sezioni interne*

Inoltre, dal confronto tra la Figura 8.1 e la Figura 8.2, è possibile osservare la coda liquida dell'evento, che si forma a partire dalla Sezione 1002 a poco più di 5100 secondi.

Il grafico relativo all'andamento dei volumi (Figura 8.3) mette in evidenza il contributo delle sezioni di ingresso. In particolare, i picchi di volume della Sezione 1002 e Sezione 1005, riportano rispettivamente il contributo delle sezioni di input 5001 e 5002 per la prima, e 5003 per la seconda.

Inoltre, esso evidenzia quanto visibile anche nella Figura 8.2, ovvero che il volume solido reclutato viene mantenuto pressoché costante a partire dalla Sezione 1003, per poi subire un calo a partire dalla Sezione 1007. Questo probabilmente è dovuto alle caratteristiche del fondo, espresse sia in termini topografici, per via della presenza di un tratto di briglie, e sia in termini di scabrezza, specialmente per il tratto compreso tra la Sezione 1008 e 1010, in quanto facente parte del bacino di deposito.

In riferimento a quest'ultimo, il volume invasato durante la simulazione è risultato essere pari a  $6'480 \text{ m}^3$ , i quali si discostano solamente di circa  $220 \text{ m}^3$  dal valore di riferimento, rappresentato da  $6'700 \text{ m}^3$  (differenza del 3%).

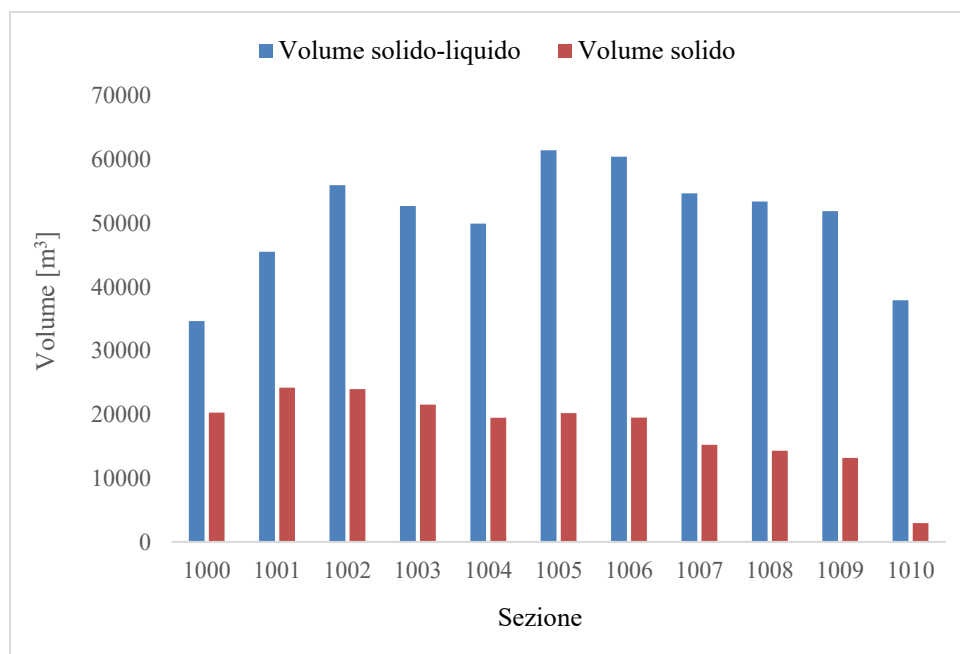


Figura 8.3 – Volumi transitanti durante l'evento del 26/07/2019 per ognuna delle sezioni interne

## 8.1.2 Evento 10 agosto 2020

L'andamento della portata solido-liquida lungo il tratto di canale analizzato dell'evento del 10 agosto 2020 (Figura 8.4) si distribuisce inizialmente, in corrispondenza della Sezione 1000, con una classica forma a campana, derivante dal contributo del sottobacino 5000. L'onda di piena assume poi una conformazione asimmetrica verso sinistra, che raggiunge il picco di circa  $28 \text{ m}^3/\text{s}$  alla Sezione 1005, posta appena a valle della sezione di ingresso del sottobacino 5003.

Il valore di riferimento per la taratura corrispondente alla Sezione 1008, nonché all'idrometro D2, è stato di  $26.66 \text{ m}^3/\text{s}$ , il quale si colloca ad appena a  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  al di sotto del valore target, rappresentato da  $31 \text{ m}^3/\text{s}$  (differenza del 14%).

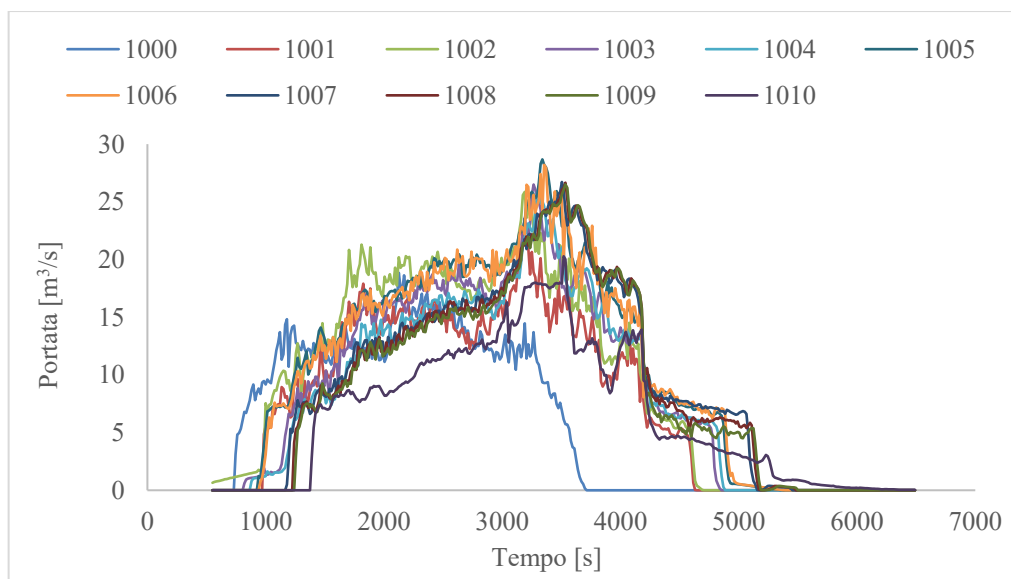


Figura 8.4 – Idrogramma della portata solido-liquida dell'evento del 10/08/2020 transitante per le sezioni interne

Per quanto riguarda invece l'andamento della portata solida (Figura 8.5), essa segue quello della portata totale, assumendo un picco di circa  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  in corrispondenza della Sezione 1006. In questo grafico, il contributo solido del sottobacino 5003 risulta ancora più visibile.

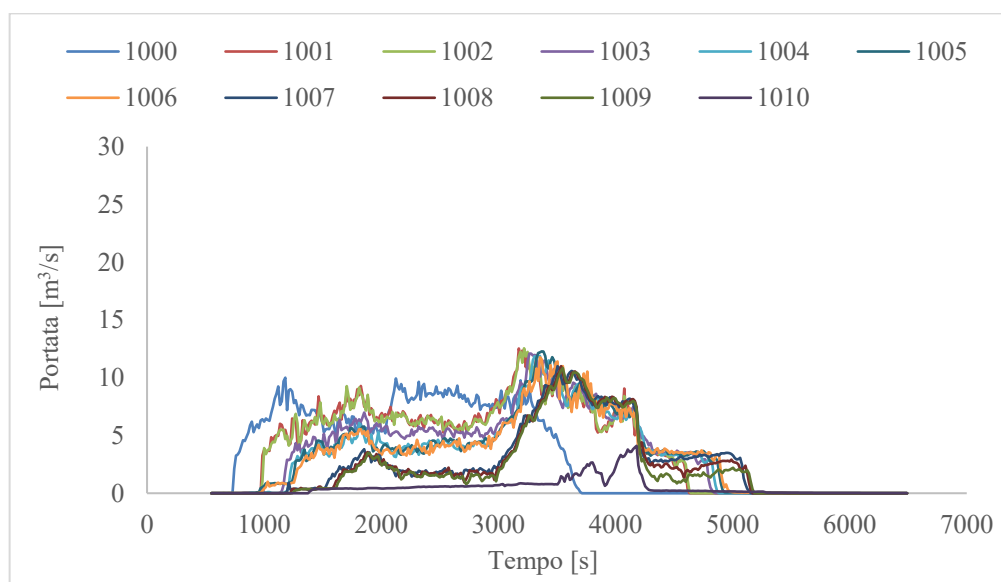


Figura 8.5 – Idrogramma della portata solida dell'evento del 10/08/2020 transitante per le sezioni interne

In riferimento invece ai volumi transitanti per ogni sezione interna, la Figura 8.6 mostra un andamento simile a quanto osservato per l'evento del 26/07/2019, con la differenza che i valori raggiunti arrivano a superare i 60'000 m<sup>3</sup>.

Il volume invasato durante la simulazione è risultato essere pari a circa 11'340 m<sup>3</sup>. Sebbene tale valore possa apparire eccessivamente inferiore rispetto a quello osservato di 15'000 m<sup>3</sup>, esso viene supportato dai risultati ottenuti da una simulazione parallela, effettuata però imponendo il filtro della briglia otturato. Questa, infatti, dimostra la propagazione sino al piazzale di deposito di 14'218 m<sup>3</sup>, confermando così i parametri utilizzati.

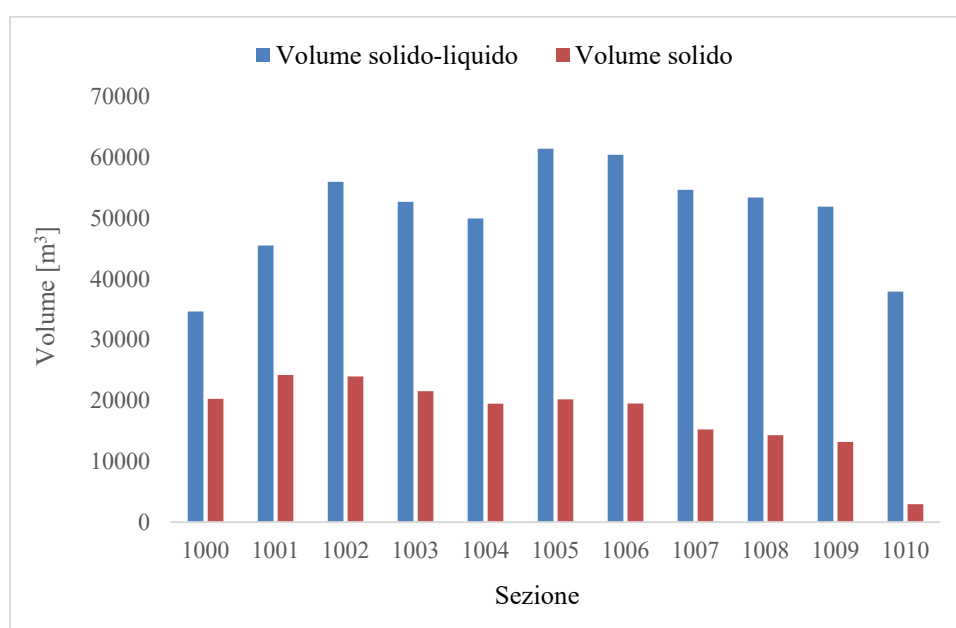


Figura 8.6 – Volumi transitanti durante l'evento del 10/08/2020 per ognuna delle sezioni interne

## 8.2 Mappe del pericolo

La realizzazione delle mappe del pericolo per la presente area di studio è avvenuta seguendo le indicazioni presenti all'interno delle "Direttive per la redazione dei piani delle zone di pericolo e per la classificazione del rischio", della Provincia Autonoma di Bolzano (DPG n.989/2016). A tal fine, come descritto nel capitolo 7, esse sono state ottenute tramite la modellazione delle piogge di eventi sintetici nel bacino del Rio Gadria, permettendo così di determinare la portata transitante attraverso la briglia filtrante, protratta poi al resto del collettore situato lungo il conoide.

Le mappe ottenute dalla modellazione numerica, che permettono di determinare i valori massimi di velocità del flusso ( $v$ ) e spessore del tirante sommato al deposito ( $h + M$ ), riportano una stima dei confini delle aree coinvolte dagli eventi simulati per ogni tempo di ritorno considerato. Questa elaborazione però presenta delle limitazioni in quanto non prende in considerazione la conformazione insediativa e non pone una visione di insieme alla distribuzione delle aree individuate. Per tale motivo il tecnico incaricato dell'elaborazione delle mappe del pericolo deve validare tali aree sulla base delle informazioni acquisite attraverso accertamenti in campo. Dal momento che quest'ultimo aspetto non risulta applicabile, le valutazioni vengono fatte attraverso l'ausilio di strumenti GIS.

Sulla base di ciò, di seguito si presentano le mappe "grezze" ottenute attraverso la modellazione del flusso, e successivamente il loro adattamento al contesto locale. Infine, viene presentato il confronto con la Carta delle Zone del Pericolo presente nel Piano delle Zone del Pericolo (PZP) realizzato per il conoide del Rio Gadria e Rio Strimm al momento dell'elaborazione del presente studio. La loro rappresentazione grafica segue le indicazioni descritte nel capitolo 2.5 e considera le categorie urbanistiche indicate nel capitolo 2.3.2 individuate dalla Provincia.

### 8.2.1 Mappe del pericolo risultanti dalla modellazione

Le mappe del pericolo presentate di seguito sono state ottenute dall'intersezione dei singoli valori massimi di " $v$ " e " $h + M$ " per ogni cella del dominio. Tale processo avviene attraverso l'attribuzione del codice previsto dalla matrice BUWAL a ciascuna di esse, il quale garantisce l'assegnazione del valore corrispondente alla condizione più critica per i TR considerati.

La prima intersezione avviene tra le variabili sopra citate per ciascun idrogramma, considerando quelli riferiti allo stesso tempo di ritorno. In questo modo si ottengono due mappe del pericolo distinte, una per ciascun idrogramma: il primo che massimizza il picco, il secondo che massimizza il volume solido-liquido. Queste vengono poi confrontate nuovamente, mantenendo per ogni cella il valore più elevato, e quindi considerato più pericoloso. Tale processo viene ripetuto per ogni tempo di ritorno considerato.

Una volta generate le tre mappe finali, esse vengono ulteriormente intersecate, selezionando ancora una volta il valore massimo per ogni cella, così da ottenere la mappa complessiva del pericolo (Figura 8.10).

La mappa del pericolo associata al TR30 (Figura 8.7) dimostra la sensibilità del canale di smaltimento anche ad eventi associati a tempi di ritorno minori e perciò meno severi, inondando un'area complessiva di 17.74 ha. Già a partire dal tratto superiore, l'assetto odierno del torrente Alliz consente il verificarsi di situazioni di pericolo al di fuori dell'alveo bagnato. Il flusso prosegue poi confinato fino a quando non raggiunge il limite inferiore dell'area abitata di Alliz, dove esonda in destra idrografica. Lo stesso fenomeno avviene nuovamente più a valle dopo circa 560 m.

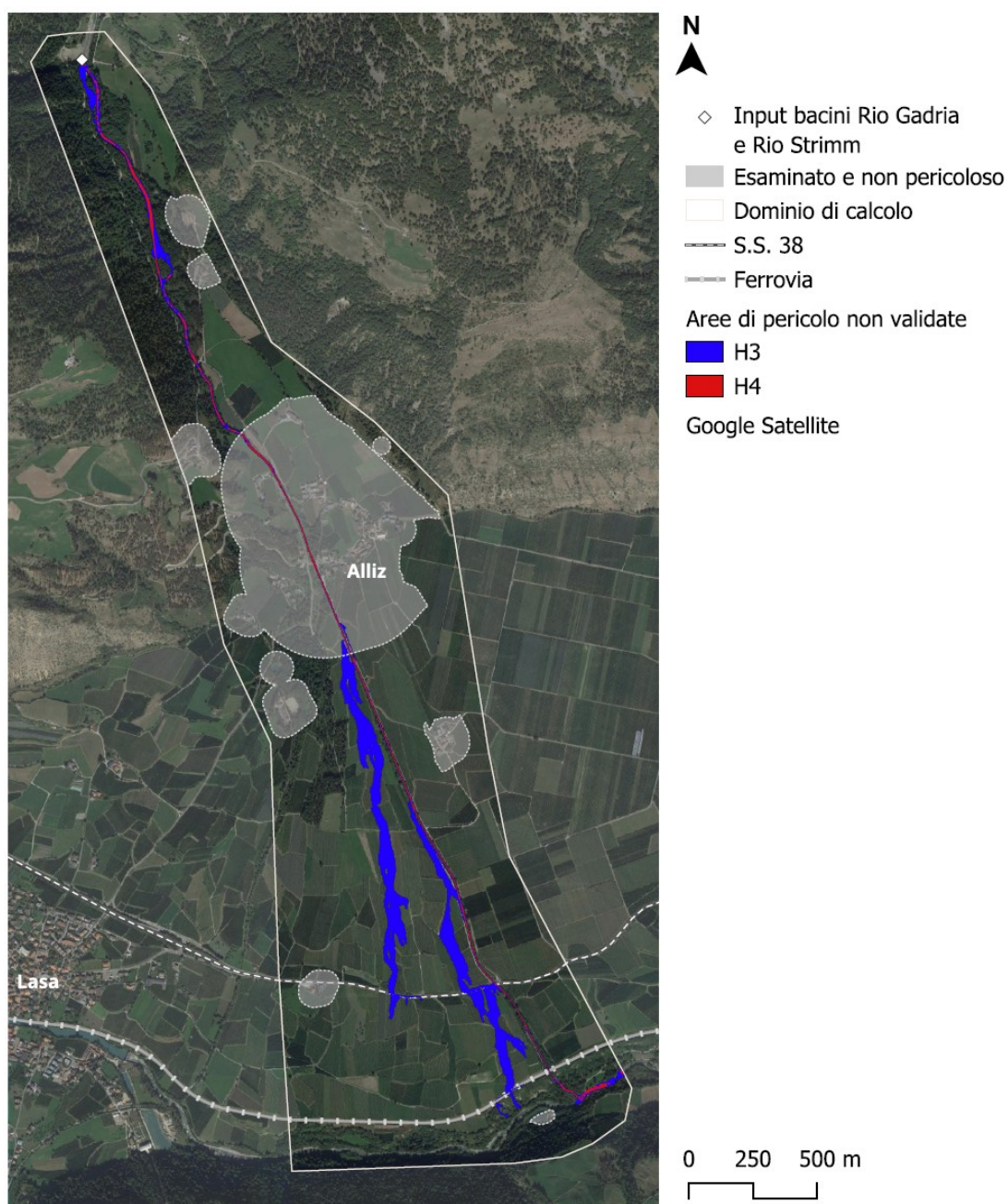
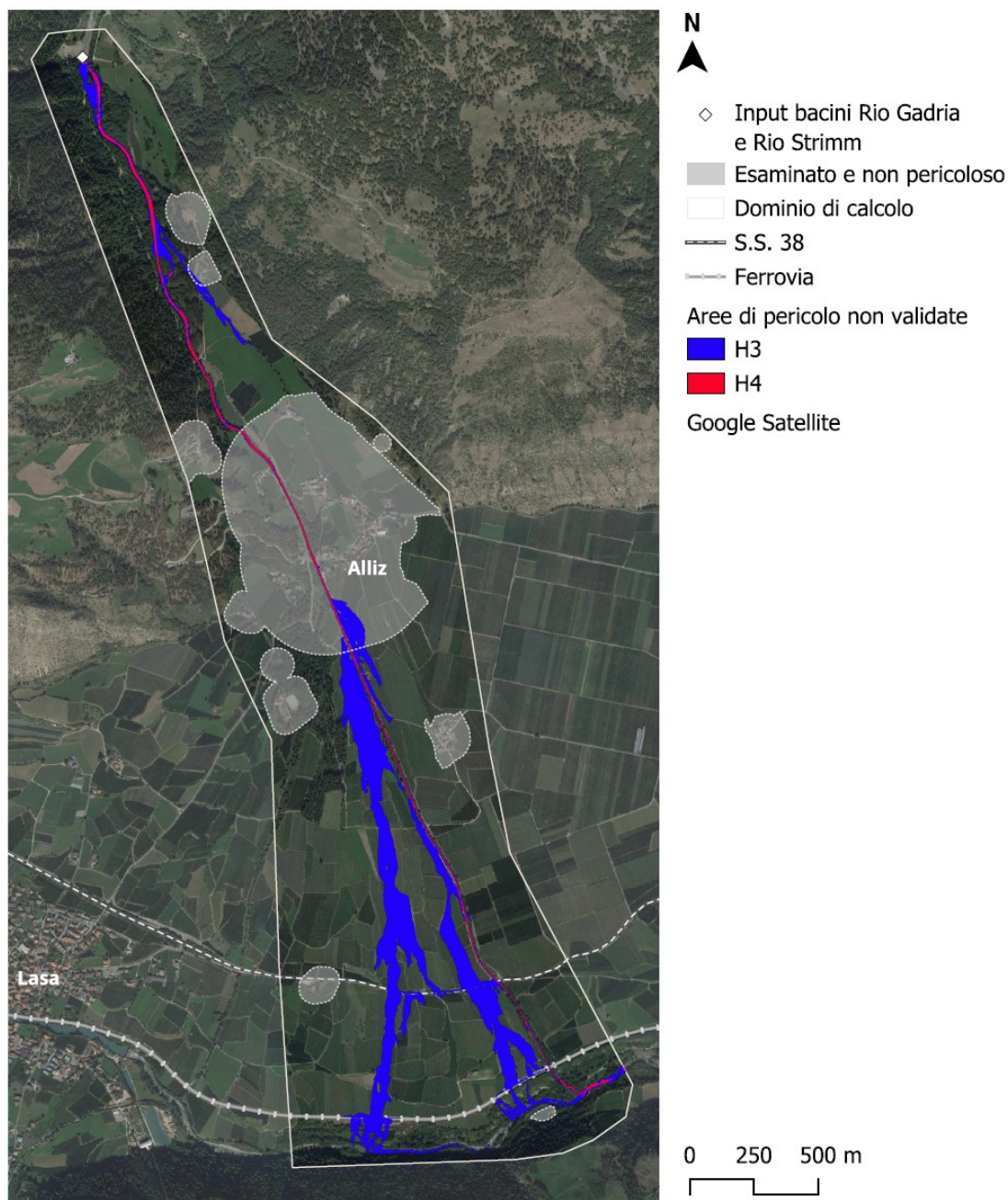


Figura 8.7 – Mappa del pericolo non validata per lo scenario TR30

La mappa del pericolo associata al TR100 (Figura 8.8) coinvolge una superficie maggiore rispetto all'evento precedente, pari a circa 33.43 ha, a causa del maggiore volume transitante. Nella parte superiore del canale si osserva una parziale fuoriuscita del flusso che interessa marginalmente alcune abitazioni isolate. Oltre ai punti di esondazione evidenziati nella mappa precedente, nel tratto successivo posto più a valle, si evidenzia una nuova superficie allagata posta in sinistra idrografica, senza che questa però interessi direttamente gli edifici del paese.



*Figura 8.8 – Mappa del pericolo non validata per lo scenario TR100*

La mappa del pericolo associata al TR300 (Figura 8.9) interessa una superficie di circa 62.70 ha, rappresentando lo scenario più esteso. Le prime fuoriuscite di flusso si osservano appena a valle della briglia filtrante, mentre per quanto riguarda l'inondazione in sinistra idrografica in corrispondenza delle abitazioni isolate poste a monte dell'abitato di Alliz, essa si propaga per una distanza superiore rispetto a quanto evidenziato nella mappa precedente, protraendosi fino a raggiungere alcune abitazioni

del centro. I punti critici di esondazione evidenziati negli scenari precedenti vengono riconfermati, dimostrando un forte coinvolgimento delle aree rurali poste lungo il canale.

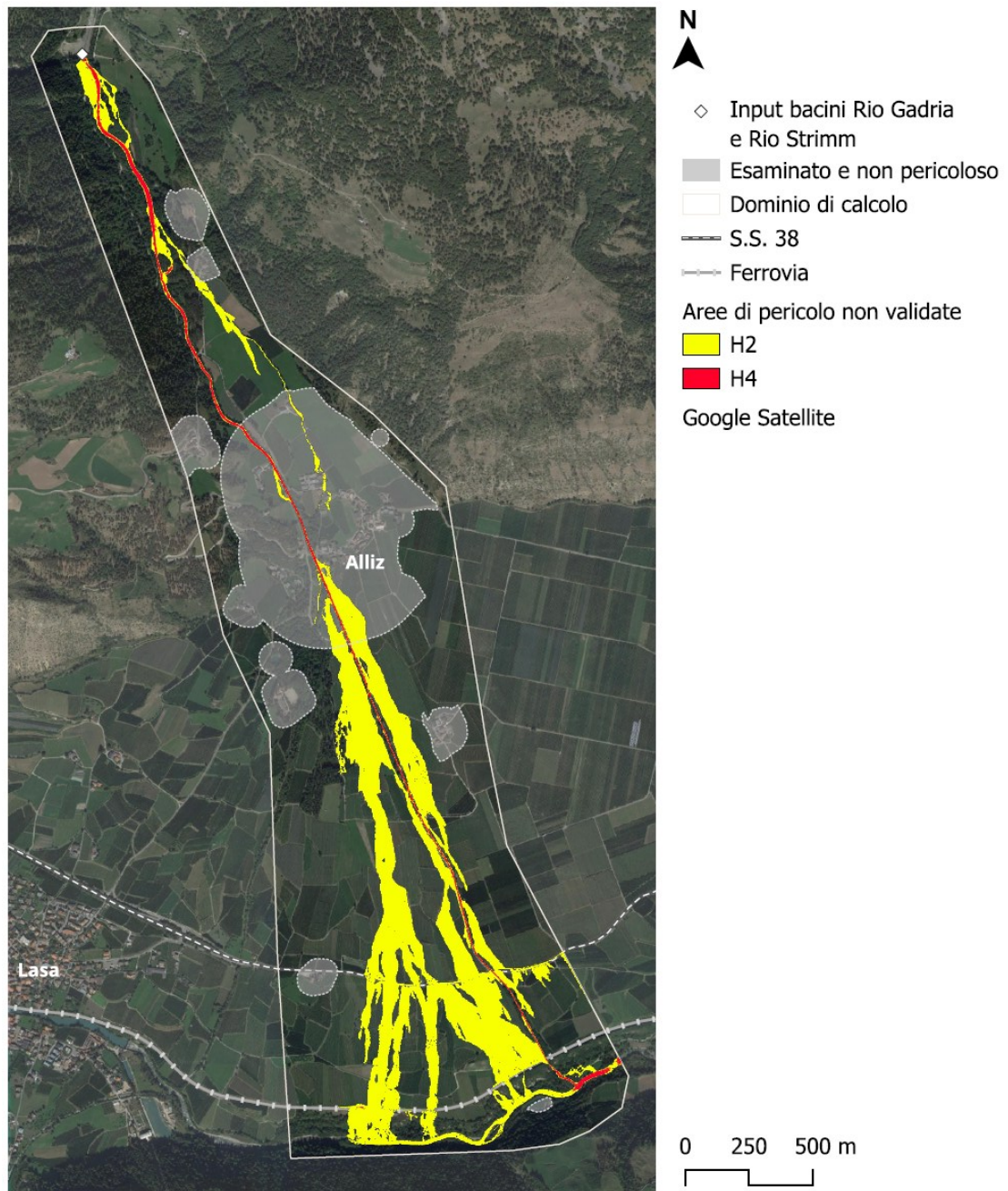


Figura 8.9 – Mapa del pericolo non validata per lo scenario TR300

Dalla sovrapposizione delle mappe sopra presentati, si ottiene la mappa del pericolo complessiva ottenuta dal modello D.F.R.M. e che quindi si basa su una prima

perimetrazione non perfettamente adattata al contesto locale, in quanto non ancora validata dai rilievi di campo (Figura 8.10).

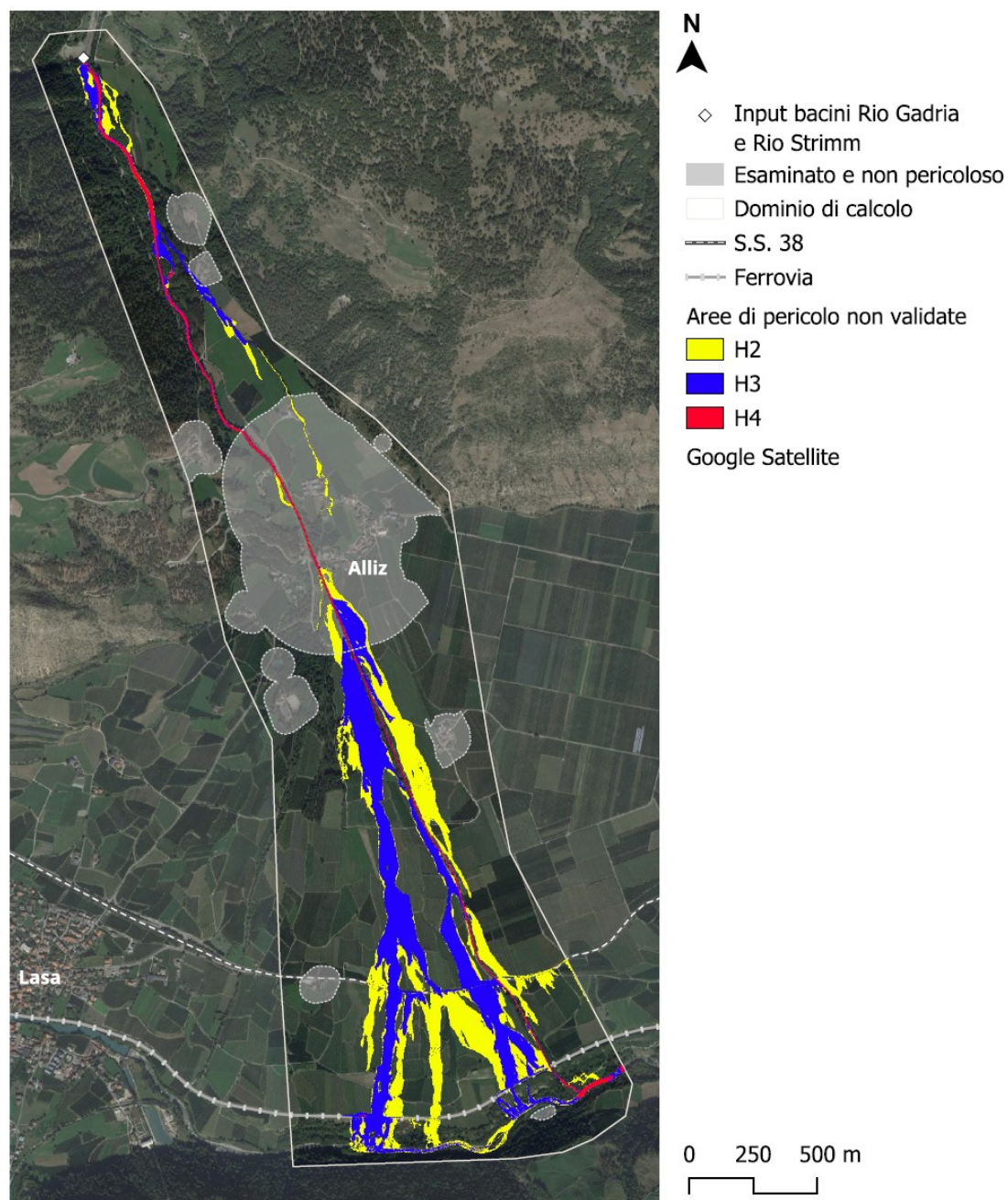


Figura 8.10 – Mappa del pericolo non validata complessiva

Le aree che vengono maggiormente colpite sono quelle situate nella parte inferiore del conoide. In quest'area, si trovano due infrastrutture di grande importanza, quale la Strada del Passo dello Stelvio (SS38) e il tratto di ferrovia che serve l'intera valle. Per quanto riguarda gli scenari associati ai tempi di ritorno di 100 e 300 anni, il flusso fuoriuscito dai punti situati a valle del centro di Alliz si propaga fino a raggiungere la

parte terminale del conoide, dove scorre lungo le ripide pareti in roccia defluendo infine nell'Adige.

### **8.2.2 Mappa del pericolo validata**

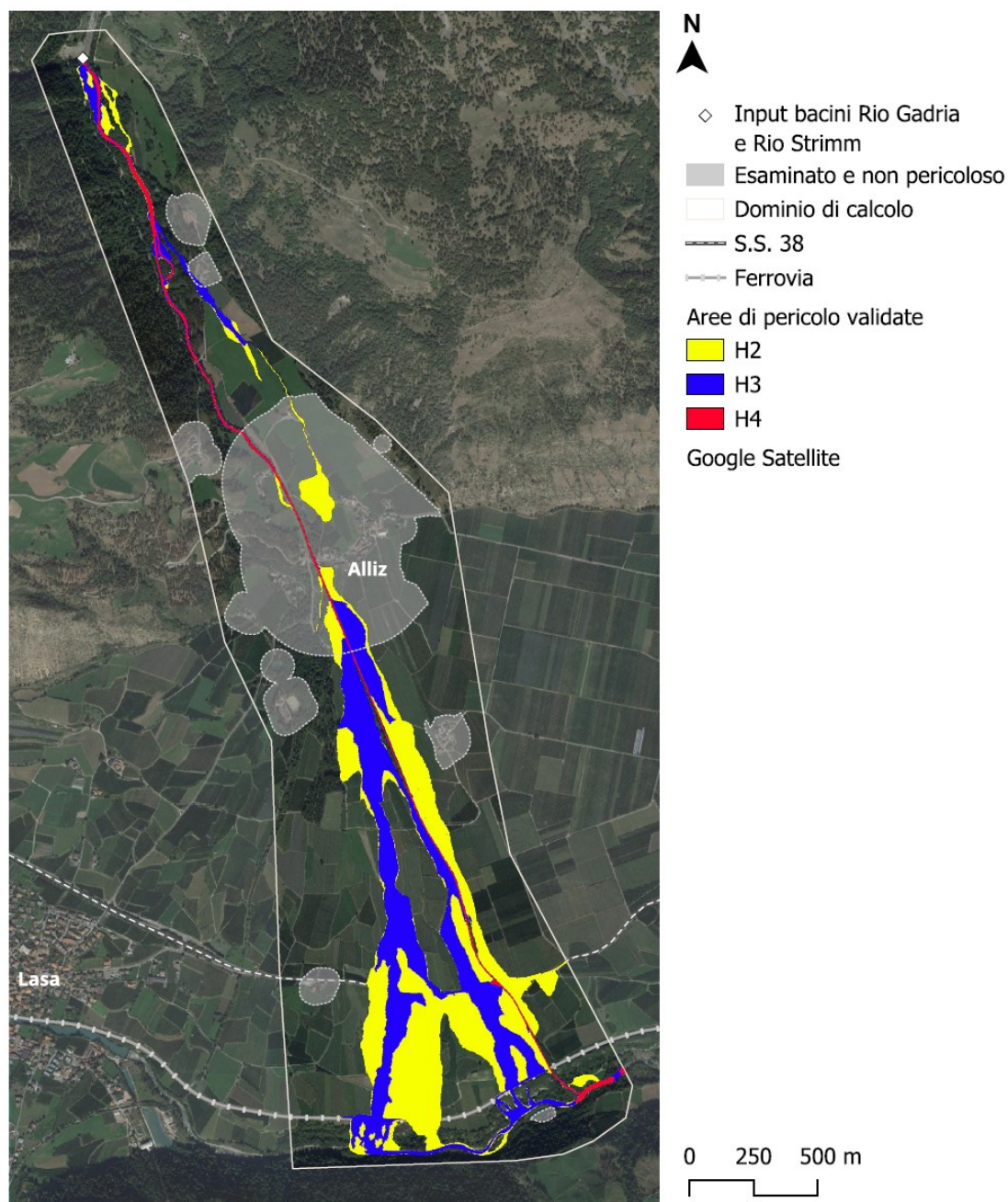
La validazione della mappa del pericolo complessiva ottenuta dalla fase di modellazione del flusso e descritta nel capitolo precedente, rappresenta un aspetto fondamentale nei confronti della pianificazione territoriale, in quanto i PZP rappresentano un piano sovraordinato ai piani urbanistici comunali, dettando prescrizioni in base alle differenti aree di pericolo individuate. Gli interventi non consentiti, o permessi con limitazioni, sono riportati dal “Regolamento di esecuzione” (D.P.P. 23/2019).

Poiché non è risultato possibile effettuare i rilievi di campo per questa fase, la validazione del perimetro è stata eseguita usufruendo delle informazioni disponibili attraverso gli strumenti GIS, avvalendosi in particolare del DEM e delle immagini satellitari disponibili online.

La matrice di BUWAL (Figura 2.1) consente al tecnico incaricato di poter scegliere tra le classi di pericolo proposte per le celle che presentano una doppia possibilità (es. 2, 4, 6). Ciò viene consentito per conferire maggiore flessibilità e adattabilità al contesto locale. Su questa base, le mappe realizzate nel capitolo precedente riportano la minore classe di pericolo consentita per ogni cella della matrice, in quanto la scelta dell'eventuale grado superiore di pericolo è stata eseguita nella presente fase di validazione delle aree individuate.

Le considerazioni che sono state utilizzate per aumentare la classe di pericolo per i codici che ne presentano la possibilità o per l'aggiornamento del perimetro delle aree di pericolo, si sono concentrate sulla presenza di elementi antropici di rilievo, quali abitazioni, strade e altre infrastrutture, e sulle aree che presentano “ $v$ ” o “ $h + M$ ” superiore a 1. Ciò viene effettuato in modo tale da considerare con un grado di pericolo superiore le superfici che si trovano in una situazione di pericolo intermedia, non rappresentata da entrambe le variabili inferiori o superiori a 1.

Di seguito si presenta la mappa del pericolo complessiva a seguito del processo di validazione basato su quanto sopra descritto (Figura 8.11).



*Figura 8.11 – Mappa del pericolo validata complessiva*

Seppur il conoide appaia con una superficie piuttosto omogenea che non presenta particolari punti di rilievo o depressione, si osservano comunque delle aree che non vengono interessate dal flusso in quanto topograficamente isolate. Esse constano in zone sufficientemente rialzate rispetto al territorio circostante e che quindi si confermano escluse dal pericolo. Le superfici che invece si sono ritenute comunque

potenzialmente suscettibili, in quanto non completamente isolate dalle aree allagate circostanti, sono state incluse all'interno delle aree in pericolo. Tali interventi sono stati applicati principalmente alle classi H3 e H2, in quanto risultano le uniche ad aver interessato il territorio al di fuori dell'alveo.

Per quanto riguarda il centro abitato di Alliz, si pone l'evidenza sull'ampliamento della zona di pericolo H2 nell'unica area raggiunta dal deflusso. Nonostante, nel modello essa interessasse una parte ridotta del territorio urbanizzato, si è preferito comprendere anche le abitazioni non direttamente colpite dal flusso ma poste comunque in prossimità di quest'ultimo.

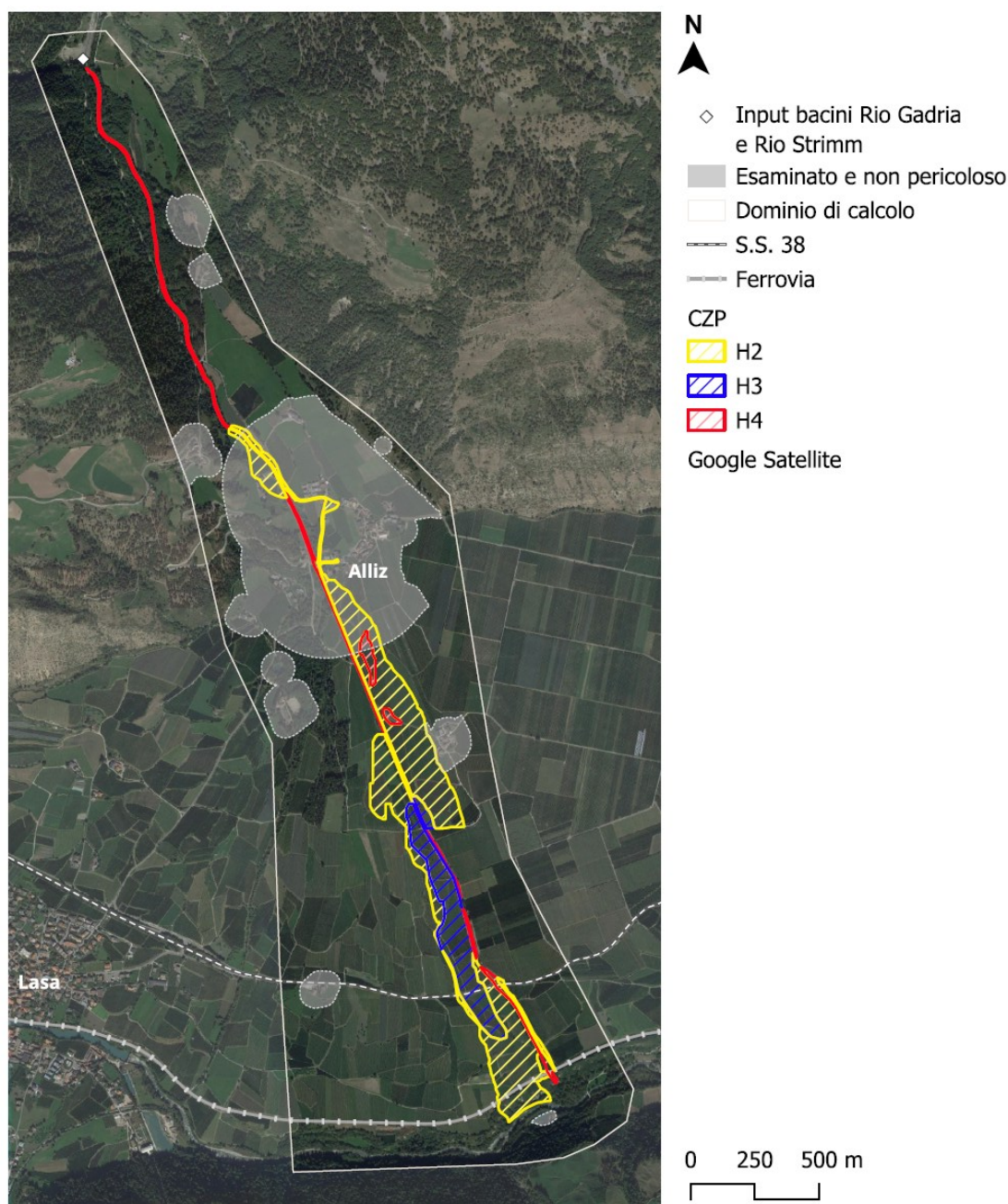
In riferimento invece agli interventi eseguiti nelle zone classificate con H4, essi si sono concentrati in due aree: nella parte superiore del conoide in prossimità delle abitazioni isolate e in corrispondenza del ponte della SS38 che attraversa il torrente Alliz. Il primo caso riguarda un canale secondario che devia temporaneamente in sinistra idrografica e che presenta una discreta quantità di celle caratterizzate da almeno uno dei due valori " $v$ " o " $h + M$ " superiori a 1. Il secondo caso invece è stato considerato come H4 in quanto parte del flusso, fuoriuscito in un punto posto più a monte, si ricongiunge al deflusso del canale principale, aumentando così la possibilità di ostruzione della sezione in corrispondenza del ponte.

In conclusione, si può affermare che a seguito delle considerazioni effettuate durante il processo di validazione, il pericolo H4 si presenta principalmente all'interno del canale di smaltimento. Mentre le aree H3 e H2 si distribuiscono prevalentemente nella parte inferiore del conoide.

### **8.2.3 Confronto con la Carta delle Zone di Pericolo**

Nonostante non sia nota la totalità delle variabili e dei dati utilizzati da parte del tecnico incaricato di realizzare le mappe del pericolo per i Comuni di Lasa e Silandro, si intende comunque effettuare un confronto con le mappe realizzate nel presente studio al fine di effettuare un paragone con i prodotti risultanti dall'applicazione della metodologia utilizzata in ambito professionale.

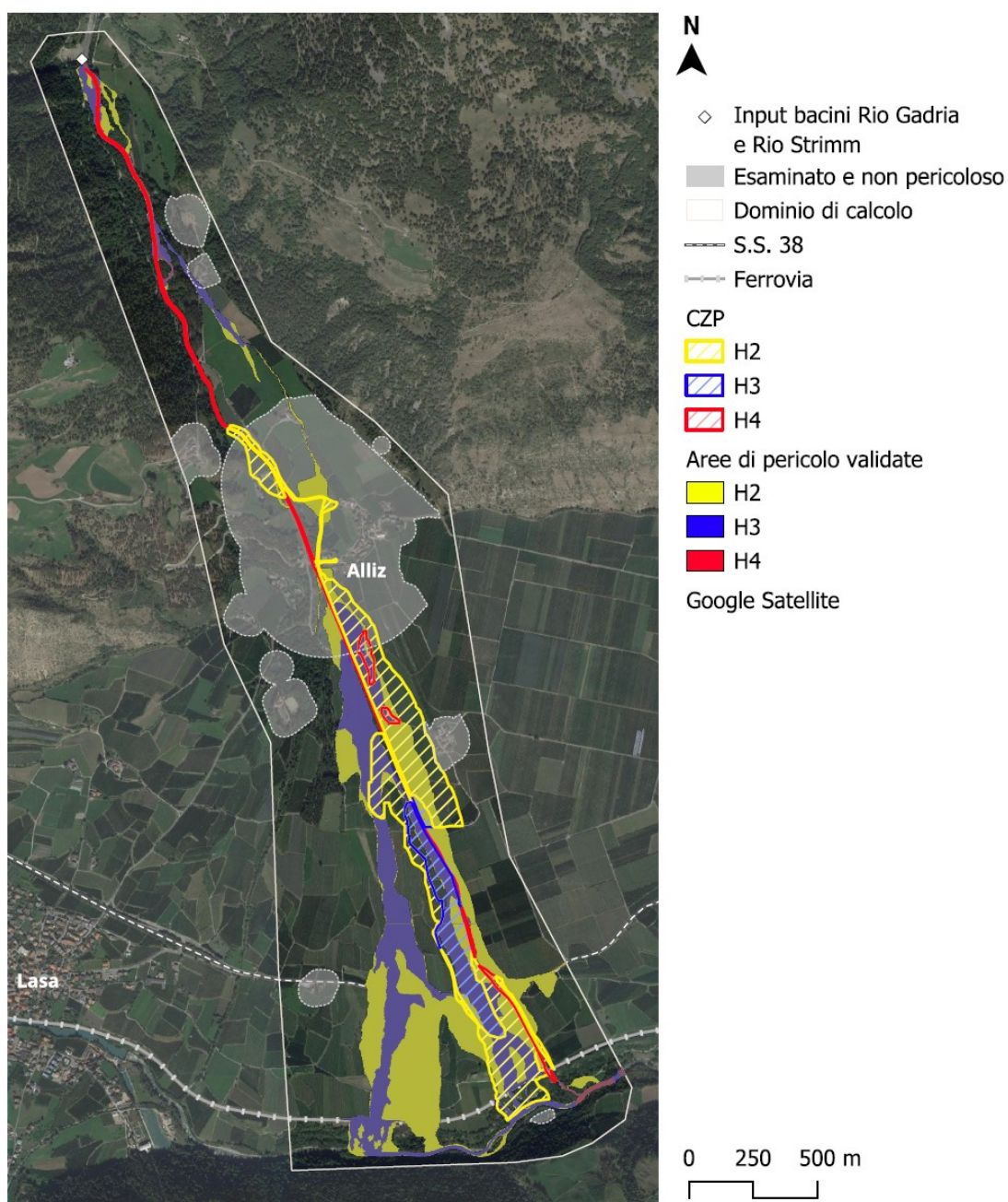
Le aree raffigurate nella mappa seguente (Figura 8.12) rappresentano un estratto della Carta delle Zone di Pericolo (CZP) ed in particolare riguardano solamente le zone categorizzate come debris flow (DF), dal momento che costituiscono il fenomeno trattato nel presente studio.



*Figura 8.12 – Estratto della Carta delle Zone di Pericolo dei Comuni di Lasa e Silandro*

Ciò che si osserva comparando l'estratto della CZP con la mappa del pericolo risultante dal presente studio (Figura 8.13) è che nella prima viene interessata una superficie nettamente inferiore, distribuita principalmente lungo il canale di smaltimento. Nel

centro abitato invece le abitazioni coinvolte sono differenti, dimostrandosi minori nella CZP. Un'ulteriore area che presenta delle differenze significative riguarda la parte superiore del conoide. Infatti, l'area immediatamente a valle della briglia filtrante viene inondata da una quantità di flusso superiore, che viene classificata con H3 e H2. Inoltre, poco più a valle si osserva la deviazione di parte del flusso in sinistra idrografica, la quale interessa marginalmente l'abitazione isolata situata nelle vicinanze.



*Figura 8.13 – Confronto fra l'estratto della CZP e la mappa del pericolo validata complessiva elaborata nel presente studio*



## 9 CONCLUSIONI

Il presente studio si concentra sull'elaborazione delle mappe del pericolo per il bacino del Rio Gadria, situato nella Provincia Autonoma di Bolzano, seguendo le indicazioni fornite dai Piani comunali delle Zone di Pericolo (PZP), e la successiva comparazione con le Carte delle Zone del Pericolo (CZP) attualmente in vigore.

L'elaborazione di tali mappe nasce dalla Direttiva Alluvioni 2007/60/CE, che impone la realizzazione dei Piani di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA) come strumento designato per la pianificazione territoriale nei confronti della gestione del rischio idraulico. Esso sostituisce il precedente piano di riferimento, costituito dal Piano di Assetto Idrogeologico (PAI), al quale rimane però la competenza in materia di rischio geologico e valanghivo.

Inoltre, la Direttiva Alluvioni istituisce le Autorità di Bacino Distrettuali quale ente incaricato della valutazione e gestione del territorio nei confronti del rischio idrogeologico. Tuttavia, il D.lgs. 49/2010, che recepisce in Italia la Direttiva europea, riconosce la competenza esclusiva in tale materia della Provincia Autonoma di Bolzano, che elabora il proprio Piano Generale per l'Utilizzazione delle Acque Pubbliche (PGUAP), pur tenendo in considerazione gli obiettivi previsti dall'Unione Europea. L'insieme dei PZP rappresenta quindi il piano stralcio dell'assetto idrogeologico del PGUAP, e corrispondono al PAI e al PGRA per i piani di bacino distrettuali.

La classificazione delle aree soggette a pericolo segue la metodologia BUWAL, la quale pone in relazione la probabilità di accadimento del fenomeno con la sua intensità. I parametri utilizzati per descrivere l'intensità delle colate detritiche sono la velocità di scorrimento del miscuglio ( $v$ ) e lo spessore del deposito ( $M$ ). In riferimento a quest'ultimo, il presente studio considera una condizione maggiormente conservativa,

rappresentata dalla sommatoria tra il tirante e il deposito ( $h + M$ ). I tempi di ritorno di riferimento invece corrispondono a 30, 100 e 300 anni.

La metodologia applicata al bacino del Rio Gadria per l'elaborazione delle mappe del pericolo segue le indicazioni fornite dai PZP. Essa quindi si è basata su un'analisi preliminare del contesto territoriale, costituito dal bacino idrografico stesso e dal conoide sottostante, e sulla raccolta degli eventi da colata detritica avvenuti in passato.

A seguito della realizzazione della briglia posta all'apice del conoide, non si sono più registrati eventi nel torrente a valle, nonostante la frequenza di accadimento annua di 1-2 eventi lungo il Rio Gadria. Pertanto, nell'elaborazione delle mappe del pericolo, si è deciso di non effettuare l'analisi inserendo gli eventi storici registrati nel conoide, in quanto avvenuti in condizioni non rappresentative della dinamica attuale.

Sulla base delle informazioni acquisite in questa fase, si sono individuate le aree oggetto di studio del conoide, suddivise per categoria urbanistica, come previsto dal DPG n. 989/2016. Successivamente si è proceduto alla determinazione delle variabili richieste dalla normativa ( $v$  e  $h + M$ ), distinte per tre scenari di precipitazione differenti, attraverso l'impiego del modello D.F.R.M. (Gregoretti et al., 2019).

La simulazione degli eventi è stata suddivisa in due domini differenti: quello relativo al bacino del Rio Gadria e quello relativo all'area del conoide posta a valle del bacino stesso. Il primo è servito a comprendere il comportamento del bacino e ad estrarre la portata transitante attraverso la briglia filtrante posta alla fine di quest'ultimo, mentre il secondo è servito a protrarre la portata sopra simulata al resto del collettore.

L'applicazione del D.F.R.M. al presente caso studio ha dovuto attraversare però una fase di taratura, allo scopo di calibrare i parametri utili alla determinazione del moto del flusso, dal momento che esso è stato validato su dei territori costituiti da caratteristiche geologiche, morfologiche e idrologiche differenti. Questo processo è stato effettuato utilizzando i parametri di alcuni eventi passati accaduti nel bacino del Rio Gadria e registrati dal sistema di monitoraggio in esso presente. In particolare, si sono considerati i valori della portata di picco e del volume depositato nel bacino di ritenuta terminale.

Per quanto riguarda invece la determinazione dei massimi valori di  $v$  e  $h + M$ , la modellazione idrologica si è basata sull'individuazione degli idrogrammi di piena

capaci di ottenere il valore maggiore di picco di portata e di volume per ogni tempo di ritorno considerato.

L'applicazione al bacino dei dati restituiti dalla taratura, ha fornito gli idrogrammi da utilizzare come input per la mappatura del pericolo nel conoide. La propagazione del deflusso derivante da monte, effettuata tramite l'utilizzo di modelli idraulici, rappresenta però un passaggio intermedio nella determinazione delle aree in pericolo. Infatti, la normativa prevede una fase di validazione dei perimetri da essi individuati, tramite rilievi di campo operati dal tecnico incaricato.

Nel presente caso studio sono state quindi elaborate le mappe del pericolo ottenute tramite il D.F.R.M. per i tempi di ritorno di 30, 100 e 300 anni. A partire dalla loro sovrapposizione, si è poi verificata la plausibilità dei risultati attraverso valutazioni effettuate tramite l'ausilio di strumenti GIS.

I risultati ottenuti (Figura 8.11), adattati al contesto locale, hanno dimostrato che il pericolo H4 si presenta principalmente all'interno del canale di smaltimento, mentre le aree H3 e H2 si distribuiscono prevalentemente nella parte inferiore del conoide. Il processo di validazione ha comportato un aumento del 23% della superficie individuata dal modello in quanto sono state considerate le superfici potenzialmente coinvolgibili, come ad esempio le aree di apparente isolamento topografico e gli edifici interessati marginalmente.

Dal confronto con la Carta delle Zone di Pericolo (Figura 8.13) si osserva una superficie coinvolta nettamente minore. Le principali differenze si evidenziano sia nella parte superiore del conoide, che nella parte inferiore. Nel primo caso essa non considera una fuoriuscita del flusso in sinistra che raggiunge il centro di Alliz e così parte delle abitazioni esistenti. Nel secondo caso, invece, i risultati ottenuti nel presente studio dimostrano una superficie coinvolta che si estende maggiormente in destra idrografica, attribuita ai punti di esondazione localizzati più a monte, posti appena al di sotto del centro abitato.

Tale confronto deve però considerare che il processo applicato in ambito professionale si sviluppa all'interno di un contesto più articolato. Il tecnico incaricato riveste un ruolo di elevata importanza, dal momento che le mappe del pericolo impongono prescrizioni ai piani comunali, incidendo in modo significativo sulle dinamiche di sviluppo socio-

economiche locali. Infatti, esse definiscono nel dettaglio gli interventi che non si possono realizzare, o che sono consentiti con determinate limitazioni.

Per questo motivo è necessario valutare con attenzione la totalità degli aspetti che vengono coinvolti durante la realizzazione di tali prodotti, mantenendo la tutela e la sicurezza della popolazione come obiettivo prioritario.

# BIBLIOGRAFIA

- Armanini, A., Fraccarollo, L., & Rosatti, G. (2009). Two-dimensional simulation of debris flows in erodible channels. *Computers & Geosciences*, 993–1006. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.11.008>
- Barbini, M., Bernard, M., Boreggio, M., Schiavo, M., D'Agostino, V., & Gregoretti, C. (2024). An alternative approach for the sediment control of in-channel stony debris flows with an application to the case study of Ru Secco Creek (Venetian Dolomites, Northeast Italy). *Frontiers in Earth Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1340561>
- Bates, P. D., & Roo, A. (2000). A Simple Raster-Based Model for Flood Inundation Simulation. *Journal of Hydrology*, 236, 54–77. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00278-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00278-X)
- Berger, C., McArdell, B., & Schlunegger, F. (2011). Direct measurement of channel erosion by debris flows, Illgraben, Switzerland. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116. <https://doi.org/10.1029/2010JF001722>
- Bernard, M., Barbini, M., Berti, M., Boreggio, M., Simoni, A., & Gregoretti, C. (2025). Rainfall-Runoff Modeling in Rocky Headwater Catchments for the Prediction of Debris Flow Occurrence. *Water Resources Research*, 61(1), e2023WR036887. <https://doi.org/10.1029/2023WR036887>
- Bernard, M., Boreggio, M., Degetto, M., & Gregoretti, C. (2019). Model-based approach for design and performance evaluation of works controlling stony debris flows with an application to a case study at Rovina di Cancia (Venetian Dolomites, Northeast Italy). *The Science of the Total Environment*, 688, 1373–1388. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.468>
- Borga, M., Boscolo, P., Zanon, F., & Sangati, M. (2007). Hydrometeorological analysis of the 29 August 2003 flash flood in the Eastern Italian Alps. *Journal of hydrometeorology*, 8(5), 1049–1067.

- Botter, G., & Rinaldo, A. (2003). Scale effect on geomorphologic and kinematic dispersion. *Water Resources Research*, 39(10), 2003WR002154. <https://doi.org/10.1029/2003WR002154>
- Bressan, L. (2025). *Documentazione fotografica dei rilievi effettuati nel bacino del Rio Gadria (BZ)* [Dataset]. HydroShare. <http://www.hydroshare.org/resource/dcc228d02ef5436aae64bee30f0caa44>
- Brufau, P., Garcia-Navarro, P., Ghilardi, P., Natale, L., & Savi, F. (2000). 1D Mathematical modelling of debris flow. *Journal of Hydraulic Research*, 38, 435–446. <https://doi.org/10.1080/00221680009498297>
- Cavalli, M., Goldin, B., Crema, S., Brardinoni, F., Marchi, L., Blasone, G., & Cazorzi, F. (2025). *Guideline for assessing sediment dynamics in alpine basins and channel reaches*.
- Chiang, S. H., Chang, K. T., Mondini, A. C., Tsai, B. W., & Chen, C. Y. (2012). Simulation of event-based landslides and debris flows at watershed level. *Geomorphology*, 138(1), 306–318. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.09.016>
- Comiti, F., Marchi, L., Macconi, P., Arattano, M., Bertoldi, G., Borga, M., Brardinoni, F., Cavalli, M., D'Agostino, V., Penna, D., & Theule, J. (2014). A new monitoring station for debris flows in the European Alps: First observations in the Gadria basin. *Natural Hazards*, 73(3), 1175–1198. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1088-5>
- Comune di Lasa. (2024). *Numeri e fatti*. Comune di Lasa. [https://www.comune.lasa.bz.it/it/Vivere\\_il\\_comune/Numeri\\_e\\_fatti](https://www.comune.lasa.bz.it/it/Vivere_il_comune/Numeri_e_fatti)
- Comune di Silandro. (2024). *Numeri e fatti*. Comune di Silandro. [https://www.schlanders.it/it/Vivere\\_il\\_comune/Numeri\\_e\\_fatti#:~:text=Il%20Comune%20di%20Silandro%20ha,31%2F12%2F2024\).](https://www.schlanders.it/it/Vivere_il_comune/Numeri_e_fatti#:~:text=Il%20Comune%20di%20Silandro%20ha,31%2F12%2F2024).)
- Courant, R., Friedrichs, K., & Lewy, H. (1967). On the Partial Difference Equations of Mathematical Physics. *IBM Journal of Research and Development*, 11(2), 215–234. <https://doi.org/10.1147/rd.112.0215>
- D'Agostino, V. (1996). *ANALISI QUANTITATIVA E QUALITATIVA DEL TRASPORTO SOLIDO TORRENTIZIO NEI BACINI MONTANI DEL TRENTO ORIENTALE. 1.*

- D'Agostino, V. (2022). *Appunti delle lezioni di Design of Sustainable and Resilient Measures Against Floods* (Laurea in Riassetto del Territorio e Tutela del Paesaggio). Università degli Studi di Padova.
- D'Agostino, V. (2024). *Appunti delle lezioni di Fluviomorfologia e protezione dal rischio idrogeologico* (Laurea magistrale in Scienze Forestali e Ambientali). Università degli Studi di Padova.
- de Haas, T., Lau, C.-A., & Ventra, D. (2024). Debris-Flow Watersheds and Fans: Morphology, Sedimentology and Dynamics. In M. Jakob, S. McDougall, & P. Santi (A c. Di), *Advances in Debris-flow Science and Practice* (pp. 9–73). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-48691-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-48691-3_2)
- DeAndreis, L. (2021, settembre 21). Linee guida per il monitoraggio delle frane. *SNPA - Sistema nazionale protezione ambiente*. <https://www.snpambiente.it/notizie/snpa/linee-guida-per-il-monitoraggio-delle-frane/>
- Delibera 3/2021. [https://distrettoalpiorientali.it/wp-content/uploads/provvedimento\\_03\\_2021.pdf](https://distrettoalpiorientali.it/wp-content/uploads/provvedimento_03_2021.pdf)
- Delibera CIP 2/2022. Recuperato 10 novembre 2025, da [http://93.56.55.241/wp-content/uploads/2023/02/Delibera\\_02\\_CIP\\_18\\_03\\_2022.pdf](http://93.56.55.241/wp-content/uploads/2023/02/Delibera_02_CIP_18_03_2022.pdf)
- Direttiva 2000/60/CE.
- Direttiva 2007/60/CE. Recuperato 9 novembre 2025, da <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007L0060&from=EN>
- D.Lgs. 49/2010. [https://www.isprambiente.gov.it/pre\\_meteo/file/DLGS\\_49\\_2010\\_agg2014.pdf](https://www.isprambiente.gov.it/pre_meteo/file/DLGS_49_2010_agg2014.pdf)
- D.Lgs. 152/2006. <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2006-04-03;152>
- DPG n. 989/2016. <https://assets-eu-01.kc-usercontent.com/f25c3e79-d836-0158-96a2-5418035fd6a5/efb90ada-62a2-4027-829f-12b5ffd481e4/Direttive%20-%20Richtlinie%202016.pdf>
- DPG n.989/2016. <https://assets-eu-01.kc-usercontent.com/f25c3e79-d836-0158-96a2-5418035fd6a5/efb90ada-62a2-4027-829f-12b5ffd481e4/Direttive%20-%20Richtlinie%202016.pdf>

- D.P.P. 23/2019. Recuperato 10 novembre 2025, da [https://lexbrowser.provinz.bz.it/doc/it/217759/decreto\\_del\\_presidente\\_della\\_p\\_rovincia\\_10\\_ottobre\\_2019\\_n\\_23.aspx](https://lexbrowser.provinz.bz.it/doc/it/217759/decreto_del_presidente_della_p_rovincia_10_ottobre_2019_n_23.aspx)
- Egashira, S., & Ashida, K. (1987). Sediment transport in steep slope flumes. *Proc. of RoC Japan Joint Seminar on Water Resources*.
- Egashira, S., HONDA, N., & Itoh, T. (2001). Experimental Study on the Entrainment of Bed Material into Debris Flow. *Physics and Chemistry of The Earth Part C-solar-terrestrial and Planetary Science - PHYS CHEM EARTH P C-SOLAR-T P*, 26, 645–650. [https://doi.org/10.1016/S1464-1917\(01\)00062-9](https://doi.org/10.1016/S1464-1917(01)00062-9)
- Frank, F., McArdeall, B., Huggel, C., & Vieli, A. (2015). The importance of entrainment and bulking on debris flow runout modeling: Examples from the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15, 2569–2583. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-2569-2015>
- Gregoretto, C. (2023). *Appunti delle lezioni di Opere di Protezione dei Versanti* (Laurea in Riassetto del Territorio e Tutela del Paesaggio). Università degli Studi di Padova.
- Gregoretto, C., & Dalla Fontana, G. (2008). The triggering of debris flow due to channel-bed failure in some alpine headwater basins of the Dolomites: Analyses of critical runoff. *Hydrological Processes*, 22(13), 2248–2263. <https://doi.org/10.1002/hyp.6821>
- Gregoretto, C., Degetto, M., Bernard, M., & Boreggio, M. (2018). The Debris Flow Occurred at Ru Secco Creek, Venetian Dolomites, on 4 August 2015: Analysis of the Phenomenon, Its Characteristics and Reproduction by Models. *Frontiers in Earth Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00080>
- Gregoretto, C., Degetto, M., Bernard, M., Crucil, G., Pimazzoni, A., Vido, G., Berti, M., Simoni, A., & Lanzoni, S. (2016). Runoff of small rocky headwater catchments: Field observations and hydrological modeling. *Water Resources Research*, 52, 8138–8158. <https://doi.org/10.1002/2016WR018675>
- Gregoretto, C., Stancanelli, L. M., Bernard, M., Boreggio, M., Degetto, M., & Lanzoni, S. (2019). Relevance of erosion processes when modelling in-channel gravel debris flows for efficient hazard assessment. *Journal of Hydrology*, 568, 575–591.

- Grimaldi, S., Petroselli, A., & Nardi, F. (2012). A parsimonious geomorphological unit hydrograph for rainfall–runoff modelling in small ungauged basins. *Hydrological Sciences Journal*, 57(1), 73–83. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.636045>
- Grimaldi, S., Petroselli, A., & Romano, N. (2013). *Curve-Number/GreenAmpt mixed procedure for streamflow predictions in ungauged basins*. <https://dspace.unitus.it/handle/2067/31911>
- Heinimann, H. R., & Hollenstein, K. (1998). *Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren: Eine risikoorientierte Betrachtungsweise*. Bundesamt für Umwelt Wald und Landschaft (BUWAL).
- Hungr, O., Morgan, G., & Kellerhals, R. (2011). Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. *Canadian Geotechnical Journal*, 21, 663–677. <https://doi.org/10.1139/t84-073>
- Iovino, F., Borghetti, M., & Veltri, A. (2009). Forests and water cycle. *Forest@ - Rivista di Selvicoltura ed Ecologia Forestale*, 6(1), 256–273. <https://doi.org/10.3832/efor0583-006>
- IPCC. (2021). *Cambiamento Climatico 2021: Sintesi per tutti*. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/outreach/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SummaryForAll\\_Italian.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/outreach/IPCC_AR6_WGI_SummaryForAll_Italian.pdf)
- IPCC (A c. Di). (2023). Technical Summary. In *Climate Change 2022—Mitigation of Climate Change* (1<sup>a</sup> ed., pp. 51–148). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.002>
- Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35(3), 245–296. <https://doi.org/10.1029/97RG00426>
- Jakob, M. (2005). A size classification for debris flows. *Engineering geology*, 79(3–4), 151–161.
- Jakob, M., & Hungr, O. (2005). *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Springer. <https://doi.org/10.1007/b138657>
- Jarman, D., Agliardi, F., & Crosta, G. B. (2011). Megafans and outsize fans from catastrophic slope failures in Alpine glacial troughs: The Malser Haide and the Val Venosta cluster, Italy. *Geological Society, London, Special Publications*, 351(1), 253–277. <https://doi.org/10.1144/SP351.14>
- Johnson, A., & Rodine, J. R. (1984). Debris flows. *Slope instability*, 257–361.

- Jordan, R. P. (1995). *Debris flows in the southern Coast Mountains, British Columbia: Dynamic behaviour and physical properties* [University of British Columbia]. <https://doi.org/10.14288/1.0088849>
- Lanzoni, S., Gregoretti, C., & Stancanelli, L. M. (2017). Coarse-grained debris flow dynamics on erodible beds. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122(3), 592–614. <https://doi.org/10.1002/2016JF004046>
- Legge 183/1989. <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1989/05/25/089G0240/sg>
- L.P. 9/2018. Recuperato 10 novembre 2025, da [https://lexbrowser.provinz.bz.it/doc/it/212899/legge\\_provinciale\\_10\\_luglio\\_2018\\_n\\_9.aspx](https://lexbrowser.provinz.bz.it/doc/it/212899/legge_provinciale_10_luglio_2018_n_9.aspx)
- Macconi, P. (2025). *Comunicazione personale*.
- Marani, M., & Ignaccolo, M. (2015). A metastatistical approach to rainfall extremes. *Advances in Water Resources*, 79, 121–126.
- Medina, V., Hürlimann, M., & Bateman, A. (2007). Application of FLATModel, a 2D finite volume code, to debris flows in the northeastern part of the Iberian Peninsula. *Landslides*, 5, 127–142. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0102-3>
- Orlandini, S., & Rosso, R. (1996). Diffusion Wave Modeling of Distributed Catchment Dynamics. *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(3), 103–113. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1996\)1:3\(103\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1996)1:3(103))
- PGRA. (2021a). *Allegato I - Elementi tecnici di riferimento nell'impostazione del Piano*. <https://sigma.distrettoalpiorientali.it/portal/index.php/direttiva-alluvioni/>
- PGRA. (2021b). *Relazione Generale*. <https://sigma.distrettoalpiorientali.it/portal/index.php/direttiva-alluvioni/>
- PGUAP. (2017). *Parte normativa*. [https://assets-eu-01.kc-usercontent.com/71daab00-137f-01d0-946b-d82e951fb8f4/20623a64-7ec5-4c1b-8a13-d51132e1acb6/04\\_PGUAP\\_BZ\\_Parte\\_3\\_Parte\\_normativa\\_01.03-2017.pdf](https://assets-eu-01.kc-usercontent.com/71daab00-137f-01d0-946b-d82e951fb8f4/20623a64-7ec5-4c1b-8a13-d51132e1acb6/04_PGUAP_BZ_Parte_3_Parte_normativa_01.03-2017.pdf)
- Pierson, T. C. (1986). Flow behavior of channelized debris flows, Mount St. Helens, Washington. In *Hillslope Processes*. Routledge.
- Provincia Autonoma di Bolzano. (2025a). *Banca dati del Catasto degli eventi idraulici*. <https://maps.civis.bz.it/?context=PROV-BZ-GEOBROWSER&lang=it&bbox=1050000,5820000,1389000,5960000>

- Provincia Autonoma di Bolzano. (2025b). *Banca dati della Carta dei Tipi Forestali*.  
<https://maps.civis.bz.it/#context=PROV-BZ-GEOBROWSER&lang=it&bbox=1050000,5820000,1389000,5960000>
- Provincia Autonoma di Bolzano. (2025c). *Banca dati della Carta di Uso del Suolo* [Dataset].  
<https://maps.civis.bz.it/#context=PROV-BZ-GEOBROWSER&lang=it&bbox=1050000,5820000,1389000,5960000>
- Provincia Autonoma di Bolzano. (2025d). *Banca dati della Morfologia del Terreno*.  
<https://mapview.civis.bz.it/?context=PROV-BZ-GEOBROWSER-MAPVIEW&lang=it&bbox=590000,5120000,765000,5220000&epsg=EPSG:25832>
- QGIS (2024). Recuperato 13 novembre 2025, da <https://www.qgis.org/>
- Raich, H. (2011). *ANALISI DELLA PERICOLOSITA' DEL BACINO DEL RIO GADRIA ATTRAVERSO INDAGINI STORICO-DOCUMENTALI*.
- R.D.L. 3267/1923. <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:regio.decreto:1923-12-30;3267>
- Rengers, F. K., McGuire, L. A., Kean, J. W., Staley, D. M., & Hobley, D. E. J. (2016). Model simulations of flood and debris flow timing in steep catchments after wildfire. *Water Resources Research*, 52(8), 6041–6061.  
<https://doi.org/10.1002/2015WR018176>
- Rosatti, G., & Begnudelli, L. (2013). Two-dimensional simulation of debris flows over mobile bed: Enhancing the TRENT2D model by using a well-balanced Generalized Roe-type solver. *Computers and Fluids*, 71, 179–195.  
<https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2012.10.006>
- Scheidl, C., & Rickenmann, D. (2009). Empirical prediction of debris-flow mobility and deposition on fans. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 157–173.  
<https://doi.org/10.1002/esp.1897>
- Takahashi, T. (2007). *Debris flow: Mechanics, prediction and countermeasures*. Taylor & Francis.  
<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9780203946282/debris-flow-tamotsu-takahashi>
- Tognacca, C. (1999). Beitrag zur Doctoral Thesis. *ETH Zurich*.

- Tognacca, C., & Bezzola, G. R. (1997). Debris-flow initiation by channel-bed failure. *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, 44–53.
- Trigila, A., Iadanza, C., Lastoria, B., Bussetini, M., & Barbano, A. (2021). *Dissesto idrogeologico in Italia: Pericolosità e indicatori di rischio* (No. 356/2021). ISPRA. <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/dissesto-idrogeologico-in-italia-pericolosita-e-indicatori-di-rischio-edizione-2021>
- UniBZ. (2025). *Comunicazione personale*.
- Unione Europea. (2018). *Corine Land Cover*. ISPRA Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. <https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/suolo-e-territorio/suolo/copertura-del-suolo/corine-land-cover>
- VanDine, D. F. (1996). *Debris Flow Control Structures for Forest Engineering*. <https://rdck.ca/wp-content/uploads/2024/11/Debris%20Flow%20Control%20Structures%20for%20Forest%20Engineering.pdf>
- Zanobetti, D., Lorgeré, H., Preissmann, A., & Cunge, J. A. (1970). Mékong Delta Mathematical Model Program Construction. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, 96(2), 181–199. <https://doi.org/10.1061/AWHCAR.0000013>