

“TACCU SA PRUNA”

Impianto di accumulo idroelettrico mediante pompaggio
ad alta flessibilità

Comune di Esterzili (SU)

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE

STRATEGIES FOR WATER



Progettisti: Ing. Luigi Lorenzo Papetti

Analisi Dam Break



REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
0	INTEGRAZIONI	30/06/2023	L. A. Garcia E. Marchesi	P. Macchi	L. Papetti

Codice commessa: 1351

Codifica documento: 1351-X-FN-A-01-0

INDICE

1	INTRODUZIONE	3
1.1	Premessa	3
1.2	Descrizione della diga e dell'impianto di accumulo idroelettrico	3
1.3	Obiettivi dello studio del collasso della diga	6
2	DATI DI INPUT	8
2.1	Dati topografici	8
2.2	Dati idrologici	8
2.3	Componenti strutturali della diga	9
3	SIMULAZIONE DEL COLLASSO DELLA DIGA	10
3.1	Scenari di collasso della diga	10
3.2	Modalità di collasso	10
3.3	Parametri della breccia e idrogrammi considerati nello studio di dam break	11
4	PROPAGAZIONE DELLA PIENA	18
4.1	Modello di propagazione del collasso della diga	18
4.2	Risultati dello Scenario 1	19
4.3	Risultati dello Scenario 2	22
4.4	Risultati dello Scenario 3	25
5	MAPPE AREE A RISCHIO ESONDAZIONE	27

ALLEGATO 1 - MAPPA AREE ALLAGABILI

ALLEGATO 2 - MAPPA DEI TIRANTI

1 INTRODUZIONE

1.1 PREMESSA

Il presente studio di valutazione dell'onda di piena è finalizzato a stimare l'entità dell'inondazione che si verificherebbe a seguito della formazione di una breccia nel rilevato del bacino di monte (*Dam Break*) dell'impianto di accumulo idroelettrico "Taccu Sa Pruna". I risultati della valutazione sono sintetizzati nel presente rapporto.

Lo studio è redatto in accordo con le "Raccomandazioni per la mappatura delle aree a rischio di inondazione conseguente a manovre degli organi di scarico o ad ipotetico collasso delle dighe" (Circolare P.C.M. 13 dicembre 1995, n. DSTN/2/22806).

1.2 DESCRIZIONE DELLA DIGA E DELL'IMPIANTO DI ACCUMULO IDROELETTRICO

Scopo dell'iniziativa in progetto è la realizzazione di un sistema di accumulo idroelettrico mediante impianto di pompaggio, tra l'invaso esistente di Nuraghe Arrubiu e un bacino di nuova realizzazione in località Taccu Sa Pruna, nel comune di Esterzili (SU).

L'intervento è ascrivibile alla categoria dei cosiddetti "impianti di pompaggio puro", in quanto gli apporti naturali che alimentano il serbatoio superiore (quello di nuova realizzazione) sono in media inferiori al 5% del volume d'acqua mediamente turbinata in un anno.

Nel caso dell'impianto di Taccu Sa Pruna, si prevede di utilizzare esclusivamente una parte del volume invasato nel bacino di Nuraghe Arrubiu (gestito dall'Ente Acque della Sardegna -ENAS-), non prevedendo quindi l'utilizzo di acque derivanti da ulteriori apporti naturali per il bacino di monte di nuova realizzazione.

Si precisa altresì che il funzionamento del sistema di accumulo idroelettrico è assimilabile ad un ciclo chiuso in cui il volume prelevato dall'invaso di valle viene poi interamente restituito all'invaso medesimo mediante il rilascio (fase di generazione) dell'acqua dal bacino di monte, senza alcuna interazione con le acque di falda.

Nello schema di impianto è prevista la realizzazione di un bacino artificiale (bacino di monte) in corrispondenza di un altopiano situato circa 3,5 km a Nord-Est dalla diga di Nuraghe Arrubiu (Figura 1), in località "Taccu Sa Pruna", in comune di Esterzili (SU). Sempre in Figura 1 è riportata la planimetria generale del bacino di monte.

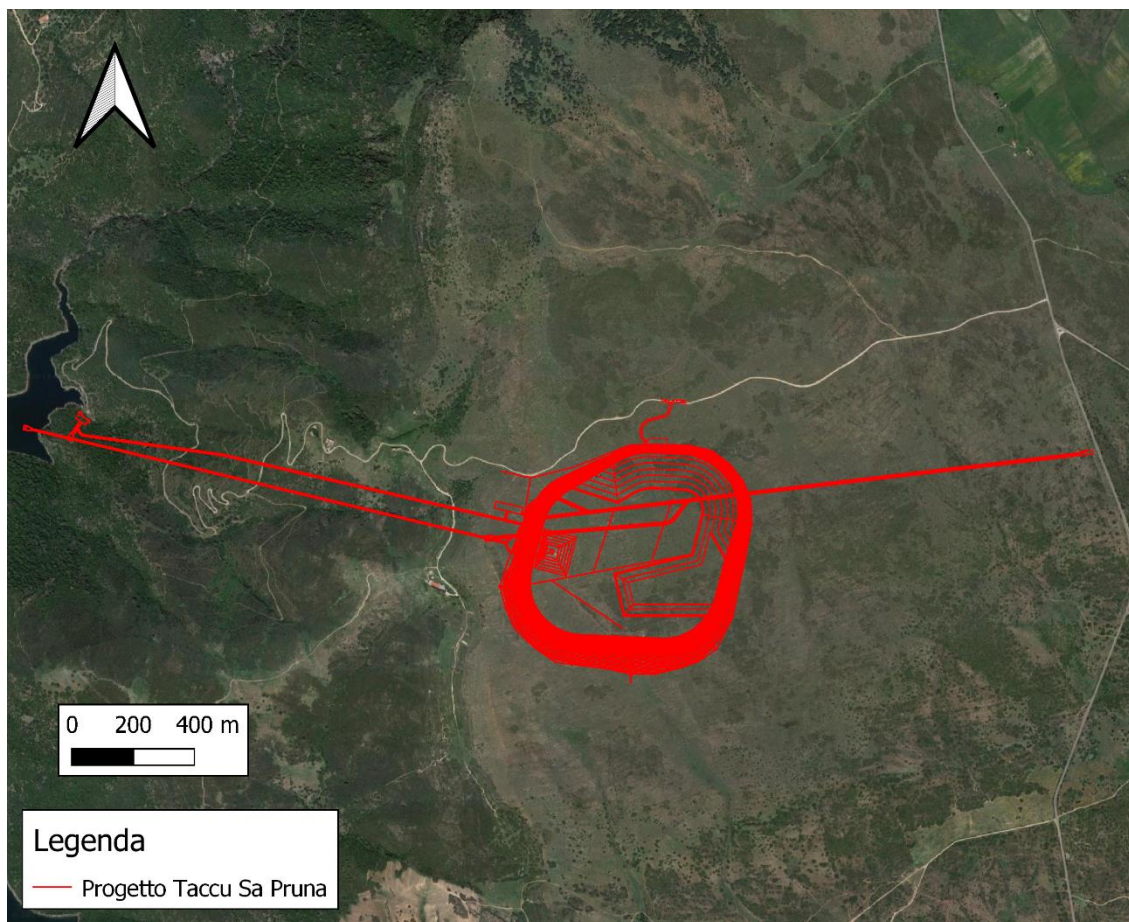


Figura 1 - Layout generale dell'impianto di accumulo

L'invaso è di forma pseudo-quadrata, avente lato di circa 650 m; l'altezza massima del rilevato (diga) è di circa 17 m.

Il coronamento è posto a quota 664,80 m s.l.m., ha uno sviluppo di 2.225 m, e larghezza di 6 m. Tale coronamento sarà accessibile tramite un raccordo con la viabilità esistente, posto sul lato Nord del bacino.

La diga è costituita da un rilevato di sezione trapezoidale in materiali sciolti derivanti dagli scavi delle opere in sotterraneo dell'impianto; questi saranno opportunamente selezionati e miscelati con materiale dolomitico proveniente dallo scavo di fondazione del rilevato e di regolarizzazione del fondo del bacino di monte. Le pendenze delle scarpate (sia interne che esterne) sono pari a 1,6/1.

Sul paramento esterno della diga si prevede di allocare lo smarino in esubero derivante dagli scavi dalla realizzazione delle opere in sotterraneo. Si prevede di distribuire materiale in modo tale da avere una scarpata costante pari a 5/1, raccordando il paramento esterno alla topografia esistente.

Questo abbancamento di materiale attorno al paramento esterno della diga ha molteplici vantaggi:

- dal punto di vista strutturale, contribuisce a favorire la stabilità del rilevato (che lavora a gravità);
- dal punto di vista paesaggistico, la debole pendenza del raccordo tra il coronamento del bacino ed il terreno circostante consente di avere un mascheramento

Grandezza	Valore	u.m.
Volume utile di regolazione	~ 3.000.000	m ³
Volume di invaso ¹ (ai sensi del L. 584/1994)	~ 3.050.000	m ³
Volume totale d'invaso ² (ai sensi del D.M. 24/03/82)	~ 3.200.000	m ³
Perimetro coronamento	2.225	m
Larghezza coronamento	6	m
Superficie liquida alla quota di min. regolazione	~ 197.000	m ²
Superficie liquida alla quota di max. regolazione	~ 363.000	m ²
Superficie liquida alla quota di massimo invaso	~ 364.000	m ²
Altezza massima diga (lato esterno)	17	m
Quota di fondo dell'invaso	648,75	m s.l.m.
Quota di minima regolazione	652,00	m s.l.m.
Quota di massima regolazione	662,70	m s.l.m.
Quota di massimo invaso	663,10	m s.l.m.
Escursione massima	10,7	m
Franco	1,70	m
Altezza muri paraonde	0,50	m

Tabella 1 - Caratteristiche principali del bacino di monte

Le perdite sono raccolte da un sistema di drenaggio composto da:

- tubi di drenaggio avvolti in geotessuto sul fondo del bacino e sui lati Ovest, Nord ed Est del rilevato: una tubazione al piede interno della diga, una tubazione al piede esterno della diga;
- cunicoli di drenaggi sul lato Sud del rilevato: un cunicolo al piede interno della diga, un cunicolo al piede esterno della diga;
- tubi di drenaggio (rivestiti con geotessuto) sull'intero perimetro esterno del rilevato.

Sono previsti tre accessi ai cunicoli di ispezione e drenaggio. Il recapito finale dei drenaggi avviene a Sud del bacino, all'ingresso dell'accesso principale ai cunicoli di ispezione e drenaggio.

1.3 OBIETTIVI DELLO STUDIO DEL COLLASSO DELLA DIGA

Il presente studio di *Dam Break* è finalizzato a:

- 1- stimare la possibile geometria della breccia nel corpo diga, la sua posizione e velocità di formazione;
- 2- modellare la propagazione dell'onda di piena a valle della diga lungo l'alveo del fiume;

¹ "Capacità del serbatoio compreso tra la quota più elevata delle soglie sfioranti degli scarichi, o della sommità delle eventuali paratoie, e la quota del punto più depresso del paramento di monte".

² "Capacità del serbatoio compresa tra la quota di massimo invaso e la quota minima di fondazione; per le traverse fluviali è il volume compreso tra il profilo di rigurgito più elevato indotto dalla traversa ed il profilo di magra del corso di acqua sbarrato".

- 3- realizzare una mappa (cartografia) delle aree che possono potenzialmente venire allagate in seguito ad una serie di scenari significativi di rottura della diga;
- 4- valutare il tempo di propagazione della piena lungo i corsi d'acqua a valle della rottura.

Quindi, i risultati del presente studio forniscono informazioni utili riguardo ad alcuni ipotetici scenari di "crollo" della diga (bacino di monte), sulla base dei quali verrà redatto un Piano di Emergenza Dighe (PED) che dovrà raccordarsi con il relativo Piano di Protezione Civile (PPC) dei comuni in cui è ubicata la diga o che sono interessati dal suo potenziale rischio. I PPC devono contenere tutti gli scenari di rischio presenti sul territorio, inclusi quelli delineati nel PED, con i relativi modelli d'intervento.

2 DATI DI INPUT

2.1 DATI TOPOGRAFICI

La topografia è stata ricavata dalle seguenti fonti:

- modello digitale del terreno (DTM), con risoluzione di 1 m, derivante dal rilievo LiDAR eseguito *ad-hoc* (2021) sull'area dell'impianto di accumulo idroelettrico;
- modello digitale del terreno (DTM), con risoluzione di 10 m, disponibile sul sito dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV, <http://tinity.pi.ingv.it>). Questo DTM copre l'area tra il bacino di monte dell'impianto ed il termine dell'area di studio (fiume Flumendosa, a valle della diga di Nuraghe Arrubiu).

2.2 DATI IDROLOGICI

Il bacino di monte dell'impianto di accumulo idroelettrico "Taccu Sa Pruna" è ubicato al di fuori del reticolo idrico fluviale dell'area, in corrispondenza di un altopiano situato circa 3,5 km a Nord-Est dalla diga di Nuraghe Arrubiu, in comune di Esterzili (SU).

Come illustrato nel capitolo 3 il deflusso dell'onda di piena si propagherà dalla breccia della diga fino all'invaso di Nuraghe Arrubiu (per gli scenari 1 e 3) oppure al fiume Flumendosa (a valle della diga di Nuraghe Arrubiu, per lo scenario 2).

Le raccomandazioni contenute nella sopraccitata circolare n. DSTN/2/22806: "... *Il calcolo di propagazione è esteso a tutto il tratto fluviale a valle della diga lungo il quale le massime portate dovute all'onda artificiale si mantengono superiori alle portate naturali considerate nella formulazione dei piani di previsione e prevenzione degli eventi di piena naturali. In mancanza di indicazioni specifiche, può essere assunta una portata di piena naturale associata ad un tempo di ritorno pari a 500 anni. ...*".

Per gli scenari 1 e 3, poiché il deflusso termina nell'invaso di Nuraghe Arrubiu, la condizione richiesta è soddisfatta, in quanto la portata di picco della rottura del bacino di monte è di 705 m³/s in entrambi i casi, ben inferiore alla portata di progetto della diga di Nuraghe Arrubiu, stimata in 4.320 m³/s. Anche per la breccia 2 la condizione è soddisfatta, in quanto la portata di picco della rottura del bacino superiore è di 580 m³/s, inferiore alla portata prevista per la diga di Nuraghe Arrubiu.

Attualmente, per l'invaso di Nuraghe Arrubiu è prevista una limitazione della quota d'invaso costante tutto l'anno pari a 262 m s.l.m.

Il volume d'invaso associato alla quota di massima regolazione teorica (267 m s.l.m.) è pari a 299,2 milioni di metri cubi, mentre il volume d'invaso associato alla quota di 262 m s.l.m. è pari a 258,6 milioni di metri cubi; pertanto, la limitazione d'invaso comporta una riduzione del volume invasato di circa 40,6 milioni di metri cubi.

Il volume totale d'invaso del bacino di monte dell'impianto di accumulo idroelettrico è pari a 3.200.000 m³ (come già riportato in Tabella 1). Anche ipotizzando che il collasso del bacino di monte comporti un trasferimento completo del volume d'acqua verso l'invaso di Nuraghe Arrubiu (caso simulato nello Scenario 3, al § 4.4), si ritiene che ciò non generi particolari criticità all'invaso di Nuraghe Arrubiu, in quanto tale volume rappresenta l'8% circa del volume destinato alla laminazione (40,6 milioni di metri cubi).

Come poi analizzato con lo Scenario 3, la portata di picco raggiungerebbe l'invaso di Nuraghe Arrubiu dopo circa un'ora dall'inizio della formazione della breccia.

il Foglio Condizioni per l'Esercizio e la Manutenzione (F.C.E.M.) della diga in questione riporta i seguenti dati relativi alle opere di scarico:

ART. 4 - DATI PRINCIPALI DELLE OPERE DI SCARICO

Portata esitata con livello nel serbatoio alla quota 269,00 m s.l.m.:

- dallo sfioratore libero in sinistra: 412,00 m³/s
- dagli scarichi di superficie in destra (2): 2534,00 m³/s
- dallo scarico di mezzofondo: 262,00 m³/s
- dagli scarichi di fondo (2): 1282,00 m³/s

Totale 4490 m³/s

2.3 COMPONENTI STRUTTURALI DELLA DIGA

Le dimensioni del bacino di monte, inserite nella simulazione di *dam break*, sono state ricavate dalle tavole di dettaglio facenti parte della documentazione di progetto (doc. ref. 1351-J-FN-D-01-1, 1351-J-FN-D-02-1, 1351-J-FN-D-03-1, 1351-J-FN-D-04-1, 1351-J-FN-D-05-1, 1351-J-FN-D-06-1, 1351-J-FN-D-07-1, 1351-J-FN-D-08-1, 1351-J-FN-D-09-1, 1351-J-FN-D-10-1, 1351-J-FN-D-11-1, 1351-J-FN-D-12-1, 1351-J-FN-D-13-1).

3 SIMULAZIONE DEL COLLASSO DELLA DIGA

3.1 SCENARI DI COLLASSO DELLA DIGA

Il bacino di monte del progetto dell'impianto di accumulo è ubicato al di fuori della rete fluviale, e gli unici afflussi nel serbatoio derivano dal sistema di pompaggio e dalle precipitazioni sull'area del bacino delimitata dal coronamento. Pertanto, in questo caso l'unico scenario di collasso della diga è il "*Sunny Day Failure*" (rottura improvvisa che si verifica durante il normale funzionamento, ad esempio causata da erosione interna, *piping*, terremoti, etc.); non viene preso in considerazione il collasso dovuto a piene di carattere eccezionale.

Sebbene il *Sunny Day Failure* considererebbe che il livello idrico nel bacino di monte sia pari alla quota di massima regolazione (633,70 m s.l.m.), a favore di sicurezza è stato assunto che il livello nell'invaso sia pari alla quota di massimo invaso (663,10 m s.l.m.).

3.2 MODALITÀ DI COLLASSO

La modalità di collasso per tracimazione (o *overtopping*) è esclusa in quanto, come descritto nel precedente paragrafo, gli unici afflussi naturali nel serbatoio derivano dalle precipitazioni che insistono sull'area del bacino di monte ed in quanto il bacino è dotato di uno sfioratore fisso.

Quindi, la modalità di collasso che può essere considerata è quella causata dall'erosione interna (o *piping*; Figura 3) del corpo diga.

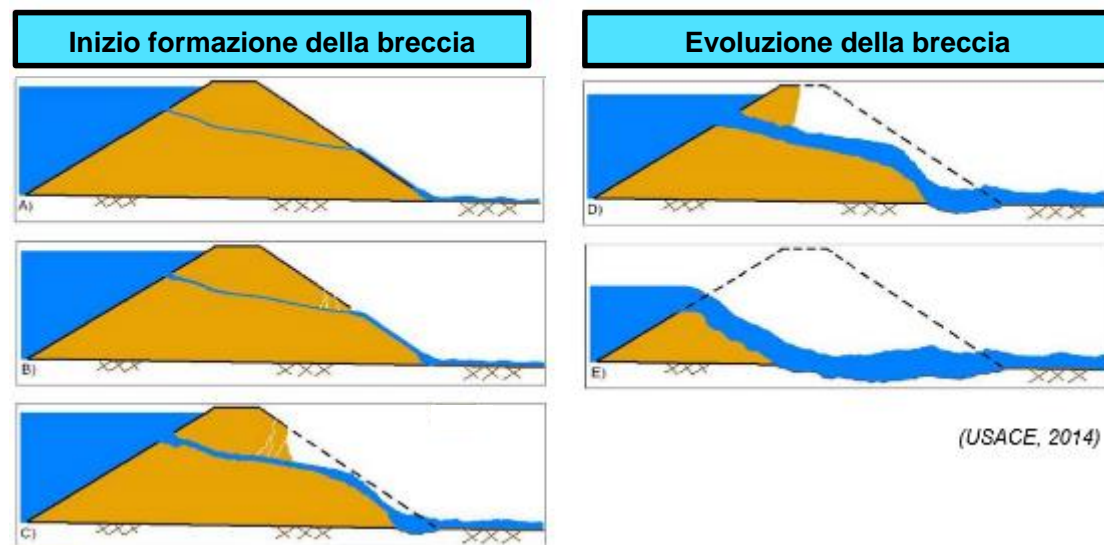


Figura 3 - "Piping Failure Mode" (USACE, 2014)

Nel fenomeno dell'erosione interna, l'acqua filtra attraverso la diga con un gradiente idraulico sufficientemente elevato da asportare il materiale costituente il rilevato, creando canali di flusso (*pipes*) che compaiono inizialmente sul paramento di valle della diga. Con l'allargamento di queste zone in erosione accelerata e la loro evoluzione verso l'alto (coronamento della diga), l'acqua che fuoriesce dai canali di flusso scorre lungo il paramento di valle della diga e scava un solco. Infine, il coronamento della diga al di sopra del canale di flusso collassa e viene trascinato a valle dall'acqua, generando una breccia.

Per il bacino di monte sono stati considerati i seguenti scenari di collasso:

- Scenario 1: breccia sul lato sud della diga, in corrispondenza dell'altezza massima del rilevato.
- Scenario 2: breccia sul lato est della diga.
- Scenario 3: breccia sull'angolo nord-ovest della diga.

L'ubicazione delle tre breccie è mostrata in Figura 4.

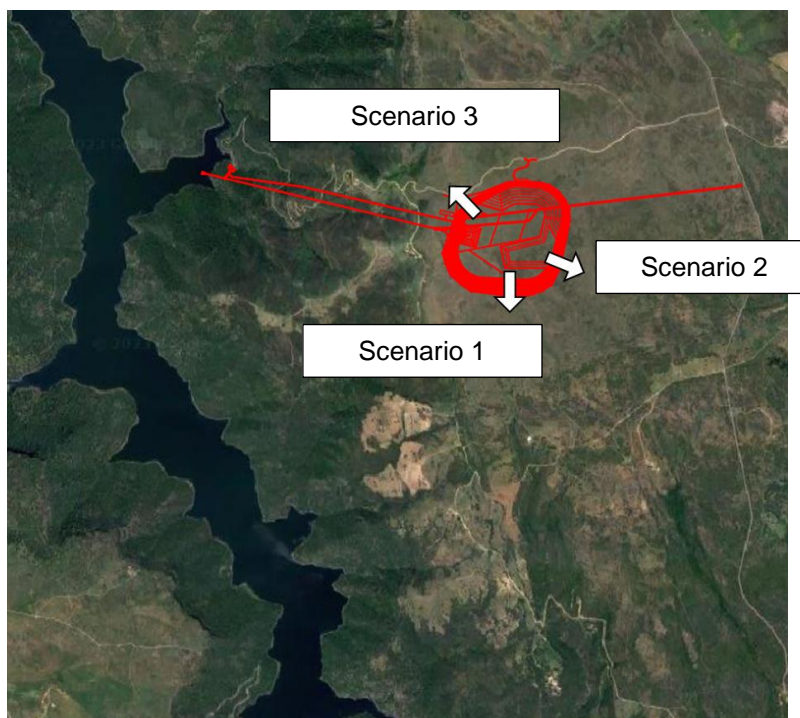


Figura 4 - Ubicazione della formazione delle breccie simulate nei tre scenari analizzati

3.3 PARAMETRI DELLA BRECCIA E IDROGRAMMI CONSIDERATI NELLO STUDIO DI DAM BREAK

La definizione della breccia della diga include:

- ubicazione, modalità di collasso e meccanismo di attivazione;
- quota del fondo, larghezza inferiore e pendenza delle sponde H:V;
- tempo di formazione della breccia.

I parametri della breccia influiscono su:

- stima della portata di picco in uscita dalla diga;
- tempo di arrivo dell'onda di piena in corrispondenza dei ricettori (e.g., zone antropizzate, strade, ponti, etc.) a valle..

La tipica geometria di una breccia è mostrata in Figura 5 e le sue principali caratteristiche geometriche sono rappresentate dai seguenti parametri:

- **Profondità della breccia (h_b):** estensione verticale della breccia, misurata dal coronamento della diga fino al fondo della breccia stessa.

- **Larghezza della breccia (W_b , B_{ave} , B_t):** la larghezza finale della breccia e la velocità dell'allargamento della breccia possono influenzare notevolmente la portata di picco ed i livelli di inondazione conseguenti a valle della diga. Generalmente, in letteratura si riporta la larghezza media della breccia (B_{ave}) o la larghezza della parte superiore (B_t) ed inferiore della breccia (W_b).
- **Fattore di pendenza delle sponde della breccia (V:H):** questo fattore, unitamente alla larghezza ed alla profondità della breccia definisce in maniera esauritiva la forma della breccia. La stima accurata degli angoli di inclinazione delle sponde della breccia è tendenzialmente di importanza secondaria rispetto alla stima della larghezza e della profondità della breccia.

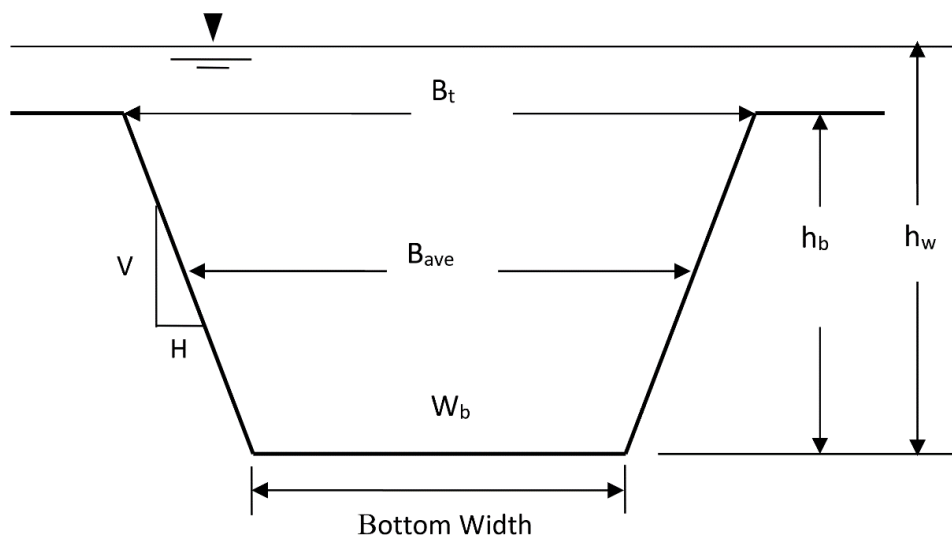


Figura 5 - Geometria della breccia

I collassi delle dighe in materiali sciolti non sono normalmente considerati istantanei, ma contengono due fasi in cui la modalità e la velocità di erosione possono essere diverse:

- Fase di inizio della breccia (da $t=t_0$ a $t=t_i$).
- Fase di formazione (evoluzione) della breccia (da $t=t_i$ a $t=t_f$).

Il processo può quindi essere suddiviso in n.4 stadi (I-IV):

- Stadio I: inizio della breccia - l'erosione si sviluppa a valle.
- Stadio II: inizio della breccia - l'erosione raggiunge il coronamento.
- Stadio III: formazione della breccia - abbassamento del coronamento.
- Stadio IV: formazione della breccia - allargamento della breccia.

I metodi per stimare i parametri della breccia sono:

- Analisi comparative: forniscono ordini di grandezza dei limiti minimi e massimi per stimare i parametri della breccia.
- Equazioni di regressione: sono sviluppate analizzando i collassi storici delle dighe, al fine di stimare portata di picco, dimensione della breccia e tempo di formazione della breccia. Tali equazioni derivano da dati per le dighe in terra, dighe in terra con nucleo impermeabile (*impervious core* di argilla) e dighe in pietrame

(MacDonald and Landgridge-Monopolis, 1984; Xu & Zhang, 2009; Froehlich, 1995 and 2008).

- Metodi fisici semplificati (tassi di velocità ed erosione): sono approcci semplificati che considerano principalmente il rapporto velocità vs. tasso approfondimento della breccia e velocità vs. tasso di allargamento della breccia.
- Modelli fisici: sono basati sulle teorie di trasporto dei sedimenti, stabilità di pendii in terra ed idraulica (i.e., formula di Schoklitsch, formula di Meyer-Peter & Müller, formula di Einstein & Brown).

Nell'ambito del presente studio, è stata ottenuta una prima approssimazione dei parametri della breccia utilizzando le equazioni di regressione di Xu & Zhang (2009). Tali relazioni mettono in relazione le portate di picco osservate con alcuni dati del volume d'acqua invasato: la profondità, il volume o una loro combinazione. Il vantaggio di questo metodo consiste nell'esplicitare all'interno delle equazioni le caratteristiche di erodibilità del materiale costituente la diga.

Avvalendosi di questo metodo, è stato possibile ricavare i seguenti parametri:

- tempo di formazione della breccia BFT (h), che rappresenta la durata degli stadi III e IV del processo precedentemente descritto;
- larghezza media della breccia B_{AVE} (m).

In seguito, viene eseguito un perfezionamento di questi parametri utilizzando un modello fisico semplificato di velocità e tassi di erosione. Per i serbatoi con volumi sufficientemente grandi per una data profondità, la formazione della breccia può essere considerata quasi istantanea: la breccia si forma completamente prima che si verifichi un significativo abbassamento di livello del bacino, e la portata di picco si avvicini al limite fisico costituito dal flusso critico che scorre attraverso una breccia completamente formata con profondità dell'acqua h_w (si veda la Figura 5).

Al contrario, per serbatoio con un volume V_0 relativamente piccolo, come quello del bacino di monte dell'impianto di Taccu Sa Pruna, si verifica un significativo abbassamento di livello del bacino durante la formazione della breccia, ed i tassi di erosione della breccia costituiscono un fattore significativo che influenza la portata di picco in corrispondenza della rottura del rilevato.

La formazione di brecce coinvolge molteplici processi, che includono: il trascinarsi dei sedimenti sul fondo della breccia, i movimenti di massa dai lati della breccia verso il flusso esistente, l'arretramento del punto di rottura ed i movimenti di massa sul paramento di valle della diga. Quindi, un numero pressoché illimitato di modelli fisici del processo di formazione delle brecce può essere realizzato per riprodurre gli idrogrammi misurati dagli sperimentatori che hanno poi prodotto le formule se i valori dei parametri costitutivi pertinenti, o anche le forme funzionali delle stesse leggi di erosione, sono corretti in modo iterativo.

L'approfondimento della breccia può essere parametrizzato semplicemente da una velocità di abbassamento del fondo k_1 (m/h) e da una velocità di allargamento della breccia k_2 (m/h), assumendo un determinato valore per le pendenze della breccia (H:V). Per la diga in questione pendenze di 0,5 (H:V) vengono considerate ragionevoli considerando la resistenza dei materiali utilizzati per costruire il corpo della diga.

Pertanto, si ipotizza che il processo di formazione della breccia allo stadio III (abbassamento del coronamento) avvenga con una breccia di forma triangolare, con pendenza dei lati pari a $Z = 0,5$ (H:V), in cui la posizione del fondo della breccia $b(t)$ varia nel tempo con un tasso k_1 lineare e costante. Man mano che la breccia si sviluppa, anche il livello nel serbatoio $w(t)$ varia nel tempo.

Se l'invaso viene abbassato in modo rapido, il livello dell'invaso $w(t)$ raggiunge il fondo della breccia $b(t)$ prima che quest'ultima raggiunga il fondo della diga e il processo termina con una profondità della breccia inferiore al massimo teorico, senza influenzare il 100% dell'altezza della diga.

Se, al contrario, il livello dell'acqua del serbatoio si abbassa lentamente, la parte inferiore della breccia di forma triangolare raggiunge la base della diga quando nel serbatoio c'è ancora una profondità d'acqua significativa. In questo caso, la formazione della breccia entra nello stadio IV (allargamento della breccia). La posizione del fondo della breccia è fissa e la breccia si espande lateralmente cambiando la sua forma da triangolare a trapezoidale, con un tasso di allargamento lineare pari a k_2 (m/h).

In sintesi, la metodologia utilizzata considera i seguenti parametri e aspetti evolutivi della breccia:

- il tasso di abbassamento del fondo della breccia, il tasso di allargamento della stessa e il volume di acqua disponibile nel serbatoio determinano il processo di formazione della breccia.
- la forma finale della potenziale breccia sarà trapezoidale, le sue dimensioni sono state stimate con le formule di Xu & Zhang (2009), assumendo un materiale di media erodibilità.
- l'evoluzione della breccia nel tempo è stata simulata considerando lo stadio III (abbassamento della cresta con tasso di abbassamento k_1 , con forma di breccia triangolare) e lo stadio IV (allargamento del processo di breccia con tasso di allargamento k_2 , con forma di breccia trapezoidale). I valori di k_1 e k_2 sono compatibili con la forma finale della breccia potenziale di Xu & Zhang e con il tempo massimo di formazione della breccia potenziale. Inoltre, tali dati sono stati anche verificati con dati pubblicati da Walder e O'Connor, 1997. I valori di k_1 e k_2 sono compresi nell'intervallo tra 30 e 40 m/h. In bibliografia, per le dighe che hanno subito collassi, i valori stimati dei tassi di erosione sono compresi tra 10 e 100 m/h. Pertanto, i valori proposti per il presente studio sono ragionevoli considerando i materiali previsti per la costruzione della diga ed in linea con i tempi di formazione della breccia secondo Xu & Zhang, per materiali a media erodibilità.

Per la simulazione del processo di formazione della breccia nel tempo è stata utilizzata la curva quota-volumi del serbatoio superiore (bacino di monte).

La portata attraverso la breccia è stata simulata utilizzando la formula dello stramazzo a larga soglia di forma triangolare per lo stadio III e dello stramazzo a larga soglia di forma trapezoidale per la fase IV.

Le formule del modello di equazioni di regressione di Xu & Zhang (2009) per il collasso della diga sono riassunte in Figura 6.

Parametric Model	Time to Failure, t_f (hr)	Average breach width, \bar{B} (m)
<i>Xu & Zhang (2009)</i>	$\frac{t_f}{t_r} = C_5 \left(\frac{h_d}{h_r}\right)^{0.654} \left(\frac{V_w^{1/3}}{h_w}\right)^{1.246}$ <p>where: $C_5 = b_5$</p> $b_5 = \begin{cases} 0.038 & HE \\ 0.066 & ME \\ 0.205 & LE \end{cases}$	$\frac{\bar{B}}{h_d} = 5.543 \left(\frac{V_w^{1/3}}{h_w}\right)^{0.739} e^{C_3}$ <p>where: $C_3 = b_4 + b_5$</p> $b_4 = \begin{cases} -1.207 & OT \\ -1.747 & P \end{cases}$ $b_5 = \begin{cases} -0.613 & HE \\ -1.073 & ME \\ -1.268 & LE \end{cases}$

t_r : durata unitaria (1 hour)
 h_d : altezza della diga (m)
 h_r : altezza di riferimento (15 m)
 V_w : volume d'acqua al di sopra del fondo della breccia finale (m³)
 h_w : altezza d'acqua al di sopra del fondo della breccia finale (m)
 HE: materiali ad alta erodibilità
 ME: materiali a media erodibilità
 LE: materiali a bassa erodibilità

Figura 6 - Modello della breccia di Xu & Zhang (2009)

I risultati ottenuti per la diga del bacino di monte di Taccu sa Pruna sono riassunti in Tabella 2.

Gli idrogrammi del collasso della diga (bacino di monte), relativi ai tre scenari considerati, ottenuti con un modello fisico semplificato di velocità e tassi di erosione sono riportati in Figura 7 e Figura 8. Gli idrogrammi dello scenario 1 e dello scenario 2 sono identici (Figura 7) in quanto i parametri delle due brecce sono gli stessi.

	Breccia 1 (lato sud) & Breccia 3 (lato nord- ovest)	Breccia 2 (lato est)
Coronamento (m s.l.m.)	664,50	664,50
Quota d'invaso iniziale (m s.l.m.)	663,10	663,10
Quota finale del fondo della breccia (m s.l.m.)	651,75	654,00
Massimo volume rilasciato (m ³)	3,200,000	2,715,000
Altezza della breccia finale (m)	12,75	10,50
Larghezza del fondo della breccia finale (m)	22,00	20,76
Tempo di formazione (min)	70	57
Portata di picco simulata (m ³ /s)	705	580
Tempo alla portata di picco (min)	56	51
Fondo della breccia alla portata di picco (m s.l.m.)	651,75	654,00
Larghezza della breccia alla portata di picco (m)	14,56	17,46
Quota d'invaso alla portata di picco (m s.l.m.)	659,74	660,46
Altezza d'acqua sul fondo della breccia alla portata di picco (m)	7,99	6,46

Tabella 2 - Parametri della breccia

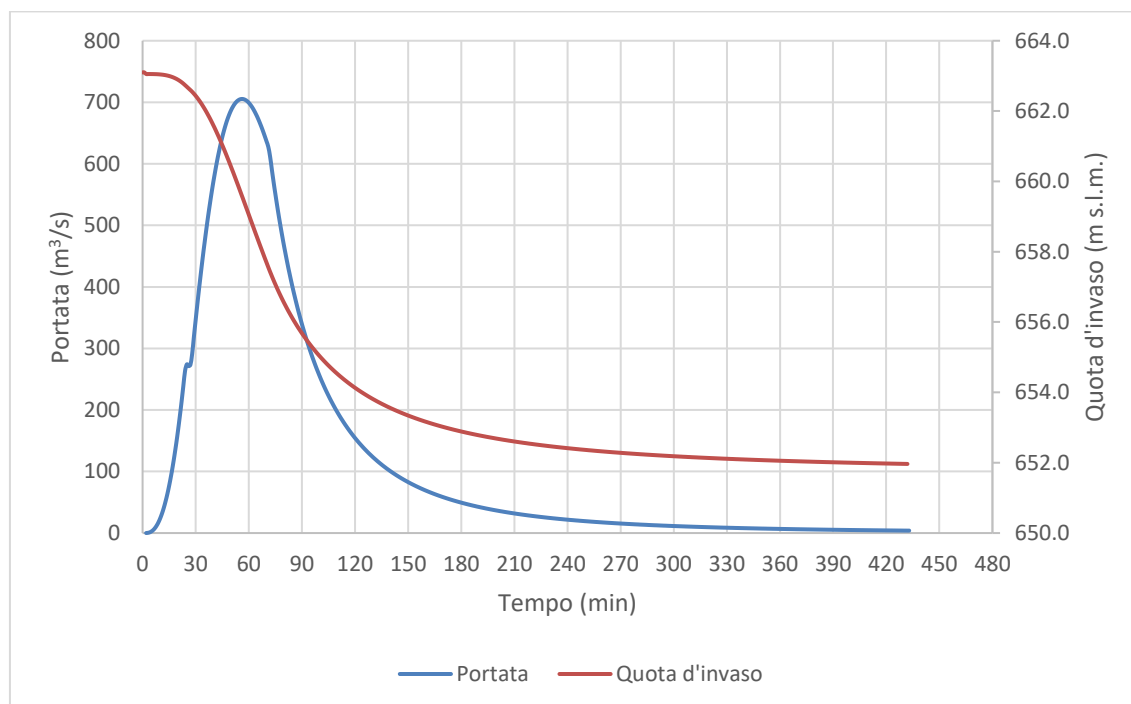


Figura 7 - Idrogramma in corrispondenza della breccia Scenario 1 e Scenario 3

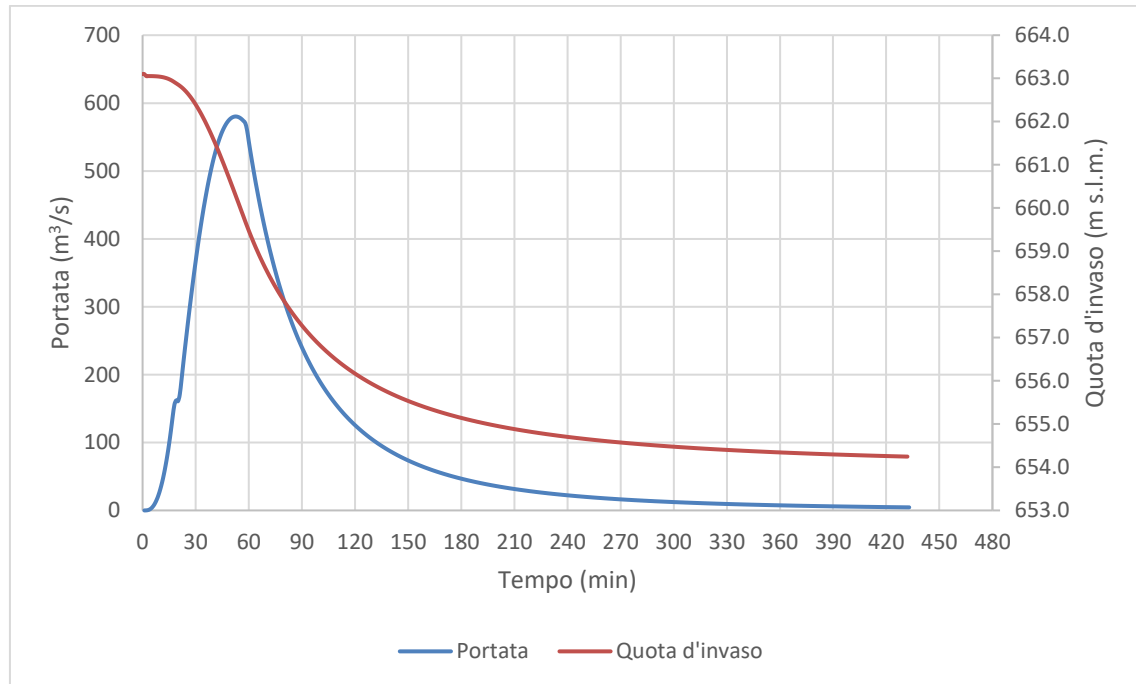


Figura 8 - Idrogramma in corrispondenza della breccia Scenario 2

4 PROPAGAZIONE DELLA PIENA

4.1 MODELLO DI PROPAGAZIONE DEL COLLASSO DELLA DIGA

L'area modellata copre il tratto dal bacino di monte sino all'invaso di Nuraghe Arrubiu (scenario 1 e 3) ed il tratto dal bacino di monte sino al fiume Flumendosa a valle della diga di Nuraghe Arrubiu (scenario 2). Vale la pena ricordare che il flusso associato allo scenario 2 è diviso in due rami: il ramo principale scorre a sud verso il fiume Flumendosa, a valle della diga di Nuraghe Arrubiu, mentre il ramo secondario si dirige a sud verso l'invaso di Nuraghe Arrubiu, attraverso lo stesso impluvio della breccia 1.

La propagazione dell'idrogramma di rottura della diga è stata effettuata utilizzando un modello bidimensionale sviluppato in HEC-RAS (v.6.0.0).

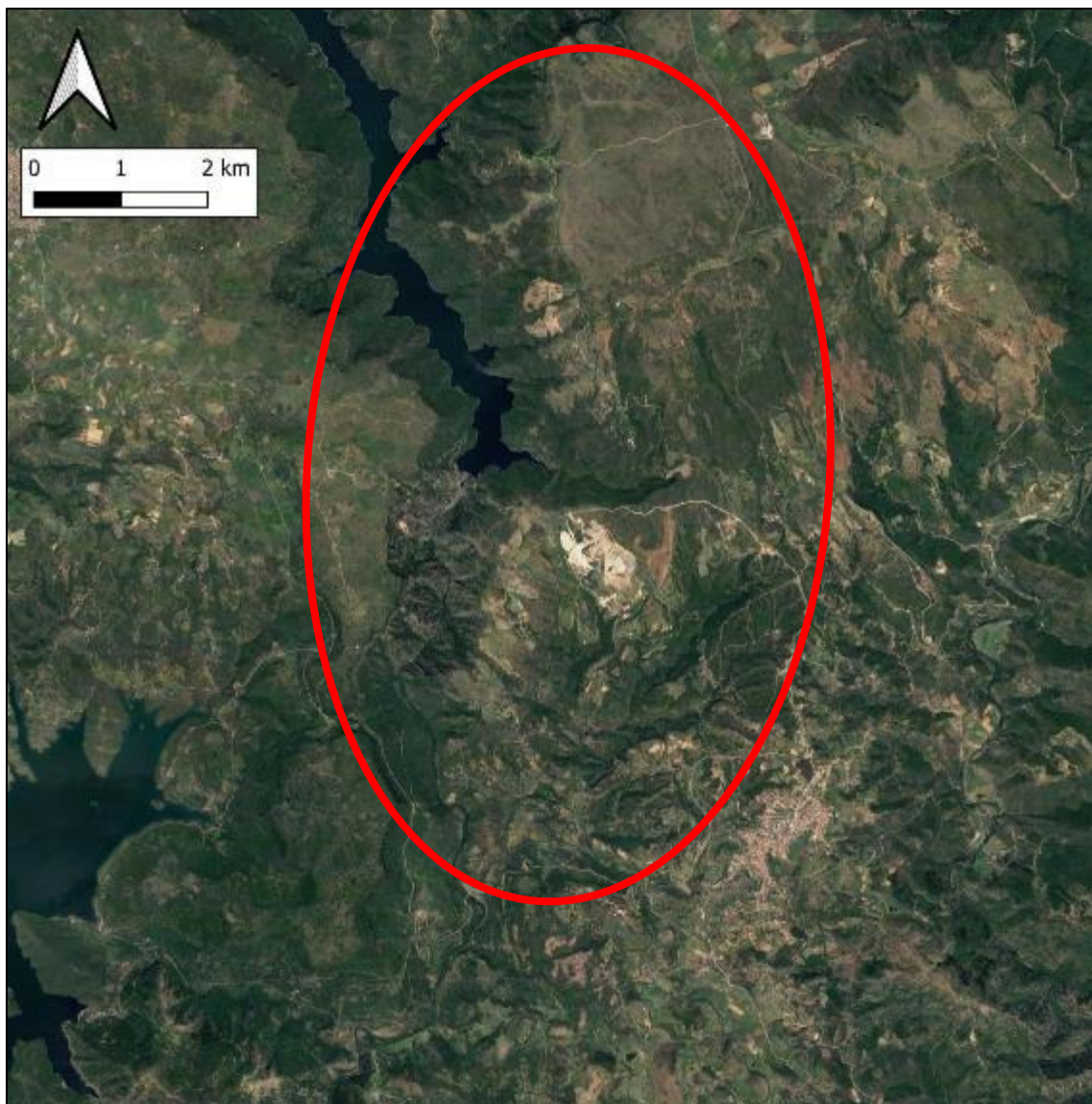


Figura 9 - Inquadramento dell'area analizzata ai fini del Dam Break

Le equazioni di Navier-Stokes descrivono il moto dei fluidi in tre dimensioni. Nel contesto della modellazione dei canali e delle piene, vengono imposte ulteriori semplificazioni. Un set semplificato di equazioni è quello per le acque poco profonde (*shallow-water*). Al fine di approssimare il moto turbolento mediante il metodo della viscosità

turbolenta, vengono fatte le seguenti assunzioni: i) flusso incomprimibile; ii) densità uniforme; iii) pressione idrostatica; iv) utilizzo delle equazioni mediate di Reynolds. Si assume inoltre che la scala di lunghezza verticale sia molto minore di quella orizzontale. Di conseguenza, la velocità verticale è piccola e la pressione è idrostatica, il che porta alla forma differenziale delle equazioni *shallow-water*. Questo limita la precisione del modello nelle aree in cui le pendenze sono superiori al 10%.

Il modello è stato impostato sulla base delle seguenti ipotesi:

- griglia di 5 m per la modellazione spaziale (n. 118.768 celle per lo scenario 1, 697.352 celle per lo scenario 2 e 36.656 celle per lo scenario 3);
- è stato assunto un valore di 0,06 per il coefficiente di Manning (n);
- al *data processing* è stato applicato un intervallo di calcolo di 0,2 secondi. Il passo temporale è stato impostato secondo la condizione di Courant, per consentire al modello di cogliere correttamente il vero processo fisico di propagazione delle onde;
- come condizione al contorno finale è stata imposta l'altezza di moto uniforme;
- come condizione al contorno iniziale è stato imposto l'idrogramma del collasso della diga;
- sono state effettuate 3 simulazioni: Scenario 1, Scenario 2 e Scenario 3;
- la lunghezza totale della simulazione è di 4,1 km per lo scenario 1, 10,6 km per lo scenario 2 e 2 km per lo scenario 3.

Le principali caratteristiche del flusso da rappresentare nello spazio e nel tempo sono:

- portata (m^3/s);
- tirante (m);
- elevazione della superficie dell'acqua (m s.l.m.);
- velocità (m/s);
- tempo di arrivo del fronte (h);
- tempo della portata di picco (h).

4.2 RISULTATI DELLO SCENARIO 1

La breccia che si genera durante lo Scenario 1 crea un flusso diretto a sud, lungo un impluvio che termina su un ramo della sponda in sinistra idraulica dell'invaso di Nura-ghe Arrubiu.

L'inviluppo della massima estensione della superficie d'acqua, del tirante (massima profondità) e della massima velocità del flusso sono mostrati in Figura 10 e Figura 11. Per maggiori dettagli si rimanda agli elaborati grafici riportati nell'allegato della presente relazione (in particolare si vedano i riquadri R02 e R03).

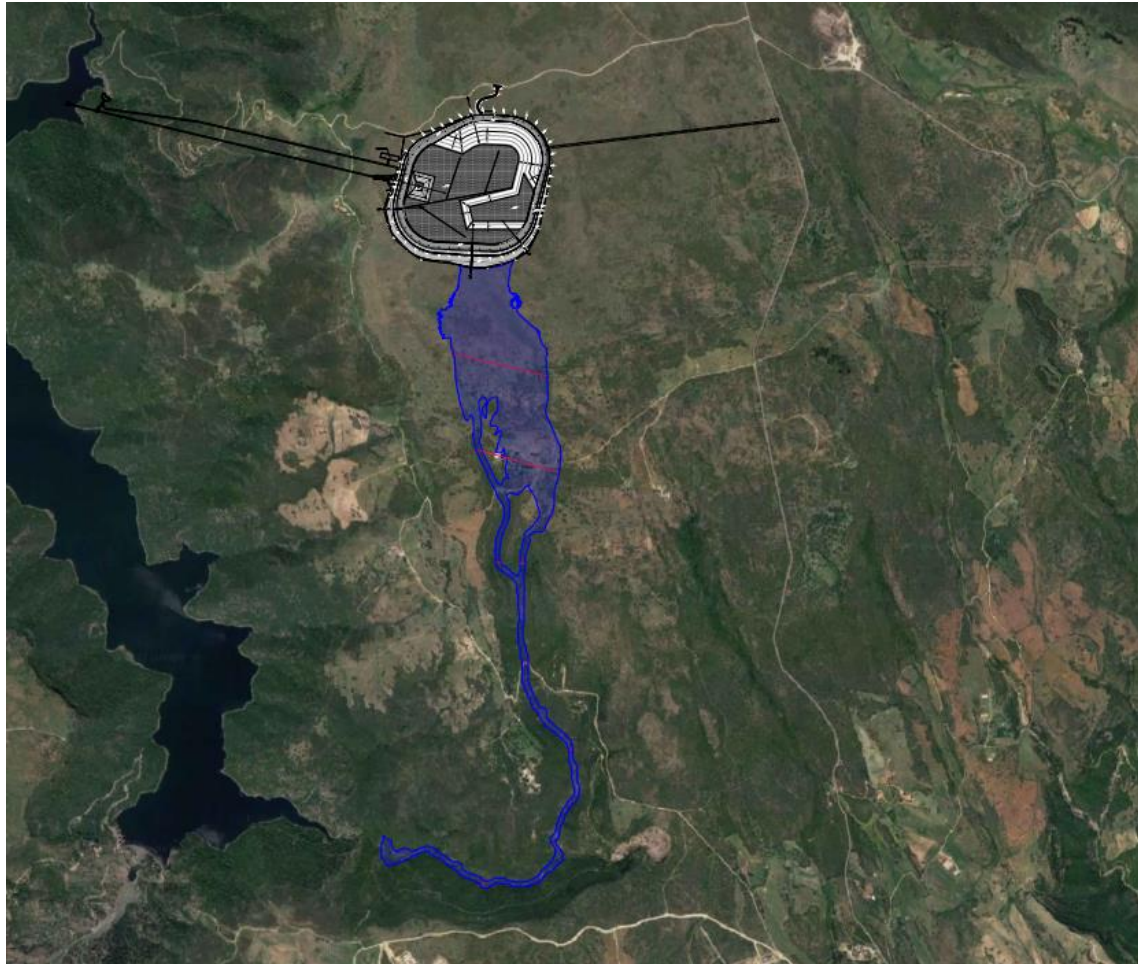


Figura 10 - Scenario 1: Estensione massima delle superfici allagate

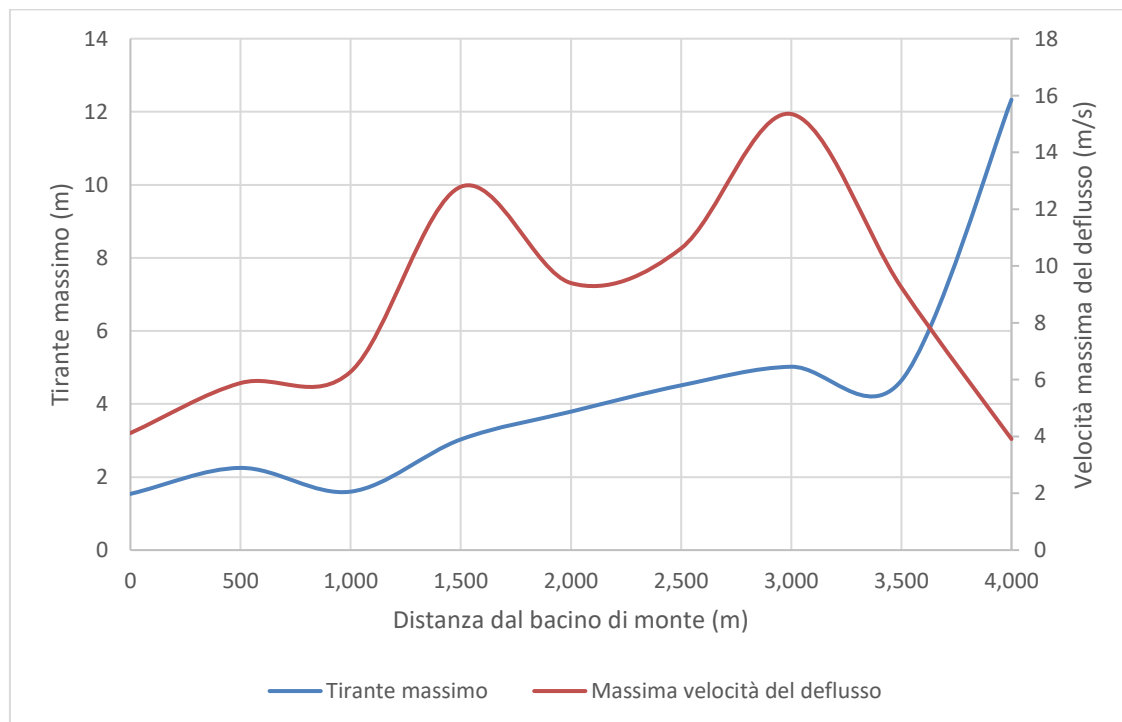


Figura 11 - Scenario 1: Tirante massimo e velocità massima del deflusso

La portata di picco totale in uscita dalla breccia dello Scenario 1 è di 705 m³/s.

La portata di picco rimane pressoché costante (pari a circa 705 m³/s) lungo l'intero tratto simulato, fino all'immissione nell'invaso di Nuraghe Arrubiu.

I parametri del deflusso in corrispondenza delle sezioni principali sono mostrati in Tabella 3.

Ubicazione	Distanza	Portata di picco	Quota massima dell'acqua	Altezza massima dell'acqua	Velocità massima	Tempo di arrivo del fronte	Tempo della portata di picco
	(m)	(m ³ /s)	(m s.l.m.)	(m)	(m/s)	(h)	(h)
Piede di valle del bacino di monte	0	705	643,01	1,54	4,12	0:00	0:54
	500	705	626,10	2,25	5,88	0:11	0:56
Strada esistente	1.000	705	593,70	1,60	6,28	0:15	0:57
	1.500	705	519,51	3,03	12,79	0:17	0:58
Strade esistente	2.000	705	465,87	3,79	9,40	0:18	0:59
	2.500	705	432,79	4,51	10,62	0:20	1:00
	3.000	705	381,43	5,02	15,35	0:21	1:01
	3.500	705	339,50	4,64	9,25	0:23	1:02
	4.000	703	311,92	12,33	3,91	0:25	1:03

Tabella 3 - Scenario 1: parametri del deflusso in corrispondenza delle sezioni principali

Gli idrogrammi delle portate di picco a diverse progressive sono mostrati in Figura 12. La progressiva 0+000 è al piede di valle del rilevato del bacino di monte, mentre la progressiva 4+000 si riferisce alla confluenza nell'invaso di Nuraghe Arrubiu.

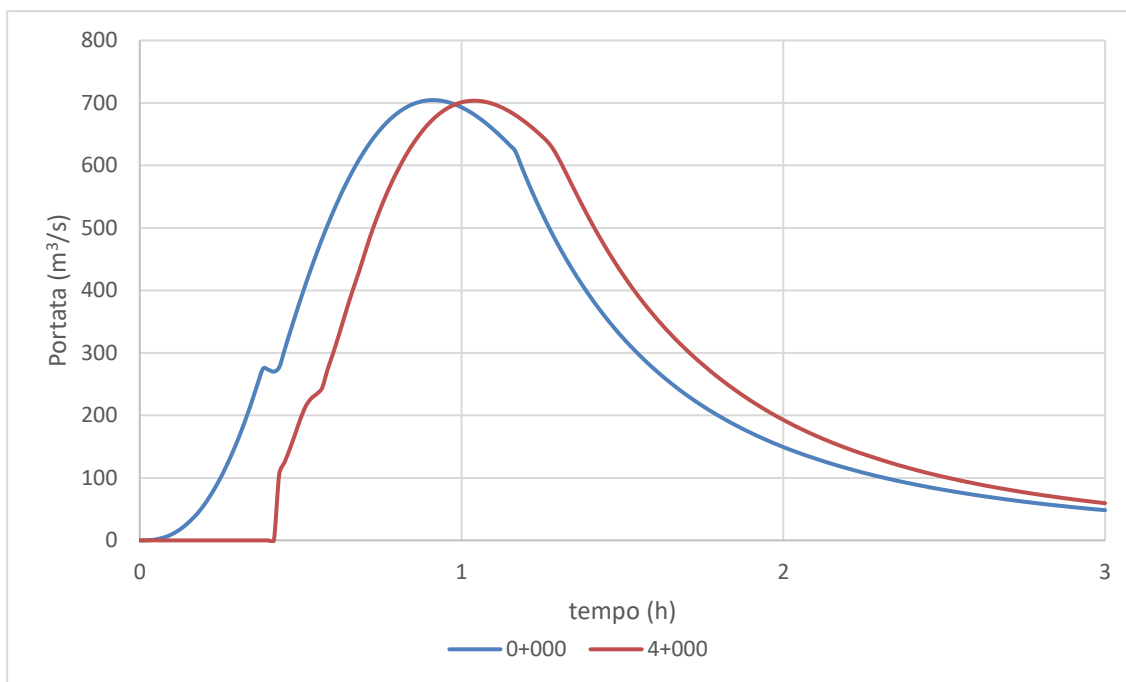


Figura 12 - Scenario 1: Idrogrammi del collasso della diga alle diverse progressive

4.3 RISULTATI DELLO SCENARIO 2

Lo scenario 2 presenta due rami. Il ramo principale segue un torrente e termina nel fiume Flumendosa, con una portata di picco in corrispondenza della confluenza pari a circa 390 m³/s. Il ramo secondario segue lo stesso impluvio dello scenario 1, ma con una portata di picco inferiore (circa 190 m³/s). Pertanto, lo scenario 1 copre il rischio di alluvione lungo questo impluvio più corto e non sarà oggetto di ulteriori studi. I risultati per il ramo principale dello scenario 2 sono presentati di seguito.

L'involuppo della massima estensione della superficie d'acqua, del tirante (massima profondità) e della massima velocità del flusso sono mostrati in Figura 13 e Figura 14. Per maggiori dettagli si rimanda agli elaborati grafici riportati nell'allegato della presente relazione (in particolare si vedano i riquadri da R02 a R08).

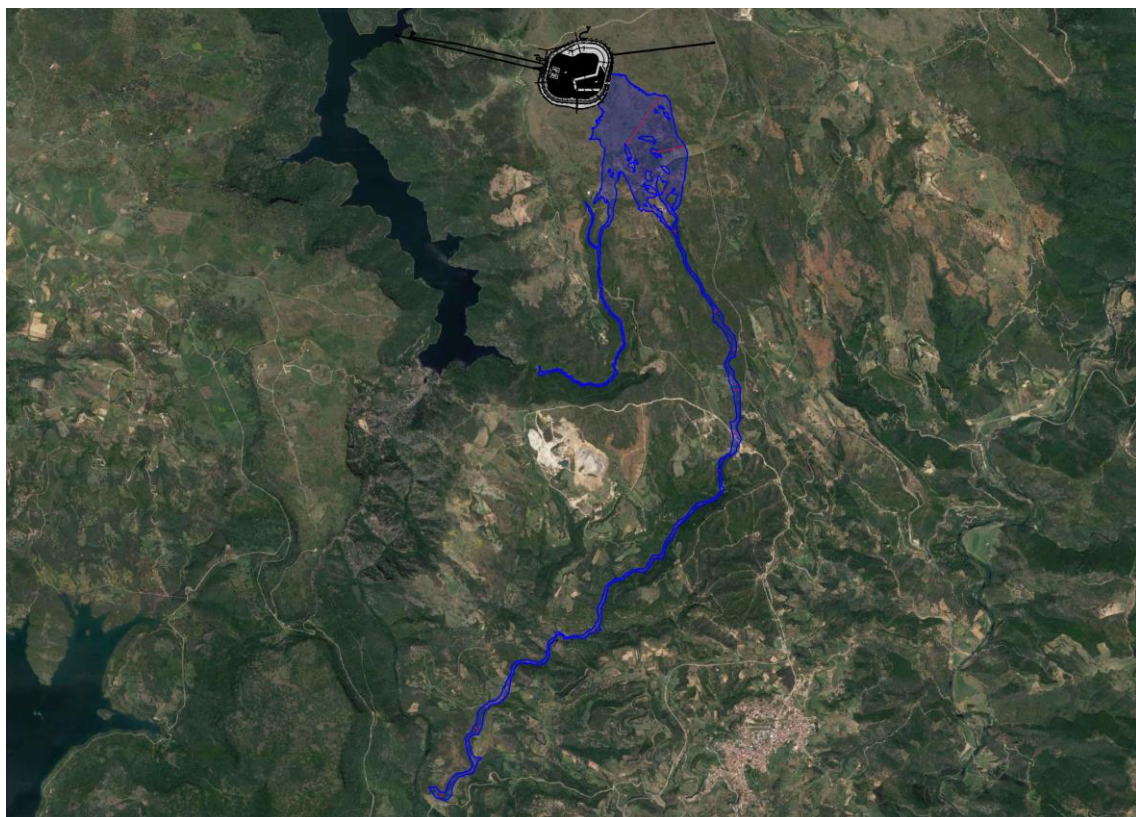


Figura 13 - Scenario 2: Estensione massima delle superfici allagate

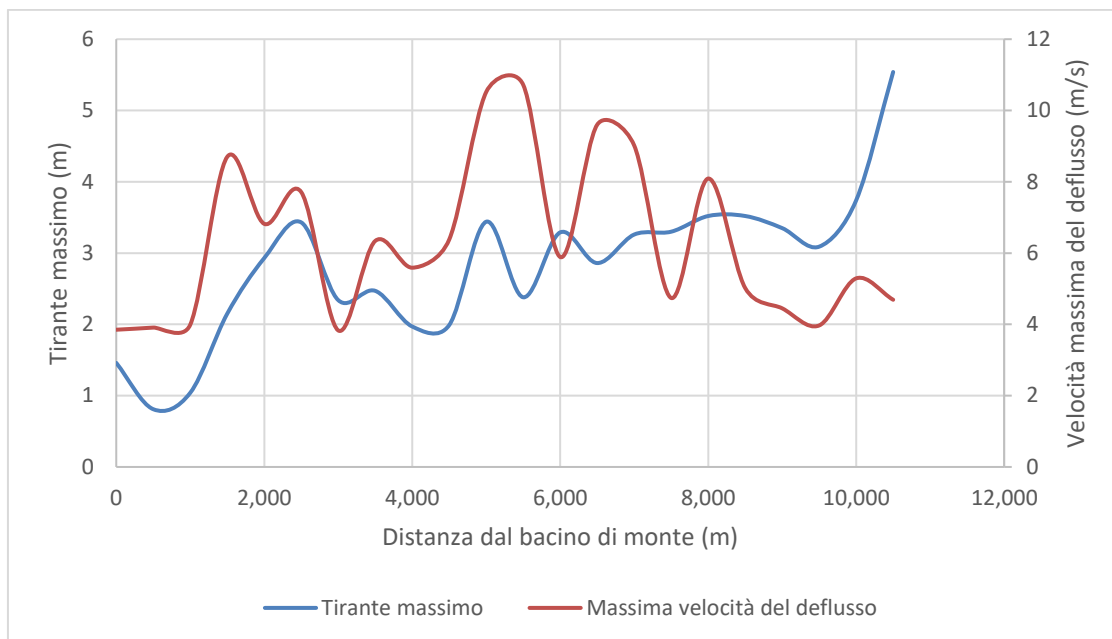


Figura 14 - Scenario 2 (ramo principale): Tirante massimo e velocità massima del deflusso

La portata di picco totale in uscita dalla breccia dello Scenario 2 è di 580 m³/s, e la maggior parte della portata defluisce lungo il ramo principale (circa 400 m³/s) (Figura 15). La portata di picco si mantiene pressoché costante fino alla confluenza nel Flumendosa.

Poiché la portata totale dello Scenario 2 (ramo secondario) è inferiore alla portata totale simulata durante la modellazione dello Scenario 1, le aree inondate a valle della confluenza sono determinate dai risultati del primo caso studiato.

I parametri del deflusso in corrispondenza delle sezioni principali sono mostrati in Tabella 4.

Ubicazione	Distanza	Portata di picco	Quota massima dell'acqua	Altezza massima dell'acqua	Velocità massima	Tempo di arrivo del fronte	Tempo della portata di picco
	(m)	(m ³ /s)	(m s.l.m.)	(m)	(m/s)	(h)	(h)
Piede di valle del bacino di monte	0	580	654,28	1,46	3,85	0:00	0:50
	500	397	636,54	0,81	3,91	0:14	0:53
Strada esistente	1.000	395	606,25	1,04	3,99	0:16	0:55
	1.500	392	578,76	2,15	8,70	0:22	0:56
	2.000	391	538,22	2,93	6,82	0:25	0:58
	2.500	391	512,37	3,43	7,71	0:27	0:59
	3.000	391	491,75	2,34	3,83	0:29	1:00
Edifici esistenti	3.500	391	473,77	2,47	6,34	0:31	1:01
	4.000	391	449,20	1,97	5,59	0:34	1:02
Strada esistente	4.500	391	422,90	1,99	6,38	0:37	1:03
	5.000	391	380,57	3,44	10,52	0:38	1:04

Ubicazione	Distanza	Portata di picco	Quota massima dell'acqua	Altezza massima dell'acqua	Velocità massima	Tempo di arrivo del fronte	Tempo della portata di picco
	5.500	391	317,78	2,38	10,72	0:39	1:05
	6.000	391	289,67	3,29	5,89	0:40	1:06
	6.500	391	273,44	2,86	9,60	0:43	1:07
	7.000	391	244,76	3,26	9,02	0:44	1:08
Strada esistente	7.500	391	230,43	3,30	4,74	0:46	1:09
	8.000	391	201,94	3,52	8,09	0:48	1:10
	8.500	391	181,96	3,52	5,02	0:50	1:11
Strada esistente	9.000	390	170,26	3,35	4,45	0:51	1:12
	9.500	390	158,96	3,09	3,97	0:54	1:14
	10.000	390	148,42	3,74	5,29	0:57	1:16
Confluenza nel Flumendosa	10.500	388	139,68	5,54	4,69	0:59	1:18

Tabella 4 - Scenario 2: parametri del deflusso in corrispondenza delle sezioni principali

Gli idrogrammi delle portate di picco a diverse progressive sono mostrati in Figura 15. La progressiva 0+000 è al piede di valle del rilevato del bacino di monte per lo Scenario 2, mentre la progressiva 4+361 si riferisce alla confluenza nell'area studiata dalla Scenario 1.

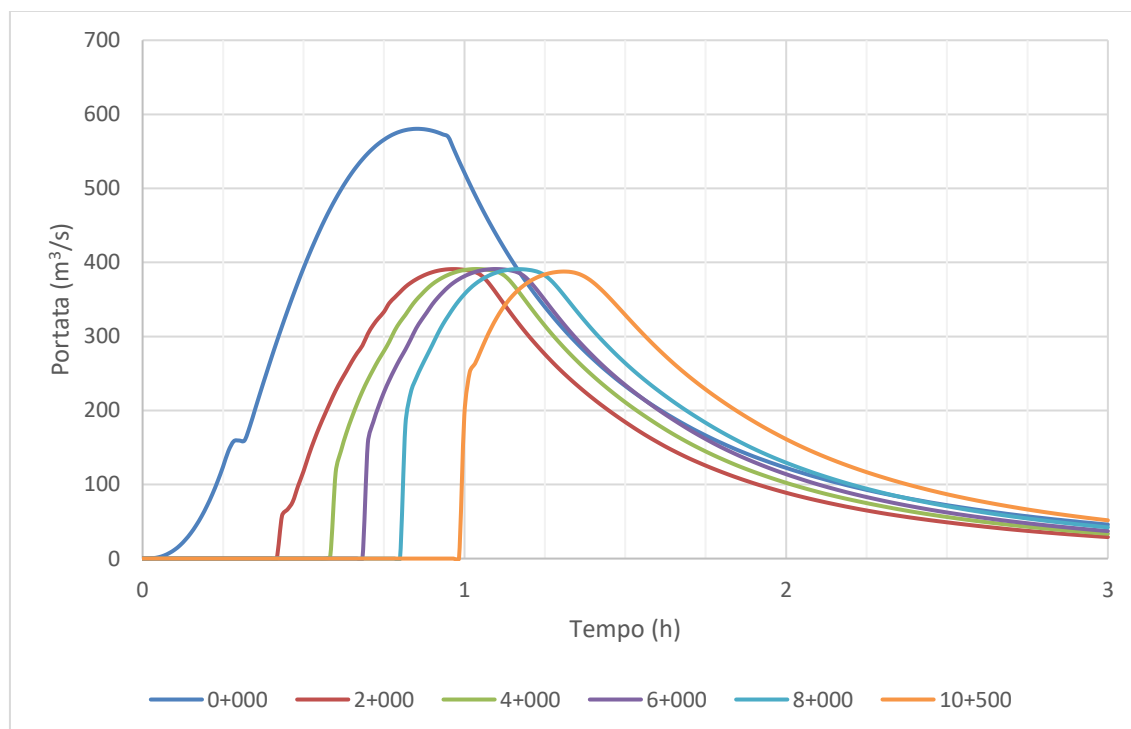


Figura 15 - Scenario 2: Idrogrammi del collasso della diga alle diverse progressive

4.4 RISULTATI DELLO SCENARIO 3

L'onda di piena che si genera dalla breccia prevista dallo Scenario 3 scorre verso l'invaso di Nuraghe Arrubiu, percorrendo il tracciato del Riu su Prisoneddu. La lunghezza totale è di 1,9 km e la portata di picco è di 705 m³/s.

L'involuppo della massima estensione della superficie d'acqua, del tirante (massima profondità) e della massima velocità del flusso sono mostrati in Figura 16 e Figura 17. Per maggiori dettagli si rimanda agli elaborati grafici riportati nell'allegato della presente relazione (in particolare si veda il riquadro R01).

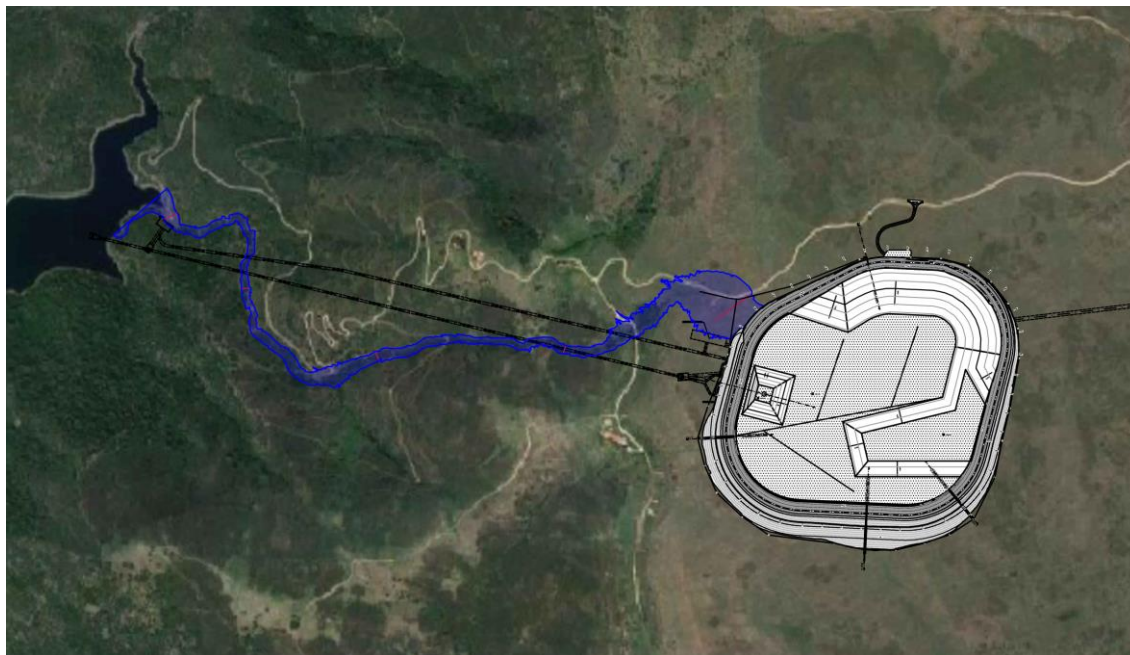


Figura 16 - Scenario 3: Estensione massima delle superfici allagate

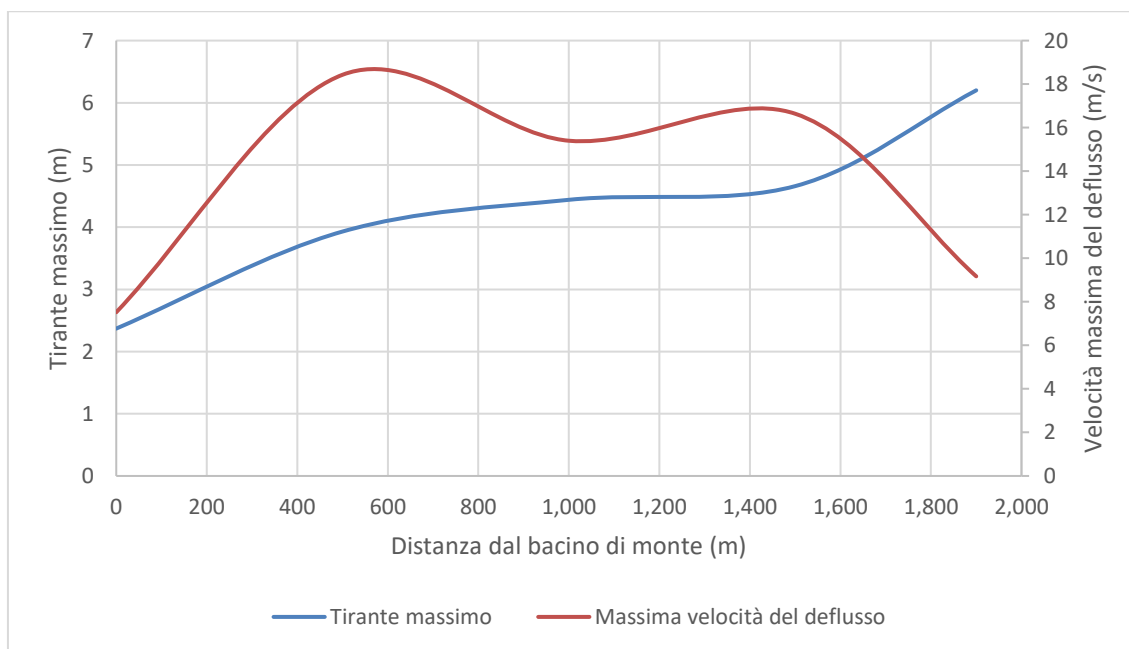


Figura 17 - Scenario 3: Tirante massimo e velocità massima del deflusso

I parametri del deflusso in corrispondenza delle sezioni principali sono mostrati in Tabella 5.

Ubicazione	Distanza	Portata di picco	Quota massima dell'acqua	Altezza massima dell'acqua	Velocità massima	Tempo di arrivo del fronte	Tempo della portata di picco
	(m)	(m ³ /s)	(m s.l.m.)	(m)	(m/s)	(h)	(h)
Piede di valle del bacino di monte	0	705	653,66	2,37	7,52	0:00	0:54
Strada esistente	300	705	613,19	2,04	14,71	0:06	0:55
Strada esistente	800	705	495,56	4,01	16,15	0:09	0:56
Invaso di Nuraghe Arrubiu	1.900	705	272,27	6,20	9,17	0:14	0:57

Tabella 5 - Scenario 3: parametri del deflusso in corrispondenza delle sezioni principali

In Figura 18 si riportano gli idrogrammi in corrispondenza delle seguenti sezioni: breccia (piedi di valle del rilevato del bacino di monte), sezione terminale del ramo inferiore (prima della confluenza nell'area studiata dallo Scenario 1), e sezione terminale del ramo inferiore (prima della confluenza nell'area studiata dallo Scenario 1).

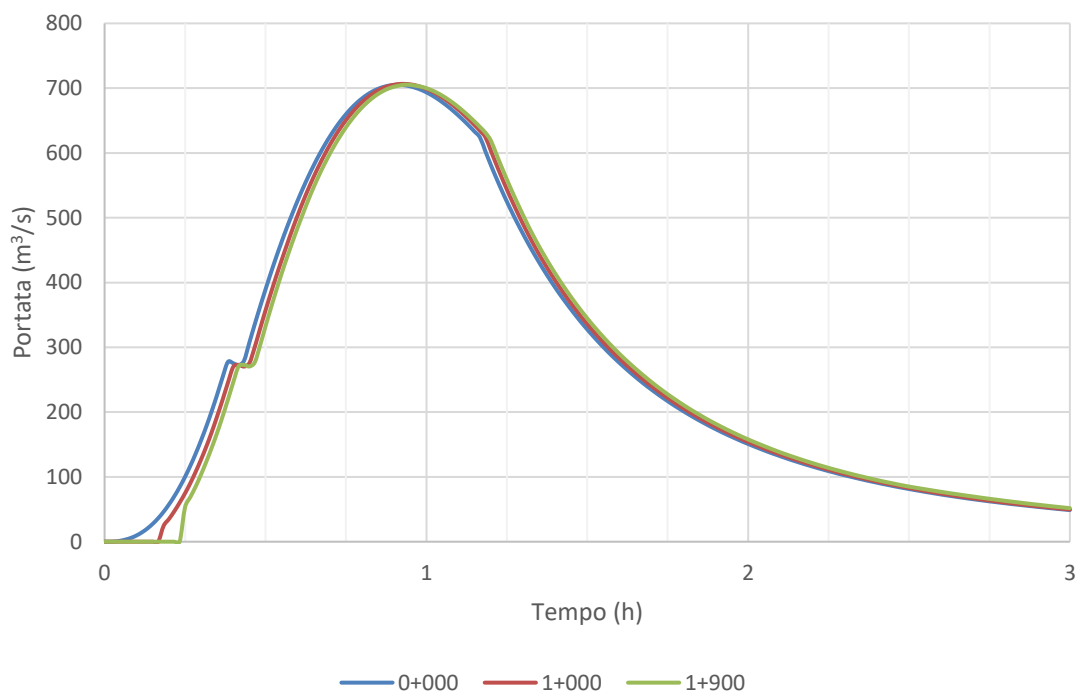


Figura 18 - Scenario 3: Idrogrammi del collasso della diga alle diverse progressive

5 MAPPE AREE A RISCHIO ESONDAZIONE

Sono state ricavate mappe di inondazione che mostrano l'involuppo delle aree coperte dall'onda di piena per i tre scenari di collasso considerati. Tali mappe sono incluse nell'appendice della presente relazione.

L'estensione dell'inondazione in alcune sezioni chiave è mostrata nelle seguenti figure (da Figura 19 a Figura 28).

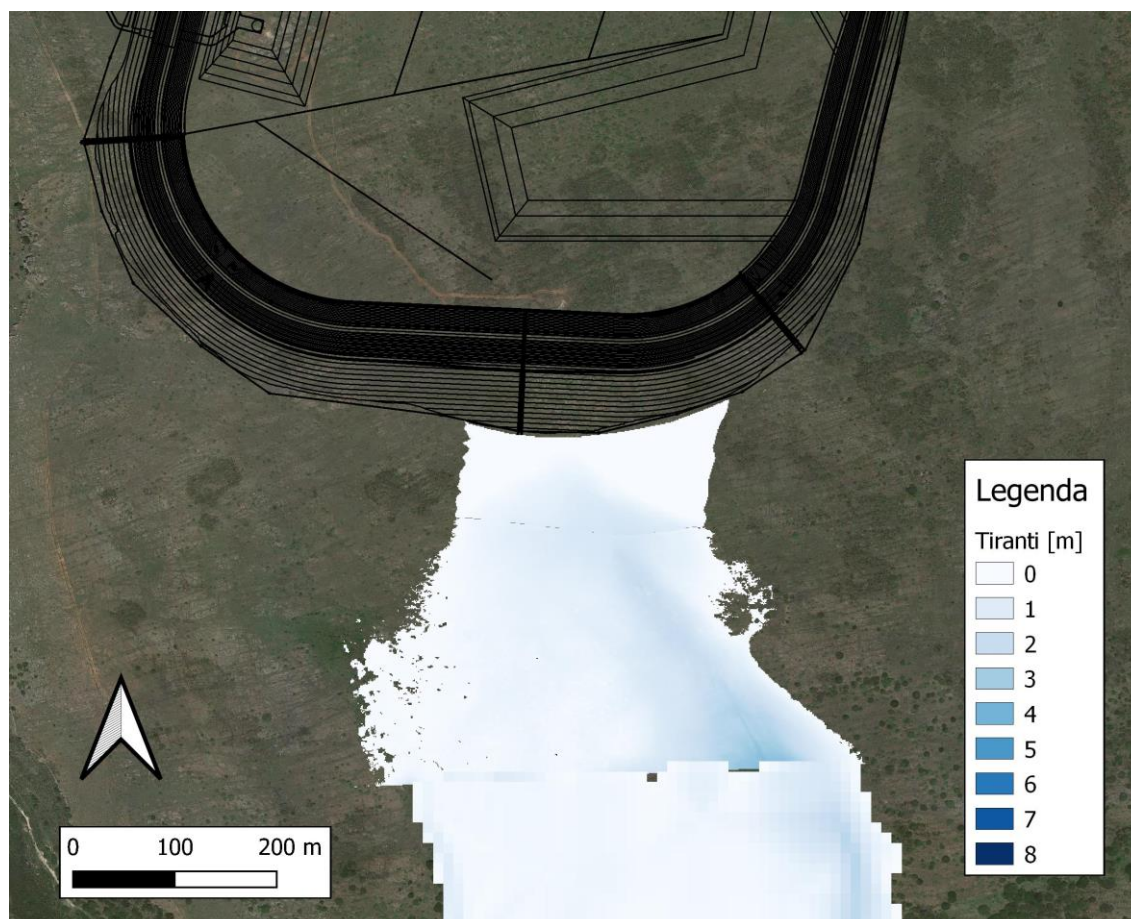


Figura 19 - Scenario 1: Progressiva 0+000 - Piede di valle del bacino di monte

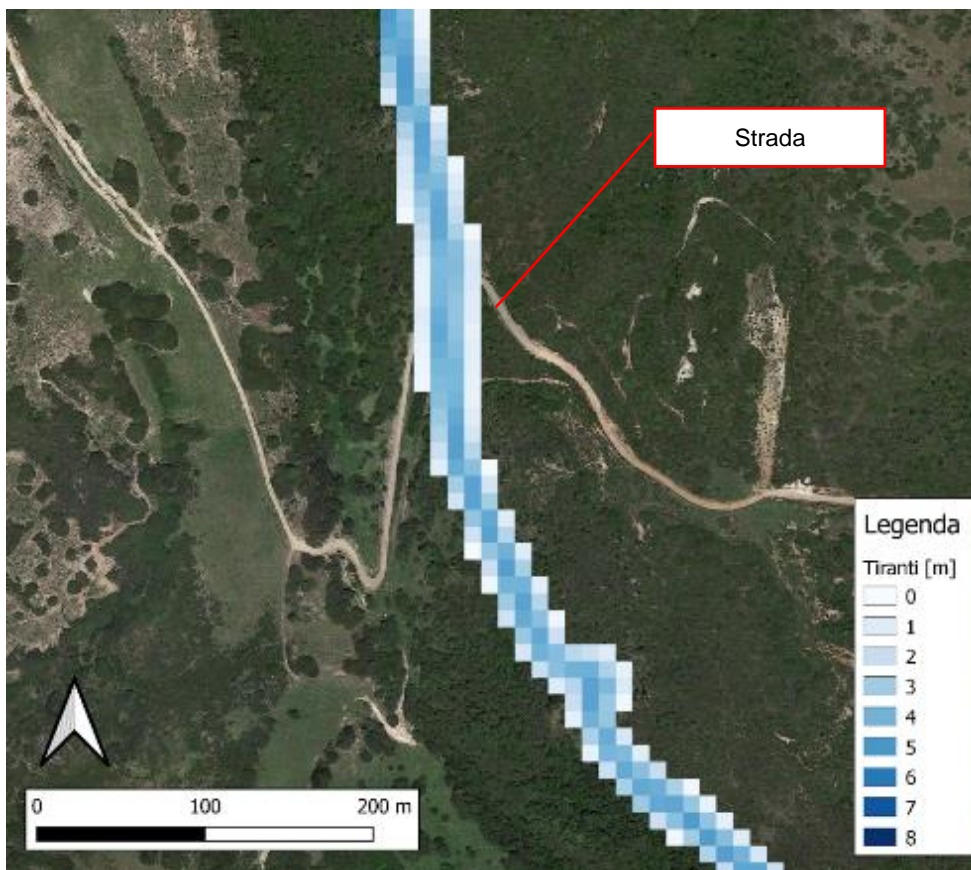


Figura 20 - Scenario 1: in prossimità della progressiva 2+000 - inondazione presso una strada esistente

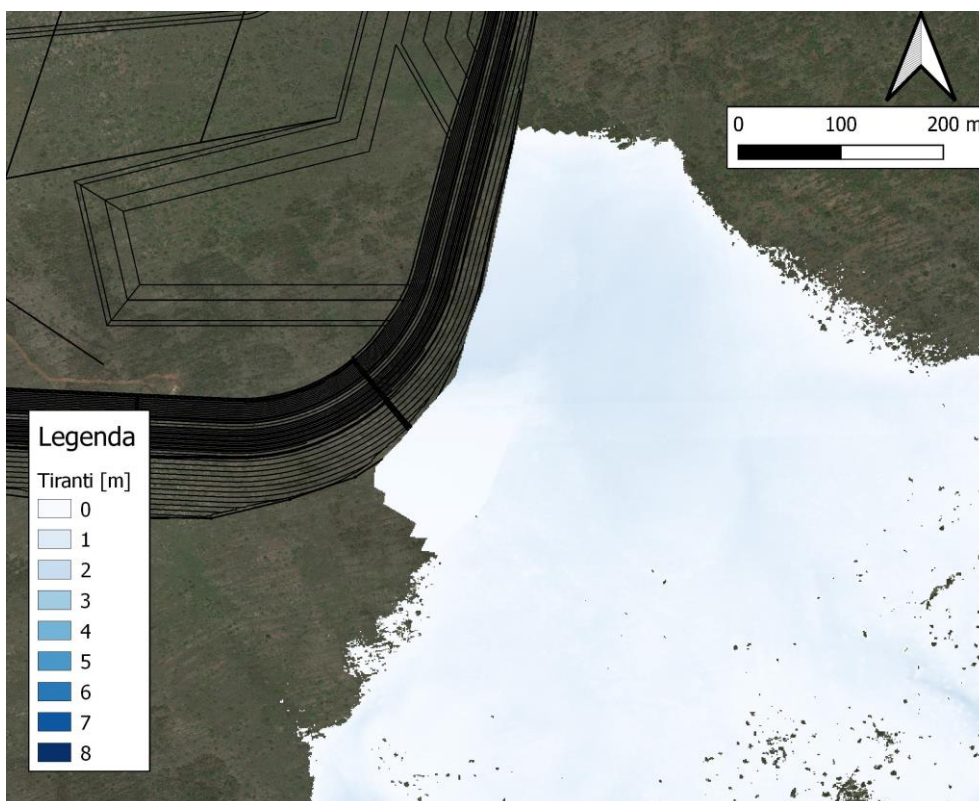


Figura 21 - Scenario 2: Progressiva 0+000 - Piede di valle del bacino di monte

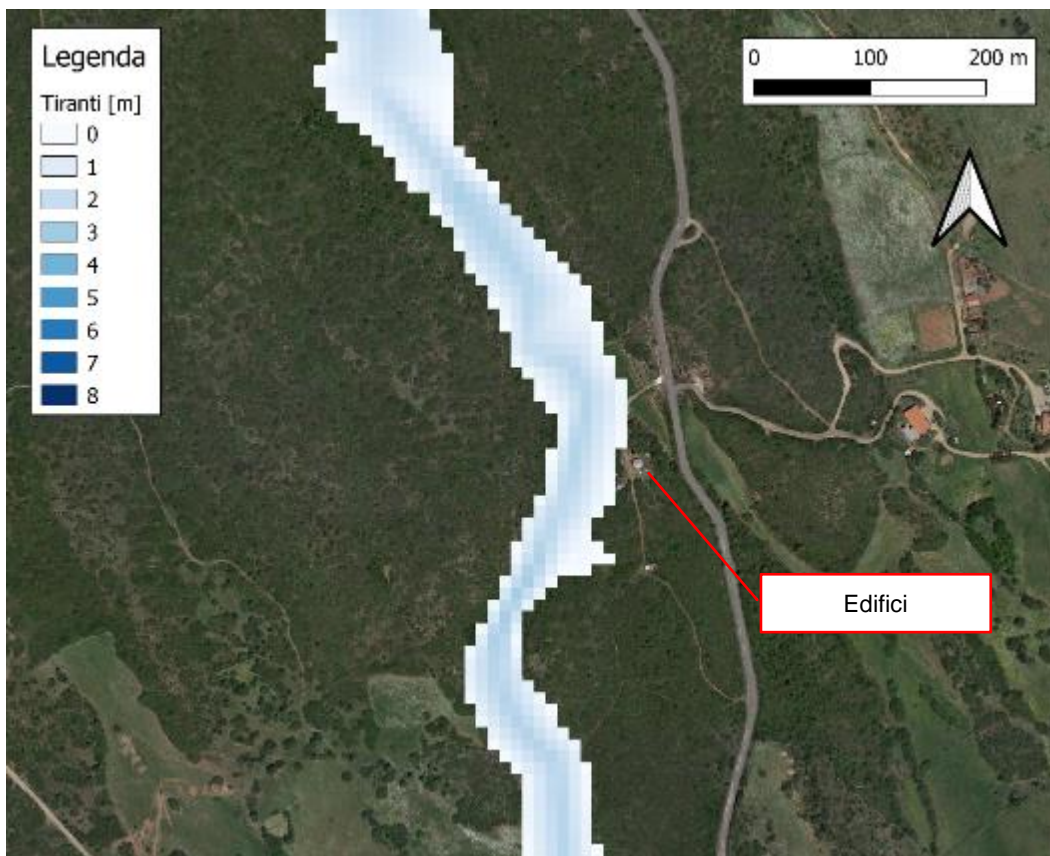


Figura 22 - Scenario 2: in prossimità della progressiva 3+500 - inondazione presso edifici esistenti

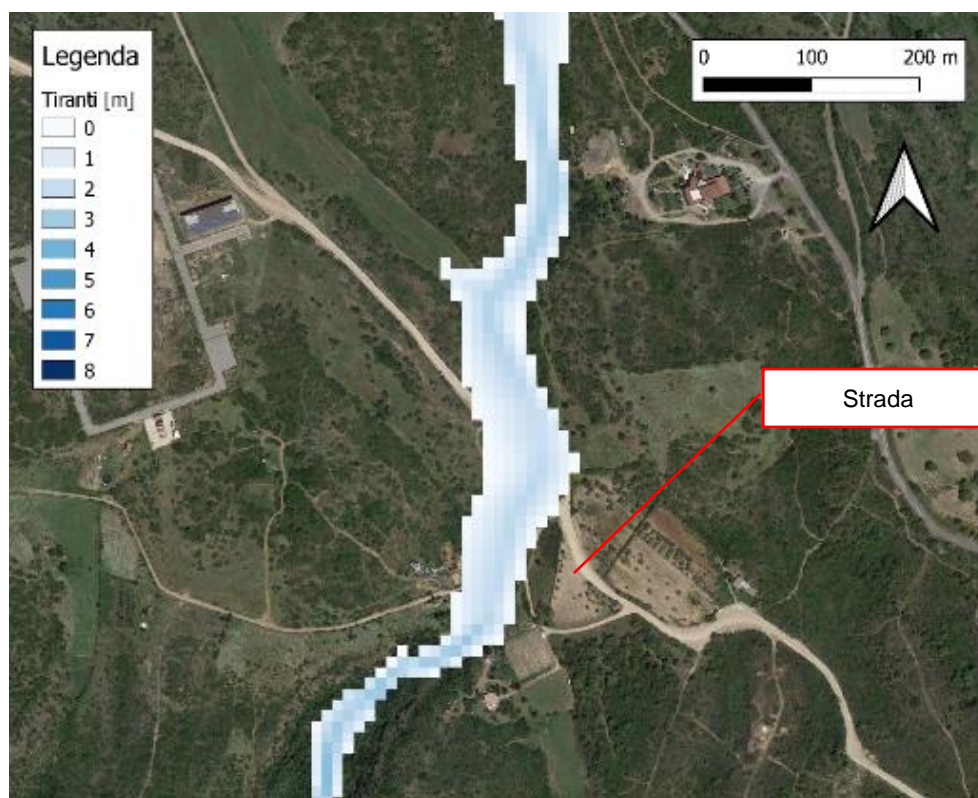


Figura 23 - Scenario 2: in prossimità della progressiva 4+500 - inondazione presso una strada esistente

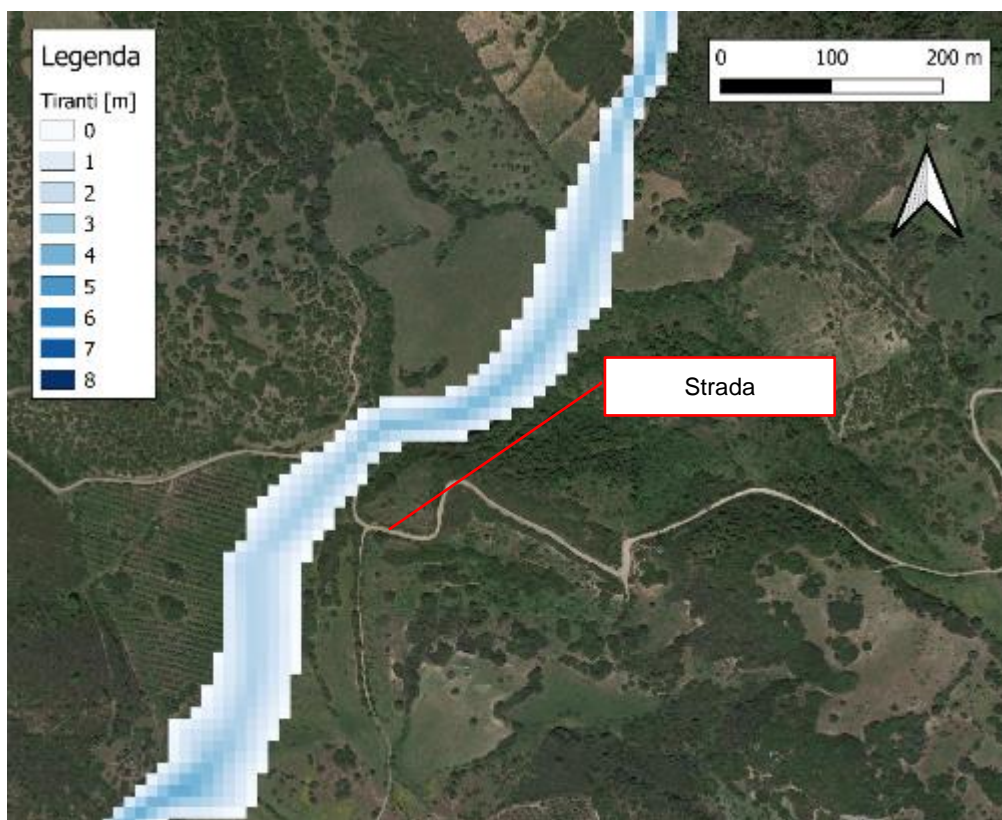


Figura 24 - Scenario 2: in prossimità della progressiva 9+200 - inondazione presso una strada esistente

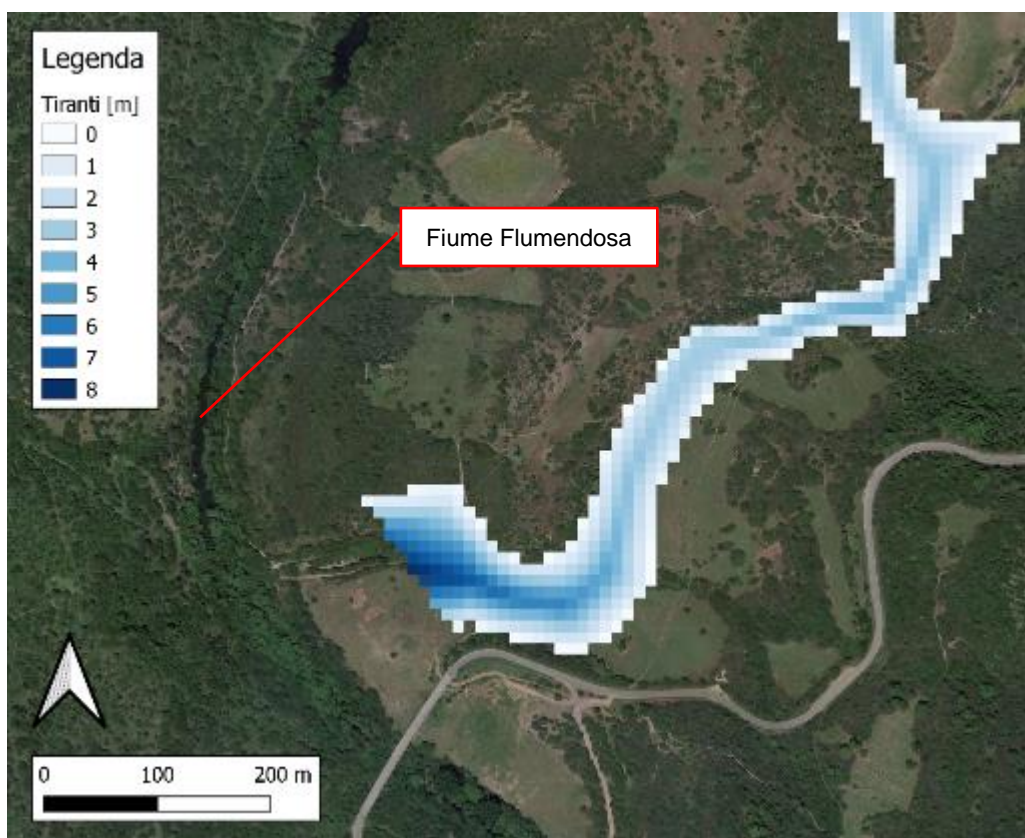


Figura 25 - Scenario 2: Confluenza nel fiume Flumendosa

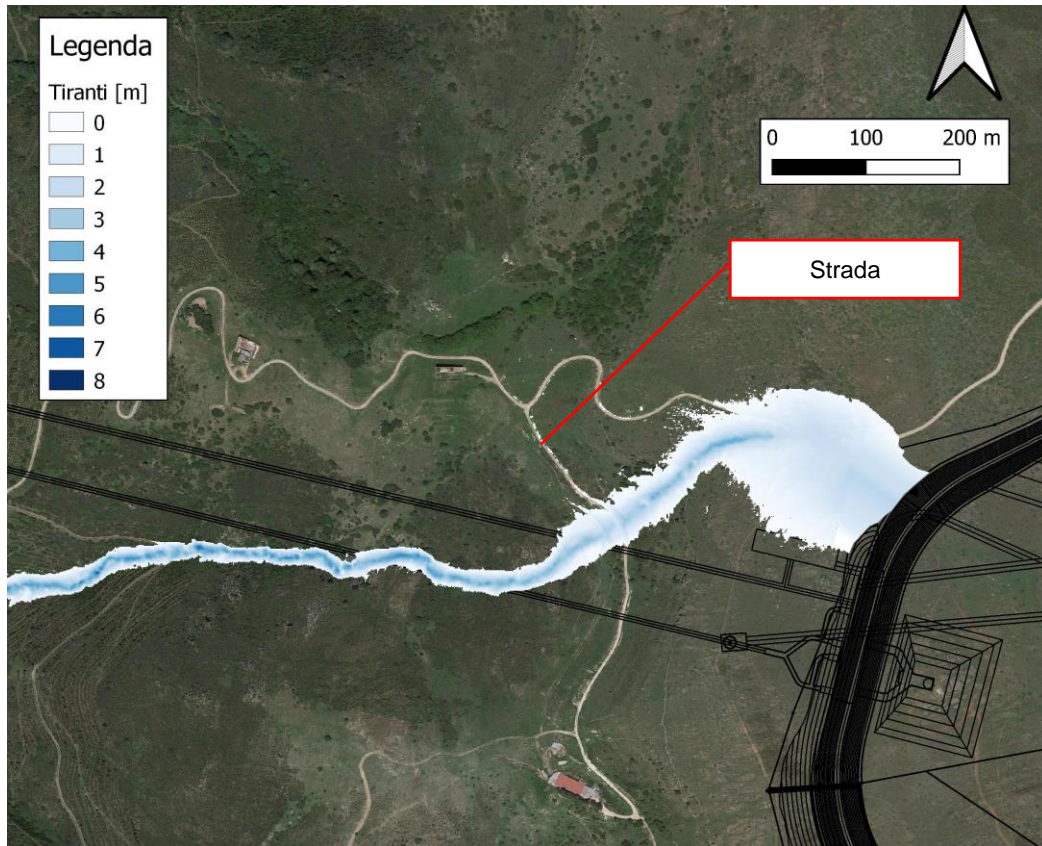


Figura 26 - Scenario 3: Progressiva 0+000 - Piede di valle del bacino di monte

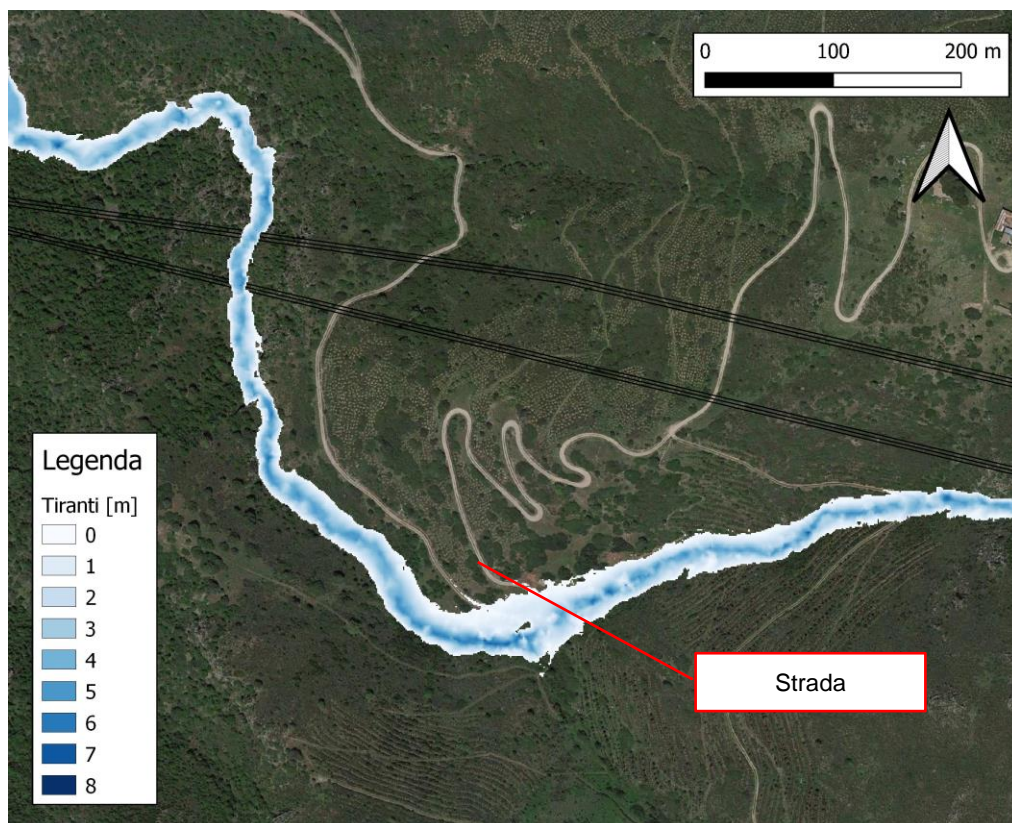


Figura 27 - Scenario 3: in prossimità della progressiva 1+000 - inondazione presso una strada esistente

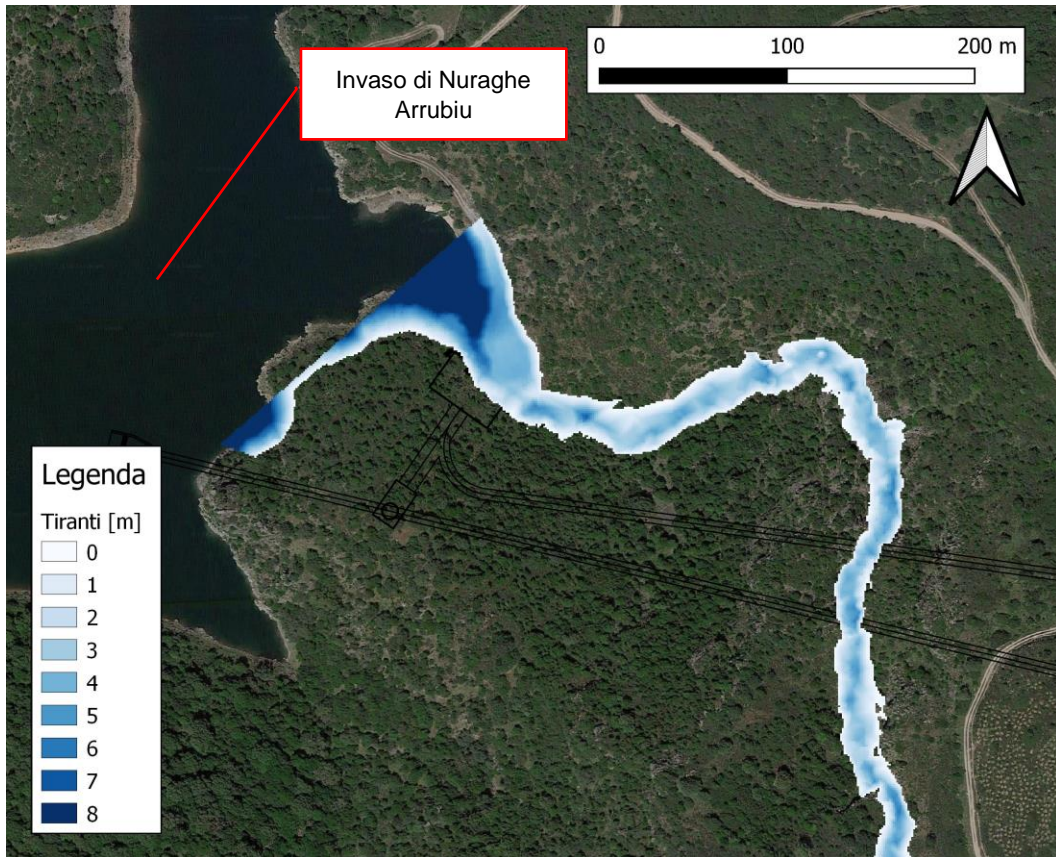


Figura 28 - Scenario 3: Confluenza nell'invaso di Nuraghe Arrubiu



Tel: +39 030 3702371 – Mail: info@frosionext.com - Sito: www.frosionext.com
Via Corfù 71 - Brescia (BS), CAP 25124
P.Iva e Codice fiscale: 03228960179