



Data del documento: 30 Gennaio 2026

Hydrological, morphological and sedimentological data in rivers reaches downstream the reservoir

Info: Deliverable 5.1



Autorità di Bacino
Distrettuale del Fiume Po



Titolo	Hydrological, morphological and sedimentological data in rivers reaches downstream the reservoir
Deliverable	5.1
WP	5
Lead Beneficiary	Politecnico di Torino
Autori	Politecnico di Torino
Partner coinvolti	Politecnico di Torino, ARPA Piemonte

Periodo	Febbraio 2023 – Gennaio 2026
Data di consegna prevista	31/01/2026
Bozza di consegna	28/01/2026
Data di validazione	30/01/2026

Tipologia	Dataset
Livello di disseminazione	Pubblico
Versione	1.0
Parole Chiave	Hydrology, morphology, sediment, river, dam, sediment flushing

HISTORY OF CHANGES		
Version	Publication date	Change
1	31/01/2026	-

Co-funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the Union or CINEA. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

Sommario

Technical Summary.....	4
Introduzione.....	7
Area di studio e siti di monitoraggio	8
Inquadramento geografico	8
Strategia di monitoraggio multi-sito	9
Sistema di monitoraggio e strumentazione.....	12
Monitoraggio della torbidità e del trasporto solido sospeso	12
Monitoraggio del livello idrometrico e della temperatura	14
Rilievi batimetrici dell'invaso.....	16
Rilievi aerofotogrammetrici con drone.....	18
Operazioni di flushing monitorate.....	23
Dataset acquisiti e struttura dei dati	24
Stato di avanzamento e prospettive.....	26
Conclusioni.....	29

Technical Summary

Introduction and objectives

This technical report presents the public dataset of hydrological, morphological, and sedimentological data acquired in the river reaches downstream of artificial reservoirs as part of Task 5.3 of the LIFE CLIMAX PO project. The task focuses on sustainable sediment management in Alpine reservoirs, addressing both the restoration of storage capacity through planned flushing operations and the reduction of downstream environmental impacts in terms of water quality, river habitat, and hydro-morphology.

The dataset was collected along the Stura di Demonte River, downstream of the Roccasparvera Dam (Cuneo Province), and provides the knowledge base for calibrating and validating hydraulic-morphodynamic models (Task 5.3.2), assessing aquatic habitats (Task 5.3.3), and defining operational guidelines for sustainable flushing operations replicable in other Alpine contexts.

Study area and monitoring strategy

The monitoring system encompasses three river reaches downstream of the Roccasparvera Dam to evaluate flushing effects at progressive distances from the reservoir and under different morphological conditions. Site S1 is located immediately downstream of the dam at the Enel Green Power gauging station; Site S2 is positioned downstream of the intake structure near the environmental flow release point; Site S3 is located further downstream after the ISD mini-hydroelectric plant weir. This multi-site strategy enables quantification of suspended sediment propagation, characterization of hydro-morphological modifications at different spatial scales, and evaluation of hydraulic infrastructure effects on sediment dynamics.

Monitoring systems and instrumentation

The monitoring infrastructure integrates multiple technologies. **Continuous turbidity monitoring** operates at all three sites using Hach Solitax sc optical

sensors with nephelometric dual-beam technology, acquiring turbidity (FNU) and total suspended solids (TSS) data transmitted in real-time via 4G LTE. **Water level and temperature sensors** were installed at Sites S2 and S3 in April 2025, recording data every 15 minutes in standalone mode with periodic manual download. Site S1 utilizes an existing Enel Green Power water level gauge.

Bathymetric surveys of the reservoir were conducted pre-flushing (April 2025) using a boat-mounted Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP River Surveyor M9), and post-flushing (June 2025) using both single-beam technology and an innovative remotely-controlled unmanned surface vehicle equipped with multibeam sensors. These surveys enable precise quantification of mobilized sediment volumes.

Drone-based surveys employed both optical (DJI Mavic 3E) and LiDAR (DJI Zenmuse L1 on Matrice 300) technologies. LiDAR was used at Site S1 to penetrate dense riparian vegetation. Surveys were conducted in April (pre-flushing), May (immediately post-flushing), and July 2025, producing high-resolution orthophotos and digital terrain models. Bathymetric corrections were applied using GNSS RTK and ADCP measurements to ensure accuracy in submerged areas.

Monitored flushing operation

The flushing operation occurred from May 5–9, 2025, during which controlled drawdown reduced the reservoir level by approximately 8 meters (to 615.47 m a.s.l.). The continuous monitoring system captured the complete temporal evolution of suspended sediment concentration across all three sites, documenting how the turbidity wave propagated downstream with progressive temporal delay and gradual intensity attenuation. During flushing operations, 50 samples of turbid water were taken at different times near the three points where the turbimeters had been installed, in order to plot a specific NTU-concentration curve. Water level and temperature variations were recorded at 15-minute intervals at Sites S2 and S3, while aerophotogrammetric surveys documented erosion and deposition patterns.

Dataset structure and future perspectives

The dataset comprises continuous time series (turbidity, TSS, water level, temperature), bathymetric models enabling volumetric sediment calculations, multi-temporal digital terrain models and orthophotos, and contextual data including reservoir levels, discharge rates, and meteorological variables.

The flushing operation, originally scheduled for spring 2024, was postponed to 2025 due to technical-administrative and regulatory delays beyond the project's control. These delays, combined with difficulties in procuring specialized monitoring equipment, resulted in the completion of the turbidimeter installation between February and March 2025 (M25-M26), later than initially planned in the MS5.3 milestone timeline. Despite this delay, all monitoring stations are now fully operational and actively collecting data. Consequently, monitoring will continue at least until May 2026 to acquire a full year of post-flushing observations, with extended acquisition planned to strengthen results and conduct more robust analyses. The extended timeline actually provides an opportunity for more comprehensive baseline characterization prior to flushing events. Future campaigns will include seasonal aero-photogrammetric surveys, sedimentological sampling for grain-size characterization, and continued continuous acquisition of turbidity, level, and temperature data.

This comprehensive, high-quality dataset will support the development of evidence-based operational guidelines replicable across Alpine contexts, contributing to sustainable water resource management and climate change adaptation strategies.

Introduzione

Il presente documento costituisce la relazione tecnica relativa al Deliverable D5.1.1, che ha l'obiettivo di raccogliere e rendere disponibile un dataset pubblico contenente i dati idrologici, morfologici e sedimentologici acquisiti nei tratti fluviali sottesi dagli invasi artificiali oggetto di studio nel Task 5.3 del progetto LIFE CLIMAX PO.

Il Task 5.3 si concentra sulla gestione sostenibile dei sedimenti negli invasi alpini, affrontando contemporaneamente due sfide interconnesse: da un lato il ripristino della capacità di invaso attraverso operazioni di svaso e fluitazione pianificate, dall'altro la riduzione degli impatti ambientali a valle in termini di qualità dell'acqua, habitat fluviale e idromorfologia. Questo approccio integrato richiede una base conoscitiva solida e dettagliata, costruita attraverso un monitoraggio continuo e multi-parametrico che permetta di comprendere i processi in atto e di supportare le decisioni gestionali.

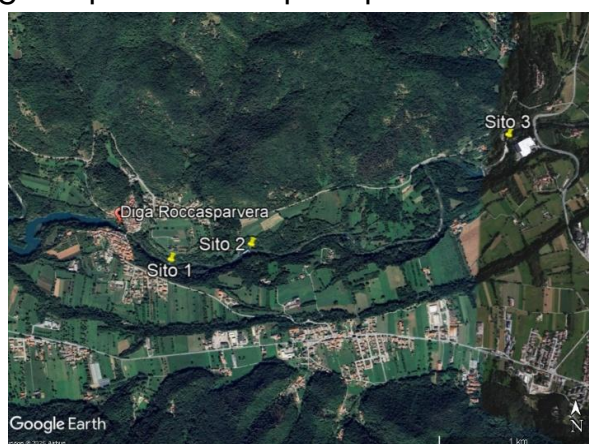
Il dataset qui presentato rappresenta il risultato delle attività di monitoraggio condotte sul fiume Stura di Demonte, a valle della diga di Roccasparvera, e costituisce la base conoscitiva fondamentale per diverse attività progettuali: la calibrazione e validazione dei modelli idraulico-morfodinamici sviluppati nel Task 5.3.2, la valutazione degli habitat acquatici prevista nel Task 5.3.3, e la definizione di linee guida operative per la gestione sostenibile delle operazioni di flushing che possano essere replicate in altri contesti alpini.

L'importanza di questo dataset risiede non solo nella sua completezza e nella qualità delle misure acquisite, ma anche nell'approccio metodologico adottato, che integra tecnologie innovative di monitoraggio in continuo con campagne di rilievo aerofotogrammetrico e misure dirette sul campo. Questo approccio multi-scala permette di cogliere sia la dinamica rapida degli eventi di flushing sia l'evoluzione morfologica di medio-lungo periodo del corso d'acqua.

Area di studio e siti di monitoraggio

Inquadramento geografico

L'area di studio si colloca nell'ambito del bacino del fiume Stura di Demonte, a valle della diga di Roccasparvera, situata nell'omonimo comune in provincia di Cuneo. Il fiume Stura di Demonte è caratterizzato da un tipico regime idrologico alpino, con una marcata variabilità stagionale delle portate. Durante la primavera, le portate elevate sono sostenute principalmente dallo scioglimento del manto nevoso accumulato durante la stagione invernale, mentre in autunno gli apporti sono legati alle precipitazioni stagionali. Il regime presenta invece due distinti periodi di magra: il primo in inverno, quando gran parte delle precipitazioni viene



immagazzinata sotto forma di neve, e il secondo in estate, causato dalla progressiva riduzione della copertura nevosa residua, dalle scarse precipitazioni estive e dall'elevata evapotraspirazione.

La diga di Roccasparvera fu costruita tra il 1957 e il 1958 e successivamente acquisita da Enel Green Power nel 1963. L'opera ha come scopo principale quello di compensare le variazioni di portata in alveo dovute all'esercizio delle centrali idroelettriche situate a monte e di garantire un rilascio d'acqua il più possibile costante verso valle. Il serbatoio che ne risulta si estende per circa due chilometri a monte dello sbarramento, generando un invaso di volume totale pari a 530.000 metri cubi. Si tratta di una diga a gravità in calcestruzzo, con soglia tracimabile posta a quota 623,50 metri sul livello del

mare. Il paramento di monte è verticale mentre quello di valle presenta un profilo a vena radente di tipo Craeger. Il ciglio sfiorante, che costituisce lo scarico di superficie, è articolato in tre luci di larghezza pari a dieci metri ciascuna. Lo scarico di fondo è invece costituito da due bocche a battente con sezione rettangolare di dimensioni tre per tre metri e mezzo, la cui soglia è posizionata a quota 610,00 metri sul livello del mare.

Strategia di monitoraggio multi-sito

Nel caso studio sono stati individuati tre tratti fluviali a valle della diga di Roccasparvera per monitorare il comportamento del fiume e gli effetti delle operazioni di flushing a distanze progressive dall'invaso e in condizioni idromorfologiche differenti. Questa strategia di monitoraggio multi-sito risponde all'esigenza di comprendere come le perturbazioni indotte dalle operazioni di svaso si propaghino lungo l'asta fluviale, modificandosi in funzione della distanza dalla sorgente, delle caratteristiche morfologiche dell'alveo e della presenza di opere idrauliche che possono influenzare la dinamica della portata liquida e quindi del trasporto solido.

L'approccio adottato permette di valutare diversi aspetti fondamentali per la gestione sostenibile delle operazioni di flushing. In primo luogo, consente di quantificare la propagazione del trasporto solido in sospensione lungo l'asta fluviale, documentando come l'onda di torbidità generata dal rilascio dei sedimenti si attenui progressivamente muovendosi verso valle. In secondo luogo, permette di caratterizzare le modificazioni idromorfologiche indotte dalle operazioni di svaso a diverse scale spaziali, identificando le zone maggiormente soggette a erosione o deposizione. Inoltre, l'analisi multi-sito consente di valutare gli effetti delle opere idrauliche presenti, come traverse e derivazioni, sulla dinamica sedimentaria, aspetto cruciale per comprendere come queste infrastrutture possano modificare il comportamento naturale del corso d'acqua. Infine, la strategia adottata permette di studiare la risposta ecologica e la eventuale variazione di habitat in funzione della distanza dalla sorgente di perturbazione, fornendo

elementi utili per la definizione di protocolli operativi che minimizzino gli impatti ambientali.

I tre siti di monitoraggio sono stati selezionati in collaborazione con i gestori dell'invaso e con gli enti di controllo, tenendo conto sia delle caratteristiche idromorfologiche dei sottotratti sia dell'accessibilità per le operazioni di installazione e manutenzione della strumentazione. La descrizione dettagliata della configurazione tecnica delle stazioni di misura, dei sistemi di alimentazione e protezione, e delle specifiche dei sensori installati è riportata nella *relazione tecnica relativa alla Milestone MS5.3*, dedicata specificatamente al monitoraggio della torbidità a valle della diga di Roccasparvera.

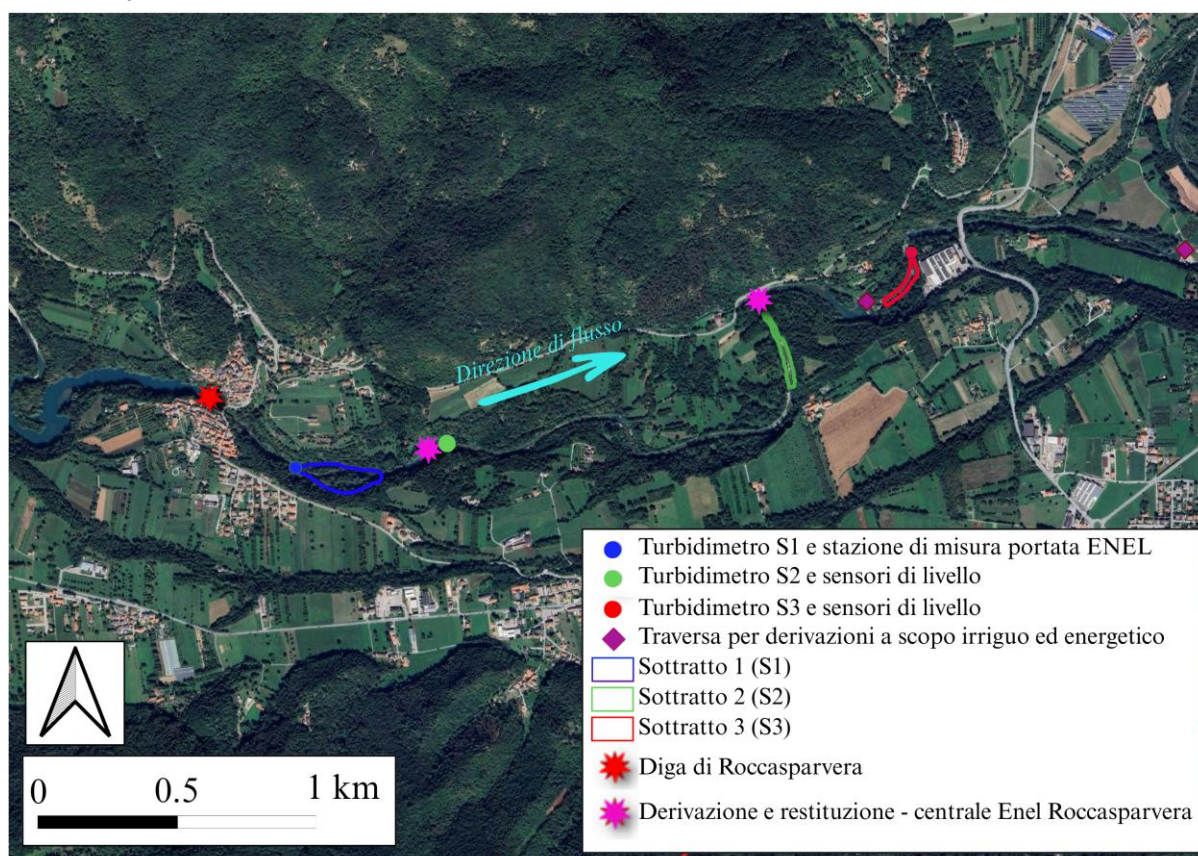


Figura1. La mappa in figura presenta l'area di studio del lavoro evidenziando la diga di Roccasparvera a monte, i sottotratti S1, S2 ed S3, i punti di installazione dei 3 diversi turbidimetri e delle stazioni misura della portata o dei sensori di livello accoppiati. La mappa evidenzia anche i punti in cui l'alveo presenta derivazione, traverse e/o restituzioni.

Il **primo sito**, identificato come S1 (in blu in figura 1), è posizionato immediatamente a valle della diga, presso la stazione idrometrica di Enel Green Power, alle coordinate 44°20'19.0"N 7°26'38.4"E. Questo sito è

idraulicamente rappresentativo del rilascio diretto dalla diga e delle condizioni di fondo alveo nella sezione di maggiore prossimità allo sbarramento. L'acquisizione dati è iniziata a febbraio 2025 e il sito rappresenta il punto di riferimento principale per caratterizzare il segnale in uscita dall'invaso, sia in condizioni ordinarie di rilascio sia durante le operazioni di flushing.

Il **secondo sito**, denominato S2 (in verde in figura 1), si trova nella zona immediatamente a valle dell'opera di presa della centrale ENEL Green Power, subito a valle del punto di rilascio del Deflusso Ecologico (DE). Anche in questo caso l'acquisizione è iniziata a febbraio 2025. Questo sito è stato scelto per monitorare specificamente le condizioni idrologiche e il trasporto solido legati al rilascio regolato attraverso il DE, che rappresenta una componente fondamentale del regime idrologico del corso d'acqua a valle della diga e ha importanti implicazioni per il mantenimento delle funzioni ecologiche.



Il **terzo sito**, S3 (in rosso in figura 1), è collocato più a valle, dopo la traversa della centrale miniidroelettrica "ISD srl" e del canale Roero, nei pressi del ponte canale e dello stabilimento industriale Agrimontana. L'acquisizione dati in questo sito è iniziata a marzo 2025. La scelta di questo sito risponde all'esigenza di valutare la propagazione del trasporto solido nelle sezioni a valle delle opere idrauliche, caratterizzate da una morfologia fluviale

sensibilmente diversa rispetto ai siti più prossimi alla diga. La presenza della traversa e della derivazione introduce infatti una discontinuità idraulica che può influenzare significativamente la dinamica del trasporto di sedimenti.



Sistema di monitoraggio e strumentazione

Monitoraggio della torbidità e del trasporto solido sospeso

In tutti e tre i siti di misura sono state installate unità complete di acquisizione e trasmissione dati per il monitoraggio continuo della torbidità. Il cuore del sistema è costituito da sensori ottici Hach Solitax sc, che operano secondo il principio di misura nefelometrico a doppio raggio. Questa tecnologia permette di misurare contemporaneamente sia la torbidità espressa in unità nefelometriche (FNU) sia la concentrazione di solidi sospesi totali (TSS), garantendo un ampio campo operativo che spazia da 0,001 a 4000 FNU e da 0 a 50 grammi per litro. L'elevata precisione e l'ampio range di misura rendono questi sensori particolarmente adatti al monitoraggio delle operazioni di flushing, che possono generare concentrazioni di sedimenti molto variabili nel tempo.

I dati vengono acquisiti in continuo e gestiti da datalogger HyQuest iRIS UnderCover Pro, che oltre a registrare le misure si occupano anche della loro trasmissione in tempo reale. La comunicazione avviene tramite rete 4G LTE verso un server FTP gestito dal Politecnico di Torino, dove i dati vengono archiviati e sottoposti a un controllo quotidiano automatico. Il sistema implementa un meccanismo di warning che si attiva in presenza di anomalie, permettendo di intervenire tempestivamente in caso di malfunzionamenti. Per garantire la massima sicurezza e affidabilità, i dati vengono salvati in modo ridondato su due repository indipendenti, minimizzando il rischio di perdita di informazioni in caso di guasti hardware o problemi di connettività.

L'autonomia energetica del sistema è garantita da una configurazione combinata che integra l'alimentazione dalla rete elettrica locale, dove disponibile, con pannelli fotovoltaici e batterie tampone. Questa soluzione assicura la continuità operativa anche in condizioni meteorologiche avverse o in caso di interruzioni dell'alimentazione di rete, aspetto fondamentale considerando che i siti di misura si trovano in ambiente montano e possono essere soggetti a eventi meteorologici intensi. In figura 2 sono riportati gli andamenti di NTU dei tre turbidimetri durante le operazioni di svaso.

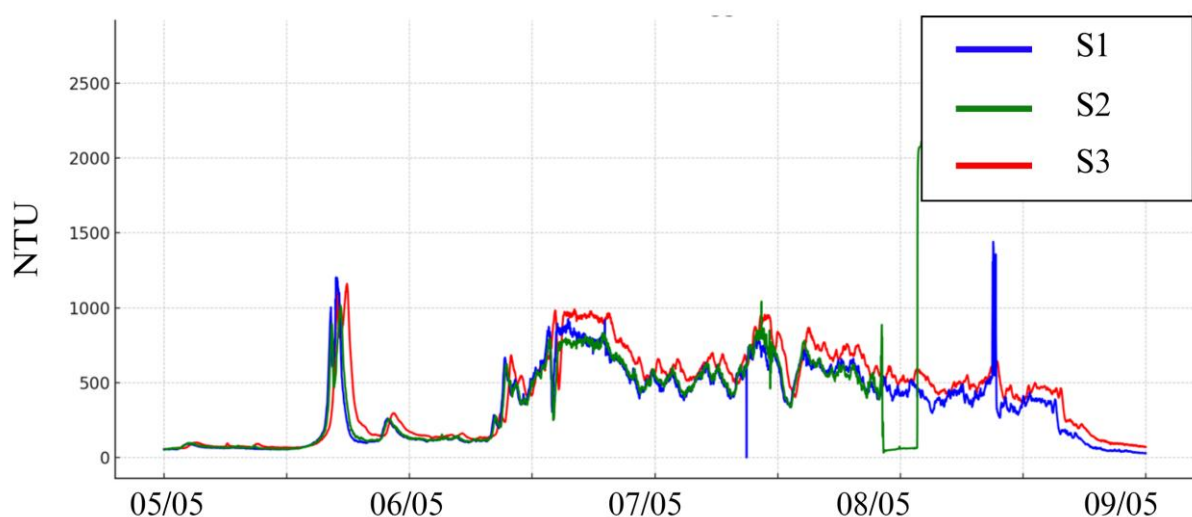


Figura 2. Andamento dei valori nefelometrici di NTU rilevati dai tre turbidimetri S1 (in blu), S2 (in verde) e S3 (in rosso).

Tabella 1. Informazioni su installazione e frequenza di misurazione dei turbidimetri installati.

Inizio acquisizione	Sito	Caratteristiche
Febbraio 2025	S1	Frequenza 1 minuto - NTU
Febbraio 2025	S2	Frequenza 1 minuto - NTU
Marzo 2025	S3	Frequenza 1 minuto - NTU

Monitoraggio del livello idrometrico e della temperatura

A partire dal mese di aprile 2025, l'infrastruttura di monitoraggio è stata ulteriormente potenziata con l'installazione di sensori di livello nelle stazioni di misura S2 e S3. In particolare, nella stazione S2 è stata installata una coppia di HOB0 HOB0 MX20L-04 HOB0 U20-001-01, mentre nella stazione una omologa coppia di HOB0 U20-001-01 HOB0 U20-001-0. Questi strumenti acquisiscono contemporaneamente la pressione e la temperatura dell'acqua con una frequenza di quindici minuti. Per ogni coppia di sensori, uno è stato installato all'interno dell'alveo sempre attivo del fiume e uno al di fuori dell'acqua, in modo da ottenere dalla sottrazione delle due pressioni misurate il valore di pressione idrostatica sul sensore sommerso, e da questo risalire al livello idrometrico. In questo modo, è possibile generare una serie temporale ad alta risoluzione che permette di ricostruire in dettaglio gli idrogrammi di piena e di correlare le variazioni di torbidità con le variazioni di portata.

Nel sito S1, immediatamente a valle della diga, non è stato necessario installare strumentazione dedicata per la misura del livello idrometrico in quanto in loco, adiacente alla strumentazione turbidimetrica, è già installato e operativo un idrometro di proprietà di Enel Green Power. Questo strumento, gestito dal concessionario nell'ambito delle attività ordinarie di monitoraggio dell'invaso e dei rilasci, fornisce dati di livello con continuità e accuratezza adeguate agli obiettivi del progetto.

A differenza dei sensori di torbidità, che trasmettono i dati in tempo reale, i sensori di livello installati nei siti S2 e S3 operano in modalità stand-alone con registrazione in memoria interna. Lo scaricamento dei dati avviene in loco mediante accesso diretto ai datalogger, con una cadenza programmata di due o tre volte l'anno. Questa scelta operativa è stata dettata dalla necessità di ottimizzare il consumo energetico e di ridurre la complessità del sistema di acquisizione, mantenendo comunque una frequenza di campionamento adeguata agli obiettivi di monitoraggio. I sensori di livello, infatti, pur essendo caratterizzati da consumi energetici contenuti, richiederebbero un sistema di trasmissione dati che incrementerebbe significativamente il fabbisogno energetico complessivo della stazione, con conseguente necessità di sovradimensionare i pannelli fotovoltaici e le batterie tampone.

I dati di livello misurati costituiscono un elemento di validazione fondamentale per i modelli idraulici sviluppati nel Task 5.3.2, permettendo di verificare l'affidabilità delle simulazioni attraverso il confronto diretto con le misure di campo. La disponibilità di serie temporali di livello acquisite durante eventi caratterizzati da condizioni idrauliche molto diverse, dalle portate di magra ordinaria fino ai picchi di piena associati alle operazioni di flushing, permette di testare i modelli in un ampio range di condizioni operative e di valutarne la robustezza e l'accuratezza predittiva.

I dati di livello permettono di ricostruire gli idrogrammi di piena durante le operazioni di flushing e di correlare le variazioni di torbidità con le variazioni di portata, fornendo elementi essenziali per la comprensione dei processi di mobilizzazione e trasporto dei sedimenti. I dati di livello misurati costituiscono un elemento di validazione fondamentale per i modelli idraulici sviluppati nel Task 5.3.2, permettendo di verificare l'affidabilità delle simulazioni attraverso il confronto diretto con le misure di campo.

Tabella 2. Informazioni su installazione e frequenza di misurazione dei sensori di livello installati. .

Inizio acquisizione	Sito	Caratteristiche
Aprile 2025	S2	Frequenza 15 minuto – Livello e Temperatura
Aprile 2025	S3	Frequenza 15 minuto – Livello e Temperatura

Date le numerose opere di presa che intervallano i diversi tratti fluviali in analisi e la presenza di una stazione idrometrica di ARPA solo a monte della diga di Roccasparvera o a valle della confluenza tra Stura e Gesso, la combinazione di una stazione di misura di livello per ciascuno permettere di ricostruire una serie di portata caratteristica del tratto, necessaria alla applicazione di metodi di modellazione dell'habitat Task 5.3.3.

Rilievi batimetrici dell'invaso

Per quantificare con precisione il volume di sedimento mobilizzato durante l'operazione di flushing, sono stati eseguiti due rilievi batimetrici completi dell'invaso di Roccasparvera, rispettivamente prima e dopo l'evento di svaso. Questi rilievi rappresentano un elemento fondamentale del dataset in quanto permettono di valutare direttamente l'efficacia dell'operazione in termini di recupero della capacità di invaso e di stimare la quantità complessiva di sedimento che è stata rimobilizzata e trasportata verso valle.

Il **rilievo batimetrico pre-flushing** è stato condotto a marzo 2025, in condizioni di invaso prossimo al livello massimo di regolazione. L'acquisizione è stata effettuata utilizzando un natante attrezzato con un Acoustic Doppler Current Proiler (River Surveyor M9, Sontek, San Diego CA, USA) che ha permesso di rilevare la profondità del fondale lungo transetti sistematici distribuiti su tutta l'estensione dell'invaso. La tecnologia single beam, basata sull'emissione di un singolo fascio acustico verticale, fornisce misure puntuali di profondità lungo la traiettoria del natante. Attraverso una griglia di navigazione opportunamente pianificata, con transetti sia longitudinali che trasversali rispetto all'asse principale del bacino, è stato possibile ricostruire la morfologia tridimensionale del fondale con un livello di dettaglio adeguato agli obiettivi del progetto. I dati acquisiti sono stati

georeferenziati utilizzando un sistema GNSS differenziale posizionato sul natante in asse con l'ADCP, garantendo un accurato posizionamento spaziale di ogni misura batimetrica.

Il rilievo batimetrico post-flushing è stato condotto a luglio 2025, dopo che il livello dell'invaso era stato ripristinato e le condizioni di sedimentazione si erano stabilizzate. Questo secondo rilievo è stato realizzato utilizzando due tecnologie complementari. Da un lato, è stata ripetuta l'acquisizione con natante attrezzato con ecoscandaglio single beam, seguendo una griglia di navigazione analoga a quella del rilievo pre-flushing per garantire la comparabilità dei dati. Dall'altro lato, è stata impiegata una tecnologia innovativa basata su un drone natante radiocomandato equipaggiato con sensore multibeam. Questa soluzione ha permesso di operare in condizioni di maggiore sicurezza, evitando la presenza di personale a bordo di natanti nelle zone più prossime allo sbarramento, e ha fornito una copertura più dettagliata grazie alla maggiore densità di dati garantita dalla tecnologia multibeam.

Il sensore multibeam montato sul drone natante opera emettendo contemporaneamente molteplici fasci acustici che coprono una fascia di fondale perpendicolare alla direzione di avanzamento del mezzo. Questa configurazione permette di acquisire una copertura areale completa del fondale in modo molto più efficiente rispetto alla tecnologia single beam, riducendo i tempi di rilievo e aumentando la densità spaziale delle misure. Il drone natante radiocomandato offre inoltre una maggiore manovrabilità nelle zone poco profonde o caratterizzate da ostacoli, permettendo di acquisire dati anche in aree difficilmente accessibili con natanti tradizionali. In entrambi i casi, zone emerse a rischio di alterazione durante le operazioni di svaso presenti sulle sponde del bacino sono state acquisite manualmente, con approccio randomico, utilizzando dati georeferenziati utilizzando un sistema GNSS.

La confronto tra i modelli digitali del fondale derivati dai rilievi pre e post-flushing ha permesso di calcolare le variazioni volumetriche dei sedimenti depositati nell'invaso, identificando le zone di maggiore erosione e quantificando il volume complessivo di materiale mobilizzato. L'integrazione

delle due tecnologie di acquisizione nel rilievo post-flushing ha inoltre fornito un elemento di validazione incrociata, permettendo di verificare la coerenza dei dati acquisiti con metodologie diverse e di stimare l'incertezza associata alle misure batimetriche.

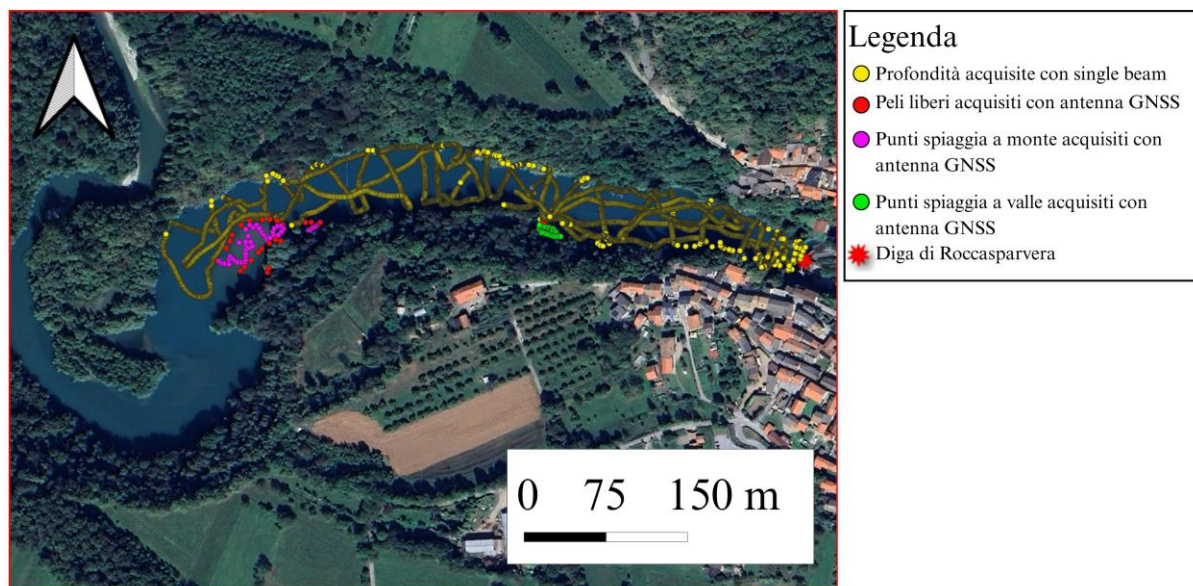


Figura 3. Punti acquisiti durante rilievo batimetrico pre-flushing nel bacino di invaso della diga di Roccasparvera a marzo 2025.

Rilievi aerofotogrammetrici con drone

Per caratterizzare la morfologia dei sottotratti fluviali a valle e monitorare le modificazioni indotte dalle operazioni di flushing sono state condotte campagne di rilievo aerofotogrammetrico utilizzando sistemi drone equipaggiati con diverse tecnologie di acquisizione. La strategia di rilevamento adottata ha integrato sia tecnologia ottica tradizionale sia tecnologia LiDAR, in funzione delle specifiche caratteristiche dei siti monitorati e degli obiettivi conoscitivi. I rilievi sono stati programmati in modo da documentare l'evoluzione morfologica del corso d'acqua attraverso acquisizioni ripetute nel tempo, permettendo di quantificare le trasformazioni indotte dalle operazioni di svasso.

Per la maggior parte dei tratti monitorati è stata utilizzata tecnologia drone ottica, impiegando un sistema DJI Mavic 3E equipaggiato con fotocamera

ad alta risoluzione. Questo drone, caratterizzato da elevata manovrabilità e autonomia di volo, ha permesso di acquisire fotogrammi con elevata sovrapposizione sia longitudinale che trasversale, necessaria per la successiva elaborazione fotogrammetrica. Le acquisizioni sono state pianificate seguendo piani di volo automatici che garantiscono una copertura sistematica dell'area di interesse e un'omogeneità nella distribuzione dei punti di presa fotografica. Il sistema di posizionamento RTK integrato nel drone ha assicurato un'elevata accuratezza nella georeferenziazione diretta delle immagini, riducendo la necessità di punti di controllo a terra e ottimizzando le operazioni di campo.

Per il sottotratto S1, immediatamente a valle della diga, la presenza di densa vegetazione riparia ha reso necessario l'impiego di una tecnologia alternativa. In questo sito, la copertura vegetale impedisce infatti alla tecnologia ottica tradizionale di acquisire correttamente la morfologia del suolo e della superficie dell'acqua, generando zone d'ombra nei modelli digitali del terreno che comprometterebbero l'accuratezza delle analisi morfologiche. Per superare questa limitazione è stata utilizzata tecnologia LiDAR, impiegando un sensore DJI Zenmuse L1 montato su piattaforma Matrice 300. Il LiDAR opera mediante l'emissione di impulsi laser che, a differenza della luce visibile utilizzata dalla fotocamera, sono in grado di penetrare parzialmente attraverso la copertura vegetale, raggiungendo il suolo sottostante. Grazie alla capacità del sistema di registrare molteplici ritorni per ogni impulso emesso, è possibile discriminare tra i ritorni provenienti dalla vegetazione e quelli provenienti dal terreno, permettendo di ricostruire la morfologia effettiva dell'alveo anche in presenza di ostacoli vegetali.

Le acquisizioni sono state condotte in tre periodi distinti per documentare l'evoluzione temporale della morfologia fluviale. La prima campagna è stata eseguita ad aprile 2025, prima dell'operazione di flushing, con l'obiettivo di caratterizzare le condizioni morfologiche iniziali dell'alveo e delle aree golenali. Questo rilievo costituisce la baseline di riferimento rispetto alla quale valutare i cambiamenti successivi e fornisce la configurazione morfologica pre-evento necessaria per la modellazione idraulica. La

seconda campagna è stata condotta immediatamente dopo il flushing, a maggio 2025, per documentare gli effetti immediati dell'operazione di svaso sulla morfologia fluviale. Questo rilievo ha permesso di identificare le zone soggette a erosione e quelle interessate da fenomeni di deposizione, quantificando l'entità delle trasformazioni morfologiche associate all'evento. La terza campagna è stata realizzata a luglio 2025 per valutare l'evoluzione morfologica del corso d'acqua nei mesi successivi all'evento, documentando i processi di riassetto naturale dell'alveo sotto l'azione delle portate ordinarie. Un riassunto delle varie campagne è riportato in Tabella 3.

L'elaborazione dei dati acquisiti ha prodotto due tipologie principali di output cartografici. Da un lato sono state generate ortofoto georeferenziate ad altissima risoluzione, tipicamente con dimensione del pixel di pochi centimetri, che forniscono una rappresentazione planimetrica dettagliata dell'alveo e delle aree golenali. Queste ortofoto costituiscono una documentazione visiva preziosa delle forme di sedimentazione ed erosione e permettono di effettuare interpretazioni qualitative dell'evoluzione morfologica attraverso il confronto visivo tra acquisizioni successive. Dall'altro lato sono stati elaborati modelli digitali tridimensionali del terreno con celle di dimensioni analoghe a quelle delle ortofoto, che permettono di quantificare con precisione le variazioni altimetriche e volumetriche associate alle trasformazioni morfologiche. Questi modelli 3D rappresentano la base fondamentale per le analisi morfometriche e per il calcolo dei bilanci sedimentari a scala di tratto. Un esempio in Figura 4.

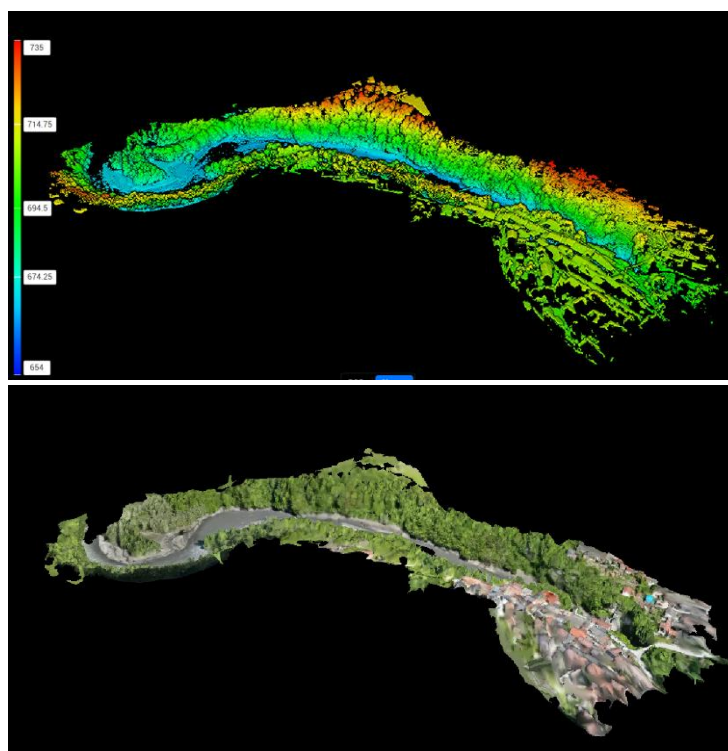


Figura 4. Esempio di output ottenuto da volo drone nel bacino della diga a maggio, subito dopo l'operazione di svaso. In alto il modello 3D e in basso l'ortofoto ad altissima risoluzione.

Per garantire l'accuratezza dei modelli digitali del terreno nelle zone dove è presente l'acqua, i rilievi aerofotogrammetrici sono stati integrati con acquisizioni batimetriche dirette. La morfologia del fondo alveo sommerso non può infatti essere rilevata in modo accurato né con tecnologia LIDAR né con tecnologia ottica quando la profondità dell'acqua supera poche decine di centimetri o quando la torbidità impedisce la penetrazione della radiazione elettromagnetica. Le acquisizioni LIDAR non permettono la ricostruzione del sommerso, mentre l'ottico restituisce valori di profondità alterati dai fenomeni di rifrazione. Per questo motivo sono state condotte misure batimetriche utilizzando due metodologie complementari. In primo luogo, sono stati eseguiti rilievi topografici delle sezioni bagnate utilizzando antenna GNSS in configurazione RTK, che permette di acquisire coordinate tridimensionali con accuratezza centimetrica. L'operatore, muovendosi lungo transetti trasversali all'alveo, ha acquisito punti georeferenziati sia nelle zone emerse sia, dove possibile, nelle zone di bagnasciuga e di bassa profondità. In secondo luogo, nelle zone dove la profondità dell'acqua non permetteva l'accesso a piedi e con profondità maggiori di 20cm, sono state condotte acquisizioni con natante equipaggiato con ADCP (Acoustic

Doppler Current Profiler), strumento che oltre a misurare il profilo di velocità della corrente fornisce anche informazioni sulla profondità del fondale attraverso la misura del tempo di ritorno del segnale acustico.

I dati batimetrici acquisiti con antenna GNSS e con ADCP sono stati utilizzati per effettuare la correzione batimetrica dei modelli digitali del terreno derivati dai rilievi con drone. Questa operazione consiste nell'integrare le informazioni altimetriche provenienti dalle diverse fonti di acquisizione, sostituendo nei modelli fotogrammetrici o LiDAR le informazioni relative alle superfici sommerse, che risultano imprecise o assenti, con le misure dirette del fondale acquisite strumentalmente. Il risultato è un modello digitale del terreno ibrido che rappresenta correttamente sia le zone emerse sia quelle sommerse, permettendo di condurre analisi morfologiche complete e di calcolare bilanci sedimentari accurati che includono anche le variazioni morfologiche del fondo alveo bagnato.

In ogni campagna di rilievo, è stata allo stesso tempo misurata la portata per legare la condizione idromorfologica rilevata ad una precisa condizione idraulica. La misura di portata è stata svolta utilizzando lo strumento ADCP quando le portate e le profondità ne consentivano l'uso. In condizioni di magra e basse profondità, è stato utilizzato un correntometro elettromagnetico OTT MF pro (OTT Hydromet, Germania).

La ripetizione dei rilievi nel tempo, integrati con le acquisizioni batimetriche, permette di costruire una cronologia dettagliata delle trasformazioni morfologiche dell'alveo, elemento essenziale per comprendere i tassi di evoluzione, per identificare i pattern di erosione e deposizione dominanti, e per validare i modelli predittivi sviluppati nel Task 5.3.2. La disponibilità di modelli digitali del terreno accurati e completi, che rappresentano correttamente sia le zone emerse sia quelle sommerse, costituisce inoltre una base cartografica aggiornata e affidabile per tutte le successive analisi idromorfologiche e per la valutazione degli habitat acquatici.

Tabella 3. Campagne di rilievo in campo per ciascun sottotratto fluviale e bacino di invaso.

Data	Sito	Tipologia di rilievo/prodotto
23/01/2025	S2	Ortofoto e modello 3D
24/01/2025	S3	Ortofoto e modello 3D
20/03/2025	Bacino invaso	Batimetria e modello 3D
01/04/2025	S1	Ortofoto e modello 3D/Nuvola di punti
30/05/2025	S2	Ortofoto
30/05/2025	S3	Ortofoto
08/05/25	Bacino invaso	Ortofoto e modello 3D/Nuvola dei punti
09/05/2025	S2	Ortofoto
09/05/2025	S3	Ortofoto
21/07/2025	S2	Ortofoto e modello 3D/Nuvola di Punti
22/07/2025	S3	Ortofoto e modello 3D/Nuvola di punti
23/07/2025	Bacino invaso	Batimetria e modello 3D

Operazioni di flushing monitorate

Le operazioni di fluitazione monitorate hanno rappresentato un evento significativo sia dal punto di vista operativo che scientifico. L'intervento è iniziato il 5 maggio 2025 alle ore 8:00 del mattino e si è concluso il 9 maggio 2025 alle ore 15:00, coprendo quindi un arco temporale di circa quattro giorni durante i quali il sistema di monitoraggio ha operato in continuo. Durante questo periodo, dagli scarichi di fondo della diga è stata rilasciata una portata d'acqua superiore a quella in ingresso nell'invaso, secondo una strategia pianificata che ha portato a uno svasso parziale del bacino. Il livello dell'invaso è progressivamente diminuito fino a raggiungere un minimo di 615,47 metri sul livello del mare, corrispondente a una riduzione di circa otto metri rispetto al livello di massimo invaso.

L'effetto idraulico di questa riduzione controllata del livello ha prodotto un'erosione progressiva dei sedimenti depositati nel bacino, concentrati principalmente nel tratto più a monte della diga dove la velocità della corrente in condizioni ordinarie è insufficiente a mantenere il materiale in sospensione. Con l'abbassamento del livello, le pendenze idrauliche sono aumentate e le velocità si sono incrementate, innescando processi di erosione che hanno mobilizzato i sedimenti accumulati. Questo materiale, una volta messo in sospensione, è stato trasportato verso lo sbarramento e quindi rilasciato a valle attraverso gli scarichi di fondo, generando un evento di torbidità controllato che si è propagato lungo l'asta del fiume Stura di Demonte.

Il sistema di monitoraggio continuo installato nei tre siti ha permesso di acquisire dati durante tutte le fasi dell'operazione, dalla fase iniziale di apertura degli scarichi fino alla fase finale di stabilizzazione. È stata documentata l'evoluzione temporale della concentrazione di sedimenti sospesi nelle tre sezioni monitorate, evidenziando come il picco di torbidità si sia propagato verso valle con un progressivo ritardo temporale e una graduale attenuazione dell'intensità massima. La propagazione dell'onda di torbidità lungo l'asta fluviale ha mostrato caratteristiche diverse nei tre siti, riflettendo l'influenza della distanza dalla sorgente, delle caratteristiche morfologiche locali e della presenza di opere idrauliche.

Le variazioni di livello e temperatura associate all'evento sono state registrate nei siti S2 e S3 con la frequenza di quindici minuti, permettendo di ricostruire in dettaglio la risposta idraulica del corso d'acqua all'incremento di portata. La risposta idromorfologica documentata attraverso i rilievi aerofotogrammetrici prima e dopo l'evento ha evidenziato pattern di erosione e deposizione che riflettono la complessa interazione tra il flusso d'acqua, il trasporto dei sedimenti e la morfologia preesistente dell'alveo.

Dataset acquisiti e struttura dei dati

Il dataset raccolto nel corso delle attività di monitoraggio si articola in diverse tipologie di dati, che coprono scale temporali differenti e rispondono

a obiettivi conoscitivi complementari. L'integrazione di queste diverse fonti di informazione permette di costruire un quadro completo dei processi in atto e di supportare sia l'analisi scientifica sia le applicazioni gestionali.

I dati in continuo costituiscono il nucleo centrale del dataset e comprendono le serie temporali di torbidità e concentrazione di solidi sospesi acquisite nei tre siti a partire da febbraio-marzo 2025. Queste misure vengono trasmesse in tempo reale e archiviate con continuità, generando serie temporali ad alta risoluzione che documentano non solo gli eventi di flushing ma anche le condizioni di fondo e la variabilità naturale del trasporto solido. A partire da aprile 2025, nei siti S2 e S3 vengono acquisiti anche il livello idrometrico e la temperatura dell'acqua con frequenza di quindici minuti, archiviati in memoria locale e scaricati periodicamente durante le visite di manutenzione programmate.

I dati derivanti dalle campagne di rilievo hanno una struttura diversa, essendo associati a eventi discreti piuttosto che a un monitoraggio continuo. I rilievi batimetrici condotti nell'invaso prima e dopo il flushing hanno prodotto modelli digitali del fondale che permettono di calcolare con precisione le variazioni volumetriche dei sedimenti mobilizzati. Il confronto tra i due rilievi fornisce una stima diretta dell'efficacia dell'operazione di svasso in termini di recupero della capacità di invaso e rappresenta un elemento di validazione fondamentale per i bilanci sedimentari complessivi. L'utilizzo integrato delle tecnologie single beam e multibeam nel rilievo post-flushing ha permesso di ottimizzare la copertura spaziale e di garantire un elevato livello di dettaglio nelle zone di maggiore interesse.

I rilievi aerofotogrammetrici condotti da gennaio a luglio 2025 nei tratti a valle della diga hanno prodotto modelli digitali del terreno e ortofoto georeferenziate che rappresentano lo stato morfologico dell'alveo in momenti specifici. Questi prodotti cartografici sono stati elaborati attraverso tecniche di fotogrammetria digitale e sono georeferenziate nel sistema di coordinate nazionale, permettendo analisi comparative multi-temporali e il calcolo di variazioni volumetriche. I campionamenti sedimentologici, attualmente in corso, forniranno informazioni sulla

granulometria dei sedimenti e sulla loro distribuzione spaziale, elementi essenziali per la calibrazione dei modelli di trasporto solido.

I dati contestuali comprendono tutte quelle informazioni necessarie per interpretare correttamente le misure dirette e per ricostruire le condizioni al contorno durante gli eventi monitorati. I dati idrometrici forniti dal gestore della diga includono i livelli di invaso registrati in continuo e le portate rilasciate attraverso i diversi organi di scarico, permettendo di ricostruire il bilancio idrologico dell'invaso e di quantificare con precisione i volumi d'acqua rilasciati durante il flushing. La documentazione fotografica raccolta durante i sopralluoghi fornisce una testimonianza visiva dell'evoluzione morfologica dei tratti monitorati e costituisce un complemento importante ai dati quantitativi.



Figura 5. Cambiamento morfologico del sottotratto S2 pre-svaso (a sinistra) e a subito al termine delle operazioni di svaso (a destra).

Stato di avanzamento e prospettive

L'analisi del sito è attualmente in corso e l'attività di monitoraggio proseguirà per un periodo complessivo di almeno un anno dall'avvenimento del

flushing di maggio 2025. Questa estensione temporale del monitoraggio risponde all'esigenza di comprendere non solo gli effetti immediati dell'operazione di svaso ma anche la risposta del sistema fluviale nel medio periodo, includendo i processi di riassetto morfologico naturale e di recupero delle condizioni ecologiche.

È importante precisare che l'operazione di flushing, originariamente programmata per il 2024, è stata posticipata al 2025 a seguito di ritardi e integrazioni nei processi autorizzativi, sui quali il progetto non ha avuto alcun ruolo né responsabilità. Questo slittamento temporale ha necessariamente comportato una rimodulazione del calendario delle attività di monitoraggio. Il fatto che il flushing sia avvenuto nel maggio 2025 richiede infatti l'acquisizione di dati almeno fino a maggio 2026 per poter disporre di un anno completo di osservazioni dalla data dell'operazione. In realtà, il periodo di monitoraggio si estenderà oltre questa data minima, al fine di acquisire una serie storica più lunga che permetterà di rafforzare i risultati ottenuti e di condurre un'analisi più robusta dei processi in atto.

Il periodo di osservazione programmato permetterà di valutare la persistenza degli effetti morfologici indotti dall'operazione di svaso, verificando se le modificazioni osservate immediatamente dopo l'evento tendano a stabilizzarsi o se invece l'alveo continui a evolvere sotto l'azione delle portate ordinarie e degli eventi di piena naturali. Questa informazione è cruciale per comprendere la resilienza del sistema fluviale e per valutare se siano necessarie misure di mitigazione aggiuntive. La documentazione dei processi di ripristino naturale dell'alveo fornirà elementi importanti per valutare la capacità di auto-recupero del corso d'acqua e i tempi caratteristici di questi processi.

L'analisi della risposta dell'ecosistema fluviale nel medio periodo richiede un monitoraggio prolungato che permetta di seguire l'evoluzione della qualità delle acque e delle condizioni degli habitat acquatici attraverso diverse stagioni. I dati idrologici e morfologici che continueranno ad essere raccolti costituiranno un elemento fondamentale per comprendere come il sistema fluviale reagisca nel tempo alle perturbazioni indotte dalle operazioni di

svaso e per identificare eventuali effetti ritardati o cumulativi che potrebbero manifestarsi solo a distanza di mesi dall'evento.

La calibrazione e validazione dei modelli previsionali sviluppati nel Task 5.3.2 beneficerà significativamente dell'estensione temporale del dataset. L'acquisizione di una serie storica più lunga permetterà infatti di testare le capacità predittive dei modelli su un arco temporale significativo e in condizioni idrologiche variabili, includendo non solo il periodo immediatamente successivo all'operazione di flushing ma anche fasi caratterizzate da portate ordinarie, eventi di piena naturali e variazioni stagionali del regime idrologico. Questa variabilità nelle condizioni al contorno costituisce un elemento essenziale per verificare la robustezza dei modelli e la loro capacità di rappresentare correttamente i processi fisici in diverse configurazioni idrauliche.

Le campagne future includeranno ulteriori rilievi aerofotogrammetrici stagionali, programmati in modo da documentare l'evoluzione morfologica attraverso le diverse fasi del ciclo idrologico annuale. La ripetizione dei rilievi permetterà di quantificare i tassi di evoluzione morfologica e di identificare eventuali pattern stagionali nei processi di erosione e deposizione. Sono inoltre previsti campionamenti sedimentologici per la caratterizzazione granulometrica dettagliata dei sedimenti presenti nell'alveo e nelle aree di deposizione, che forniranno i parametri necessari per i modelli di trasporto solido e permetteranno di valutare come la distribuzione granulometrica del materiale evolva nel tempo in risposta ai processi di sorting selettivo operati dalla corrente.

L'acquisizione in continuo di torbidità, livello e temperatura proseguirà senza interruzioni, arricchendo progressivamente il dataset e migliorando la base statistica per l'analisi dei processi. L'estensione del periodo di osservazione permetterà di caratterizzare meglio la variabilità naturale del trasporto solido e di distinguere con maggiore chiarezza gli effetti antropici legati alle operazioni di gestione dell'invaso dagli effetti legati alla variabilità naturale del regime idrologico. Inoltre, la disponibilità di serie temporali più lunghe consentirà di applicare tecniche statistiche più avanzate per l'analisi delle

tendenze e per l'identificazione di eventuali cambiamenti significativi nelle caratteristiche del corso d'acqua.

L'insieme delle attività di monitoraggio programmate per i prossimi mesi garantirà quindi la costruzione di un dataset completo e affidabile, che costituirà la base per lo sviluppo di linee guida operative supportate da evidenze scientifiche solide e replicabili in altri contesti alpini.

Conclusioni

Il dataset qui presentato rappresenta un contributo significativo alla conoscenza dei processi di trasporto solido e delle modificazioni idromorfologiche indotte dalle operazioni di flushing negli invasi alpini. La strategia di monitoraggio multi-sito, multi-parametro e multi-scala temporale adottata ha permesso di costruire una base conoscitiva solida e articolata, che integra misure in continuo ad alta frequenza con campagne di rilievo mirate e dati contestuali forniti dai gestori e dalle reti di monitoraggio esistenti.

L'approccio metodologico sviluppato permette di comprendere la dinamica del trasporto di sedimenti associati alle manovre di fluitazione a diverse distanze dalla sorgente, evidenziando come l'onda di torbidità generata dalle operazioni di flushing si propaghi e si attenui lungo l'asta fluviale. La valutazione degli effetti delle opere idrauliche sulla propagazione dei sedimenti fornisce elementi importanti per la gestione integrata del sistema, suggerendo come le infrastrutture presenti possano essere gestite in modo da minimizzare gli impatti negativi o, in alcuni casi, da sfruttare la loro presenza per controllare meglio la distribuzione dei sedimenti rilasciati. I dati di elevata qualità raccolti costituiscono una risorsa fondamentale per la modellazione idromorfologica, fornendo sia i parametri necessari per la calibrazione dei modelli sia le serie temporali indispensabili per la validazione delle simulazioni. L'accuratezza e la completezza del dataset permetteranno di testare diversi approcci modellistici e di identificare le configurazioni più adatte a rappresentare i processi osservati, migliorando così l'affidabilità delle previsioni e la capacità di progettare operazioni di flushing ottimizzate.

La definizione di linee guida operative replicabili in altri contesti alpini rappresenta uno degli obiettivi finali del Task 5.3 e richiede che l'esperienza maturata su questo caso studio sia generalizzabile. Il dataset raccolto, insieme alle analisi che verranno condotte, fornisce gli elementi per identificare i parametri chiave che controllano l'efficacia e la sostenibilità ambientale delle operazioni di flushing, permettendo di trasferire le conoscenze acquisite ad altri invasi con caratteristiche simili.

I dati raccolti saranno resi apertamente disponibili in formato standardizzato sia su repository pubblica sia sulla cartella di progetto ClimaxPo, contribuendo ad ampliare la rete nazionale di monitoraggio avanzato del trasporto solido.

Attualmente in Italia esistono solo poche stazioni di misura in continuo del trasporto solido sospeso con caratteristiche analoghe a quelle installate nel progetto LIFE CLIMAX PO. L'ampliamento di questa rete rappresenta un passo importante verso una gestione più consapevole e sostenibile delle risorse idriche, fornendo ai gestori e ai decisori politici strumenti conoscitivi più avanzati per affrontare le sfide poste dai cambiamenti climatici.

Il contributo alla gestione sostenibile delle risorse idriche nel contesto dell'adattamento ai cambiamenti climatici si manifesta attraverso diversi canali. I dati raccolti permettono di quantificare gli effetti delle operazioni di gestione degli invasi non solo in termini di disponibilità idrica ma anche di qualità ambientale dei corsi d'acqua a valle, supportando decisioni che bilancino le diverse esigenze in modo più efficace. Le metodologie sviluppate e i risultati ottenuti costituiranno un riferimento per la pianificazione di futuri interventi di gestione sedimentaria negli invasi alpini, contribuendo a definire protocolli operativi che massimizzino i benefici e minimizzino gli impatti negativi.