

WP3

Linee guida e kit di strumenti comuni per migliorare la gestione dei bacini idrografici

Zagotavljanje skupnih smernic in orodja za izboljšanje upravljanja porečij

Action: A3.2

Processo di upscaling

Proces prenosa na večji nivo

Deliverable: D3.2.1

Report sulle opzioni di intervento

Poročilo o možnostih posredovanja

Status: *Final*

Diffusion: *Public*

Date: *Giugno 2026 / Junij 2026*

Author(s): *UNIUD, ARFVG, RRC KOPER, UL*

Contributors: *UNIUD, ARFVG, RRC KOPER, UL*

L'obiettivo dell'Attività 3.2. del WP3 è definire, sulla base dei risultati ottenuti nel corso del progetto TORRENT, un insieme di pratiche comuni da scalare e generalizzare all'interno dei contesti idrografici italiani e sloveni. Tali azioni mirano a rispondere alle principali problematiche emerse nei contesti analizzati nel corso del progetto e a contribuire alla definizione di linee guida condivise per il monitoraggio, la valutazione dell'efficacia e l'individuazione delle priorità di manutenzione delle opere di Sistemazione Idraulico – Forestale (SIF).

A tal fine, verranno presi in esame i prodotti sviluppati nell'ambito del progetto, tra cui il database condiviso, i modelli digitali del terreno (DTM) multitemporali e l'indice MPi, supportati da strumenti operativi appositamente realizzati, come il plugin "Hydrogeomorphology Tools for QGIS".

The aim of Activity 3.2 of WP3 is to define, based on the results obtained during the TORRENT project, a set of common practices to be expanded and adopted more widely in Italian and Slovenian river basins. These actions aim to address the main issues that have emerged in the contexts analysed during the project and to contribute to the development of shared guidelines for the monitoring, effectiveness assessment and identification of maintenance priorities for Torrent Control Structures (TCS).

To this end, the outputs developed as part of the project will be examined, including the shared database, multi-temporal Digital Terrain Models (DTMs) and the MPi index, supported by specially developed operational tools such as the 'Hydrogeomorphology Tools for QGIS' plugin.

Cilj dejavnosti 3.2 v okviru delovnega paketa 3 (WP3) je na podlagi rezultatov, pridobljenih v okviru projekta TORRENT, opredeliti niz skupnih praks, ki jih je treba razširiti in širše uvesti v italijanskih in slovenskih porečjih. Ti ukrepi so namenjeni reševanju glavnih težav, ki so se pojavile v okvirih, analiziranih med projektom, ter prispevanju k razvoju skupnih smernic za spremljanje, ocenjevanje učinkovitosti in opredeljevanje prednostnih nalog vzdrževanja hidrotehničnih objektov (TCS).

V ta namen bodo preučeni rezultati, razviti v okviru projekta, vključno s skupno bazo podatkov, veččasovnimi digitalnimi modeli terena (DTM) in indeksom MPi, podprti s posebej razvitimi operativnimi orodji, kot je vtičnik »Hydrogeomorphology Tools for QGIS«.

QUADRO CONOSCITIVO E OPERATIVO DERIVANTE DAI PRODOTTI SVILUPPATI NEL CORSO DEL PROGETTO / KNOWLEDGE AND OPERATIONAL FRAMEWORK DERIVED FROM THE OUTPUTS DEVELOPED DURING THE PROJECT / ZNANJE IN OPERATIVNI OKVIR, IZHODIŠČA, KI IZHAJAJO IZ REZULTATOV, RAZVITIH V OKVIRU PROJEKTA

In questo capitolo verranno illustrati i principali prodotti sviluppati nel corso del progetto, già descritti nei precedenti deliverable, al fine di redigere un quadro conoscitivo, suddiviso nei seguenti ambiti e utile all'individuazione delle problematiche emerse e alla successiva individuazione di possibili opzioni strategiche scalabili al contesto transfrontaliero:

- Strumenti e metodologie per l'organizzazione, la condivisione e la gestione dei dati.
- Prodotti tecnici a supporto della valutazione delle criticità emerse nei bacini pilota.
- Strumenti operativi per l'elaborazione, l'aggiornamento e la replicabilità dell'analisi.

This chapter will outline the main outputs developed during the project – as previously described in earlier deliverables – with a view to providing an overview, divided into the following areas, which will assist in identifying the issues that have emerged and subsequently pinpointing possible strategic options that can be scaled to the cross-border context:

- Tools and methodologies for organising, sharing and managing data.
- Technical products and tools to support the assessment of critical issues identified in the pilot catchment areas.
- Operational tools for the development, updating and replicability of the analysis.

V tem poglavju bomo predstavili glavne rezultate, ki so bili razviti v okviru projekta – kot je bilo že opisano v prejšnjih poročilih, da bi zagotovili pregled, razdeljen na naslednja področja, ki bo pomagal pri prepoznavanju ugotovljenih težav in posledično pri opredelitvi možnih strateških možnosti, ki jih je mogoče prilagoditi čezmejnemu kontekstu:

- Orodja in metodologije za organizacijo, izmenjavo in upravljanje podatkov.
- Tehnični izdelki in orodja za podporo ocenjevanju kritičnih vprašanj, opredeljenih v pilotnih porečjih.
- Operativna orodja za razvoj, posodabljanje in ponovljivost analize.

1. Strumenti e metodologie per l'organizzazione, la condivisione e la gestione dei dati / Tools and methodologies for organising, sharing and managing data / Orodja in metodologije za organizacijo, izmenjavo in upravljanje podatkov

Gli strumenti e le metodologie operative adottate per organizzare, condividere e gestire in maniera interoperabile i dati geospaziali raccolti e prodotti nel corso del progetto sono i seguenti:

- a) Flusso di lavoro per la raccolta dei dati in campo, attraverso lo sviluppo di una scheda di campo utile alla raccolta delle informazioni relative alle opere di Sistemazione Idraulico-Forestale (SIF). Tale procedura ha permesso di uniformare le informazioni da raccogliere in campo in merito allo stato delle opere SIF, associando, oltre all'informazione relativa al tipo di struttura, punteggi standard inerenti allo stato strutturale e di funzionalità delle opere. Tali informazioni hanno successivamente consentito di individuare un indice di priorità di manutenzione delle opere. Maggiori dettagli sono riportati nel D2.2.2.
- b) Sistema di riferimento comune, utilizzabile sia per il territorio italiano sia per quello sloveno, individuato nell'ETRS 89 / UTM 33N (EPSG: 25833).
- c) Numerazione univoca e condivisa delle opere SIF, definita al fine di garantire l'identificazione omogenea delle opere SIF. Maggiori dettagli sono riportati nel D2.2.2.
- d) Server FTP strutturato con un'alberatura delle cartelle standard e condivisa, definita sulla base dei documenti e dei prodotti richiesti dal progetto e ulteriormente implementata in funzione delle esigenze emerse nel corso del progetto. Maggiori dettagli sono riportati nel D1.3.1.
- e) Convezioni adottate per i file e i documenti condivisi, tra cui:
 - Formati di scambio e condivisione dei file.
 - Nomenclatura dei file e delle cartelle relative al server FTP.
 - Gestione delle versioni dei file.
 - Riferimenti temporali dei file.

Maggiori dettagli sono riportati nel D1.3.1.

- f) Catalogo delle fonti documentarie e cartografiche consultate e rese disponibili ai partner, sviluppato al fine di catalogare in maniera univoca tutta la documentazione storica raccolta, mantenendo traccia della nomenclatura originale dei file e dei riferimenti o delle fonti da cui sono stati reperiti. Nel corso del progetto si è inoltre deciso di adottare tale catalogo anche per la documentazione prodotta e raccolta nel corso del progetto, e non esclusivamente per quella storica. Maggiori dettagli sono riportati nel D1.2.1.

The tools and operational methodologies adopted to organise, share and manage, in an interoperable manner, the geospatial data collected and produced during the project are as follows:

- a) Workflow for data collection in the field, through the development of a field form designed to gather information relating to Torrent Control Structures (TCS). This

procedure has made it possible to standardise the information to be collected in the field regarding the condition of TCS, linking – in addition to details of the type of structure – standard scores relating to the structural condition and functionality of the works. This information subsequently enabled the identification of a maintenance priority index for the works. Further details are set out in D2.2.2.

- b) A common reference system, applicable to both Italian and Slovenian territory, identified as ETRS 89 / UTM 33N (EPSG: 25833).
- c) A unique and shared numbering system for SIF works, established to ensure consistent identification of TCS. Further details are set out in D2.2.2.
- d) An FTP server structured with a standard, shared folder hierarchy, defined based on the documents and products required by the project and further implemented in line with the needs that arose during the project. Further details are set out in D1.3.1.
- e) Conventions adopted for shared files and documents, including:
 - File exchange and sharing formats.
 - Naming conventions for files and folders on the FTP server.
 - File versioning.
 - File timestamps.

Further details can be found in D1.3.1.

- f) A catalogue of the documentary and cartographic sources consulted and made available to partners, developed to systematically catalogue all the historical documentation collected, whilst retaining the original file names and the references or sources from which they were obtained. During the project, it was also decided to use this catalogue for the documentation produced and collected during the project itself, and not exclusively for the historical material. Further details are set out in D1.2.1.

Orodja in operative metodologije, sprejete za interoperabilno organizacijo, izmenjavo in upravljanje geoprostorskih podatkov, zbranih in ustvarjenih v okviru projekta, so naslednje:

- a) Delovni tok za zbiranje podatkov na terenu prek razvoja terenskega obrazca, namenjenega zbiranju informacij v zvezi s hidrotehničnimi objekti. Ta postopek je omogočil standardizacijo informacij, ki jih je treba zbrati na terenu glede stanja hidrotehničnih objektov, pri čemer so bile, poleg podrobnosti o vrsti objekta, povezane standardne ocene, ki se nanašajo na strukturno stanje in funkcionalnost objektov. Te informacije so nato omogočile določitev indeksa prioritete vzdrževanja za te objekte. Nadaljnje podrobnosti so navedene v D2.2.2.
- b) Skupni koordinatni sistem, ki se uporablja tako na italijanskem kot na slovenskem ozemlju, označen kot ETRS 89 / UTM 33N (EPSG: 25833).
- c) Enoten in skupni sistem oštevilčevanja objektov SIF, vzpostavljen za zagotovitev dosledne identifikacije hidrotehničnih objektov. Podrobnosti so navedene v D2.2.2.
- d) FTP-strežnik, strukturiran s standardno, skupno hierarhijo map, opredeljeno na podlagi dokumentov in izdelkov, ki jih zahteva projekt, ter nadalje izvedeno v skladu s potrebami, ki so se pojavile med projektom. Podrobnosti so navedene v D1.3.1.

- e) Dogovori sprejeti za skupne datoteke in dokumente, vključno z:
 - a. Formati za izmenjavo in souporabo datotek.
 - b. Dogovori za poimenovanja datotek in map na FTP-strežniku.
 - c. Različice datotek.
 - d. Časovni žigi datotek.
- f) Nadaljnje podrobnosti so na voljo v D1.3.1.
- g) Katalog dokumentarnih in kartografskih virov, ki so bili pregledani in dani na voljo partnerjem, je bil razvit z namenom sistematičnega zbiranja vse pridobljene zgodovinske dokumentacije, ob ohranitvi izvirnih imen datotek ter sklicev ali virov, iz katerih so bile pridobljene. Med projektom je bilo tudi ugotovljeno, da se ta katalog uporabi za dokumentacijo, ki je bila pripravljena in zbrana med samim projektom, in ne izključno za zgodovinsko gradivo. Nadaljnje podrobnosti so navedene v D1.2.1.

2. Prodotti tecnici a supporto della valutazione dei bacini pilota e della funzionalità delle opere di Sistemazione Idraulico – Forestale (SIF) / Technical products to support the assessment of pilot catchments and the functionality of Torrent Control Structures (TCS) / Tehnični izdelki za podpora pri ocenjevanju pilotnih porečjih in delovanja hidrotehničnih objektov

I prodotti raccolti e acquisiti nel corso del progetto per la valutazione dei bacini pilota e della funzionalità delle opere SIF sono i seguenti:

- a) Dati di remote sensing storici e Modelli Digitali del Terreno (DTM), raccolti e acquisiti nel corso del progetto, mediante rilievi in campo. Tra i dati di remote sensing storici, sono stati raccolti i DTM, il grafo relativo all'idrografia, le ortofoto e la cartografia storica. Maggiori dettagli sono riportati nei Deliverable 1.2.4 e 2.3.2.
- b) Differenze di Modelli Digitali del Terreno (DoD), utili ad evidenziare i processi geo-idrologici in atto in relazione alle opere SIF presenti e a fornire un quadro conoscitivo che possa supportare le scelte future di gestione dei territori analizzati. Maggiori dettagli sono riportati nel D2.4.1.
- c) Indice di Priorità di Manutenzione (MPI), il quale è risultato utile per individuare le opere alle quali bisogna porre maggiore attenzione in termini di manutenzione. Maggiori dettagli sono riportati nel D2.4.2.
- d) Database storico delle opere SIF che è risultato fondamentale come base di partenza per la realizzazione del database aggiornato, implementato grazie ai rilievi effettuati in campo e alle informazioni recepite nel corso del progetto. Maggiori dettagli sono riportati nei Deliverable 1.2.2 e 2.3.1.

The data collected and analysed during the project to assess the pilot catchment areas and the functionality of the TCS are as follows:

- a) Historical remote sensing data and Digital Terrain Models (DTMs), collected and acquired during the project through field surveys. The historical remote sensing data

collected included DTMs, hydrographic maps, orthophotos and historical maps. Further details are provided in Deliverables 1.2.4 and 2.3.2.

- b) Digital Terrain Models Differences (DoD), which are useful for highlighting the geo-hydrological processes taking place in relation to existing TCS and for providing a knowledge base to support future management decisions regarding the areas analysed. Further details are set out in D2.4.1.
- c) Maintenance Priority Index (MPi), which has proved useful in identifying the structures requiring the greatest attention in terms of maintenance. Further details are set out in D2.4.2.
- d) The historical database of TCS proved to be essential as a starting point for the creation of the updated database, which was implemented based on field surveys and information gathered during the project. Further details are set out in Deliverables 1.2.2 and 2.3.1.

Podatki, zbrani in analizirani v okviru projekta za oceno pilotnih porečjih in delovanja sistema hidrotehničnih objektov, so naslednji:

- a) Zgodovinski podatki daljinskega zaznavanja in digitalni modeli terena (DTM), zbrani in pridobljeni v okviru projekta s terenskimi raziskavami. Zbrani zgodovinski podatki daljinskega zaznavanja so vključevali DTM, hidrografske karte, ortofoto posnetke in zgodovinske karte. Nadaljnje podrobnosti so navedene v poročilih 1.2.4 in 2.3.2.
- b) Razlike v digitalnih modelih terena (DoD), ki so koristne za analiziranje geo-hidroloških procesov, ki potekajo v povezavi z obstoječimi sistemi hidrotehničnih objektov, ter za zagotavljanje baze znanja v podporo prihodnjim upravljavskim odločitvam glede analiziranih območij. Nadaljnje podrobnosti so navedene v poročilu D2.4.1.
- c) Indeks prioritete vzdrževanja (MPi), ki se je izkazal za koristnega pri prepoznavanju objektov, ki zahtevajo največjo pozornost z vidika vzdrževanja. Nadaljnje podrobnosti so navedene v D2.4.2.
- d) Zgodovinska baza podatkov o hidrotehničnih objektih se je izkazala za bistveno izhodišče za oblikovanje posodobljene baze podatkov, ki je bila vzpostavljena na podlagi terenskih raziskav in informacij, zbranih med projektom. Nadaljnje podrobnosti so navedene v končnih izdelkih 1.2.2 in 2.3.1.

3. Strumenti operativi per l'elaborazione, l'aggiornamento e la replicabilità delle analisi / Operational tools for the development, updating and replicability of analyses / Operativna orodja za razvoj, posodabljanje in ponovljivost analiz

Gli strumenti operativi per l'elaborazione, l'aggiornamento e la replicabilità delle analisi sono i seguenti:

- a) Procedura metodologica per il post-processing dei dati acquisiti in campo, nel corso del progetto, descritta in dettaglio nel D2.3.2.

- b) Plugin "HydroGeomorphology Tools for QGIS", sviluppato appositamente per gli utenti coinvolti nella pianificazione idrologica e nella gestione dei bacini idrografici, descritto in dettaglio nel D3.3.1.

The operational tools for the development, updating and replicability of the analyses are as follows:

- a) Methodological procedure for the post-processing of data collected in the field during the project, described in detail in D2.3.2.
- b) The "HydroGeomorphology Tools for QGIS" plugin, developed specifically for users involved in hydrological planning and river basin management, is described in detail in D3.3.1.

Operativna orodja za razvoj, posodabljanje in ponovljivost analiz so naslednja:

- a) Metodološki postopek za naknadno obdelavo podatkov, zbranih na terenu med izvajanjem projekta, ki je podrobno opisan v D2.3.2.
- b) Vtičnik »HydroGeomorphology Tools for QGIS«, razvit posebej za uporabnike, ki se ukvarjajo s hidrološkim načrtovanjem in upravljanjem porečij, je podrobno opisan v D3.3.1.

OPZIONI STRATEGICHE SCALABILI AL CONTESTO TRANSFRONTALIERO / STRATEGIC OPTIONS ADAPTABLE TO THE CROSS-BORDER CONTEXT / STRATEŠKE MOŽNOSTI, PRILAGODLJIVE ČEZMEJNEMU KONTEKSTU

I prodotti, gli strumenti e le metodologie applicate nei bacini pilota sono stati scalati e generalizzati all'intero contesto dei bacini idrografici italiani e sloveni, prendendo in esame altre aree di studio e scale spaziali più estese.

The products, tools, and methodologies applied in the pilot watersheds were scaled up and generalised to the entire context of Italian and Slovenian basins, considering other study areas and broader spatial scales.

Proizvodi, orodja in metodologije, ki so se uporabljali v pilotnih porečjih, so bili razširjeni in posplošeni na celotno območje italijanskih in slovenskih porečij, pri čemer so bila upoštevana tudi druga raziskovalna območja in širše prostorske ravni.

1. Applicazione del kit di strumenti TORRENT ad altri bacini / Application of the TORRENT toolkit to other basins / Uporaba orodja TORRENT v drugih porečjih

Il kit di strumenti messi a punto con il progetto TORRENT nelle aree pilota è stato validato ed applicato anche in altri bacini idrografici, come quello del torrente Miozza sito nel Comune di Ovaro (UD), del torrente Cella-Vuom a Tarvisio (UD), del torrente Turriea a Paularo (UD), del torrente Ortegla a Treppo Carnico (UD), del torrente Resartico a Resiutta (UD), del torrente Pesarina a Prato Carnico (UD), del torrente Orvenco ad Artegna (UD), del torrente Vegliato a Gemona (UD) e del rio Calda a Forni di Sopra (UD). Inoltre, per alcuni di questi bacini sono stati realizzati certi strati informativi, ad esempio:

- un database di immagini storiche delle opere SIF (Fig. 1);
- un database storico della localizzazione delle opere SIF (Fig. 2)
- un database storico dei progetti delle opere SIF (Fig. 3)
- un database storico dei dati di remote sensing (GNSS, DTM, ortofoto; Fig. 4);
- un database aggiornato delle opere SIF (Fig. 5);
- alcuni nuovi rilievi topografici ad alta risoluzione (Fig. 6);
- le differenze di DTM (DoD) per monitorare la dinamica del sedimento (Fig. 7);
- Maintenance Priority Index (MPI) alle opere SIF (Fig. 8).

The toolkit developed as part of the TORRENT project in the pilot areas has been validated and applied in other watersheds as well, such as that of the Miozza Stream in the municipality of Ovaro (UD), the Cella-Vuom Stream in Tarvisio (UD), the Turriea Stream in Paularo (UD), the Ortegla stream in Treppo Carnico (UD), the Resartico stream in Resiutta (UD), the Pesarina stream in Prato Carnico (UD), the Orvenco stream in Artegna (UD), the Vegliato stream in Gemona (UD), and the Calda stream in Forni di Sopra (UD). In addition, informational layers have been created for some of these basins, for example:

- a database of historical images of TCS structures (Fig. 1);
- a historical database of the locations of TCS structures (Fig. 2)
- a historical database of TCS project designs (Fig. 3)
- a historical database of remote sensing data (GNSS, DTM, orthophotos; Fig. 4);
- an updated database of TCS structures (Fig. 5);
- several new high-resolution topographic surveys (Fig. 6);
- Digital Elevation Model (DEM) differences (DoD) to monitor sediment dynamics (Fig. 7);
- Maintenance Priority Index (MPI) for TCS structures (Fig. 8).

Orodje, razvito v okviru projekta TORRENT na pilotnih območjih, je bilo preverjeno in uporabljeno tudi v drugih porečjih, kot so porečje potoka Miozza v občini Ovaro (UD), potoka Cella-Vuom v Tarvisiju (UD), potoka Turriea v Paularu (UD), potoka Ortegla v Treppo Carnico (UD), potoka Resartico v Resiutti (UD), potoka Pesarina v Prato Carnico (UD), potoka Orvenco v Artegna (UD), potoka Vegliato v Gemoni (UD) in potoka Calda v Forni di Sopra (UD). Poleg tega so bili za nekatera od teh povodij pripravljene informativni panoji, na primer:

- baza podatkov zgodovinskih posnetkov hudourniških objektov (Slika 1);
- zgodovinska baza podatkov o lokacijah hudourniških objektov (Slika 2)
- zgodovinska baza podatkov o projektni dokumentaciji hudourniških objektov (Slika 3)
- zgodovinska baza podatkov o podatkih daljinskega zaznavanja (GNSS, DTM, ortofotografije; Slika 4);
- posodobljena baza podatkov o hudourniških objektih (Slika 5);
- več novih topografskih meritev z visoko ločljivostjo (Slika 6);
- razlike v digitalnem modelu višine (DEM) za spremljanje dinamike transporta sedimentov (Slika 7);
- Indeks prioritete vzdrževanja (MPI) za hudourniške objekte (Slika 8).



Figura 1: Esempio di database di immagini storiche (prima del 1977, 1977, 2022) delle opere SIF nel bacino del torrente Miozza. *Example of a database of historical images (before 1977, 1977, 2022) of TCS in the Miozza watershed. Primer zbirke zgodovinskih posnetkov (pred letom 1977, 1977, 2022) hudourniškega objekta v porečju Miozza.*

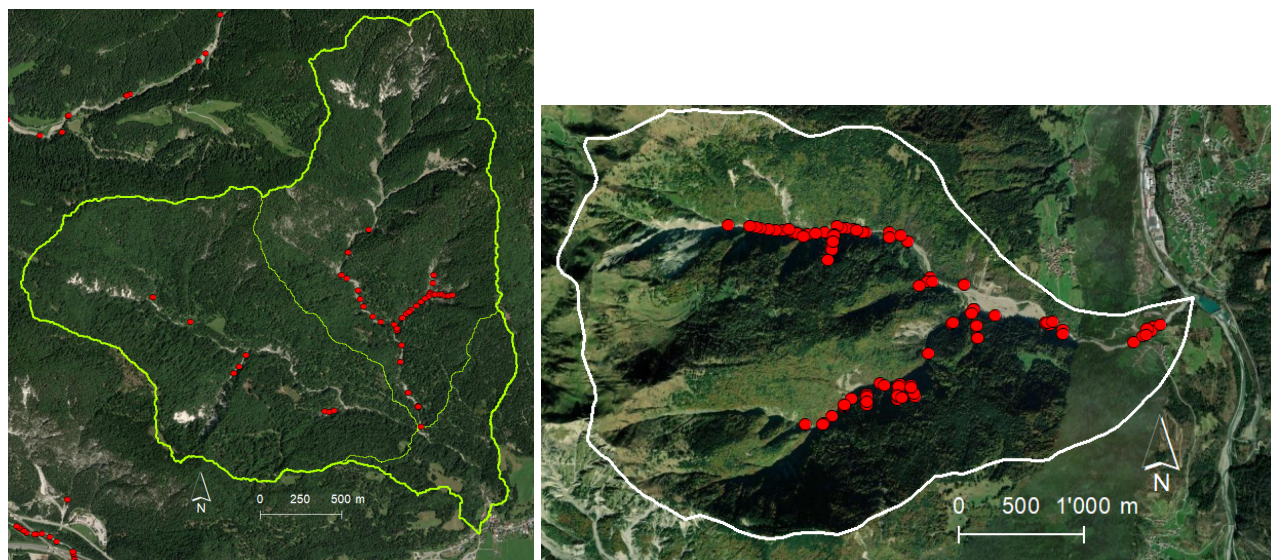


Figura 2: Esempi di database storiche delle opere SIF del torrente Cella-Vuom e del torrente Miozza ricavato dal Geodatabase della Regione Friuli-Venezia Giulia. I cerchi rossi indicano la posizione delle opere SIF all'interno del bacino. *Examples of historical databases of TCS on the Cella-Vuom and Miozza torrents, drawn from the Friuli-Venezia Giulia Region's Geodatabase. The red circles indicate the locations of the structures within the watershed. Primeri zgodovinskih*

podatkovnih baz o hudourniških objektih na potokih Cella-Vuom in Miozza, pridobljenih iz geodoteke dežele Furlanija-Juljska. Rdeči krogi označujejo lokacije objektov znotraj porečja.

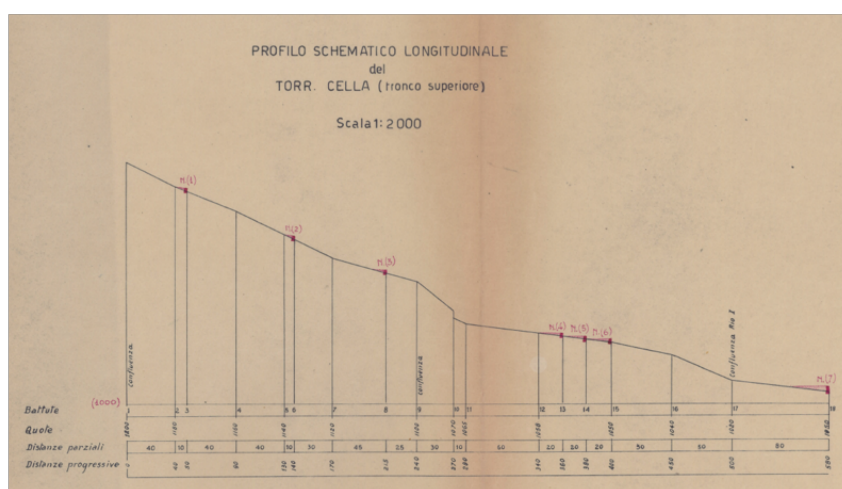
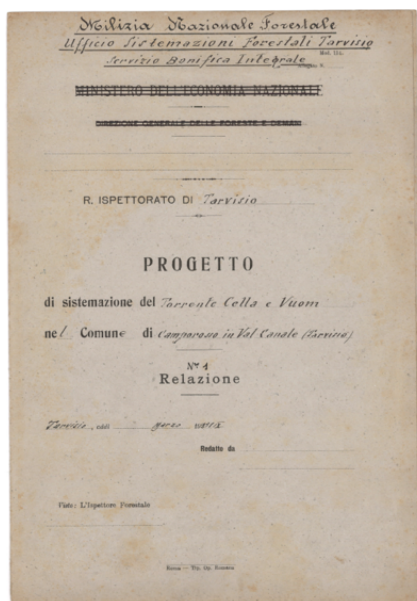


Figura 3: Esempio di progetti storici delle opere SIF del torrente Cella-Vuom del 1923, ricavato dagli archivi della Regione Friuli-Venezia Giulia. *An example of historical plans for the TCS on the Cella-Vuom torrent from 1923, taken from the archives of the Friuli-Venezia Giulia Region.* Primer zgodovinskih načrtov za hudourniške objekte na potoku Cella-Vuom iz leta 1923, povzeto iz arhivov dežele Furlanija-Juljska.

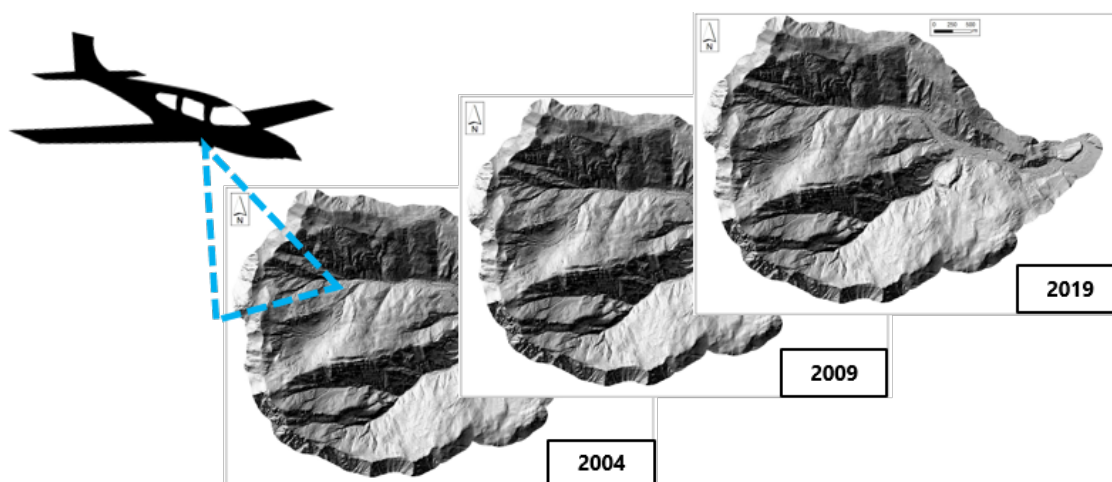


Figura 4: Esempio di database storico dei Modelli Digitali del Terreno (DTM) per il bacino del torrente Miozza. *Example of a historical database of Digital Terrain Models (DTMs) for the Miozza watershed.* Primer zgodovinske zbirke podatkov digitalnih modelov terena (DTM) za porečje Miozza.

T. Vuom



T. Cella



- 39 Briglie
- 8 Soglie
- 2 Opere spondali

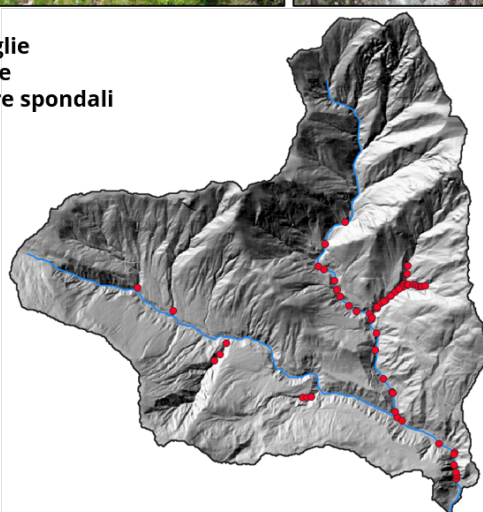


Figura 5: Esempio di database aggiornato delle opere SIF del torrente Cella-Vuom nel 2024. I cerchi rossi indicano la posizione delle opere SIF all'interno del bacino. *Example of an updated database of structures on the Cella-Vuom torrent in 2024. The red circles indicate the locations of the TCS within the watershed. Primer posodobljene baze podatkov o objektih na potoku Cella-Vuom v letu 2024. Rdeči krogi označujejo lokacije hudourniških objektov znotraj porečja.*

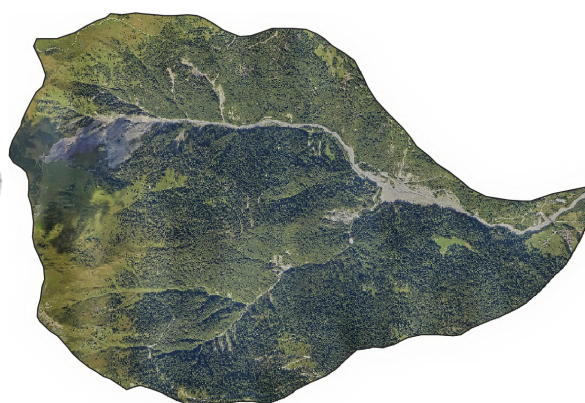


Figura 6: Esempio di nuovo rilievo topografico LiDAR ed ortofoto da aereo effettuati nel 2024 nel bacino del torrente Miozza. *Example of a new LiDAR topographic survey and aerial orthophotos conducted in 2024 in the Miozza watershed. Primer nove topografske meritve z LiDAR-jem in ortofotografij, izvedenih leta 2024 v porečju Miozza.*

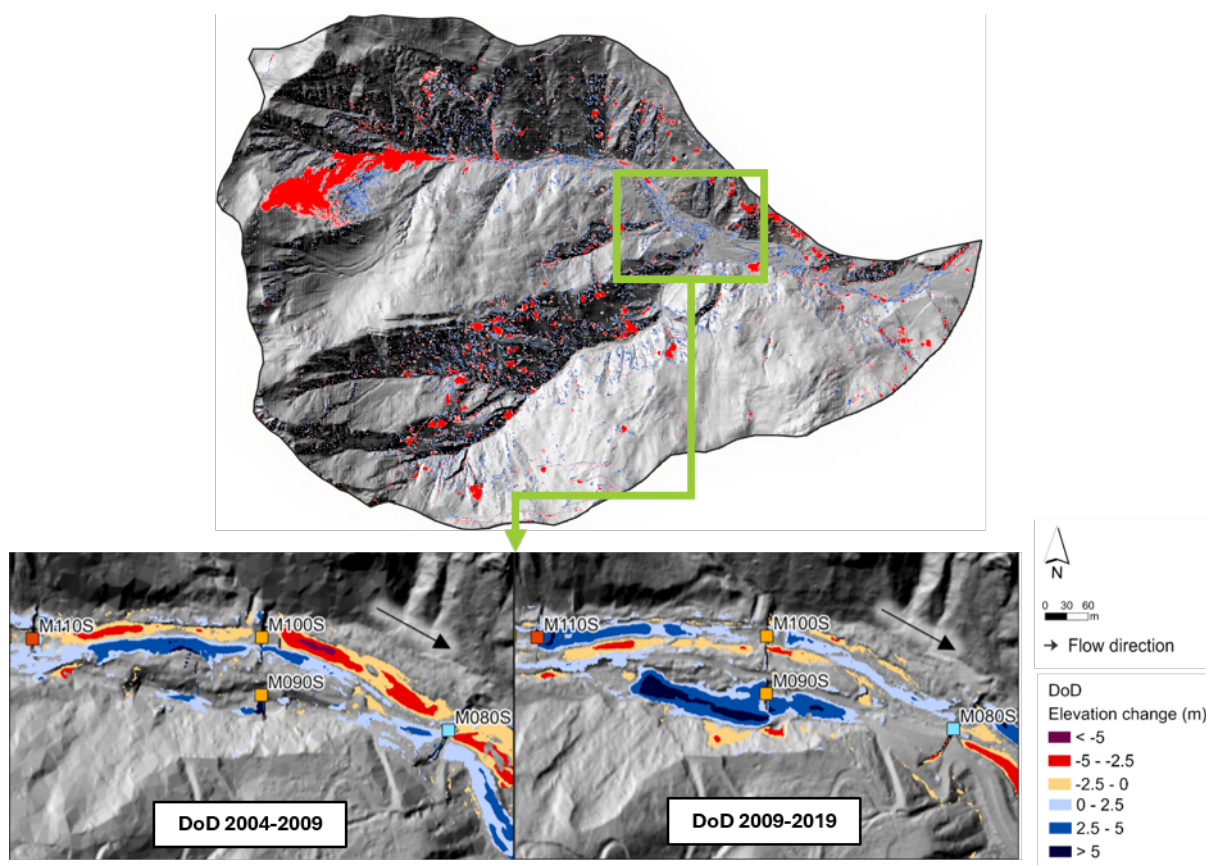


Figura 7: Esempi di Differenze di DTM (DoD) per monitorare la dinamica del sedimento nel bacino del torrente Miozza.
Examples of DTM Differences (DoD) for monitoring sediment dynamics in the Miozza basin. Primeri razlik v digitalnem modelu terena (DTM) (DoD) za spremljanje dinamike transporta sedimentov v porečju Miozza.

MPI = Indice di Priorità di Manutenzione

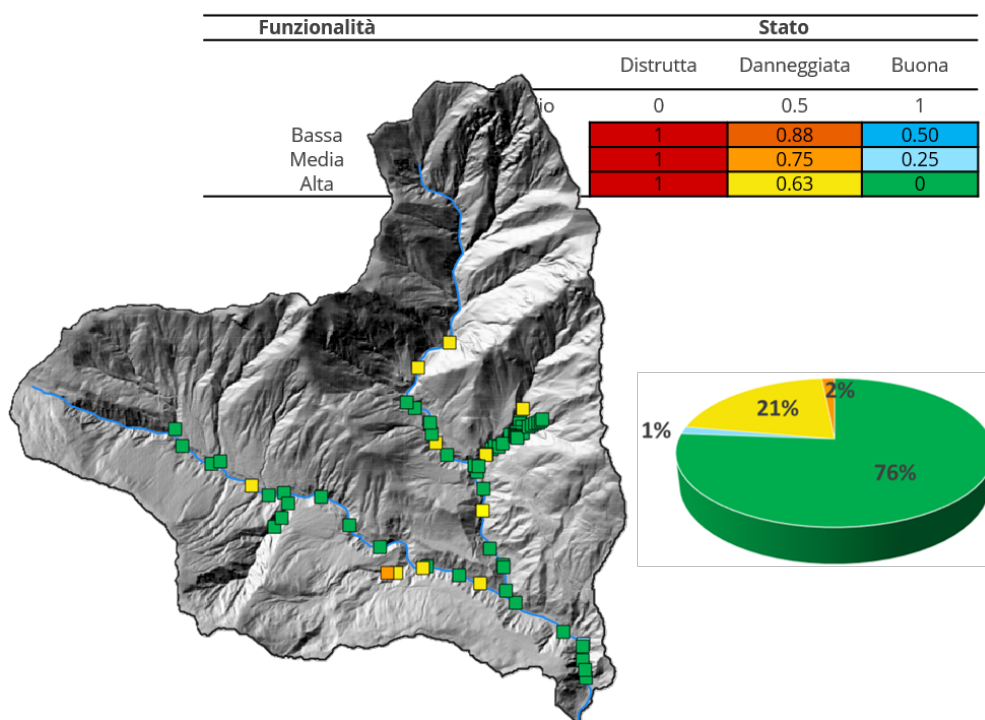


Figura 8: Esempio di applicazione del Maintenance Priority Index (MPI) per le opere SIF dei torrenti Cella-Vuom. *Example of the application of the Maintenance Priority Index (MPI) for structures on the Cella and Vuom torrents. Primer uporabe indeksa prioritete vzdrževanja (MPI) za objekte na potokih Cella in Vuom.*

Questi ultimi risultati sono stati rapportati ed analizzati con i bacini pilota (Fig. 9) al fine di identificare le criticità dell'approccio metodologico utilizzato e le priorità di manutenzione, in un'ottica di pianificazione degli interventi sulle opere SIF.

These latest results were compared and analyzed with the pilot basins (Fig. 9) to identify the critical issues in the methodological approach used and the maintenance priorities, with a view to planning interventions on structures.

Te najnovejše rezultate smo primerjali in analizirali v primerjavi s pilotnimi porečji (Slika 9), da bi ugotovili ključne težave v uporabljenem metodološkem pristopu ter prednostne naloge pri vzdrževanju, s ciljem načrtovanja ukrepov na objektih.

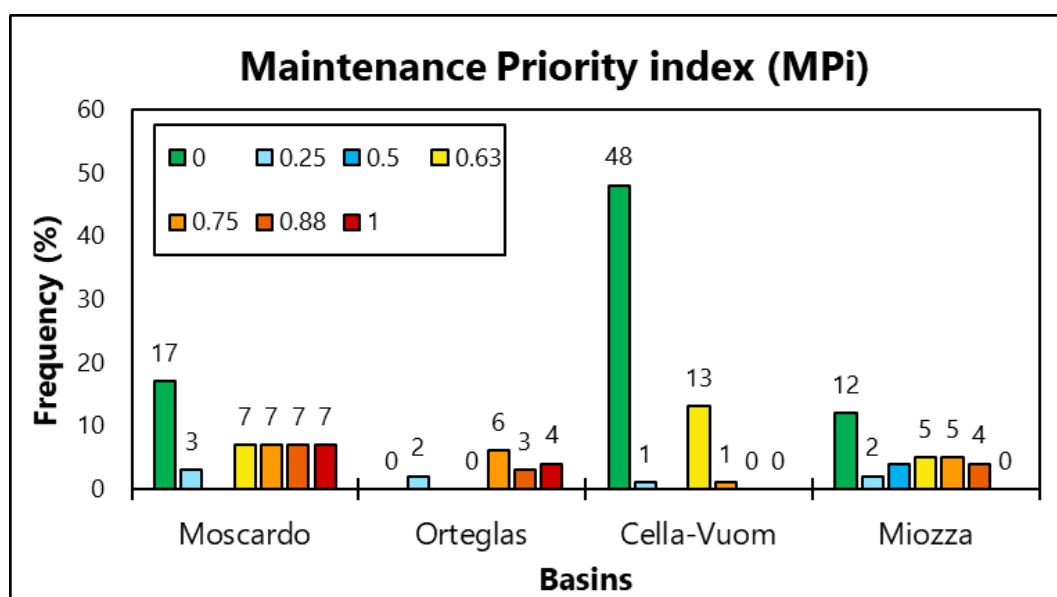


Figura 9: Confronto tra valori di MPi nei bacini pilota e negli altri bacini analizzati. *Comparison of MPi values in the pilot basins and the other catchments analyzed.* Primerjava vrednosti MPi v pilotnih prečjih in drugih analiziranih porečjih.

2. Applicazione del kit di strumenti TORRENT a scala estesa / Application of the TORRENT toolkit to large scale / Uporaba orodja TORRENT v večjem obsegu

Il processo di “upscaling” del toolkit TORRENT ha reso necessario adottare delle diverse strategie di analisi e processamento dei dati perché un rilievo dettagliato di tutte le opere SIF presenti in bacini idrografici con estensione spaziale elevata (es. centinaia di km²) richiede molti anni di lavoro e risorse. Per questo motivo si è deciso di partire dagli strumenti sviluppati con il progetto TORRENT per costruire un ulteriore indicatore capace di fornire un semplice screening a grande scala della potenziale fragilità delle opere SIF, sfruttando informazioni storiche e geospaziali già disponibili, da validare poi con i dati più dettagliati ed aggiornati di campo seguendo il workflow TORRENT.

Partendo dalla metodologia sviluppata da **Marchi et al. (2022)** e modificando alcuni aspetti per adattare il flusso di lavoro ai dati storici disponibili di TORRENT, è stata realizzata la pubblicazione di **Chiarel et al. (2026)**, nella quale è stato presentato l'Indice di Potenziale Fragilità (PFI) delle opere SIF.

L'PFI valuta in maniera molto semplificata e ad ampia scala la fragilità strutturale delle opere SIF, considerando cinque fattori (F_n) che possono influenzare la fragilità di un intervento, ciascuno suddiviso in tre classi di fragilità su scala da 1 (bassa) a 3 (alta):

- Fattori intrinseci: anno di costruzione, altezza, e materiale costruttivo della struttura; queste informazioni possono essere ricavate dai database storici descritti nel Deliverable 1.2.2.
- Fattori estrinseci: litologia del substrato (ricavate ad esempio da una carta geo-litologica 1:150.000) sul quale è stata costruita la struttura e posizione dell'opera lungo il reticolo

idrografico classificato secondo il processo geo-idrologico prevalente (es. innesco, propagazione, decelerazione, e deposito di una colata detritica), che può essere derivato da un Modello Digitale del Terreno (DTM) a larga scala tramite il tool sviluppato da Cavalli et al. (2017).

The process of “upscaling” the TORRENT toolkit made it necessary to adopt different strategies for data analysis and processing, because a detailed survey of all TCS located in watersheds covering a large spatial area (e.g., hundreds of km²) requires many years of work and resources. For this reason, it was decided to build upon the tools developed through the TORRENT project to create an additional index capable of providing a simple, large-scale screening of the potential vulnerability of structures, leveraging already available historical and geospatial information, which would then be validated with more detailed and up-to-date field data following the TORRENT workflow.

Building on the methodology developed by **Marchi et al. (2022)** and modifying certain aspects to adapt the workflow to the available historical data from TORRENT, the publication by **Chiarel et al. (2026)** was produced, in which the Potential Fragility Index (PFI) for structures was presented.

The PFI assesses the structural fragility of TCS in a highly simplified and large-scale manner, considering five factors (F_n) that can influence the fragility of a project, each divided into three fragility classes on a scale from 1 (low) to 3 (high):

- Intrinsic factors: year of construction, height, and construction material of the structure; this information can be obtained from the historical databases described in Deliverable 1.2.2.
- Extrinsic factors: lithology of the substrate (derived, for example, from a 1:150,000 geolithological map) on which the structure was built and the structure's location along the hydrographic network classified according to the prevailing hydrogeological process (e.g., triggering, propagation, deceleration, and deposition of a debris flow), which can be derived from a large-scale Digital Elevation Model (DEM) using the tool developed by Cavalli et al. (2017).

Zaradi procesa »širitve obsega« orodja TORRENT je bilo treba sprejeti drugačne strategije za analizo in obdelavo podatkov, saj podrobna raziskava vseh hudourniških objektov v porečjih, ki pokrivajo veliko prostorsko območje (npr. več sto km²), zahteva več let dela in virov. Zato je bilo sklenjeno, da se na podlagi orodij, razvitih v okviru projekta TORRENT, ustvari dodatni indeks, ki omogoča preprosto in obsežno oceno potencialne ranljivosti objektov z izkoriščanjem že razpoložljivih zgodovinskih in geoprostorskih podatkov, ki bi se nato validirali z natančnejšimi in najnovejšimi terenskimi podatki v skladu z delovnim tokom projekta TORRENT.

Na podlagi metodologije, ki so jo razvili **Marchi et al. (2022)**, in s prilagoditvijo nekaterih vidikov, da bi delovni tok uskladili z razpoložljivimi zgodovinskimi podatki iz projekta TORRENT, je nastala publikacija **Chiarel et al. (2026)**, v kateri je bil predstavljen indeks potencialne krhkosti (PFI) za objekte.

PFI ocenjuje strukturno krhkost hudourniških objektov na zelo poenostavljen in obsežen način, pri čemer upošteva pet dejavnikov (F_n), ki lahko vplivajo na krhkost posameznega objekta, od katerih je vsak razdeljen v tri razrede krhkosti na lestvici od 1 (nizka) do 3 (visoka):

- Notranji dejavniki: leto izgradnje, višina in gradbeni material objekta; te informacije je mogoče pridobiti iz zgodovinskih podatkovnih baz, opisanih v poročilu D1.2.2.
- Zunanji dejavniki: litologija podlage (izpeljana na primer iz litolške karte v merilu 1:150.000), na katerem je bil objekt zgrajen, ter lokacija objekta vzdolž hidrografskega omrežja, razvrščena glede na prevladujoči hidrogeološki proces (npr. sprožitev, širjenje, upočasnitev in odlaganje drobirja in rinjenih plavin), ki ga je mogoče izpeljati iz digitalnega višinskega modela (DEM) v velikem merilu z uporabo orodja, ki so ga razvili Cavalli et al. (2017).

$$PFI = \frac{\sum (F_n * w_f)}{\sum w_f} \quad \text{Eq. 1}$$

Il PFI (Eq. 1) è calcolato come somma pesata delle classi dei fattori disponibili (F_n), normalizzata sulla somma dei pesi (w_f), rendendo l'indice confrontabile anche in presenza di dati mancanti. Il peso di ciascun fattore nel contributo alla fragilità di un'opera può essere determinato predisponendo dei questionari da sottoporre a degli esperti del settore. Dalle risposte fornire nei questionari è possibile ricavare i valori medi di importanza di ciascun fattore, da utilizzare poi per pesare i singoli fattori.

L'indice PFI è stato testato su tre bacini idrografici estesi (Fig. 10) come quello del fiume Fella (700 km²), del torrente But (325 km²) e del torrente Degano (320 km²) su un totale di 3556 strutture censite nel catasto regionale IRDAT della Regione Friuli-Venezia Giulia (descritto nel Deliverable 1.2.2).

The PFI (Eq. 1) is calculated as the weighted sum of the available factor classes (F_n), normalized by the sum of the weights (w_f), making the index comparable even in the presence of missing data. The weight of each factor in contributing to the fragility of a structure can be determined by preparing questionnaires to be administered to experts in the field. From the responses provided in the questionnaires, it is possible to derive the average importance values for each factor, which are then used to weigh the individual factors.

The PFI index was tested on three large watersheds (Fig. 10), such as the Fella River (700 km²), the But torrent (325 km²), and the Degano torrent (320 km²), on a total of 3556 structures surveyed in the IRDAT regional cadastre of the Friuli-Venezia Giulia Region (described in Deliverable 1.2.2).

Indeks PFI (En. 1) se izračuna kot tehtana vsota razpoložljivih razredov dejavnikov (F_n), normalizirana z vsoto uteži (w_f), kar omogoča primerljivost indeksa tudi v primeru manjkajočih podatkov. Težo vsakega dejavnika pri prispevanju k ranljivosti objekta je mogoče določiti s

pripravo vprašalnikov, ki se izpolnijo s pomočjo strokovnjakov s tega področja. Iz odgovorov, podanih v vprašalnikih, je mogoče izpeljati povprečne vrednosti pomembnosti za vsak dejavnik, ki se nato uporabijo za tehtanje posameznih dejavnikov.

Indeks PFI je bil preizkušen na treh velikih porečjih (Slika 10), kot so reka Fella (700 km²), potoku But (325 km²) in potoku Degano (320 km²), na skupno 3556 objektih, zajetih v regionalnem katastru IRDAT v deželi Furlanija-Juljska (opisano v poročilu D1.2.2).

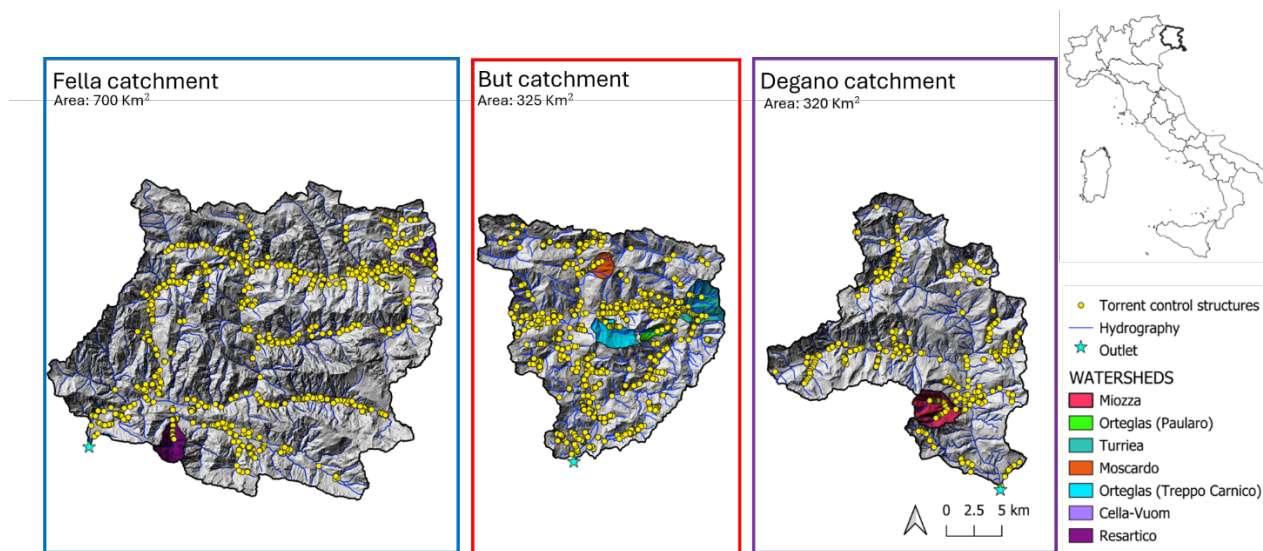


Figura 10: Localizzazione dei torrenti Fella, But e Degano in Friuli-Venezia Giulia, di alcuni loro sottobacini studiati nel dettaglio e delle opere SIF presenti. *Location of the Fella, But, and Degano torrents in Friuli-Venezia Giulia, along with some of their sub-basins studied in detail, and the TCS present.* Lokacija potokov Fella, But in Degano v Furlaniji-Juljski krajini, skupaj z nekaterimi njihovimi podrobno proučenimi podbazeni in prisotnimi strukturami.

I pesi dei singoli fattori sono stati determinati analizzando le risposte di 37 questionari forniti da esperti del settore. I valori medi dei pesi da applicare a ciascun fattore sono stati i seguenti: litologia (0.81), materiale costruttivo (0.80), posizione nel reticolo (0.75), anno di costruzione (0.65) e altezza (0.54).

Le strutture sono state classificate in tre classi: bassa (PFI < 1.76), media (1.76–2.26) e alta (PFI > 2.26), definite rispettivamente al 25° e al 75° percentile della distribuzione complessiva (Fig. 11). Le percentuali di strutture nelle tre classi di fragilità variano tra i bacini: nel But il 24.3% ricade nella classe alta, nel Degano il 28.1% e nel Fella il 26.2%, con la classe bassa che rappresenta in tutti e tre i bacini circa il 50% delle strutture.

The weights of the individual factors were determined by analyzing the responses from 37 questionnaires completed by experts in the field. The average weights to be applied to each factor were as follows: lithology (0.81), construction material (0.80), location within the grid (0.75), year of construction (0.65), and height (0.54).

The structures were classified into three categories: low (PFI < 1.76), medium (1.76–2.26), and high (PFI > 2.26), defined respectively at the 25th and 75th percentiles of the overall distribution

(Fig. 11). The percentages of structures in the three fragility classes vary across the watersheds: in the But watershed, 24.3% fall into the high class; in the Degano watershed, 28.1%; and in the Fella watershed, 26.2%, with the low-class accounting for approximately 50% of the structures in all three watersheds.

Uteži posameznih dejavnikov so bile določene z analizo odgovorov iz 37 vprašalnikov, ki so jih izpolnili strokovnjaki s tega področja. Povprečne uteži, ki so bile uporabljene za vsak dejavnik, so bile naslednje: litologija (0,81), gradbeni material (0,80), lokacija znotraj mreže (0,75), leto gradnje (0,65) in višina (0,54).

Objekti so bili razvrščeni v tri kategorije: nizka ($PFI < 1,76$), srednja ($1,76-2,26$) in visoka ($PFI > 2,26$), ki so bile določene na 25. oziroma 75. percentilu celotne porazdelitve (Slika 11). Odstotki objektov v treh razredih ranljivosti se med posameznimi porečji razlikujejo: v porečju But jih 24,3 % spada v visoki razred; v porečju Degano 28,1 %; v porečju Fella pa 26,2 %, pri čemer nizki razred predstavlja približno 50 % objektov v vseh treh porečjih.

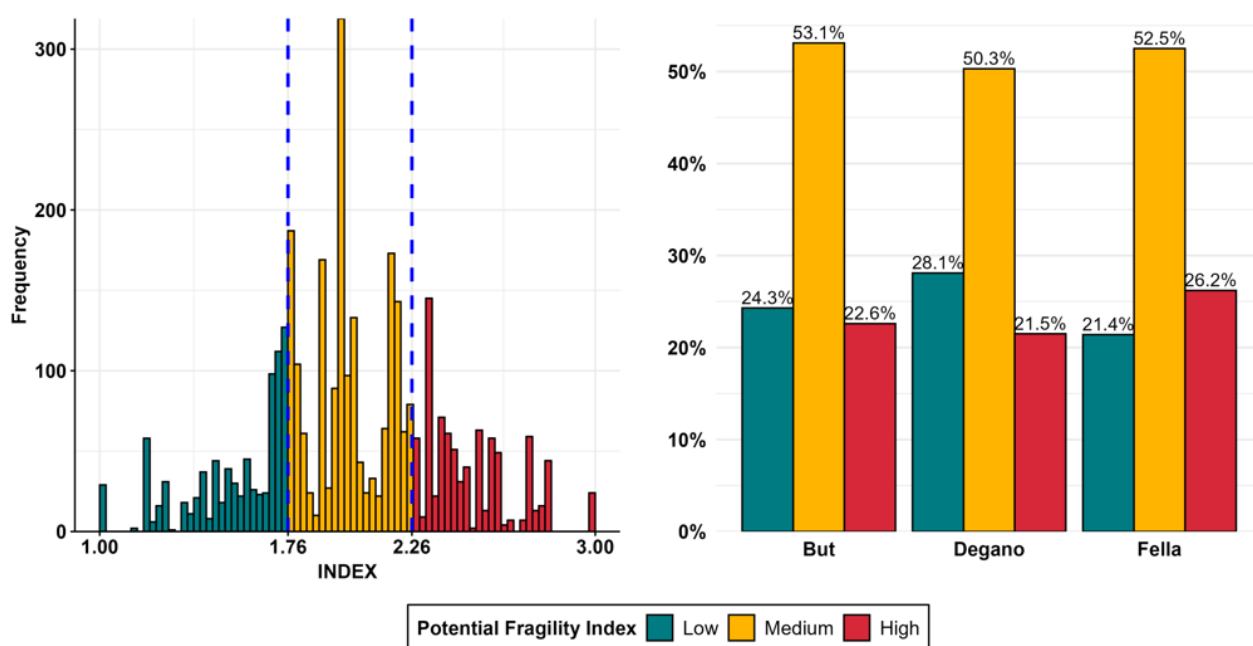


Figura 11: Potential Fragility index (PFI) calcolato per 3556 strutture censite nei bacini del Fella, But e Degano in Friuli-Venezia Giulia. *Potential Fragility Index (PFI) calculated 3556 structures surveyed in the Fella, But, and Degano basins in Friuli-Venezia Giulia. Indeks potencialne ranljivosti (PFI) je bil izračunan za 3556 objektov, pregledanih v porečjih Fella, But in Degano v Furlaniji-Juljski krajini.*

La coerenza concettuale dell'indice è stata valutata qualitativamente attraverso il confronto con i rilievi di campo su 282 strutture distribuite nei seguenti sottobacini (Fig. 10): Moscardo (UD), Ortegla di Paularo (UD), Miozza (UD), Cella-Vuom (UD), Turriea (UD), Ortegla a Treppo Carnico (UD) e Resartico a Resiutta (UD) nei quali era già stato applicato il flusso di lavoro del progetto

TORRENT ed in particolare calcolato l'indice MPi, così da verificare la presenza, lo stato, la funzionalità, la corretta geolocalizzazione e la classificazione delle opere SIF esistenti.

La verifica qualitativa tramite rilievi di campo ha evidenziato una buona coerenza tra i valori del PFI, le condizioni osservate e i valori di MPi. I principali risultati emersi sottolineano che: *i)* le strutture localizzate in zone di testata e di propagazione dei processi geo-idrologici come i debris-flow, caratterizzate da pendenze elevate e processi erosivi dominanti, mostrano valori di PFI più alti e presentano generalmente maggiori segni di danneggiamento (es. briglie del bacino del Moscardo e del Turriea); *ii)* le strutture posizionate in conoidi alluviali o tratti a bassa pendenza, dove prevalgono i processi deposizionali, tendono ad avere PFI basso e condizioni strutturali migliori; *iii)* strutture con caratteristiche intrinseche simili ma collocate in bacini con processi geomorfologici dominanti diversi possono mostrare condizioni strutturali significativamente diverse; *iv)* strutture con PFI identico ma posizione diversa all'interno dello stesso bacino possono presentare condizioni attuali contrastanti, confermando che la classificazione dell'indice riflette la fragilità potenziale e non lo stato strutturale corrente, il quale dipende anche dalla frequenza degli eventi e dalle attività di manutenzione recente.

Nel complesso, i risultati mostrano che il PFI costituisce uno strumento concettualmente solido e semplice per effettuare un primo screening su larga scala delle criticità per poi orientare le priorità di manutenzione ad una scala di maggior dettaglio sfruttando l'MPi e il flusso di lavoro TORRENT. L'PFI rappresenta un'ottima soluzione per identificare le criticità di un territorio su larga scala e può essere facilmente applicato in presenza di database storici delle opere SIF come quelli della Regione FVG e della Slovenia (descritti nel Deliverable 1.2.2.), ma poi è di fondamentale importanza verificare ed aggiornare i dati mediante rilievi in campo più dettagliati ed approfonditi, sfruttando strumenti come il toolkit sviluppato con il progetto TORRENT.

The conceptual consistency of the index was assessed qualitatively by comparing it with field surveys of 282 structures distributed across the following sub-basins (Fig. 10): Moscardo (UD), Ortegla di Paularo (UD), Miozza (UD), Cella-Vuom (UD), Turriea (UD), Ortegla at Treppo Carnico (UD), and Resartico at Resiutta (UD), where the TORRENT project workflow had already been applied—and, in particular, the MPi index had been calculated—in order to verify the presence, condition, functionality, correct geolocation, and classification of existing structures.

Qualitative verification through field surveys revealed good consistency between the PFI values, the observed conditions, and the MPi values. The main findings highlight that: *i)* structures located in headwater and propagation zones of hydrogeological processes such as debris flows—characterized by steep slopes and dominant erosive processes—exhibit higher PFI values and generally show greater signs of damage (e.g., weirs in the Moscardo and Turriea basins); *ii)* structures located in alluvial fans or low-gradient sections, where depositional processes prevail, tend to have a low PFI and better structural conditions; *iii)* structures with similar intrinsic characteristics but located in basins with different dominant geomorphological processes may exhibit significantly different structural conditions; *iv)* structures with identical PFI but different locations within the same basin may exhibit contrasting current conditions,

confirming that the index classification reflects potential fragility rather than the current structural state, which also depends on the frequency of events and recent maintenance activities.

Overall, the results show that the PFI is a conceptually sound and simple tool for conducting an initial large-scale screening of critical issues, which can then be used to guide maintenance priorities at a more detailed level by leveraging the MPI and the TORRENT workflow. The PFI is an excellent solution for identifying critical issues in a region on a large scale and can be easily applied when historical databases of TCS are available, such as those of the Friuli-Venezia Giulia Region and Slovenia (described in Deliverable 1.2.2.), but it is then of fundamental importance to verify and update the data through more detailed and in-depth field surveys, using tools such as the toolkit developed as part of the TORRENT project.

Konceptualno doslednost indeksa smo kvalitativno ocenili s primerjavo s terenskimi raziskavami 282 objektov, razporejenih po naslednjih podporečjih (Slika 10): Moscardo (UD), Ortegias di Paularo (UD), Miozza (UD), Cella-Vuom (UD), Turriea (UD), Ortegias pri Treppo Carnico (UD) in Resartico pri Resiutta (UD), kjer je bil že uporabljen delovni tok projekta TORRENT – in zlasti izračunan indeks MPI – z namenom preverjanja prisotnosti, stanja, funkcionalnosti, pravilne geolokacije in klasifikacije obstoječih objektov.

Kvalitativna preveritev s terenskimi raziskavami je pokazala dobro skladnost med vrednostmi PFI, opazovanimi stanji in vrednostmi MPI. Glavne ugotovitve poudarjajo, da: i) objekti, ki se nahajajo v zgornjih delih porečij, kjer je prisotnost masnih premikov kot so plazovi, kažejo višje vrednosti PFI in na splošno večje znake poškodb (npr. pregrade v porečjih Moscardo in Turriea); ii) objekti, ki se nahajajo na aluvialnih nanosih ali odsekih z majhnim naklonom, kjer prevladujejo procesi odlaganja sedimentov, imajo večinoma nizek PFI in so v boljšem strukturnem stanju; iii) objekti s podobnimi notranjimi značilnostmi, ki pa se nahajajo v porečjih z različnimi prevladujočimi geomorfološkimi procesi, lahko kažejo znatno različne strukturne razmere; iv) objekti z enakim PFI, a različnimi lokacijami znotraj istega porečja, lahko kažejo nasprotujoče si trenutne razmere, kar potrjuje, da razvrstitev po indeksu odraža potencialno ranljivost in ne trenutnega strukturnega stanja, ki je odvisno tudi od pogostosti dogodkov in nedavnih vzdrževalnih dejavnosti.

Na splošno rezultati kažejo, da je PFI konceptualno utemeljeno in preprosto orodje za izvedbo začetnega pregleda kritičnih vprašanj v velikem obsegu, ki se nato lahko uporabi za usmerjanje vzdrževalnih prioritet na podrobnejši ravni z izkoriščanjem MPI in delovnega toka TORRENT. Indeks PFI je odlična rešitev za prepoznavanje kritičnih vprašanj v regiji v velikem obsegu in se ga lahko enostavno uporabi, kadar so na voljo zgodovinske baze podatkov o hudourniških objektih, kot so tiste za regijo Furlanija-Juljska pokrajina in Slovenijo (opisane v poročilu D 1.2.2.), vendar je nato ključnega pomena, da se podatke preveri in posodobi s podrobnejšimi in poglobljenimi terenskimi raziskavami, pri čemer se uporabijo orodja, kot je nabor orodij, razvit v okviru projekta TORRENT.

Bibliografia / References / Literatura

Cavalli M, Crema S, Trevisani S, Marchi, L. (2017). GIS tools for preliminary debris-flow assessment at regional scale. J Mt Sci 14(12):2498–2510. <https://doi.org/10.1007/s11629-017-4573-y>

Chiarel G, Cucchiaro S, Cavalli M, Marchi L, Saretta A, Crema S, Cazorzi F. (2026). Monitoring of torrent control structures through a multi-parameter index. Nat Hazards 122, 369 (2026). <https://doi.org/10.1007/s11069-026-08120-x>

Marchi L, Marchese E, Crema S, Sarretta A, Cavalli, M. (2022). Identification of torrent control systems with potential fragility and notes on mitigation strategies. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18339416>