



**REGIONE AUTÒNOMA DE SARDIGNA**  
**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

AGENZIA REGIONALE PRO S'AMPARU DE S'AMBIENTE DE SARDIGNA  
AGENZIA REGIONALE PER LA PROTEZIONE DELL'AMBIENTE DELLA SARDEGNA

ARPAS

Dipartimento Geologico  
Servizio Idrogeologico e Idrografico

**Calibrazione e validazione del modello idrologico MIKE SHE  
nel bacino idrografico del Riu Badu Crabolu  
alla stazione idrometrica “F33 Riu Badu Crabolu a p.te SS292”**

**Maggio 2024**

## Sommario

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1. | INTRODUZIONE.....  | 2  |
| 2. | BACINO IDROGRAFICO DI INTERESSE.....   | 2  |
| 3. | IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO MIKE SHE NEL BACINO.....   | 4  |
| 4. | CALIBRAZIONE E VALIDAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO MIKE SHE ALLA<br>SEZIONE RIU BADU CRABOLU A P.TE SS292 ..... | 11 |
| 5. | CONCLUSIONI .....  | 14 |

## 1. INTRODUZIONE

In data 30/07/2021 (prot. n. 27374/2021) è stato sottoscritto il nuovo accordo di collaborazione tra ARPAS e la Direzione Generale della Protezione Civile per le tematiche inerenti la modellistica idrologica e idraulica, la modellistica geomorfologica e i sistemi di rilevamento nell'ambito del ruolo svolto da ARPAS (Dipartimento Geologico) quale Centro di Competenza. In particolare all'art. 2 è prevista la predisposizione e calibrazione di diversi modelli idrologico-idraulici di bacini idrografici di estensione inferiore ai 400 km<sup>2</sup>.

La predisposizione, calibrazione e validazione di modelli matematici idrologico-idraulici dei bacini idrografici del territorio regionale è uno degli obiettivi caratterizzanti del Servizio idrogeologico e idrografico di ARPAS.

Per lo sviluppo della modellistica il Servizio ha individuato quale strumento la piattaforma software "MIKE ZERO" realizzata originariamente dal *Danish Hydraulic Institute*, ora DHI Group. In particolare, nel presente lavoro sono stati utilizzati, in accoppiamento tra loro, i moduli MIKE HYDRO per la modellazione del corso d'acqua e MIKE SHE per la modellazione idrologica del bacino idrografico, più diversi *tool* integrati per la predisposizione dei dati in ingresso e la visualizzazione, confronto e valutazione dei risultati.

Il presente documento si pone l'obiettivo di illustrare sinteticamente le caratteristiche del bacino idrografico di interesse, i principali passaggi attuati in fase di modellazione e i principali risultati raggiunti in fase di calibrazione e validazione del modello finale.

## 2. BACINO IDROGRAFICO DI INTERESSE

Il bacino idrografico oggetto del presente lavoro è costituito dal sottobacino sotteso dalla stazione idro-termo-pluviometrica storicamente identificata come "Badu Crabolu p.te Badu Crabolu", ma recentemente rinominata all'interno della Rete Fiduciaria in telemisura della Protezione Civile "**Riu Badu Crabolu a p.te SS292**", codice F33 della rete idrometrica gestita dal Servizio.

Il bacino ha estensione pari a 144,79 km<sup>2</sup> e si sviluppa prevalentemente nella regione geografica dell'altopiano di Campeda, a cavallo tra le province di Nuoro e Oristano e la Città Metropolitana di Sassari, nei territori dei Comuni di Bolotana, Lei, Silanus, Bortigali, Macomer, Sindia, Bonorva, Semestene, Pozzomaggiore e Suni (Figura 1, Figura 2, Figura 3).

La sezione di chiusura del bacino, corrispondente alla sezione idrometrica di controllo strumentata "Riu Badu Crabolu a p.te SS292", coordinate 465743,38 E; 4464641,89 N (WGS84/UTM 32N, EPSG 32632) è posta sul ponte della SS292 al km 62,580 in località "Ponte Badu 'e Crabolu" al confine tra i territori comunali di Suni e Pozzomaggiore. La stazione appartiene alla Rete Fiduciaria in telemisura della Protezione Civile ed è equipaggiata con pluviometro, termometro e idrometro. L'inizio delle misure in tempo reale risale al 2007. Lo zero idrometrico è posto a quota 224,95 m slm.

All'interno del bacino è stato considerato di interesse (e pertanto implementato nella modellazione) un unico corso d'acqua, denominato univocamente "Riu Baddu Cabriolu" nella cartografia vettoriale dei corpi idrici superficiali predisposta ai sensi del DM 16 giugno 2008, n. 131 del MATTM, integrata all'interno della cartografia del Piano Paesaggistico Regionale disponibile su Sardegna Geoportale.

Nella cartografia tecnica regionale (DGBT2022) lo stesso corpo idrico è riportato coi nomi "Riu Temo" nella parte di monte (circa da inizio corso a attraversamento SP44 in località "Ponte Oinu"), "Riu Mannu" nella parte centrale e "Riu Badu Crabolu" più a valle, in corrispondenza dell'attraversamento della SS292. Su altre sorgenti geografiche sono riportati nomi ancora diversi (es. "Riu Badde Cabriolu" su OpenStreetMap; "Mannu de Planu de Murto" sulla cartografia di base IGM scala 1:250.000, ecc.).

Il corso d'acqua nasce in località Badde Salighes nel Comune di Bolotana; confluisce con il Riu Ponte Enas (anche noto come "Riu Cumone") in località Monte Su Padru e successivamente con il Fiume Temo, del quale è affluente insinistra idraulica. La stazione idrometrica e sezione di controllo corrisponde alla

progressiva 35.824 m da inizio corso. Alla progressiva 25.900 m circa, nei pressi dell'abitato di Sindia, è presente una piccola diga (ID 438 del catasto regionale; categoria L.R. 12/07: B2).

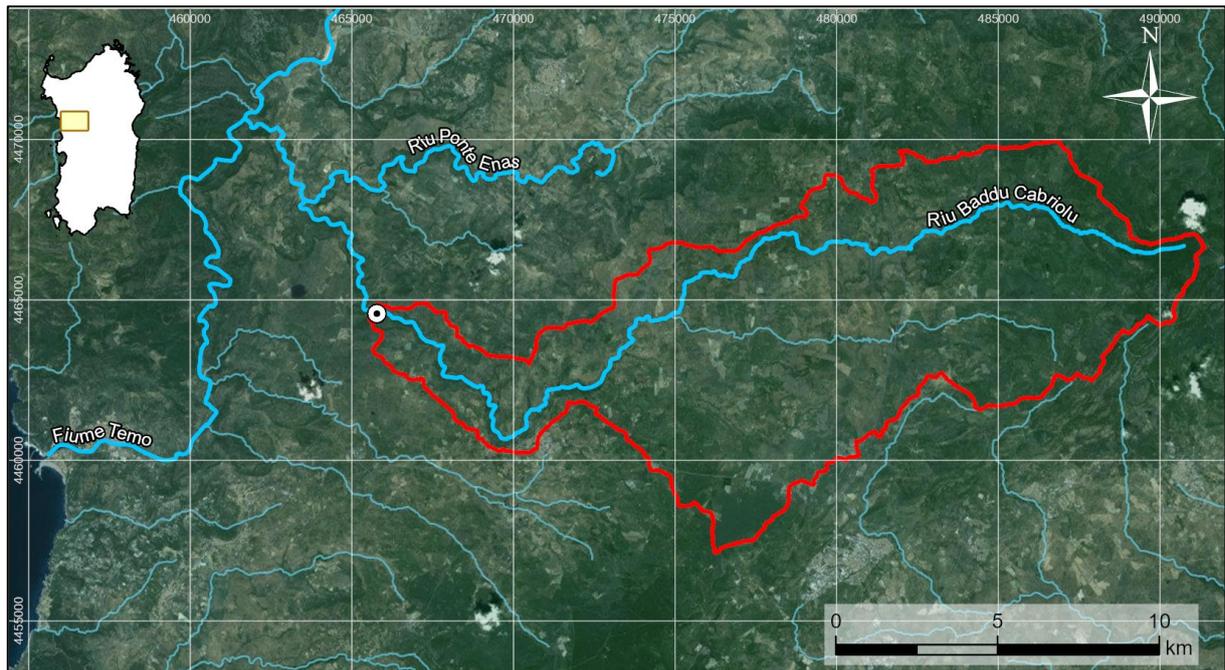


Figura 1. Immagine satellitare del territorio del bacino. Sono evidenziati la posizione della sezione di controllo e del reticolo idrografico principale. È riportata la griglia planimetrica WGS84 / UTM Zona 32N (EPSG 32632).

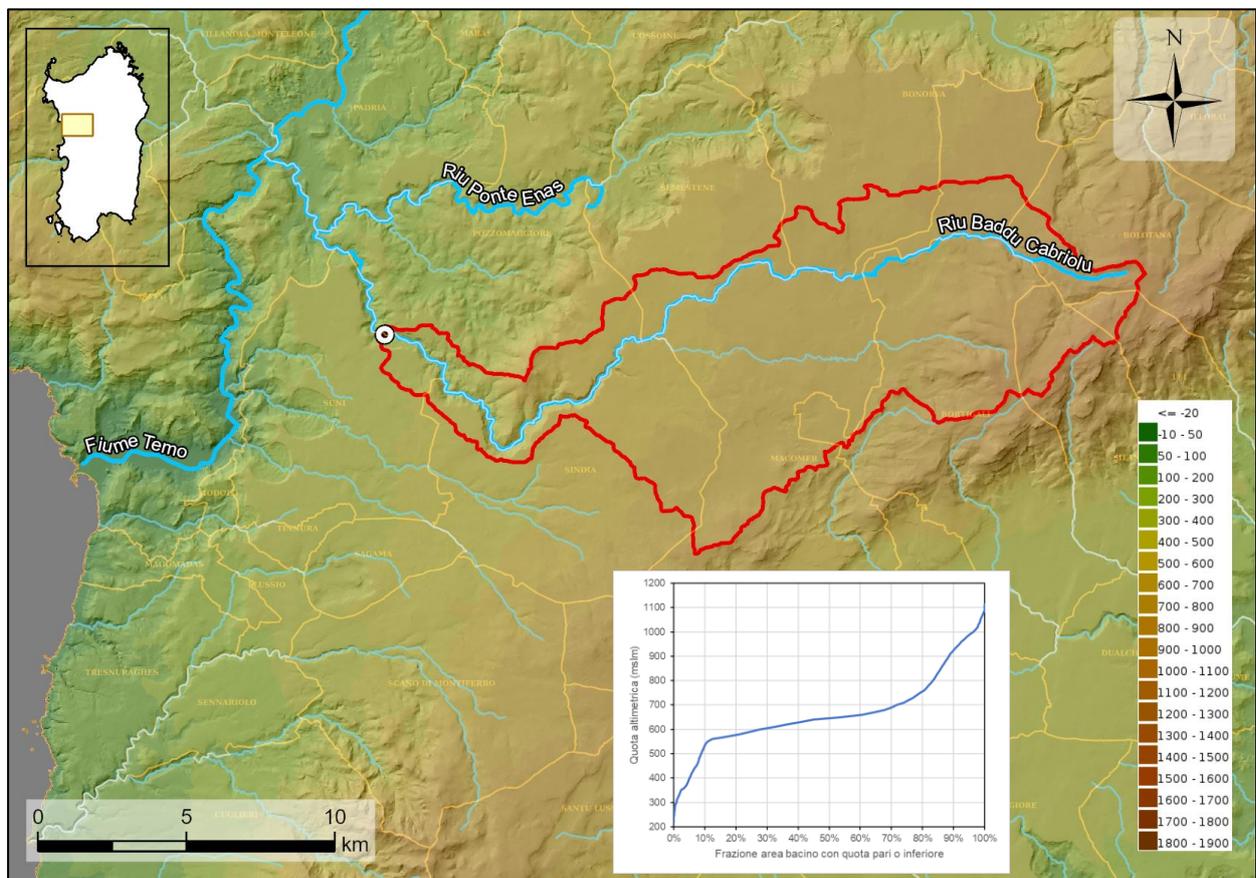


Figura 2. Inquadramento altimetrico e amministrativo del bacino.

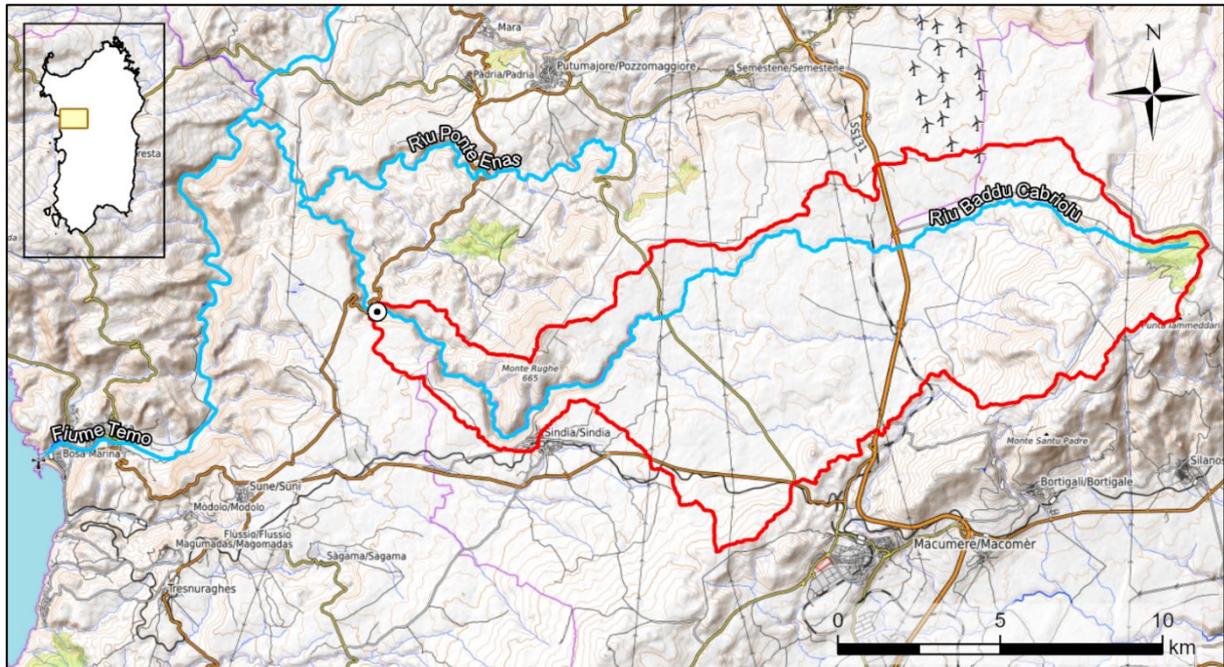


Figura 3. Inquadramento territoriale del bacino (sfondo OpenSteeMap).

### 3. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO MIKE SHE NEL BACINO

L'interfaccia utente di MIKE SHE consente, attraverso un albero di gestione delle varie componenti del modello, di seguire l'intero flusso di lavoro: dalla messa a punto, con l'inserimento dei dati di setup, al preprocessing dei dati di input, alla simulazione, all'analisi dei risultati ottenuti.

Per il set-up del modello sono state innanzitutto definite le specifiche della simulazione, attivando i moduli di calcolo di interesse, specificando il periodo della simulazione, impostando i passi di calcolo ed i parametri di controllo computazionali utilizzati nella ricerca della soluzione.

Le simulazioni sono state fatte utilizzando i seguenti moduli:

- OL (*OverLand Flow*): modulo di simulazione dello scorrimento superficiale;
- OC (*Rivers and Lakes*): per la simulazione idrodinamica lungo il reticolo idrografico;
- UZ (*Unsaturated Flow*): modulo di simulazione del deflusso nella zona insatura;
- ET (*Evapotranspiration*): modulo di simulazione dell'evapotraspirazione;
- SZ (*Saturated Flow*): modulo di simulazione della zona satura dell'acquifero.

Il flusso nel mezzo insaturo (UZ) è stato simulato con il metodo semplificato *2 Layer UZ*, mentre il flusso nel mezzo saturo (SZ) è stato simulato con il metodo semplificato del *linear reservoir*, trasformando il modello idrologico in un modello afflussi-deflussi concettuale semi-distribuito (Figura 4).

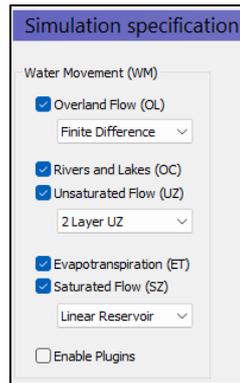


Figura 4. Moduli attivati per la simulazione con il modello semi-distribuito afflussi-deflussi.

È stato quindi definito il dominio spaziale del modello, sulla base della perimetrazione del sistema idrologico del bacino di interesse. Il dominio spaziale così definito, esteso complessivamente per 145 km<sup>2</sup> circa, è stato discretizzato secondo una griglia di calcolo regolare alle differenze finite, con lato della maglia pari a 50 m, disposta su 320 righe e 600 colonne, per un totale di 59.299 celle di calcolo attive.

In Figura 5 è riportata la finestra di set-up del modello che visualizza il dominio di calcolo, definito sulla base di opportuno shapefile. Per il dato relativo alla superficie topografica, che costituisce il limite superiore del modello, è stato definito un file *grid* (estensione *dfs2*) del modello digitale del terreno dell'area a passo 50 m. In Figura 6 è riportata la finestra di visualizzazione della superficie topografica utilizzata.

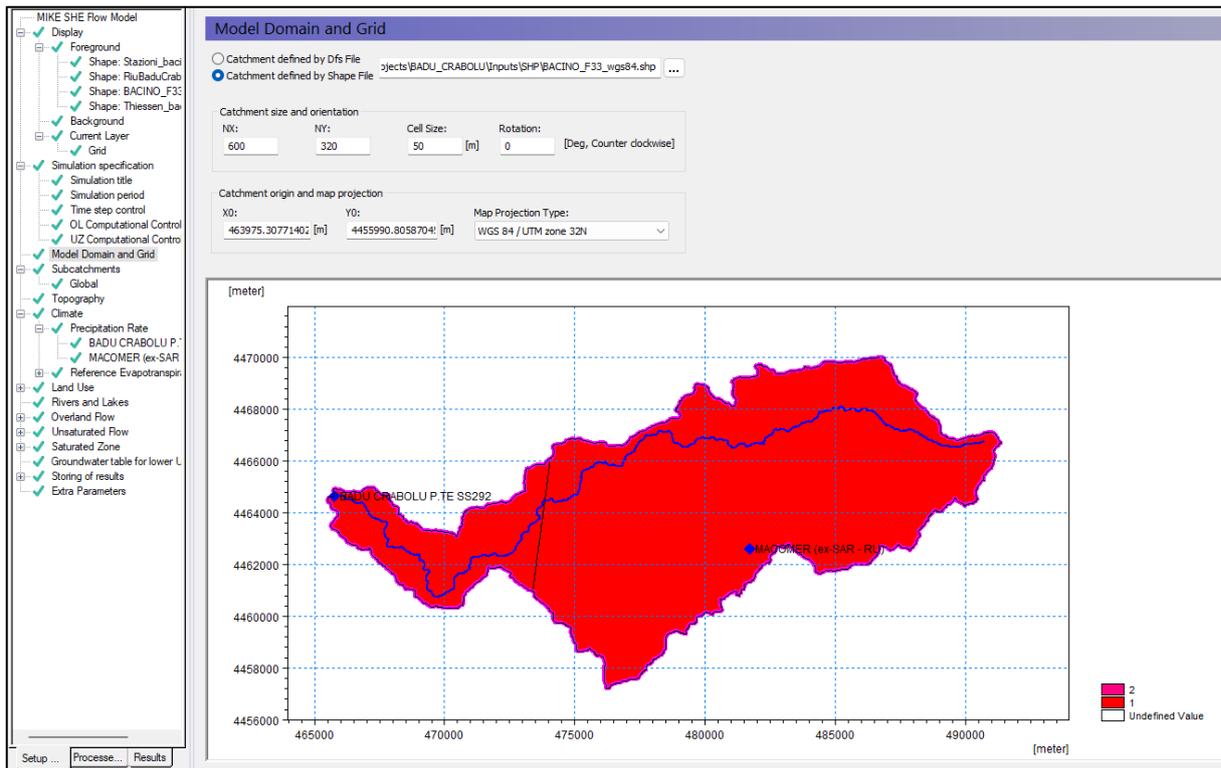


Figura 5. Finestra di set-up del modello con definizione e visualizzazione del dominio di calcolo.

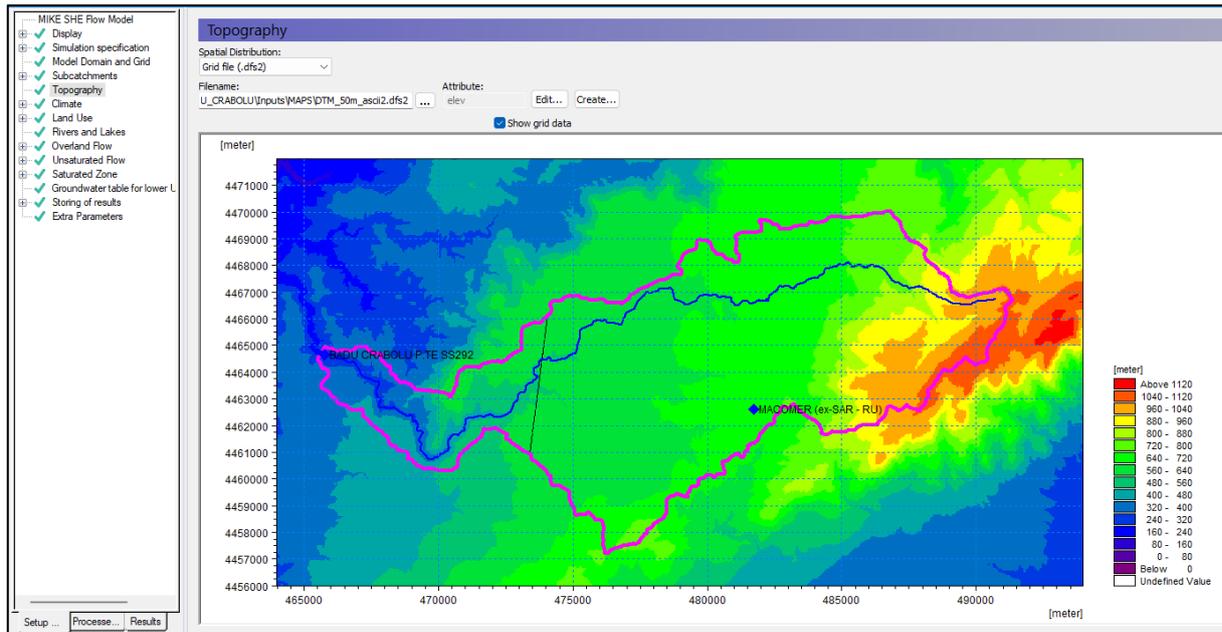


Figura 6. Topografia del dominio del modello.

Il bacino non è stato suddiviso in ulteriori sottobacini.

Per quanto riguarda il monitoraggio meteorologico, nell'area sono presenti e attive diverse stazioni. Data l'estensione temporale sia dei dati termo-pluviometrici che di quelli idrometrici della stazione di Riu Badu Crabolu a p.te SS292, installata in data 22/03/2006 e con dati completi a partire dal 2007, si è scelto di utilizzare i dati termo-pluviometrici a scala oraria di tale stazione e dell'unica altra stazione termo-pluviometrica con set di dati sufficientemente estesa, ovvero Macomer "Sas Enas", attualmente appartenente alla Rete Unica Regionale e precedentemente alla rete "Ex- SAR", con dati a partire dal 2006. Peraltro, essa è l'unica altra stazione interna alla perimetrazione del bacino. Le altre stazioni non utilizzate, oltre che esterne al bacino, presentavano serie di dati non antecedenti al 2017.

Sono stati quindi caricati, come serie temporali (formato *dfs0*), i dati di precipitazione cumulata oraria delle due stazioni. È stato quindi definito e caricato uno shapefile con i poligoni di Thiessen che permettesse al software di interpolare la precipitazione misurata puntualmente e spazializzarla.

L'evapotraspirazione potenziale (ETP) è stata calcolata esternamente al software a scala oraria con l'equazione di Penman-Monteith utilizzando i dati meteorologici disponibili per ciascuna stazione, e caricata nel software come serie temporale in formato *dfs0*. Per la spazializzazione dell'ETP sono stati utilizzati gli stessi poligoni di Thiessen definiti per le precipitazioni (Figura 7).

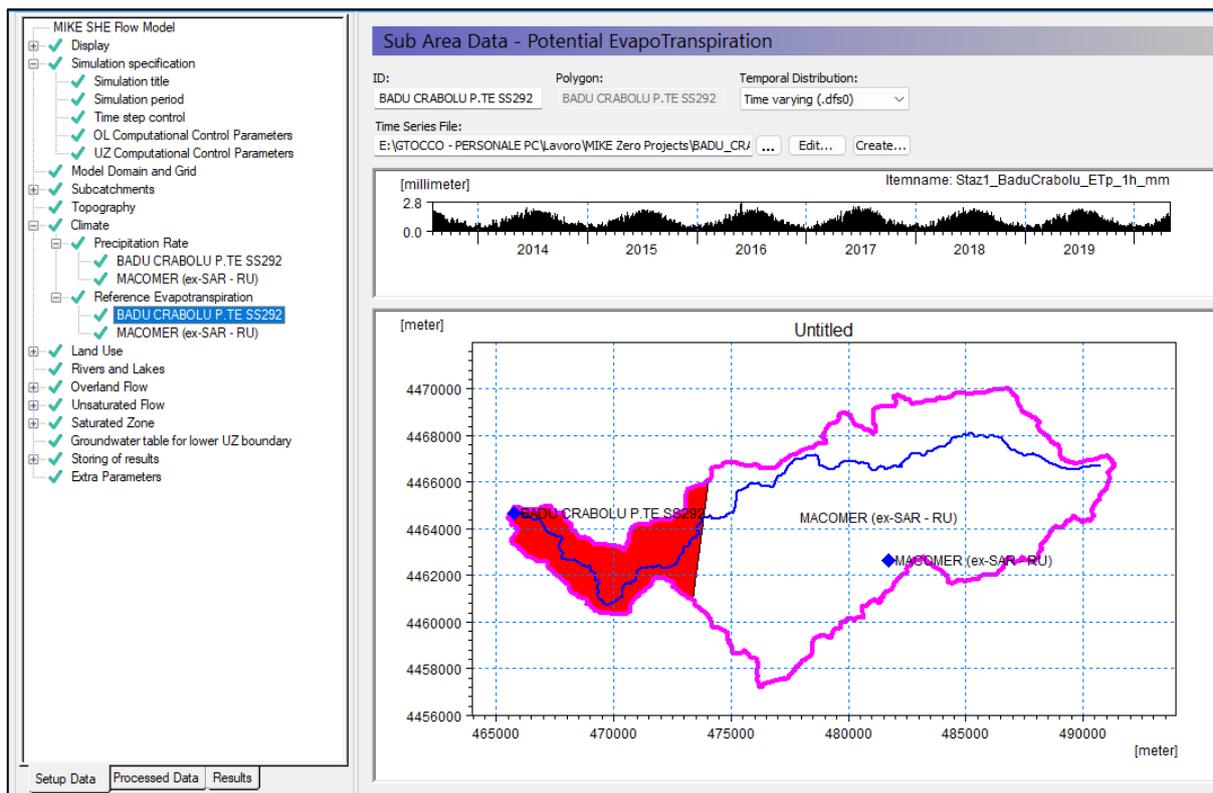


Figura 7. Schermata di set-up del modulo *Climate* con la spazializzazione dei dati puntuali di precipitazione e evapotraspirazione (serie temporali) tramite poligoni di Thiessen.

Per quanto riguarda il Land Use è stata caricata la mappa dell'uso del suolo ottenuta dalla riclassificazione della carta Corinne Land Cover 2008 attraverso un'aggregazione che riconduce a 5 classi: *grass* (seminativi e prati), *tree* (boschi e alberi), *shrub* (arbusti), *wetland* (laghi e zone umide) e *urban* (urbanizzato). Nella seguente Tabella 1 viene riportata la percentuale di copertura di ciascuna classe. La mappa ha una risoluzione spaziale di 50 m ed è stata caricata in formato grid *dfs2* (Figura 8).

| Vegetazione                  | Codice | Copertura (% area) |
|------------------------------|--------|--------------------|
| Seminativi e Prati (Grass)   | 1      | 66,8               |
| Boschi e Alberi (Tree)       | 2      | 9,4                |
| Arbusti (Shrub)              | 3      | 23,1               |
| Laghi e Zone Umide (Wetland) | 4      | 0,01               |
| Urbanizzato (Urban)          | 5      | 0,7                |

Tabella 1. Classi di uso del suolo.

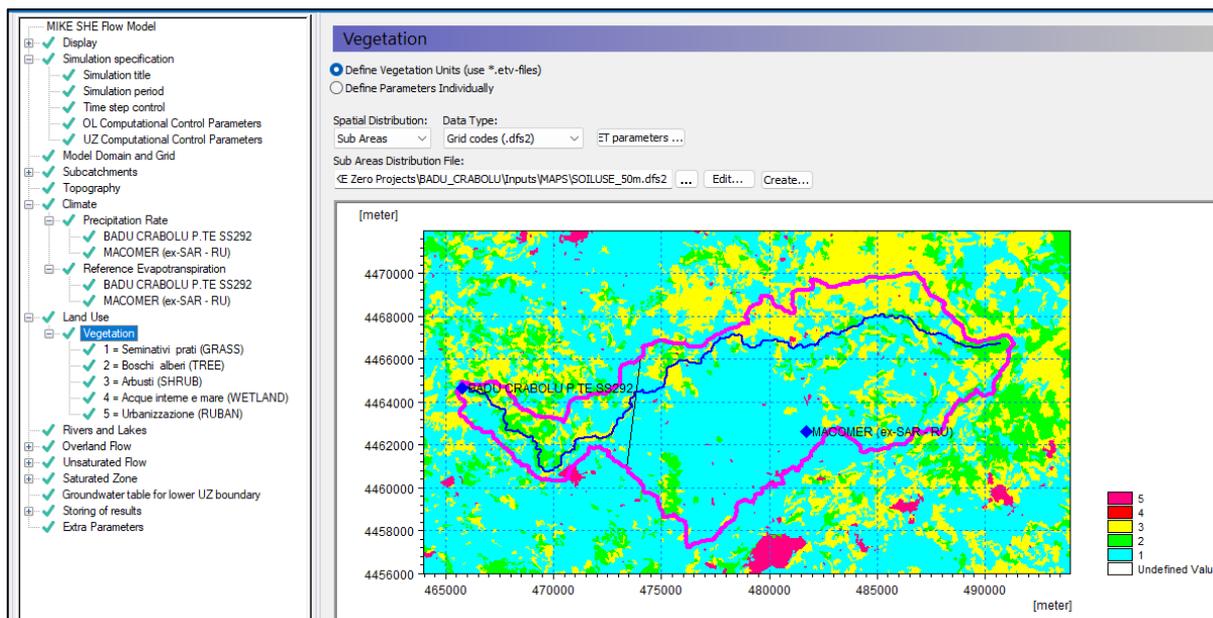


Figura 8. Mappa dell'uso del suolo caricata su MIKE SHE.

A ciascun tipo di vegetazione sono stati associati valori di determinati parametri utilizzati dal modello per il calcolo dell'evapotraspirazione effettiva:

- LAI (*Leaf Area Index*) che è un indice adimensionale che esprime l'area di superficie fogliare presente su una superficie unitaria di suolo. Tale valore è stato estratto per ciascun tipo di vegetazione presente nel bacino dalle mappe del LAI MODIS NASA con risoluzione spaziale 1 km e temporale 8 giorni, ottenute dall'elaborazione di immagini da satellite (<https://modis.ornl.gov/globalsubset/>);
- coefficiente colturale  $k_c$ ;
- profondità dell'apparato radicale (RD, *root depth*).

Per i tipi di vegetazione “grass”, “tree” e “shrub” è stato definito uno specifico file con estensione *etv* nel quale sono state caricate le serie temporali del LAI, variabili con ciclo annuale, e gli altri parametri. Per le classi “Wetland” e “Urban” sono invece stati utilizzati valori costanti.

Tali parametri sono stati oggetto di calibrazione; in Tabella 2 sono riportati i valori definitivi utilizzati dal modello per il calcolo dell'evapotraspirazione effettiva.

| Vegetazione                  | LAI (-)   | Coeff. Colturale $k_c$ (-) | Root Depth (mm) |
|------------------------------|-----------|----------------------------|-----------------|
| Seminativi e Prati (Grass)   | Variabile | 1                          | 1000            |
| Boschi e Alberi (Tree)       | Variabile | 1,4                        | 1700            |
| Arbusti (Shrub)              | Variabile | 1,5                        | 1900            |
| Laghi e Zone Umide (Wetland) | 4         | n.d.                       | 900             |
| Urbanizzato (Urban)          | 0,5       | n.d.                       | 400             |

Tabella 2. Valori delle costanti calibrate relativamente all'uso del suolo.

Per quanto riguarda il suolo insaturo (UZ) è stata utilizzata la carta delle permeabilità prodotta dal dipartimento Geologico di ARPAS nel 2018 (Figura 9). Nel software ciascuna classe di permeabilità è stata associata ad un tipo di suolo, secondo quanto riportato nella successiva Tabella 3.

La mappa utilizzata ha una risoluzione spaziale di 50 m ed è stata caricata in formato grid *dfs2* (Figura 10).

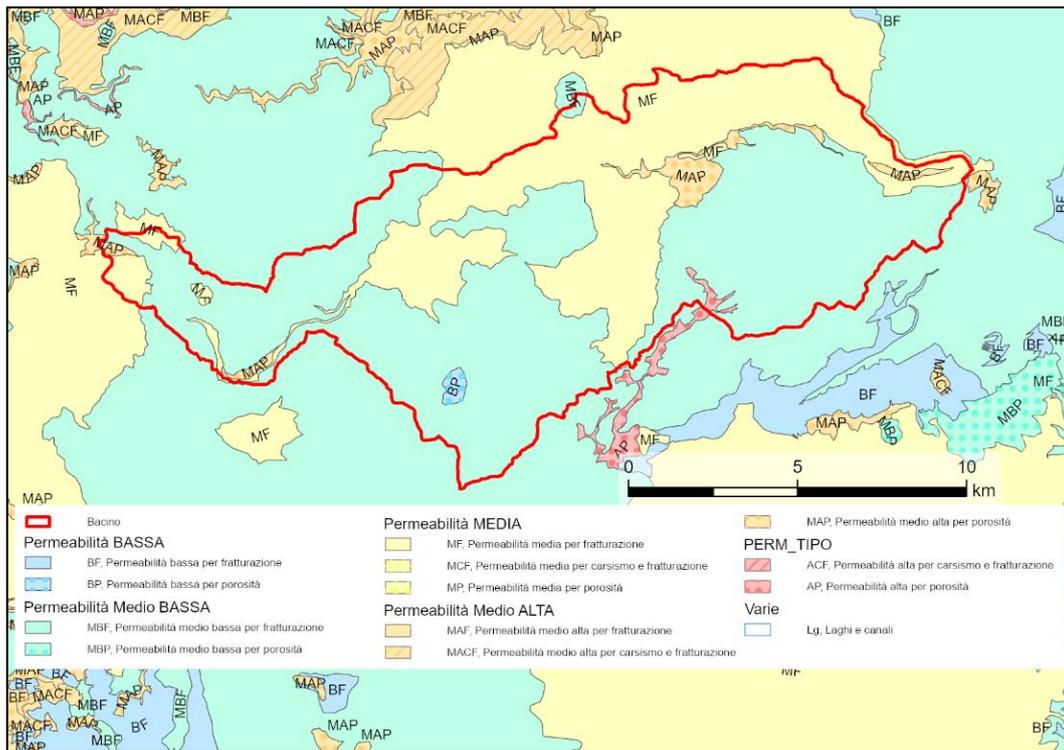


Figura 9. Estratto della carta della permeabilità ARPAS 2018, con legenda.

| Classe di permeabilità | Codice | Permeabilità | Tipo di suolo | Copertura (% area) |
|------------------------|--------|--------------|---------------|--------------------|
| A                      | 1      | Alta         | Sand          | 3,6                |
| B                      | 2      | Media        | Sandy Loam    | 34,4               |
| C                      | 3      | Medio-bassa  | Loam          | 61,6               |
| D                      | 4      | Bassa        | Clay          | 0,4                |

Tabella 3. Classi di permeabilità del suolo.

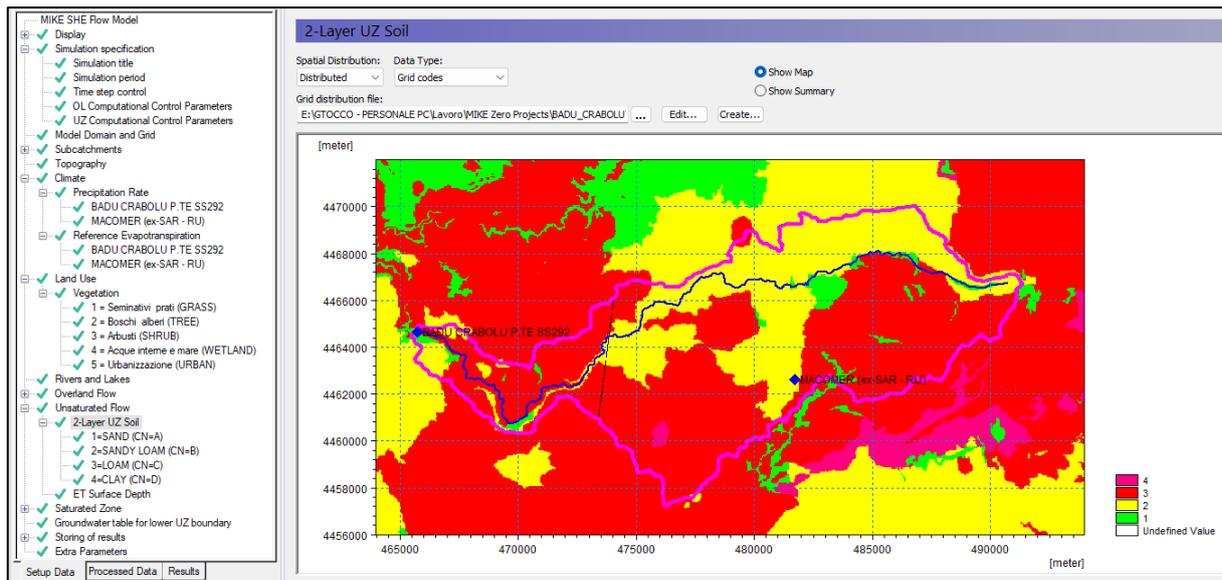


Figura 10. Mappa della caratterizzazione del suolo insaturo caricata su MIKE SHE.

In Figura 11 vengono riportati i valori dei parametri utilizzati per ciascun tipo di suolo.

|   |   |
|---|---|
| Profile ID: 1=SAND (CN=A)                     | Profile ID: 2=SANDY LOAM (CN=B)               |
| Water content at saturation: 0.25             | Water content at saturation: 0.25             |
| Water content at field capacity: 0.06         | Water content at field capacity: 0.15         |
| Water content at wilting point: 0.04          | Water content at wilting point: 0.05          |
| Saturated hydraulic conductivity: 3e-05 [m/s] | Saturated hydraulic conductivity: 3e-05 [m/s] |
| Soil Suction at wetting front: -0.2 [m]       | Soil Suction at wetting front: -0.2 [m]       |
| Profile ID: 3=LOAM (CN=C)                     | Profile ID: 4=CLAY (CN=D)                     |
| Water content at saturation: 0.25             | Water content at saturation: 0.48             |
| Water content at field capacity: 0.23         | Water content at field capacity: 0.2          |
| Water content at wilting point: 0.03          | Water content at wilting point: 0.16          |
| Saturated hydraulic conductivity: 3e-05 [m/s] | Saturated hydraulic conductivity: 2e-06 [m/s] |
| Soil Suction at wetting front: -0.2 [m]       | Soil Suction at wetting front: -0.2 [m]       |

Figura 11. Parametri relativi a ciascun tipo di suolo.

La parte idrodinamica è sviluppata all'interno del software integrato MIKE HYDRO, con lo sviluppo di un apposito modello di tipo *River* con attivazione del modulo di calcolo *Hydrodynamic* (HD). In Figura 12 è riportata la finestra di set-up del modello MIKE HYDRO River.

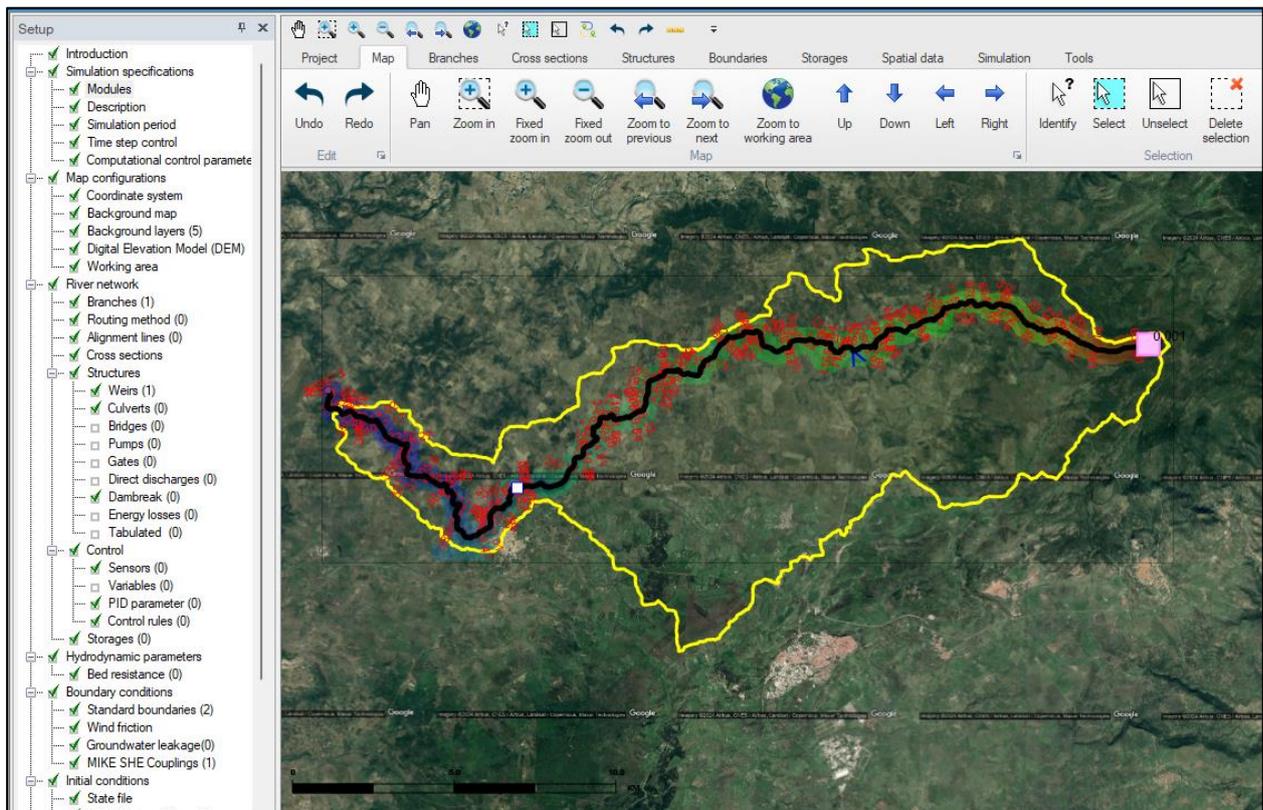


Figura 12. Finestra di set-up del modello MIKE HYDRO River.

Per la descrizione geometrica del reticolo idrografico in esame si è fatto riferimento alle sezioni topografiche ottenute estraendo le relative quote dal DEM LIDAR disponibile a risoluzione spaziale 1 m (Figura 13). Un'opzione all'interno del codice di calcolo permette il processamento diretto delle quote del grid relativo

al DEM, restituendo l'andamento planimetrico del corso d'acqua e le sezioni topografiche con l'interesse desiderato.

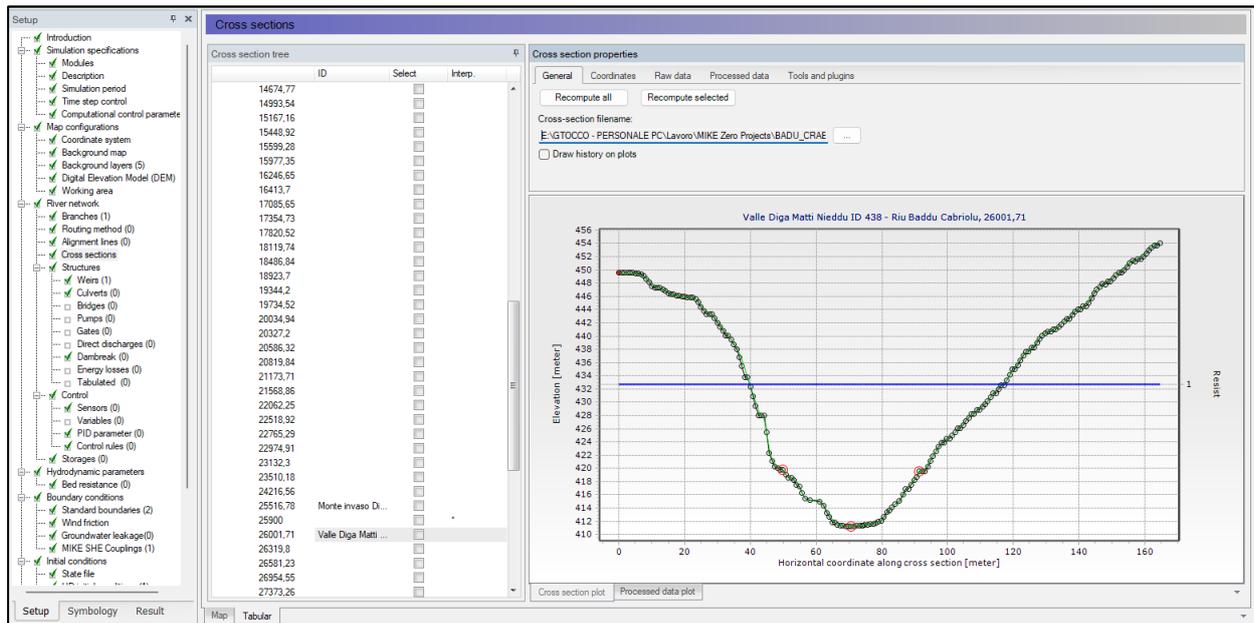


Figura 13. Interfaccia grafica del MIKE HYDRO River HD per la visualizzazione delle sezioni topografiche ("cross sections").

Relativamente alla sezione di controllo, la sezione topografica è stata invece implementata nel modello facendo riferimento al rilievo topografico di dettaglio riportato nella monografia della stazione pubblicata dal Servizio.

I risultati ottenibili dal modello idrodinamico MIKE HYDRO River HD sono molteplici e diversificati. Nel caso in esame l'implementazione del modello idrodinamico è stata funzionale a dettagliare una boundary del modello integrato del bacino implementato con il codice MIKE SHE.

#### 4. CALIBRAZIONE E VALIDAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO MIKE SHE ALLA SEZIONE RIU BADU CRABOLU A P.TE SS292

Il modello idrologico MIKE SHE è stato calibrato con i dati di precipitazione e temperatura osservati nel bacino dal 1 agosto 2013 al 1 agosto 2020 (7 anni), confrontando i livelli idrometrici restituiti dal modello con quelli osservati alla sezione di Riu Badu Crabolu a p.te SS292, stazione appartenente alla rete fiduciaria ARPAS, utilizzando i dati idrometrici a scala oraria ivi osservati.

Non essendo disponibile per tale sezione una scala delle portate validata, non è stato possibile operare un contestuale confronto in termini di portata. La serie temporale delle osservazioni idrometriche è stata caricata nel modello in formato *dfs0*.

Le analisi di confronto per la calibrazione del modello sono state effettuate utilizzando il coefficiente di Nash-Sutcliffe (NS):

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (h_m^t - h_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (h_o^t - \bar{h}_o)^2} \quad (1)$$

dove  $h_o^t$  è il livello osservato al tempo  $t$ ,  $h_m^t$  è il livello modellato al tempo  $t$ ,  $\bar{h}_o$  è il livello medio osservato per  $T$  intervalli temporali assunti pari all'ora.

Il coefficiente di Nash-Sutcliffe può variare tra  $-\infty$  e 1. Un coefficiente pari a 1 indica una perfetta corrispondenza tra valori modellati e osservati; un coefficiente pari a 0 indica che i valori modellati riproducono la media dei dati osservati, mentre un coefficiente minore di 0 si verifica quando la media dei valori osservati è un predittore migliore del modello, cioè quando la sommatoria delle differenze tra modello e osservazione (descritta dal numeratore), è maggiore della sommatoria delle differenze tra modello e media delle osservazioni (denominatore). Il modello si reputa sufficientemente calibrato se i valori di NS sono almeno compresi nell'intervallo 0.5-0.65; una buona calibrazione del modello è rappresentata da un  $NS > 0.65$ , mentre un'ottima calibrazione viene individuata da un  $NS > 0.8$ .

Al termine della fase di calibrazione, il modello ha restituito un valore di NS pari a 0.85.

Successivamente si è passati alla fase di validazione: il modello calibrato è stato lanciato utilizzando i dati di precipitazione e temperatura osservati nel bacino dal 1 agosto 2020 al 30 aprile 2024 (3 anni e 9 mesi circa); analogamente a quanto fatto in fase di calibrazione, i valori modellati sono stati posti a confronto con quelli osservati ed è stato ricalcolato il coefficiente NS.

In fase di validazione il modello ha restituito un valore di NS pari a 0.72 circa.

In Figura 14 sono riportati a confronto i livelli idrometrici osservati e modellati in fase di calibrazione e validazione per l'intero intervallo temporale di riferimento. In generale è possibile osservare che il modello è parso in grado di riprodurre correttamente i livelli, cogliendo il verificarsi pressoché della totalità degli eventi, sovrastimando alcuni colmi di piena e sottostimandone altri. Un dettaglio di ciò è evidenziato nelle immagini in Figura 15, in cui sono riportati a scala di evento i livelli idrometrici osservati e modellati per alcuni degli eventi di piena maggiormente significativi. Salvo alcune eccezioni, il modello mostra di riprodurre con buona precisione gli istanti, l'entità e la durata degli eventi di piena.

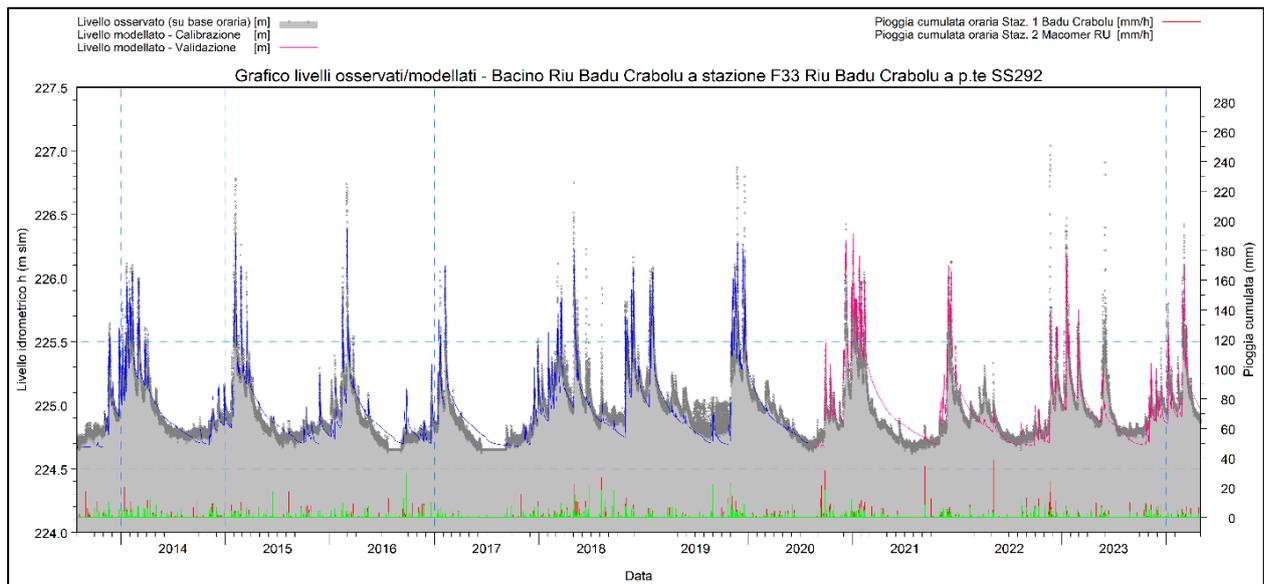


Figura 14. Livelli idrometrici modellati e osservati per la sezione di controllo per il periodo di calibrazione (01/08/2013 – 01/08/2020, linea blu,  $NS=0.850$ ) e validazione del modello (01/08/2020 – 30/04/2024, linea magenta,  $NS=0.716$ ). Sono riportati anche i valori di pioggia osservati e utilizzati in fase di modellazione.

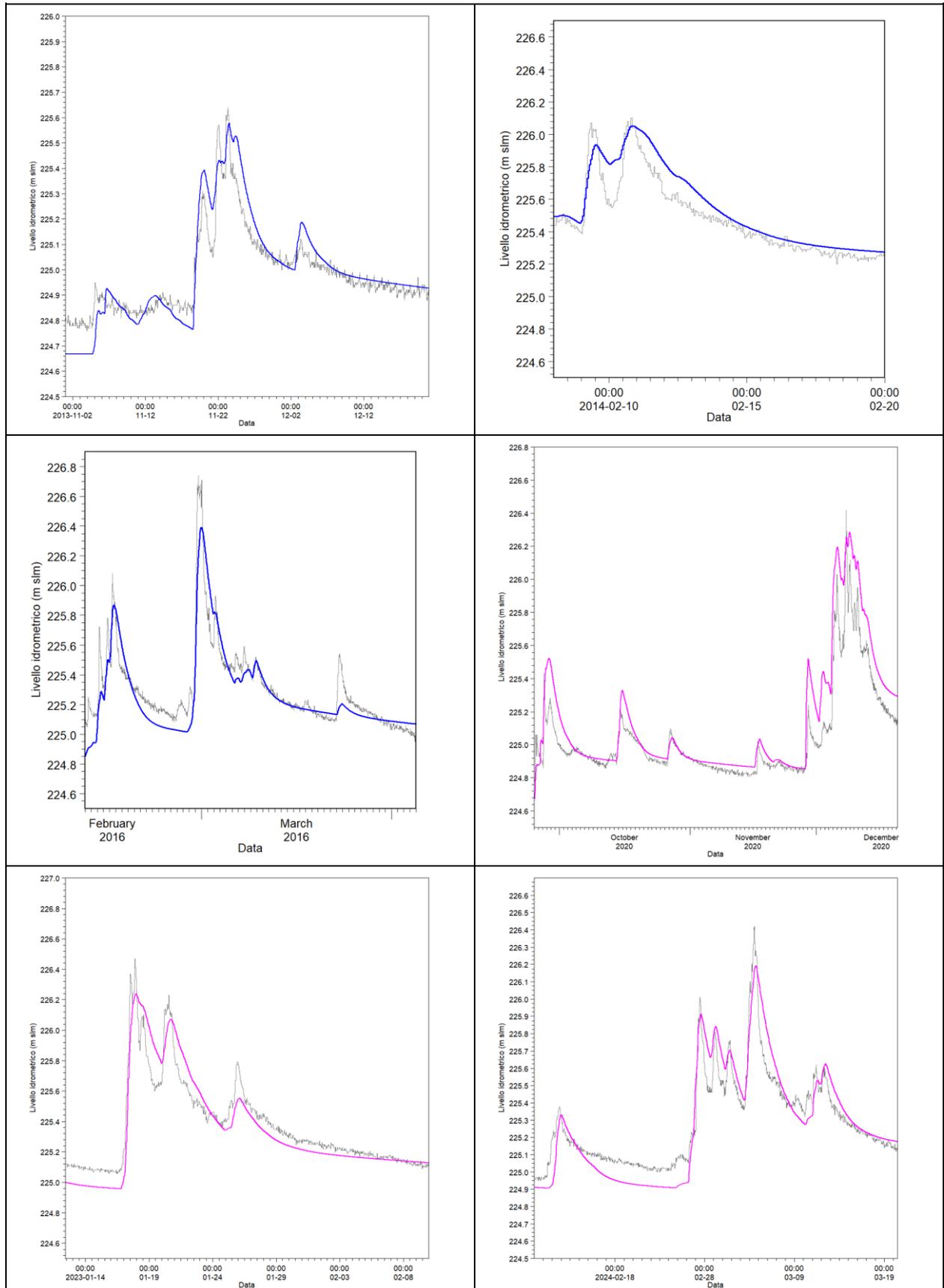


Figura 15. Analisi a scala di evento: confronto tra livelli idrometrici osservati (linea grigia) e modellati in fase di calibrazione (linea blu) e validazione (linea magenta) per alcuni degli eventi di piena maggiormente significativi.

In termini di portata, gli idrogrammi modellati sono riportati in Figura 16. Sebbene non disponibile una scala di deflusso aggiornata e validata, i valori ottenuti, e in particolare i valori di picco delle piene, sono parsi coerenti con valori di portata stimati riportati negli annali idrologici fino al 2013.

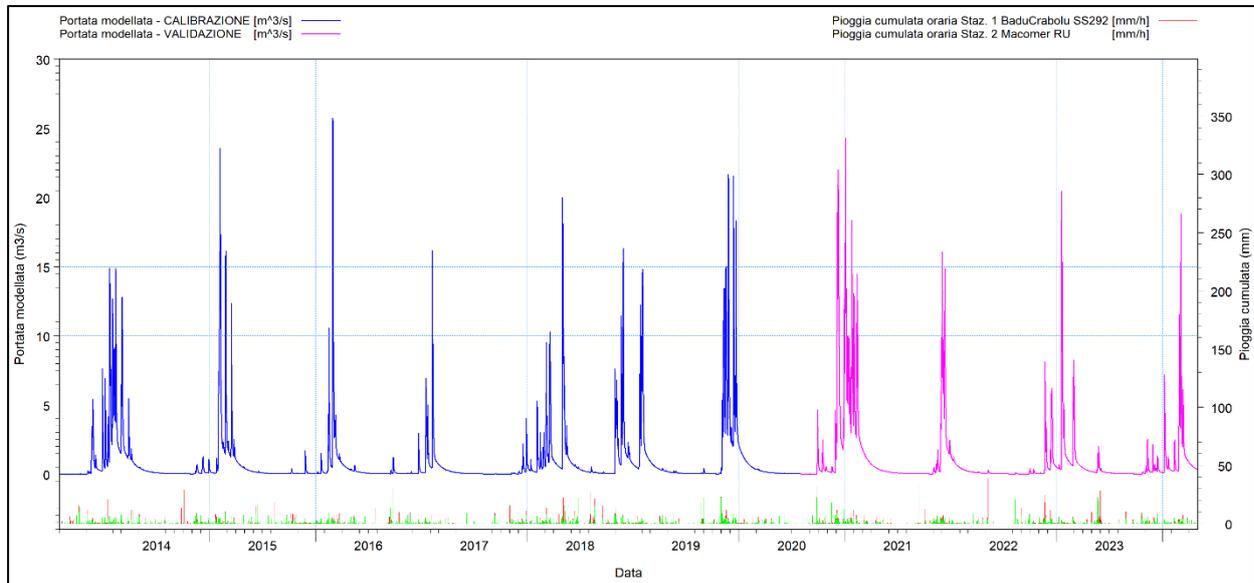


Figura 16. Grafico delle portate modellate.

## 5. CONCLUSIONI

La mancanza di una scala di deflusso validata aggiornata non ha permesso di effettuare una valutazione della bontà della modellazione a livello di portata, come sarebbe stato maggiormente opportuno, ma esclusivamente in relazione ai livelli idrometrici osservati, rendendo i risultati affetti da una dipendenza dalla corretta rappresentazione geometrica della sezione di controllo. Tuttavia i valori di portata modellati sono parsi coerenti con valori di portata stimati riportati negli annali idrologici fino al 2013.

La realizzazione di misure di portata e la futura implementazione di una scala di deflusso opportunamente validata permetterà di rivalutare e aggiornare il modello.