

# PIANIFICAZIONE E GESTIONE DI SERBATOI AD USO IRRIGUO: STIMA DEI VOLUMI DI RISORSA DISPONIBILI TRAMITE LA MODELLAZIONE AFFLUSSI-DEFLUSSI DI BACINI NON STRUMENTATI

Mattia Neri<sup>1</sup>, Alberto Montanari<sup>1</sup> & Elena Toth<sup>1</sup>

(1) Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM), Università di Bologna

## ASPETTI CHIAVE

- Stima dei volumi prelevabili in corrispondenza delle sezioni fluviali dove si ipotizza la collocazione dei serbatoi attraverso modellazione afflussi-deflussi
- Regionalizzazione dei parametri di modelli afflussi-deflussi per la simulazione in bacini non strumentati
- Probabilità di fallanza di piccoli serbatoi ad uso irriguo

## 1 OBIETTIVI DELLO STUDIO

La progettazione di strategie di adattamento delle infrastrutture idriche ai cambiamenti climatici non può prescindere dalla stima della disponibilità idrica storica e futura alle diverse fonti di approvvigionamento, al fine di garantirne la diversificazione e l'utilizzo sostenibile.

Le acque superficiali svolgono un ruolo fondamentale per l'agricoltura in molte parti del paese e sono, rispetto alle acque sotterranee, maggiormente suscettibili agli eventi estremi, come le siccità. Per incrementarne la disponibilità lungo tutto l'arco dell'anno, e in particolare durante la stagione irrigua, può essere necessario pianificare volumi di accumulo aggiuntivi. A tale scopo, i serbatoi di irrigazione di medie dimensioni (sfruttabili da più di una singola azienda agricola) rappresentano una preziosa opportunità che molti consorzi di irrigazione in Emilia-Romagna stanno implementando o prendendo in considerazione.

La pianificazione della posizione e dimensione di tali bacini di accumulo dipende, oltre che da informazioni su quantità e stagionalità della domanda irrigua, dalla stima della portata prelevabile dal corso d'acqua per il loro riempimento, una volta soddisfatti i vincoli sui deflussi minimi vitali. Purtroppo, le serie storiche di osservazioni di portata nei corsi d'acqua, in particolare per i bacini idrografici più piccoli, sono raramente disponibili o spesso non sufficientemente estese. Di conseguenza, nella maggioranza dei casi pratici, risulta necessario implementare una procedura per la stima delle serie storiche di portata in corrispondenza delle sezioni fluviali dove si ipotizza la collocazione dei serbatoi, basandosi su tecniche di regionalizzazione.

Considerando la rilevanza delle informazioni sul regime temporale delle portate fluviali nei tratti non strumentati, in questo studio si adotta un approccio di tipo "process-based", basato quindi sulla modellazione afflussi-deflussi, che permette di simulare l'intero idrogramma. Un approccio di questo tipo permetterebbe inoltre, se si forzassero i modelli con scenari climatici futuri invece che con le serie meteorologiche storiche, di valutare anche la variazione della risposta del bacino e del regime dei deflussi nei decenni futuri.

La modellazione afflussi-deflussi in bacini non strumentati prevede la regionalizzazione dei parametri del modello (e.g. Yang *et al.*, 2018), che vengono trasferiti da uno o più bacini strumentati, detti "donatori" e assunti idrologicamente simili al bacino relativo alla sezione non strumentata di interesse (bacino target).

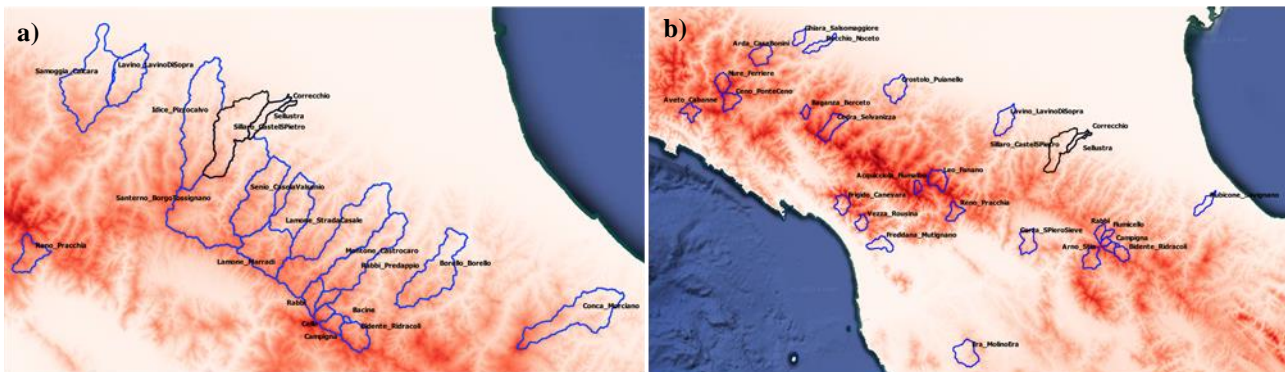
Il caso di studio scelto come "proof-of-concept" fa riferimento a tre piccoli bacini idrografici non strumentati dell'Appennino emiliano-romagnolo, la cui sezione di chiusura è stata ritenuta idonea alla realizzazione di un vaso di piccole dimensioni sulla base di indagini preliminari di fattibilità tecnica. La procedura include una fase preliminare di individuazione dei bacini idrografici strumentati (donatori) nell'area di studio, ritenuti idrologicamente simili ai bacini target. Per tali bacini vengono raccolti e validati i dati giornalieri di portata disponibili e si ricavano le serie storiche di forzanti meteorologiche. Successivamente, un modello afflussi-deflussi a simulazione giornaliera in continuo viene calibrato e validato per tutti i bacini idrografici strumentati. Infine, si testa una consolidata tecnica di regionalizzazione dei parametri in leave-one-out cross-validazione, ottimizzandone la configurazione e verificandone l'efficacia, per poi applicarla ai bacini afferenti alle sezioni non strumentate di interesse, simulandone la serie storica delle portate. Le simulazioni ottenute consentono di stimare i volumi di risorsa potenzialmente prelevabili e stoccabili nei serbatoi durante

i mesi piovosi precedenti l'inizio della stagione irrigua. Una volta definita la capacità del potenziale serbatoio, è possibile calcolare la probabilità di fallanza del sistema, intesa come la probabilità che l'invaso non venga riempito prima dell'inizio della stagione irrigua.

## 2 CENSIMENTO DELLE MISURE IDROMETRICHE DISPONIBILI E IDENTIFICAZIONE DEL TRAINING SET DI BACINI STRUMENTATI

La prima fase della procedura prevede l'identificazione delle sezioni idrometriche dove sono disponibili misure di portata giornaliera sul territorio e la messa a punto del training set di bacini dal quale estrarre l'informazione idrologica di interesse (in questo caso i parametri del modello afflussi-deflussi).

Il censimento delle misure idrometriche giornaliere disponibili è stato eseguito sull'intero territorio montano e pedemontano di entrambi i versanti dell'appennino tosco-emiliano. Il censimento ha portato all'identificazione di oltre 150 bacini strumentati nell'area sopra citata. Al fine di identificare un training set di bacini idrologicamente simili ai target, è stato poi necessario effettuare una prima ipotesi sulle principali caratteristiche climatiche o geo-morfologiche che guidano la similarità della risposta idrologica sul territorio, che permetta di selezionare un sottoinsieme di bacini dall'intero database. In letteratura è noto come una delle caratteristiche che influenza maggiormente la risposta idrologica è l'area drenata dalla sezione fluviale. D'altro canto, molti studi nel campo della regionalizzazione hanno dimostrato come la prossimità spaziale sia, per quanto semplice, una efficace misura di similarità in diverse aree geografiche (vedasi per esempio *Neri et al.*, 2020; *Oudin et al.*, 2008; *Parajka et al.*, 2005): l'uso di tale misura si basa infatti sull'assunzione che le caratteristiche climatiche, ma anche geo-morfologiche, dei bacini varino uniformemente nello spazio. In questo studio si sono ipotizzati due training set di bacini, scelti sulla base di tali caratteristiche: training set 1 (Figura 1a) nel quale, basandosi sul principio della prossimità spaziale, si considerano i bacini strumentati disponibili nell'area geografica che comprende la Romagna e il bacino del fiume Reno; training set 2 (Figura 1b) nel quale, considerando le modeste dimensioni dei bacini oggetto di studio (target), si considerano i bacini aventi area drenata inferiore o uguale a 100 km<sup>2</sup>. Tutte le analisi descritte sono state ripetute per entrambi i set.



**Figura 1.** In blu il training set 1 (a) e il training set 2 (b) di bacini (strumentati) individuati sull'area di studio, all'interno del quale vengono scelti i potenziali donatori; in nero i tre bacini target (non strumentati)

Si è poi proceduto alla stima delle forzanti meteorologiche in corrispondenza dei bacini strumentati. In particolare, l'applicazione della modellistica afflussi-deflussi utilizzata in questo studio prevede la stima di precipitazioni e temperature medie areali sui bacini a scala temporale giornaliera. A tal scopo si è scelto di utilizzare il dataset E-OBS (*Cornes et al.*, 2018), reso disponibile nell'ambito progetto ECA&D (European Climate Assessment & Datasets). E-OBS è un dataset grigliato a copertura europea prodotto dall'interpolazione di misure meteorologiche osservate al suolo a scala temporale giornaliera, incluse precipitazione e temperatura. La scala spaziale è 0.1° x 0.1° (circa 11 km). L'affidabilità delle stime E-OBS varia sensibilmente nello spazio, principalmente in funzione della densità di misure al suolo utilizzate nella procedura di interpolazione spaziale, anch'essa estremamente variabile sul territorio europeo. Per quanto riguarda la regione di studio, la disponibilità misure termo-pluviometriche al suolo utilizzate per il grigliato è una delle migliori in Italia, e l'affidabilità delle stime E-OBS è stata verificata in occasione di precedenti esperienze del gruppo di ricerca (*Sarigil et al.* 2024).

### 3 MODELLAZIONE AFFLUSSI-DEFLUSSI SUI BACINI STRUMENTATI DEI TRAINING SET

Il modello afflussi-deflussi scelto per la analisi è il TUV model (Technischen Universität Wien model, *Viglione and Parajka, 2018*), basato sul noto modello HBV (*Bergström, 1976*). Il TUV è un modello concettuale e concentrato per la simulazione in continuo dei deflussi, a scala giornaliera; è governato da 15 parametri e include un modulo per la simulazione dell'accumulo e dello scioglimento nivale, un modulo di simulazione dell'umidità del suolo e la generazione del deflusso e un modulo per la propagazione dello stesso.

I parametri modello TUV vengono calibrati separatamente per ciascun bacino servendosi dell'algoritmo di ottimizzazione automatico Dynamically Dimensioned Search (DDS, *Tolson and Shoemaker, 2007*). Considerando gli scopi del lavoro, la funzione obiettivo scelta è l'Efficienza di Kling-Gupta fra portate giornaliere osservate e simulate nei mesi da ottobre ad aprile, per i quali si ipotizza l'accumulo della risorsa all'interno dei bacini in vista della stagione irrigua.

### 4 REGIONALIZZAZIONE DEI PARAMETRI DEL MODELLO AFFLUSSI-DEFLUSSI

Una volta calibrato e validato il modello afflussi-deflussi per i bacini dei training set, si procede con la messa a punto del framework di regionalizzazione dei parametri. Studi comparativi condotti in diverse regioni del mondo hanno dimostrato come i cosiddetti metodi "distance-based" risultino spesso superiori in termini di accuratezza (vd. *Cislaghi et al., 2019; Oudin et al., 2008; Parajka et al., 2005; Reichl et al., 2009; Yang et al., 2018*). Tali metodi si basano sull'identificazione di uno o più bacini idrografici strumentati (denominati donatori) idrologicamente simili al bacino target (non strumentato), e sul trasferimento del set dei parametri calibrati su tali donatori al target stesso. All'interno di questa classe di approcci, le tecniche si differenziano per due aspetti: i) la definizione di similarità idrologica e ii) la procedura di trasferimento dei parametri dai bacini donatori al bacino non misurato. La definizione di similarità viene quindi utilizzata per selezionare i bacini donatori e costituisce il fondamento di tutti i metodi distance-based.

Per il presente lavoro si è deciso di utilizzare un approccio distance-based consolidato in letteratura (vd. per es. *McIntyre et al., 2005; Parajka et al., 2005; Oudin et al., 2008; Neri et al., 2020*) che si articola nei seguenti passaggi: i) si selezionano gli  $n$  bacini donatori che risultano più simili al target tenendo conto di un set di attributi climatici e geo-morfologici, esprimendo la similarità fra i bacini con un indice che rappresenta la distanza di due bacini nello spazio degli attributi; ii) gli interi set dei parametri dei bacini donatori sono trasferiti al bacino target; iii) il modello viene applicato al bacino target con ciascuno dei set dei parametri dei bacini donatori ottenendo  $n$  simulazioni ed infine iv) la simulazione regionalizzata è ottenuta come la media degli idrogrammi simulati con ciascuno dei set dei parametri. L'approccio prevede quindi sia la definizione del numero di bacini donatori  $n$  sia l'ottimizzazione della misura di similarità (i.e. la scelta degli attributi). Per ottimizzare la configurazione del metodo e allo stesso tempo valutarne le performance, la procedura di regionalizzazione è preliminarmente testata in "leave-one-out cross-validation".

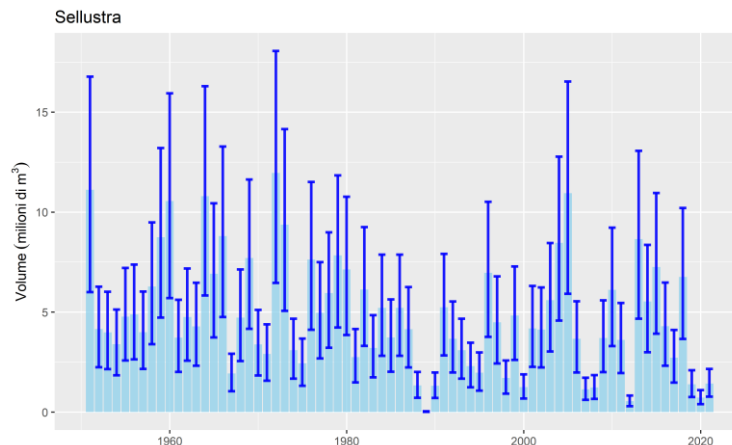
La procedura è testata e validata su entrambi i training set. Le performance di regionalizzazione migliori sono ottenute per il training set 1, che viene quindi utilizzato per applicare la metodologia ai tre bacini non strumentati, simulandone i deflussi giornalieri per l'intero periodo storico di riferimento, per il quale si sono stimate le forzanti meteorologiche medie areali sempre tramite E-OBS.

### 5 STIMA DEI VOLUMI DI DEFLUSSO E VALUTAZIONE DELL'ADEGUATEZZA DEGLI INVASI IPOTIZZATI

Le simulazioni di portata ottenute attraverso la procedura di regionalizzazione consentono, una volta sottratti i deflussi minimi vitali, di stimare i volumi di risorsa prelevabili dalle sezioni analizzate e stoccabili negli invasi previsti durante i mesi piovosi (da ottobre ad aprile) che precedono l'inizio della stagione irrigua, trascurando per semplicità il processo di evaporazione dai serbatoi, ritenuto trascurabile durante tali mesi. Inoltre, ai valori dei volumi di deflusso stagionali, viene associato un intervallo di confidenza valutando l'incertezza della stima. La scelta del metodo di valutazione d'incertezza (non riportato qui per brevità) è stata effettuata con l'utilizzo di una procedura di tipo "data-based" (e.g. *Montanari, 2007*), che si basa sull'analisi sperimentale degli errori di simulazione, introducendo assunzioni che ne permettano la stima mediante tecniche statistiche e stimandone quindi la distribuzione di probabilità, che si assume essere la stessa per tutti

i bacini considerati. In Figura 2 si riporta un esempio dei risultati ottenuti per una delle sezioni fluviali di interesse: le barre azzurre fanno riferimento ai volumi stagionali di risorsa che sarebbero stati prelevabili sul periodo storico di riferimento, mentre l'intervallo blu ne quantifica l'incertezza.

Come anticipato in precedenza, gli studi preliminari di fattibilità hanno permesso di individuare le volumetrie impiegate per l'accumulo della risorsa, in corrispondenza delle sezioni target. Una volta definita la capacità del potenziale serbatoio, i volumi stagionali prelevabili vengono utilizzati per calcolare la probabilità di fallanza, definita come il numero di anni in cui le portate prelevabili non permetterebbero il riempimento totale del serbatoio entro la fine di aprile, in relazione al numero totale di anni nel periodo di osservazione (1951-2022). Tale probabilità di fallanza e il corrispondente deficit idrico (volume di risorsa "mancante" in ciascun anno) sono fondamentali per valutare i potenziali danni alle colture o per pianificare e individuare potenziali fonti idriche alternative ad integrazione dei deficit.



**Figura 2.** Volumi idrici teorici potenzialmente disponibili nel periodo ottobre-aprile al netto del DMV e rispettivi intervalli di incertezza, in una delle sezioni fluviali target.

*Lo studio è condotto nell'ambito del Partenariato Esteso RETURN, finanziato dall'Unione Europea, NextGenerationEU (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza-PNRR, Missione 4 Componente 2, Investimento 1.3-D.D. 1243 2/8/2022, PE0000005).*

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Bergström, S. Development and Application of a Conceptual Runoff Model for Scandinavian Catchments, A: Bulletin series. Department of Water Resources Engineering, 1976, Lund Institute of Technology, University of Lund.
- Cislaghi, A., Masseroni, D., Massari, C., Camici, S. & Brocca, L. Combining a rainfall-runoff model and a regionalization approach for flood and water resource assessment in the western Po Valley, Italy. *Hydrol. Sci. J.*, 2019, 65, 348–370.
- Cornes, R. C., van der Schrier, G., van den Besselaar, E. J. & Jones, P. D. An ensemble version of the E-OBS temperature and precipitation data sets, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(17), 9391-9409.
- McIntyre, N., Lee, H., Wheat, H., Young, A. & Wagener, T. Ensemble predictions of runoff in ungauged catchments. *Water Resour. Res.*, 2005, 41, 1–14.
- Montanari, A. What do we mean by 'uncertainty'? The need for a consistent wording about uncertainty assessment in hydrology. *Hydrological Processes.*, 2007, 21, 841 - 845.
- Neri, M., Parajka, J. & Toth, E. Importance of the informative content in the study area when regionalising rainfall-runoff model parameters: the role of nested catchments and gauging station density, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2020, 24, 5149–5171.
- Oudin, L., Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C. & Le Moine, N. Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments, *Water Resour. Res.*, 2008 44, 48–54.
- Parajka, J., Merz, R. & Blöschl, G. A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2005, 9, 157–171.
- Reichl, J.P.C., Western, A.W., McIntyre, N.R. & Chiew, F.H.S. Optimization of a similarity measure for estimating ungauged streamflow. *Water Resour. Res.*, 2009, 45, 1–15.
- Sarigil, G., Neri, M., & Toth, E. An indirect validation of gridded precipitation products in Northern Italy through rainfall-runoff model application, accettato per la pubblicazione fra gli Atti del XXXIX Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Parma 15-18 settembre 2024.
- Tolson, B.A. & Shoemaker, C.A. Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. *Water Resour. Res.*, 2007, 43.
- Viglione, A., Parajka, J., TUWmodel: Lumped Hydrological Model for Education Purposes, 2018.
- Yang, X., Magnusson, J., Rizzi, J. & Xu, C.Y. Runoff prediction in ungauged catchments in Norway: comparison of regionalization approaches. *Hydrol. Res.*, 2018, 49, 487–505.