

LE RISORSE IDRICHE E I CAMBIAMENTI CLIMATICI: LA SORGENTE NOSSANA

Andrea Citrini¹, Corrado Camera¹, Giovanni Pietro Beretta¹, Guido Pezzera²

¹ *Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Scienze della Terra “A. Desio”, Milano*

² *Geologo freelance*

INTRODUZIONE

Le sorgenti carsiche svolgono un ruolo fondamentale per l’approvvigionamento idrico umano a larga scala, sia dal punto di vista strategico sia dal punto di vista delle relazioni socio – economiche (Bakalowicz, 2005). Quantificare e prevedere le portate delle sorgenti è necessario per gestire l’approvvigionamento idrico nelle aree carsiche, specialmente a fronte degli effetti relativi al cambiamento climatico. Infatti, secondo l’*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2014), la temperatura media è destinata a crescere a livello globale lungo tutto il XXI secolo con conseguente aumento delle ondate di calore, dei periodi siccitosi e degli eventi di precipitazione intensa in molte regioni del mondo. La previsione della risposta a questi cambiamenti dei sistemi idrogeologici, soprattutto se sfruttati per approvvigionamento potabile, diventa di vitale importanza.

L’applicazione di modelli di simulazione del flusso sotterraneo in ambiente carsico risulta problematica (Scanlon et al., 2003; Worthington, 2009) a causa della dualità del sistema, formato da una matrice rocciosa fratturata e da un reticolo di condotti ampiamente articolato (Bakalowicz, 2005; Ford e Williams, 2007). Data la doppia natura del sistema, è infatti molto difficile definire un modello concettuale affidabile. Tuttavia, se l’obiettivo principale dello studio riguarda la risposta agli eventi meteorici, si possono utilizzare dei modelli a “parametri concentrati” (lumped parameter) che legano l’apporto di precipitazione alla portata in uscita tramite equazioni empiriche. Tali approcci rappresentano una semplificazione molto spinta del sistema naturale, ma portano con loro notevoli vantaggi, come per esempio la minore richiesta di dati e il minore dispendio computazionale rispetto ai modelli distribuiti e fisicamente basati. Un esempio di un modello a parametri concentrati è Rainfall-Response Aquifer and Watershed Flow Model (RRAWFLOW, Long and Mahler, 2013; Long, 2015), che è un codice che consente di simulare la risposta delle acque sotterranee di un acquifero carsico avendo come dati di input i valori di precipitazione e di temperatura (Pinault et al., 2001; Simoni et al., 2011).

I modelli di circolazione atmosferica su scala globale (GCM) e regionale (RCM) forniscono previsioni riguardanti scenari futuri di cambiamento climatico a bassa risoluzione (10-100 km) a partire dalla definizione di condizioni variabili, come i tassi di crescita delle emissioni di gas serra nel tempo. Le serie temporali di variabili climatiche prodotte da tali modelli possono successivamente essere adattate su scala locale (risoluzione puntuale) con il metodo del *downscaling statistico*. Lo scopo di questa tecnica è fornire un quadro predittivo delle condizioni locali attraverso relazioni statistiche con gli aspetti climatici regionali (in particolare temperature e precipitazioni), mantenendo l’ipotesi che la circolazione atmosferica su larga scala rimanga costante su scala locale (Benestad et al., 2008).

Questo studio si prefigge due obiettivi principali: simulare, attraverso un modello a parametri concentrati (RRAWFLOW), la risposta della sorgente carsica Nossana alle condizioni climatiche attuali e valutare gli effetti sulle sue portate dei cambiamenti climatici attesi fino al 2100, definiti tramite *downscaling statistico* di Modelli Regionali Climatici (RCM).

L'AREA DI STUDIO

La sorgente Nossana è una delle sorgenti più importanti del nord Italia in termini di portata. È situata nella media val Seriana, nelle Prealpi Bergamasche, e più precisamente tra i comuni di Parre e Premolo. Il suo studiatissimo bacino idrogeologico copre un'area di circa 80 km² ed è caratterizzato da elevate differenze di altitudine. Il punto più alto è la vetta del Pizzo Arera a 2512 m s.l.m., mentre la quota di sbocco si trova a 474 m s.l.m. (Figura 1). La sorgente è gestita da UniAcque S.p.A. e alimenta il principale sistema di distribuzione idrica locale servendo più di 300 mila persone. La sua portata annuale media è di 3.77 m³/s, con un'alta variabilità dei suoi estremi (da 0.55 a 18.00 m³/s). Per soddisfare il fabbisogno idrico pubblico, la sorgente deve assicurare una portata di 0.50 m³/s; al di sotto di questa soglia, il sistema di distribuzione deve ricorrere a differenti risorse, che, normalmente, sono più costose e difficili da gestire.

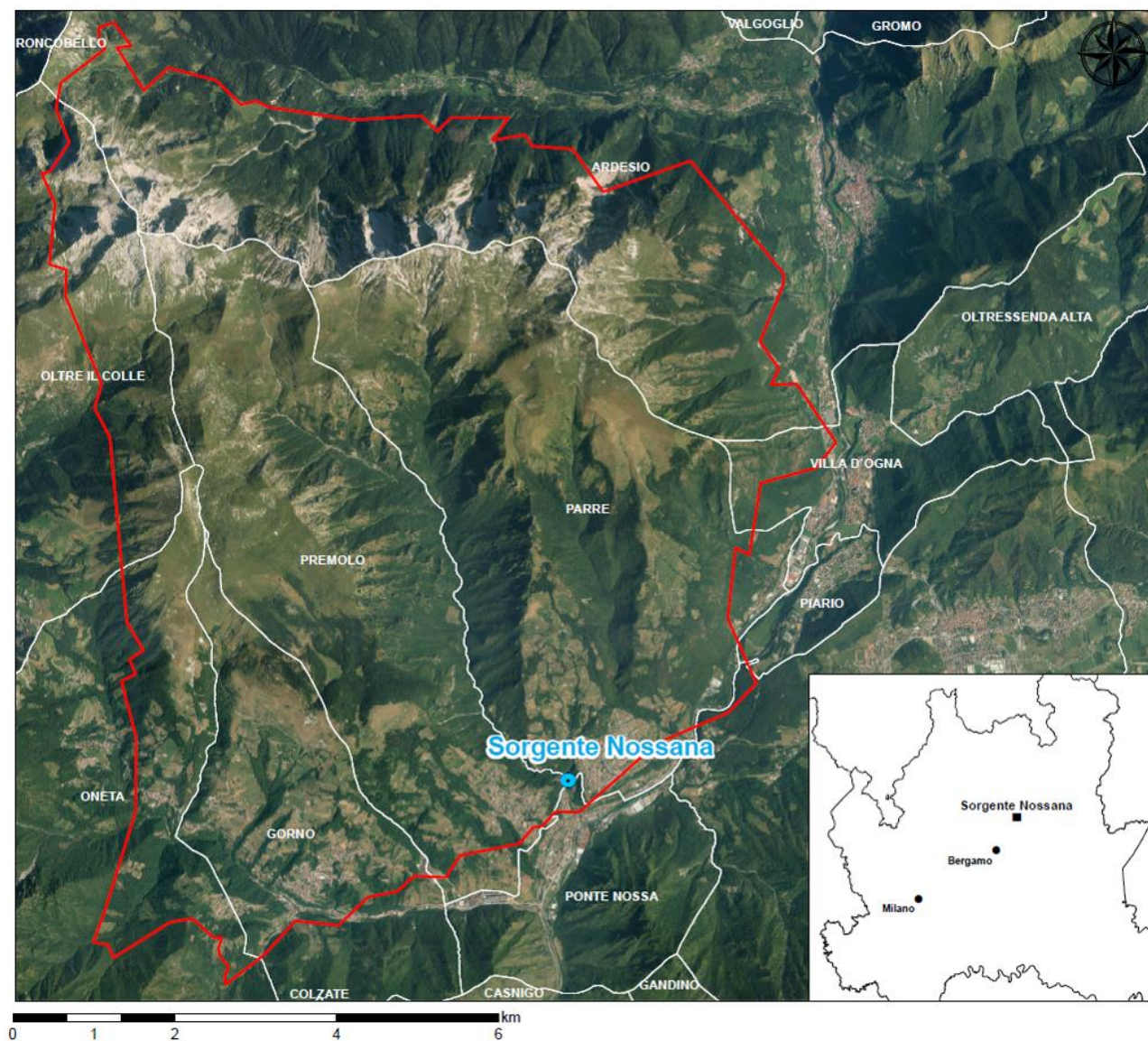


Figura 1 - Area di studio e bacino idrogeologico della Sorgente Nossana.

L'acquifero è impostato interamente in rocce calcaree e calcareo – silicoclastiche del medio – tardo Triassico, intensamente carsificate (Calccare di Esino). Il comportamento dell'acquifero è assimilabile a quello di un sistema a dreno dominante (Vigna & Banzato, 2015): alta permeabilità, alte velocità di deflusso soprattutto nei condotti e assenza/presenza parziale di una zona freatica.

DATI DISPONIBILI

La base di dati utilizzata come input in questo studio è composta da:

- serie giornaliera di dati di portata in m³/s della sorgente Nossana dal 1998 al 2018 (UniAcque S.p.A.);
- serie giornaliere di dati di precipitazione (mm) e temperature (°C) dal 1998 al 2018 (ARPA Lombardia);
- serie giornaliere di dati di precipitazione e temperatura dal 1950 al 2100 di 9 modelli climatici generali (progetto *CORDEX Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* - <https://www.cordex.org>).

I modelli previsionali considerano tre diversi scenari di evoluzione climatica in quanto dipendono dalle proiezioni riguardanti le azioni che si intraprenderanno per diminuire le emissioni di gas serra (principalmente CO₂). Meno si cambia dal punto di vista delle strategie politico-economiche attuali, maggiore sarà l'impatto dei cambiamenti climatici. Gli scenari considerati sono quelli definiti dal *Intergovernmental Panel on Climate Change* all'interno del *Fifth Assessment Report* (IPCC, 2014). Essi sono definiti come *Representative Concentration Pathways* (RCPs) e valutano gli impatti dei cambiamenti climatici sui sistemi economici, sull'ambiente e sulla popolazione globale.

Sono stati considerati 3 modelli climatici per ogni scenario di emissione, per un totale di 9 combinazioni modello-scenario di emissione (Figura 2):

- Primo scenario, RCP 2.6: le emissioni saranno dimezzate a partire dall'anno 2050;
- Secondo scenario, RCP 4.5: le emissioni saranno dimezzate a partire dal 2080;
- Terzo scenario, RCP 8.5: le emissioni continueranno ad aumentare con un tasso di crescita pari a quello dei giorni nostri.

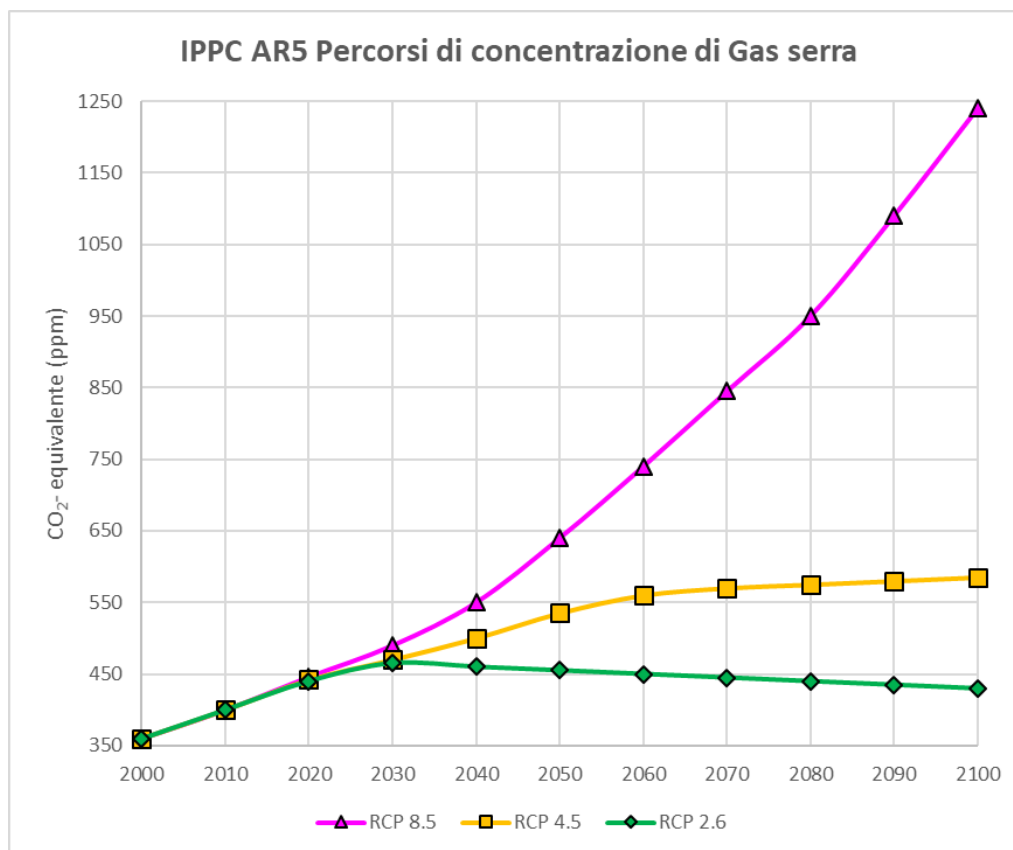


Figura 2 – Percorsi di concentrazione di gas serra secondo il 5° report di valutazione dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

METODOLOGIA

La **prima fase** di questo studio è stata quella di simulare il comportamento della sorgente Nossana nel periodo osservato (1998 – 2018). Il metodo classico nello studio del comportamento delle sorgenti si focalizza solamente sulle curve di recessione¹ dell'idrogramma, ma per comprendere complessivamente il comportamento di questo fenomeno occorre porre l'attenzione anche sulle curve ascendenti dell'idrogramma. RRAWFLOW permette di simulare l'intero idrogramma. Il codice numerico utilizza delle curve teoriche che permettono di riprodurre le curve reali di portata così che ad ogni evento di precipitazione (input) corrisponde una risposta della sorgente (output) sotto forma di picco di portata (Figura 3).

Si è così effettuata una simulazione dei dati di portata dal 1998 al 2018 considerando i primi 12 anni (1998 – 2011) come periodo di calibrazione e i successivi di validazione. Il software restituisce inoltre un coefficiente di efficienza (o di Nash & Sutcliffe (1970)) in grado di quantificare quanto le curve simulate si avvicinino alle condizioni reali. Questo coefficiente varia tra $-\infty$ e 1, dove con 1 si indica la perfetta sovrapposizione della curva simulata con quella reale. I risultati ottenuti di 0.50 e 0.51, rispettivamente per il periodo di calibrazione e validazione, avvalorano il modello garantendo una buona robustezza e predittività dei risultati.

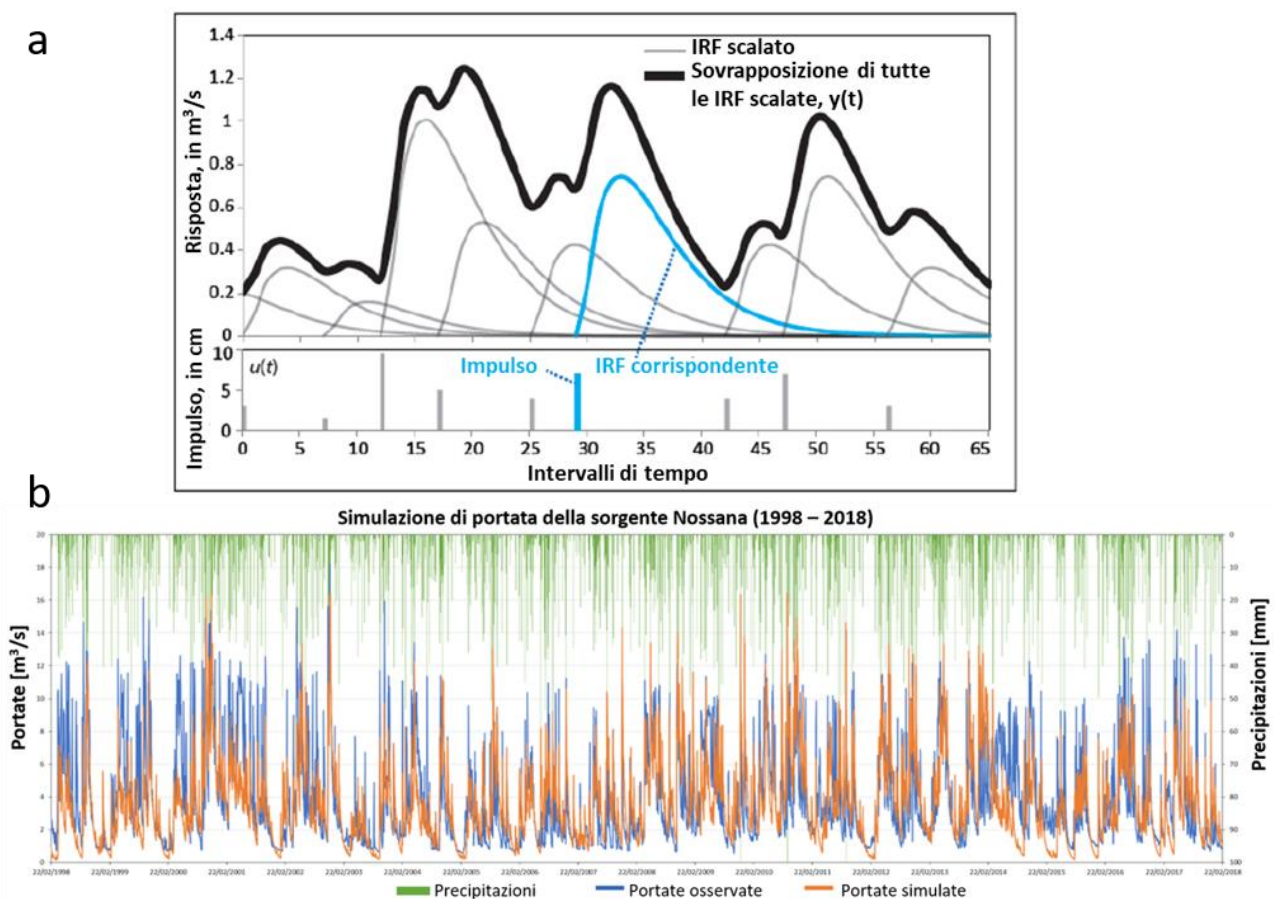


Figura 3 - a) Metodologia di calcolo della risposta della sorgente (output) alle precipitazioni (input). b) Simulazione di portata della sorgente Nossana utilizzando i dati di precipitazione e temperatura dal 1998 al 2018.

La **seconda fase** ha previsto l'elaborazione dei dati di precipitazione e di temperatura dei modelli climatici fino all'anno 2100, per ottenere i dati di input delle simulazioni future. Si è considerata una climatologia omogenea per intervalli di 20 anni, quindi il lasso di tempo futuro è stato diviso in 4 periodi: 2021- 2040, 2041 – 2060, 2061 – 2080 e 2081 – 2100. Il confronto tra le statistiche di ciascun modello tra il periodo di controllo

¹ **Curve di recessione (o curve di esaurimento):** definito "idrogramma" il grafico che mostra le variazioni nel tempo delle portate di una sorgente (ascisse: tempo espresso in giorni; ordinate: portata espressa in m^3/s), si intende curva di recessione quella curva asintotica all'asse dei tempi che descrive quel periodo dell'anno in cui le portate sorgive decrescono pressoché indisturbate per l'assenza o per trascurabilità della ricarica attiva dovuta all'apporto delle acque di precipitazione.

e i periodi futuri ha permesso di generare coefficienti in grado di dare una stima del cambiamento del trend climatico nel tempo (*change factors*), validi anche a scala locale. Tali coefficienti sono stati quindi applicati ai dati osservati e sono state così ottenute 9 serie temporali di dati (una derivante da ciascuna combinazione modello-scenario di emissione) per i 4 periodi ventennali futuri.

La **terza ed ultima fase** è stata quella di utilizzare le nuove serie giornaliere di precipitazioni e temperature come dati di input in RRAWFLOW per ottenere le simulazioni delle portate della sorgente Nossana fino al 2100. Sono state effettuate 9 simulazioni, una per ogni combinazione modello-scenario di emissione (Figura 4). Le simulazioni di portate ottenute sono state analizzate focalizzandosi sull'apporto idrico fornito dalle portate medie e sul numero di giorni al di sotto della soglia di $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$.

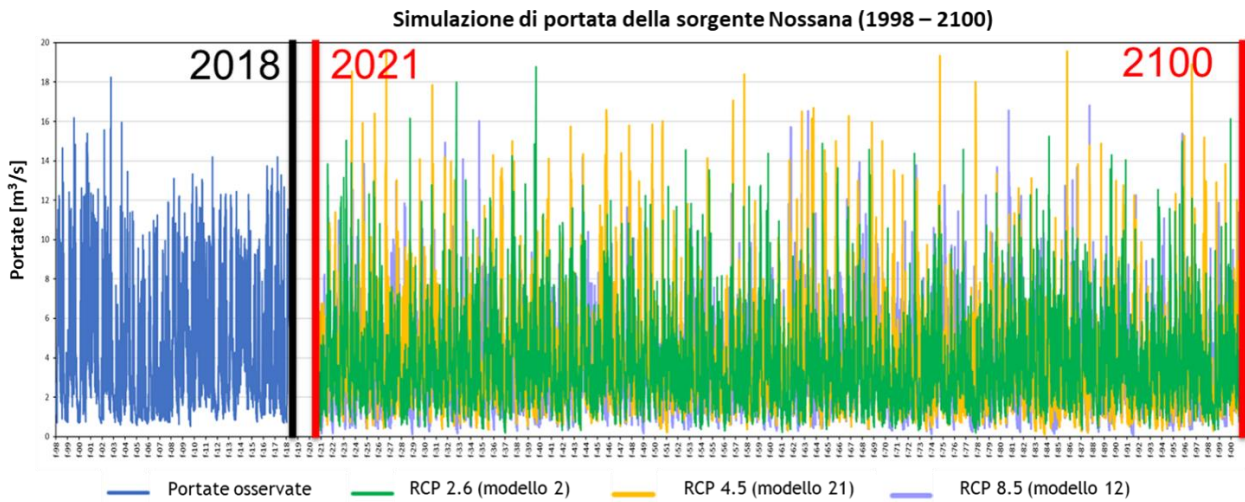


Figura 4 – Esempi di simulazione di portate effettuate utilizzando come dati di input quelli dei modelli climatici proiettati fino all'anno 2100. Nella figura sono mostrati i risultati di 3 dei 9 modelli considerati, uno per ognuno dei tre scenari di severità d'emissione di gas serra considerato.

RISULTATI

Analizzando i dati per ogni scenario si può osservare come la media delle portate subisca un decremento consistente (Figura 5). Inoltre, con l'incremento di emissioni di gas serra, le portate subiscono variazioni con intervalli maggiori. Questo significa che, allontanandosi dalle condizioni reali, le incertezze aumentano.

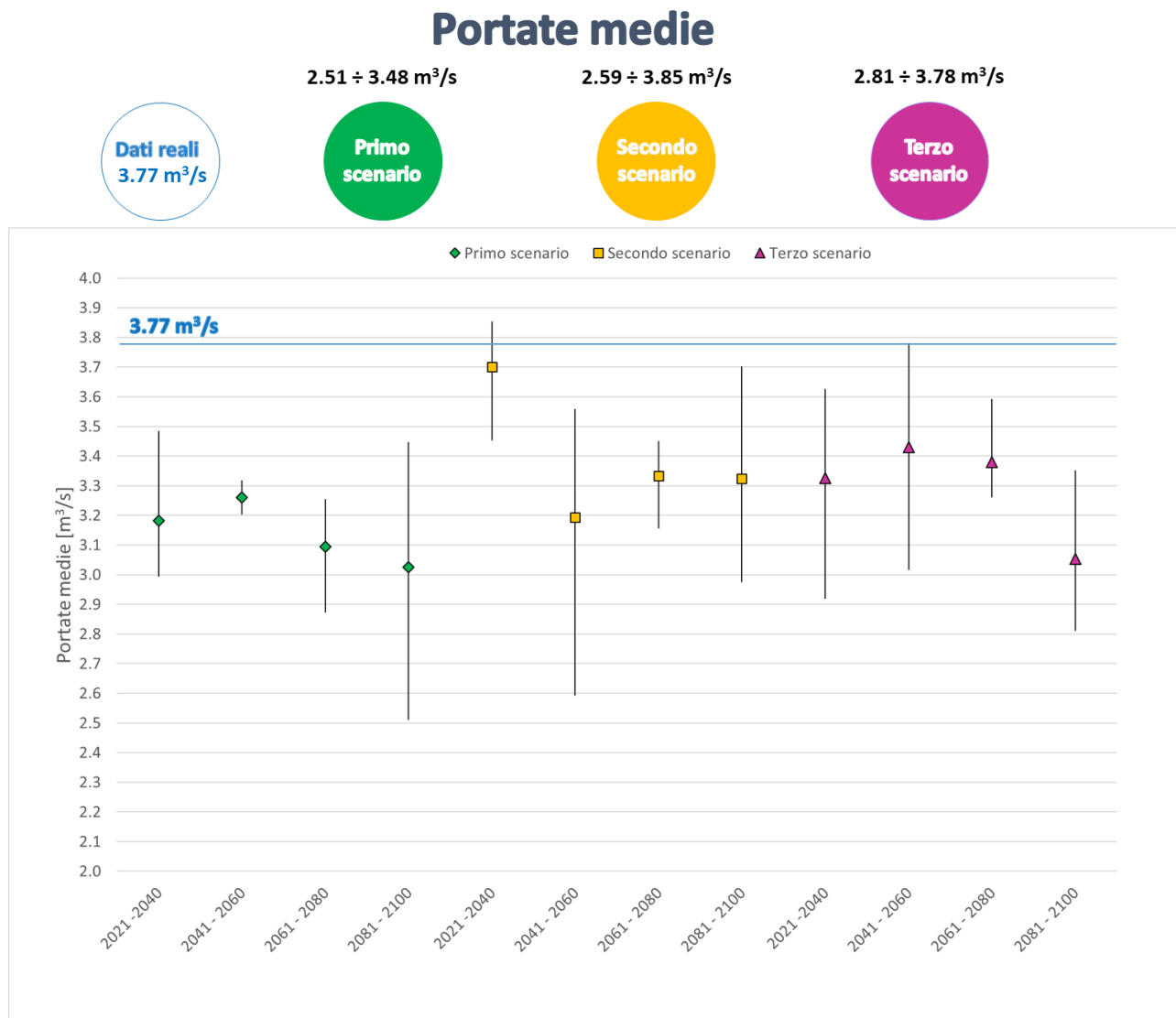


Figura 5 – Distribuzione dei dati di portata media negli intervalli 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100 per ognuno degli scenari considerati. Grazie alle linee che indicano gli intervalli entro cui oscillano i dati e il dato osservato (rappresentato dalla linea orizzontale blu) è possibile osservare come variano i dati relativi alla portata media; il simbolo sovrapposto alle linee di distribuzione indica il dato medio per ogni intervallo di tempo.

La situazione è inversa quando si analizzano i massimi di portata per ogni scenario, in quanto essi mediamente aumentano rispetto al dato osservato. Questi valori indicano un dato puntuale legato ad eventi singoli e quindi può essere fuorviante se l'obiettivo è indagare la disponibilità idrica nel tempo: i picchi si esauriscono in pochissimi giorni e non hanno peso sul bilancio complessivo.

Infatti ponendo l'attenzione sui giorni al di sotto della soglia di allerta (0.5 m³/s), si nota come i valori passino dagli attuali 0 giorni per anno ad una media, calcolata considerando tutti gli intervalli, di circa 7 giorni/anno per il primo scenario, 6 giorni/anno per il secondo e agli 10 giorni/anno per il terzo (Figura 6). Considerando infine il massimo numero di giorni consecutivi al di sotto della soglia si ottengono valori compresi tra una forbice di circa 16 – 50 giorni per tutti e tre gli scenari considerati, indicando la possibilità in media di circa un mese/un mese e mezzo di siccità per ogni intervallo di 20 anni.

Giorni al di sotto della soglia di 0.5 m³/s

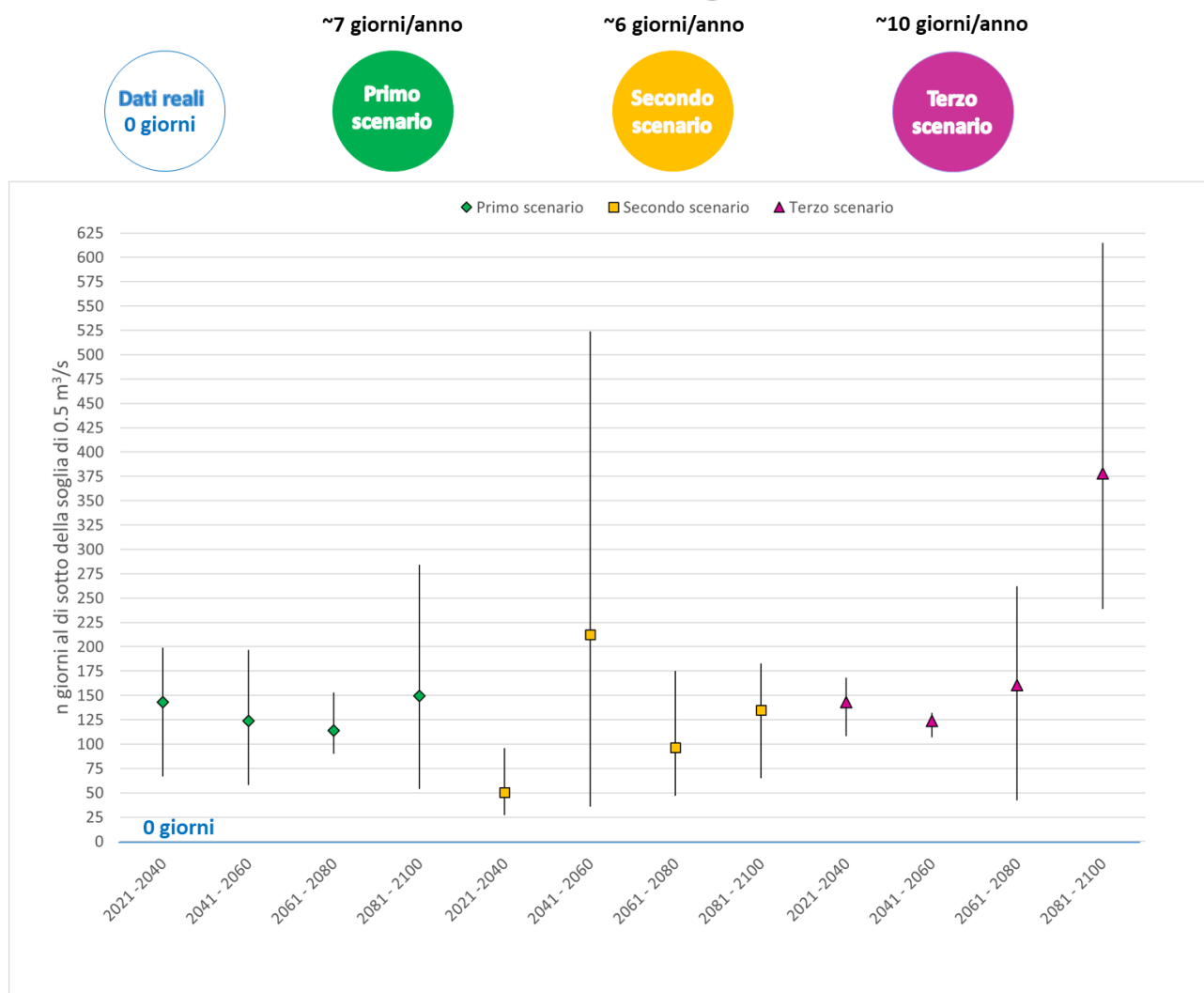


Figura 6 – Grafico che mostra la distribuzione dei giorni al di sotto della soglia di 0.5 m³/s negli intervalli 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 e 2081-2100 per ognuno degli scenari considerati; il simbolo sovrapposto alle linee di distribuzione indica il dato medio per ogni intervallo di tempo.

CONCLUSIONI

Questo studio ha permesso di indagare una tra le più complete serie di dati disponibili di portata di una sorgente. L'analisi statistica ha dimostrato che le portate medie della sorgente Nossana potranno subire significative variazioni legate al cambiamento climatico; basti pensare che il secondo scenario, quello con maggiore variabilità fra i tre utilizzati, suggerisce che le portate potrebbero variare tra circa il -33% e il +2%. Quello che è importante però non è concentrarsi sul dato in sé ma sulla tendenza dei risultati ottenuti dalla modellazione.

Il quadro che si delinea è quello di un possibile aumento dei giorni al di sotto della soglia di allerta e un aumento dei picchi di portata. È stato inoltre dimostrata una tendenza della risorsa idrica nel diminuire le portate medie, ma non un esaurimento della stessa in tempi brevi. Questo vantaggio in termini di tempo risulta utile per attuare misure che portino a preservare la risorsa e/o ricercare e sfruttare risorse nuove ed integrative.

Infine migliorando la qualità delle previsioni, questo metodo può essere ulteriormente implementato diventando un valido strumento per la gestione della risorsa idrica e per affrontare situazioni critiche. Inoltre, integrando i dati derivanti da un monitoraggio chimico-isotopico, è possibile migliorare non solo il modello concettuale del sistema acquifero individuando le direzioni principali di flusso e il tempo di interazione acqua-

roccia, ma anche la conoscenza della risposta del sistema dopo un evento estremo. Questo permetterebbe di affinare ancora di più il metodo, elevandolo ad una previsione quali – quantitativa della risorsa.

BIBLIOGRAFIA

- Bakalowicz M., 2005. Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeol. J.* 13, 148–160. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-004-0402-9>.
- Benestad R.E., Hanssen-Bauer I., Chen D., 2008. *Empirical Statistical Downscaling*. World Scientific Publishing Company. New Jersey, London.
- Ford D., Williams P.W., 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons, Chichester, England, A Hoboken, NJ.
- IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Long A.J., 2015. RRAWFLOW: Rainfall-Response Aquifer and Watershed Flow Model (v1.15). *Geosci. Model Dev.* 8, 865–880. <http://dx.doi.org/10.5194/gmd-8-865-2015>.
- Long A.J., Mahler B.J., 2013. Prediction, time variance, and classification of hydraulic response to recharge in two karst aquifers. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 281–294. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-17-281-2013>.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282–290.
- Pinault J.L., Plagnes V., Aquilina L., Bakalowicz M., 2001. Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems: Characterization of Karst System Functioning. *Water Resour. Res.* 37, 2191–2204. <http://dx.doi.org/10.1029/2001WR900018>.
- Scanlon B.R., Mace R.E., Barrett M.E., Smith B., 2003. Can we simulate regional groundwater flow in a karst system using equivalent porous media models? Case study, Barton Springs Edwards aquifer, USA. *J. Hydrol.* 276, 137–158. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00064-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00064-7)
- Simoni S., Padoan S., Nadeau D.F., Diebold M., Porporato A., Barrenetxea G., Ingelrest F., Vetterli M., Parlange M.B., 2011. Hydrologic response of an alpine watershed: Application of a meteorological wireless sensor network to understand streamflow generation. *Water Resour. Res.* 47, W10524. <http://dx.doi.org/10.1029/2011WR010730>.
- Vigna B., Banzato C., 2015. The hydrogeology of high-mountain carbonate areas: an example of some Alpine systems in southern Piedmont (Italy). *Environmental Earth Science* vol.74, Issue 1, 267-280. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4308-8>
- Worthington S.R.H., 2009. Diagnostic hydrogeologic characteristics of a karst aquifer (Kentucky, USA). *Hydrogeol. J.* 17, 1665. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-009-0489-0>.