
Variazioni attese sul regime delle portate per i bacini sottesi agli invasi artificiali di interesse di Acquedotto Pugliese S.p.A.

Technical Notes

Ottobre 2023
Issue TN0293

*REMHI
REgional Models
and geo-
Hydrological
Impacts*

*By **Giuliana Barbato,**
Paola Mercogliano,
Roberta Padulano,
Matteo Pesce,
Mario Raffa,
Mattia Scalas*

*Fondazione CMCC
Centro Euro-
Mediterraneo sui
Cambiamenti Climatici
roberta.padulano@cmcc.it
paola.mercogliano@cmcc.it*

***Gianluigi Fiori, Vincenzo
Patruno, Davide Ritossa,**
Luciano Venditti,
Gerardo Ventafridda
Acquedotto Pugliese S.p.A.
v.patruno@aqp.it
l.venditti@aqp.it*

SUMMARY Questo report contiene i risultati dell'analisi dei valori di portata media calcolati in termini di variazione futura attesa su base annuale e mensile per gli invasi di acqua ad uso idropotabile individuati dalla società Acquedotto Pugliese S.p.A nella Regione Puglia. L'analisi considera come periodo di riferimento l'intervallo 1981-2010 e costruisce le proiezioni per il periodo 2021-2050. La metodologia applicata si avvale dell'indicatore di impatto *river discharge* sviluppato dall'Istituto Meteorologico e Idrologico Svedese (SMHI) e utilizzando come forzanti un set di modelli climatici EURO-CORDEX accoppiati a un set di modelli idrologici tra cui E-HYPEcatch, E-HYPEgrid e VIC-WUR. Le medie stagionali e annuali future sono state costruite su tre Representative Concentration Pathways (RCP): RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8. Osservando una generale diminuzione della portata media mensile/stagionale/inter-annuale – considerata variabile proxy – sono esaminate le implicazioni per la disponibilità di risorsa idrica negli elementi oggetto di analisi. Questo report tecnico è frutto dell'accordo di collaborazione stipulato tra la Fondazione CMCC e Acquedotto Pugliese S.p.A.

Keywords hydrology, river discharge, climate change

DOI: <https://doi.org/10.25424/cmcc-tykv-fb34>

PREFAZIONE

Già nel novembre del 2021 Acquedotto Pugliese S.p.A. e la Fondazione CMCC (nel seguito identificati come AQP e CMCC) hanno siglato un accordo di collaborazione per mettere a fattor comune il proprio know-how ed affrontare il cambiamento climatico sulla base di una chiara, condivisa consapevolezza dei rischi e degli impatti e per definire modelli di approccio scientifici e, tuttavia, concreti e semplificati, per identificare gli interventi tecnici di adattamento e delineare piani di resilienza con riguardo al servizio idrico integrato e, in generale, all'utilizzo della risorsa idrica nel territorio di riferimento.

La complessità e l'ampiezza di tale obiettivo hanno condotto a ripartire l'impegno per distinti ambiti di rischio che intercettano le ricadute dei cambiamenti climatici sui processi del Servizio Idrico Integrato gestito da AQP.

La collaborazione è stata avviata operativamente nel gennaio 2022 e ha riguardato prioritariamente l'ambito della Sicurezza della Risorsa Idrica e, quindi, l'analisi degli effetti delle variazioni di determinati indicatori climatici, nel periodo 2021 – 2050, sulla disponibilità della risorsa idrica approvvigionata da AQP per il fabbisogno idropotabile della popolazione della regione Puglia. Le attività si sono concentrate in particolare sulle attuali fonti utilizzate da AQP, ovvero gli invasi superficiali, le sorgenti ed i pozzi, ed hanno esplorato altresì gli aspetti di competizione sulla risorsa idrica ed il possibile aumento dei consumi irrigui.

Questo ciclo di *Technical Notes* CMCC riassume i risultati delle attività riguardanti gli invasi superficiali e i relativi impatti del cambiamento climatico sulla quantità e qualità delle acque disponibili in futuro. Questa fonte, infatti, per sua natura risente in modo spiccato del cambiamento climatico e delle conseguenti variazioni nelle componenti del bilancio idrologico (precipitazioni medie ed estreme ed evapotraspirazione potenziale, tra le altre). Le *Technical Notes* CMCC incluse nella raccolta si focalizzano, in particolare, su diversi potenziali effetti del cambiamento climatico: sulla variazione nel regime delle portate medie e sulla variazione del numero e delle caratteristiche degli



Variazioni attese sul regime delle portate per i bacini sottesi agli invasi artificiali di interesse di Acquedotto Pugliese S.p.A. - Implicazioni sul pericolo di indisponibilità della risorsa idrica

eventi di siccità idrologica, che impattano sulla quantità della risorsa, e sulla variazione dell'intensità e frequenza degli eventi estremi di piena e di precipitazione e sulla variazione del tasso di erosione dei suoli, che impattano sulla qualità delle acque.



03

1. PREMESSA

Il presente Report è riferito all'attività CG01.49.1.15: *Analisi dei valori giornalieri di deflusso superficiale risultanti dall'applicazione di modelli di trasformazione afflussi-deflussi a scala paneuropea (target "Invasi superficiali – quantità")*. L'attività consiste nell'analisi dei valori di portata media annua e media mensile relativi al periodo di riferimento (1981-2010) e al periodo futuro (2021-2050), per i bacini individuati da Acquedotto Pugliese S.p.A. (AQP) in corrispondenza di sbarramenti (dighe e traverse) per uso idropotabile, con lo scopo di determinare la variazione attesa della portata media annua e della portata media mensile.

Per l'analisi è stato utilizzato l'indicatore di impatto *River discharge* fornito dall'Istituto Meteorologico e Idrologico Svedese (SMHI). Questo indicatore è consultabile e scaricabile, come dato grezzo, dall'applicazione SMHI¹ oppure come parte del dataset *Hydrology-related climate impact indicators from 1970 to 2100 derived from bias adjusted European climate projections* distribuito dalla piattaforma Copernicus Climate Change Service (C3S)². In entrambi i casi, gli indicatori presenti all'interno del dataset sono calcolati da SMHI utilizzando forzanti da modelli climatici regionali EURO-CORDEX accoppiati a modelli di impatto idrologico (tra cui *E-HYPEcatch*, *E-HYPEgrid* e *VIC-WUR*). Essi sono generalmente calcolati come medie annuali o stagionali sul periodo di riferimento e come variazioni su tre periodi futuri, per tre *Representative Concentration Pathways (RCPs)* ossia *RCP 2.6*, *RCP 4.5* e *RCP 8.5*, nonché per tre scenari di aumento della temperatura media globale rispetto alle condizioni pre-industriali, ossia 1.5, 2.0, 3.0 °C. Gli indicatori inclusi nel dataset sono molteplici e descrivono diverse quantità, tra cui *runoff*, portata fluviale, umidità del suolo, aridità e qualità dell'acqua (temperatura dell'acqua, azoto e fosforo). Durante l'ultima parte dell'anno 2022, i contenuti della piattaforma SMHI sono stati progressivamente

¹ <https://hypeweb.smhi.se/explore-water/climate-change-data/europe-climate-change/>

² <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-hydrology-variables-derived-projections?tab=doc>



travasati all'interno della piattaforma C3S. Di conseguenza, si è deciso di considerare il dataset C3S come quello più aggiornato e definitivo.

2. NOTA METODOLOGICA: MODELLO IDROLOGICO

Questa sezione contiene le informazioni più rilevanti per comprendere la genesi dei dati di portata prodotti da SMHI, messi a disposizione da C3S e utilizzati in questa attività. In particolare, viene sommariamente descritto il modello idrologico di riferimento **E-HYPE**, con particolare enfasi sulle tipologie di dati di input richiesti e sulle caratteristiche degli output.

2.1 IL MODELLO E-HYPE

Il modello **E-HYPE** (Donnelly et al. 2016) si basa sul modello idrologico continuo **HYPE** (*HYdrological Predictions for the Environment*; Lindstrom et al. 2010), che simula le componenti del ciclo idrologico e di qualità dell'acqua. Il modello consente di simulare i principali processi idrologici superficiali e sub-superficiali (es. accumulo e scioglimento nevoso, evapotraspirazione, flusso superficiale e poroso, umidità del suolo, generazione di *runoff*, fluttuazione di falda, *routing* attraverso fiumi e laghi), gestione del suolo (irrigazione, astrazione d'acqua), e *turnover* dei nutrienti (rilascio di fonti diffusi e puntuali, pozzi sotterranei di materiale solido e disciolto, assorbimento delle piante, trasporto fluviale) che sono controllati da parametri legati alla fisiografia, per tener conto della variabilità spaziale, e stimati attraverso calibrazione. Il modello è semi-distribuito, nel senso che, di tutti i parametri di controllo, alcuni vengono fissati per l'intero dominio, mentre altri possono variare da un sottobacino all'altro e all'interno di ciascun sottobacino. L'omogeneità di alcuni parametri, in particolare quelli legati al tipo di suolo e classi di uso del suolo, consente di identificare le *hydrological response units (HRUs)*, entità spaziali alla base della modellazione.



05



CMCC Technical Notes

Il dataset derivato da **E-HYPE** può essere definito un “*ensemble multi-modello*”, poiché i dati forniti rappresentano, in realtà, una media tra i risultati di diverse simulazioni, ottenuti considerando diversi set di parametri, ritenuti le migliori scelte possibili. La procedura per la calibrazione dei parametri, e dunque per la scelta dei migliori set di parametri con cui effettuare le simulazioni, è articolata e complessa ed è basata su una serie di strumenti tra cui: il *toolbox* di analisi di sensitività e incertezza **SAFE** (Pianosi et al. 2015); l’approccio di identificazione dei parametri **GLUE** (Beven & Binley 1992); la ben nota metrica di performance *Nash-Sutcliffe Efficiency*.

Per le simulazioni alla base del dataset qui analizzato, il modello è stato settato per il dominio pan-Europeo, coprendo un’area di 8.8 milioni di km² suddivisa in 35’408 sottobacini con una dimensione media di 248 km². I dati qui utilizzati sono i risultati del modello **E-HYPEcatch**, una declinazione del modello **E-HYPE** che fornisce risultati, in termini di portate fluviali, alla scala di bacino. I bacini considerati sono delineati da poligoni irregolari liberamente consultabili³, la cui identificazione è necessaria in questa sede per assicurare la consistenza fisica tra il dominio di interesse e il dominio per cui è fornito un risultato.

2.2 INPUT E OUTPUT DEL MODELLO E-HYPE

L’applicazione del modello **E-HYPE** oggetto di studio vede in input serie temporali e spazialmente distribuite di precipitazione e temperatura media dell’aria. Nelle analisi in oggetto, le forzanti climatiche utilizzate come input di **E-HYPE** sono costituite da un *ensemble* di modelli climatici regionali, facenti parte dell’iniziativa **EURO-CORDEX** (Jacob et al. 2020) e bias-corrette utilizzando il dataset **EFAS-Meteo** (Ntegeka et al. 2013). In particolare, per ciascuna delle catene di simulazione climatica disponibili (costituite da un accoppiamento tra modello di circolazione globale, **GCM** e modello climatico regionale, **RCM**) e per ogni scenario, viene effettuata una simulazione (intendendo, con questo termine, l’*ensemble* multi-modello come spiegato nella

³ <https://doi.org/10.5281/zenodo.581451>

precedente sezione) e vengono forniti i risultati in termini di portate. È demandata quindi all'utente finale la possibilità di valutare la media (*ensemble mean*) e l'incertezza (deviazione standard) dei risultati derivanti dall'utilizzo delle varie catene di simulazione climatica disponibili. La Tabella 1 mostra le catene di simulazione climatica con cui il dataset in oggetto è stato ottenuto. Come si evince, vengono utilizzati 3 **GCM** e 4 **RCM**, per un totale di 8 catene modellistiche per ciascuna delle quali è fornito un risultato a scala di bacino in termini di portata. La scelta effettuata da **SMHI** delle specifiche catene modellistiche mostrate in Tabella 1 è semplice: si trattava infatti delle sole catene modellistiche esistenti nel programma **EURO-CORDEX** che, al 2019, soddisfacessero il criterio di avere una simulazione per ciascuno dei tre scenari (infatti, per un notevole numero di catene modellistiche lo scenario RCP 2.6 non era, e non è, disponibile).

Per la bias correction, **SMHI** ha utilizzato il dataset **EFAS** (*European Flood Awareness System*) – Meteo distribuito dal *Copernicus Emergence Monitoring Service* (**CEMS**)⁴. Si tratta di un dataset di diverse variabili meteorologiche, tra cui precipitazione e temperatura (oltre che vento, radiazione, evapotraspirazione tra le altre) con risoluzione temporale giornaliera e orizzontale pari a 5 km, con copertura paneuropea sull'arco temporale 1990-2018. Tale dataset è ottenuto attraverso l'interpolazione di serie temporali di dati meteorologici osservate presso un elevato numero di stazioni di misura afferenti alle due reti **EU-FLOOD-GIS** e **JRC-MARS** (Ntegeka et al., 2013). La data di inizio del dataset osservativo utilizzato (1990) è posteriore di circa vent'anni rispetto alla data di inizio delle simulazioni climatiche (1971). Ciò non costituisce un problema per l'operazione di bias correction, che nel caso in esame è stata effettuata mediante *Empirical Quantile Mapping at two timescales*. Infatti, la procedura prevede una calibrazione della funzione di trasferimento sulla finestra temporale in cui si abbiano osservazioni, e la sua successiva applicazione ad una finestra temporale target, che può quindi essere anche diversa da quella di calibrazione. Una piccola criticità è legata al

⁴ <https://www.efas.eu/en>

CMCC Technical Notes

fatto che, per costruire la funzione di trasferimento, i dati osservati devono essere confrontati con i dati simulati sullo stesso periodo: poiché però le simulazioni sul periodo storico si fermano al 2005, mentre dal 2006 partono quelle di scenario, per il confronto i dati climatici simulati sono stati organizzati in una serie temporale che dal 1990 al 2005 è relativa all'esperimento storico, mentre dal 2006 al 2018 è relativa all'esperimento sotto lo scenario *RCP 4.5*, scelto perché intermedio. Secondo la documentazione fornita⁵, comunque, le differenze nelle variabili climatiche sul periodo 2006-2018 per i tre scenari sono minime.

Tabella 1. Lista delle simulazioni climatiche utilizzate.

Global Climate Model (institution)	Regional Climate Model (institution)	Realizzazione*	Historical Period (1971-2005)	Future horizon (2006-2100)		
				RCP2.6	4.5	8.5
EC-EARTH (ICHEC, Ireland)	CCLM4-8-17 (CLM Community, EU)	r12i1p1	X			X
	RACMO22E (KNMI, Netherlands)	r12i1p1	X			X
	RCA4 (SMHI, Sweden)	r12i1p1	X			X
HadGEM2-ES (UK Met Office UK)	RCA4 (SMHI, Sweden)	r1i1p1	X			X
	RACMO22E (KNMI, Netherlands)	r1i1p1	X			X
MPI-ESM-LR (MPI, Germany)	RCA4 (SMHI, Sweden)	r1i1p1	X			X
	CSC-REMO2009 (MPI, Germany)	r2i1p1	X			X
	CSC-REMO2009 (MPI, Germany)	r1i1p1	X			X

* La realizzazione r<N>i<N>p<N> viene utilizzata per distinguere simulazioni strettamente correlate che differiscono, ad esempio, per condizioni iniziali o parametrizzazioni fisiche.

Per ciascun bacino, concettualmente l'output grezzo del modello è costituito da una serie temporale (una per ogni catena di simulazione climatica e per ogni scenario) di

⁵ <https://shorturl.at/rDO27>



portate fluviali giornaliere (*Essential Climate Variable*, **ECV**). Si noti inoltre che, per ciascuno scenario e ciascuna catena di simulazione climatica, la **ECV** è disponibile separatamente per ciascuno dei *run* del modello idrologico **E-HYPE catch** (otto, corrispondenti a otto parametrizzazioni diverse per i sotto-processi). Ai fini della presente attività, gli otto *run* del modello idrologico, caratterizzati da diversi valori dei parametri, sono stati tra loro mediati (i risultati dei singoli *run* non sono oggetto di questo documento). Di conseguenza, per ogni catena di simulazione climatica, ciascun bacino viene ad essere caratterizzato da due serie temporali:

- La prima, relativa al periodo di riferimento, si estende dal 1981 al 2010. Tuttavia, dal 1981 al 2005 i valori sono quelli forniti dall'esperimento storico (1971-2005), mentre dal 2006 al 2010 i valori sono ottenuti dalla media di quelli forniti dai tre scenari di concentrazione. Un'alternativa altrettanto efficace sarebbe stata scegliere i valori forniti dall'esperimento relativo allo scenario RCP 4.5 (scegliendo cioè un approccio simile a quello adottato da **SMHI** per la *bias correction*).
- La seconda, relativa all'orizzonte futuro 2021-2050, è triplice, poiché corrisponde ai valori forniti dalla simulazione per ciascuno dei tre scenari RCP 2.6, 4.5 e 8.5.

2.3 INQUADRAMENTO TERRITORIALE

I bacini superficiali di interesse per la Convenzione sono i seguenti (Figura 1):

1. “*Fortore*” (fiume Fortore, chiuso in corrispondenza della Diga di Occhito);
2. “*Conza*” (fiume Ofanto, chiuso in corrispondenza della Diga di Conza);
3. “*Traversa Santa Venere*” (fiume Ofanto, chiuso in corrispondenza della suddetta traversa);
4. “*Locone*” (fiume Locone, chiuso in corrispondenza della Diga del Locone);
5. “*Cogliandrino*” (fiume Sinni, chiuso in corrispondenza della Diga di Cogliandrino);
6. “*Traversa Sarmento*” (fiume Sinni, chiuso in corrispondenza della suddetta traversa);
7. “*Monte Cotugno*” (fiume Sinni, chiuso in corrispondenza della Diga di Monte Cotugno);
8. “*Pertusillo*” (fiume Agri, chiuso in corrispondenza della Diga del Pertusillo);
9. “*Traversa Agri*” (fiume Agri, chiuso in corrispondenza della suddetta traversa);
10. “*Traversa Sauro*” (Torrente Sauro chiuso in corrispondenza della suddetta traversa).

I bacini risultano dislocati nei territori di Campania, Puglia e Basilicata. Per ciascuno di essi è stata svolta un’analisi di consistenza con i bacini e sottobacini forniti da **SMHI**. In particolare, in 8 casi su 10 la corrispondenza è stata individuata e le serie di portata fornite da **SMHI** sono state considerate rappresentative dei deflussi alle sezioni di chiusura degli invasi di interesse AQP. I bacini forniti da **SMHI** ritenuti rappresentativi dei bacini AQP sono rappresentati in Figura 2, mentre la Tabella 2 riassume l’esito dell’analisi di consistenza per tutti i bacini.



Variazioni attese sul regime delle portate per i bacini sottesi agli invasi artificiali di interesse di Acquedotto Pugliese S.p.A. - Implicazioni sul pericolo di indisponibilità della risorsa idrica



11

Figura 1. Mappa dei bacini individuati da AQP in corrispondenza di sbarramenti per uso idropotabile.

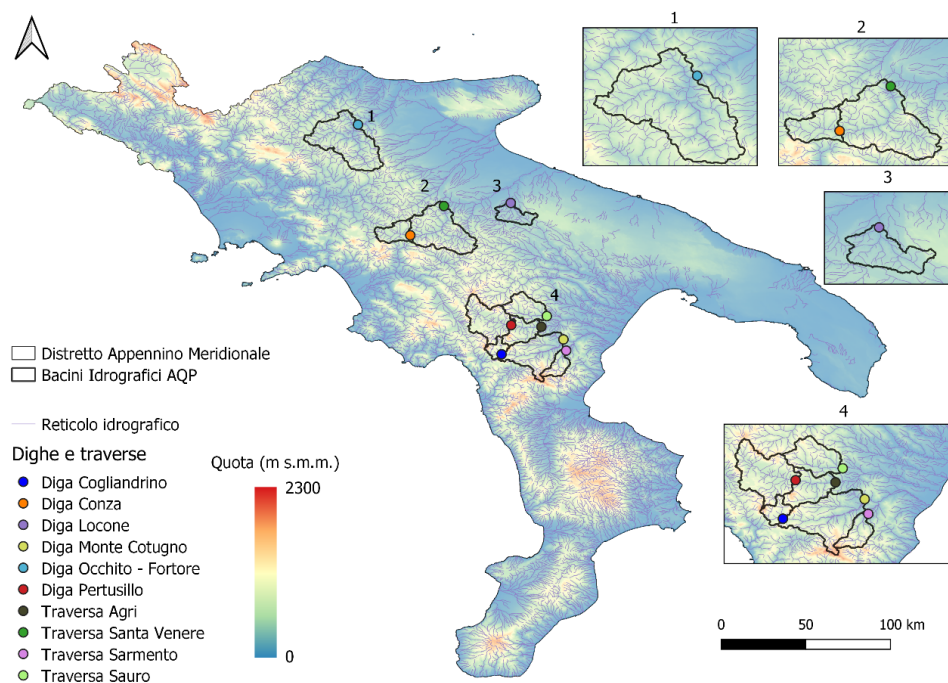


Figura 2. Mappa dei bacini forniti da SMHI rappresentativi degli invasi AQP.

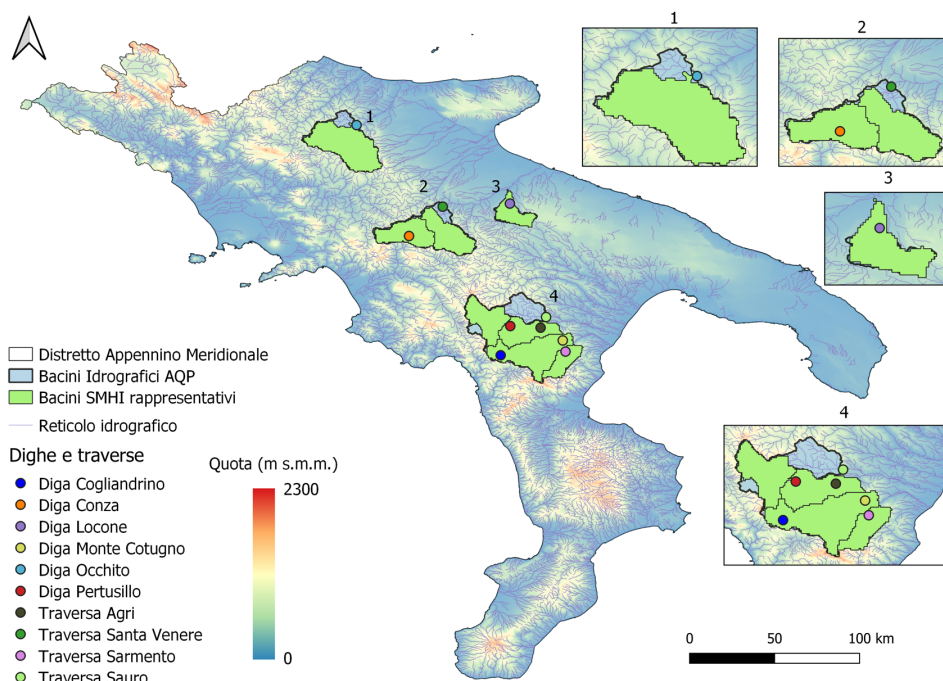


Tabella 2. Esito analisi di consistenza tra i bacini forniti AQP e quelli forniti da SMHI.

Bacino AQP	Consistenza
Cogliandrino	No
Conza	Si
Locone	Si
Monte Cotugno	Si
Fortore	Si
Pertusillo	Si
Traversa Agri	Si
Traversa Santa Venere	Si
Traversa Sarmento	Si
Traversa Sauro	No

2.4 CRITICITÀ NELL'UTILIZZO DEL DATASET NELLA CONVENZIONE

In base alla descrizione proposta per il dataset oggetto di studio, emergono alcune criticità relative al suo impiego all'interno delle attività della Convenzione:

- Il numero di catene di simulazione climatica (8) è inferiore a quello di default scelto per la convenzione (14). Ciò implica che la valutazione delle incertezze

legate all'utilizzo di un ensemble di catene è meno robusta, sebbene il numero sia comunque, per gli standard vigenti, elevato. Tuttavia, si noti che tutte le catene modellistiche utilizzate da **SMHI** e proposte in Tabella 1 sono presenti nell'ensemble più ampio considerato nelle attività della Convenzione (ne costituiscono, cioè, un sottoinsieme).

- Fissato lo scenario e il membro dell'ensemble, per ogni bacino il dataset oggetto di studio fornisce una serie temporale di portate giornaliere. Come detto in precedenza, il modello idrologico **E-HYPE** ha subito una procedura di calibrazione ampia e articolata, e la validazione effettuata da **SMHI** confrontando i risultati relativi al periodo di riferimento con osservazioni di portata sui principali bacini europei ha dato esito soddisfacente. Tuttavia, l'esito di tale validazione per i bacini di interesse non è noto, poiché essi non sono monitorati (almeno non nelle sezioni di chiusura corrispondenti agli invasi di interesse). Un altro elemento riguardante la modellazione idrologica è il perimetro del bacino, che è stato ottenuto da **SMHI** sulla base del dataset di quote **EU-DEM**, avente risoluzione orizzontale pari a 25 metri. Tale risoluzione potrebbe non permettere l'individuazione precisa dei confini dei bacini più piccoli oggetto di studio.
- Il dataset di precipitazione e temperatura utilizzato da **SMHI** per la bias correction (EFAS – Meteo) non è quello di riferimento della Convenzione (**E-OBS**). Il motivo è che il dataset **E-OBS** riesce a coprire il periodo di riferimento scelto per la Convenzione (1981-2010), mentre i dati **EFAS** partono dal 1990. Sebbene ciò non costituisca un problema per la bias correction in sé, sarebbe stato invece un problema utilizzare il dataset **EFAS** per le attività della Convenzione dove invece era necessario fornire valori assoluti di riferimento (ad esempio, per gli indicatori climatici) necessari per interpretare le variazioni attese in futuro.



CMCC Technical Notes

A valle di tali valutazioni, si ritiene comunque che il contenuto informativo del dataset sia rilevante. Si fa inoltre notare che si tratta dell'unico prodotto del servizio C3S, messo quindi a disposizione dalla Comunità Europea, che includa proiezioni di portata a scala di bacino.



3. NOTA METODOLOGICA: ANALISI E RESTITUZIONE DEI RISULTATI

In questa sezione viene presentato un approfondimento sull'approccio e le modalità utilizzate per analizzare i dati forniti dal dataset oggetto di studio, descritto in precedenza, nonché per restituire i risultati in un modo che sia rigoroso ma, allo stesso tempo, di immediata interpretazione e che garantisca flessibilità.

3.1 ANALISI DELLE INCERTEZZE

Le incertezze associate alle stime effettuate in questa attività sono di diversa natura, tra cui:

- I. Incertezze legate all'utilizzo di un modello idrologico al posto di osservazioni di portata. La fonte di tale incertezza è da ricercarsi nell'utilizzo di un qualsivoglia strumento di modellistica, che, per sua natura, non può che costituire un'approssimazione della realtà, ad esempio attraverso dei parametri da calibrare che semplificano i processi, e risoluzioni spaziali e temporali più o meno limitate a seconda delle risorse computazionali allocate e dei dati a disposizione. In questa analisi tali incertezze non possono essere quantificate, poiché non si hanno a disposizione dati ufficiali di portata osservati sui vari bacini per il periodo di riferimento. Un ulteriore approfondimento su questa tematica è riportato nella sezione di **DISCUSSIONE**.
- II. Incertezze legate all'utilizzo di un *ensemble* di modelli climatici (Tabella 1). Tali incertezze consistono nella variabilità dei risultati in termini di portata allorquando il modello idrologico vede in input diverse catene di simulazione climatica. Tale variabilità può essere facilmente quantificata confrontando tra loro i diversi output disponibili. L'approccio con cui tale fonte di incertezza può essere analizzata non è univoco: tuttavia, lo stato dell'arte solitamente fa riferimento ad un approccio di tipo statistico, in cui il valore più vicino alla



CMCC Technical Notes

“verità” è il valore medio, lo scostamento medio dalla “verità” è la deviazione standard. In altre parole, l’insieme delle realizzazioni di portata ottenute utilizzando in input al modello idrologico diverse simulazioni climatiche viene trattato come un vero e proprio campione statistico.

Per quanto riguarda la prima fonte di incertezza, ai fini di questa attività si ritiene che la procedura di validazione cui il dataset in oggetto è stato sottoposto sia sufficiente per ritenere il dato affidabile, come testimoniato dall’inclusione di questo prodotto all’interno del servizio *Copernicus Climate Change Service (C3S)*. Per quanto riguarda invece la seconda fonte, nei risultati l’analisi di tale incertezza verrà proposta in modo strutturato secondo quanto segue.

La media tra tutte le catene modellistiche, che prende il nome di “ensemble mean” (EM), rappresenta la migliore approssimazione della verità, e sarà quindi il principale risultato fornito. La “deviazione standard” (**DS**) associata alla media esprime la variabilità del campione: maggiore è la deviazione standard, più grande è la variabilità. Tuttavia, il valore assoluto di **DS** non è interpretabile se non in proporzione al valore di EM: valori di deviazione alti, associati a valori medi bassi, esprimono una maggiore aleatorietà rispetto ad analoghi valori di deviazione associati però a valori medi alti. Appare dunque utile considerare il “coefficiente di variazione” (**CV**), definito come rapporto tra **DS** e **EM**, che quantifica *di quante volte* la deviazione standard è maggiore della media. Quanto più è alto il valore di **CV**, tanto più è grande **DS** rispetto ad **EM**, tanto più è grande l’incertezza associata alla stima della “verità”. Tuttavia, una soglia di accettazione di **CV** può essere imposta soltanto in modo arbitrario, a seconda dello scopo delle analisi e dei dati a disposizione. Un campione statistico di soli 8 elementi (tanti quante sono le catene di simulazione climatica considerate) è estremamente ridotto (solitamente si fa riferimento ad un’ampiezza pari a 10 come quella minima per analisi statistiche) e foriero di valutazioni poco robuste: in altre parole, l’aggiunta di anche solo un elemento potrebbe cambiare significativamente la stima, soprattutto di **DS**. È quindi atteso che le presenti analisi forniscano incertezze elevate associate alla stima della “verità”, poiché dato il numero esiguo di elementi (ma un’ampiezza pari a 14, quante sono le catene di simulazione climatica adottate in altre attività della Convenzione, sarebbe comunque da considerarsi ridotta) sarebbe irrealistico pretendere un’incertezza più contenuta.

3.2 ANALISI DELLA PORTATA MEDIA ANNUA E MEDIA MENSILE

Per i bacini rappresentati, le serie di portata fornite sono state analizzate aggregando i valori a diverse scale temporali, soffermandosi in particolare sulla scala annuale e su quella mensile, per evidenziare eventuali pattern stagionali. È stata quindi ottenuta, per ogni bacino e per ogni scenario, una serie temporale mensile e una annuale. In linea di principio, le analisi possono essere condotte con due approcci:

Analizzando separatamente i valori di portata sul periodo di riferimento e i valori di portata futuri, in altre parole fornendo, per ciascuno dei due periodi, un valore “vero” (**EM**) e l’incertezza (**DS** e/o **CV**).

Analizzando la variabile “variazione di portata” valutata come differenza (anche percentuale) tra i valori futuri e quelli correnti, fornendo per quest’ultima una stima del valore “vero” (**EM**) e l’incertezza (**DS** e/o **CV**).

Si noti che, al variare della catena climatica usata come input, le serie temporali di portata sul periodo di riferimento non sono coincidenti, sebbene siano tanto più vicine quanto più efficace è l’operazione di *bias correction* dei dati climatici. Tuttavia, ci si attende che la variabilità delle portate, sul periodo di riferimento, sia bassa; se fossero stati disponibili dati di portata per i bacini oggetto di studio, il riferimento sarebbe stato certo. Invece, per l’orizzonte futuro, ci si attende che la variabilità delle portate sia più elevata, in funzione di quanto ciascuna catena di simulazione climatica è sensibile all’aumento di temperatura causato dal particolare scenario di concentrazione adottato come condizione iniziale e al contorno.

Dal punto di vista delle azioni di adattamento, è chiaro che il valore assoluto di portata da attendersi in futuro è più utile della variazione, poiché esso può fungere, ad esempio, da valore di riferimento per la progettazione di interventi. L’informazione della



CMCC Technical Notes

variazione è invece sufficiente quando si voglia più che altro individuare e descrivere eventuali pericoli che possano insorgere o inasprirsi per effetto del cambiamento climatico. Ci sono però ulteriori considerazioni che possono far convergere verso l'uno o l'altro approccio. Ad esempio, utilizzare in input precipitazioni e temperature provenienti da proiezioni climatiche permette appunto di tenere conto dell'effetto del cambiamento climatico sui valori di portata; tuttavia, estendere le analisi a orizzonti temporali futuri, anche lontani, senza tenere conto di altri cambiamenti, ad esempio legati al *land cover*, alle proprietà dei suoli, o a interventi antropici di regimazione del bacino, possono fornire risultati, in termini di portate future, non attendibili. La valutazione della "variazione" permette invece di isolare l'effetto del cambiamento climatico, e la variazione può essere applicata a qualsivoglia riferimento: portate osservate che possano rendersi disponibili, oppure, in mancanza di osservazioni, i risultati di un modello idrologico. Ai fini di queste analisi, si considererà come riferimento il valore "vero" (**EM**) delle simulazioni idrologiche sul periodo di riferimento 1981-2010, ma potenzialmente si potrebbe utilizzare anche il risultato di un modello idrologico calibrato ad hoc per i bacini di interesse, e dunque probabilmente più attendibile rispetto a quello qui considerato, calibrato a livello pan-europeo.

La differenza tra i due approcci presenta anche un risvolto per quanto concerne l'interpretazione dei parametri di incertezza. Si supponga di avere un campione di valori di portata (ad esempio, portata media annua) x_R sul periodo di riferimento (di media EM_1 , deviazione standard DS_1 e $CV_1 = DS_1/EM_1$) e un campione x_F sull'orizzonte futuro (di media EM_2 , deviazione standard DS_2 e $CV_2 = DS_2/EM_2$). Si definisca inoltre la variabile differenza $x_d = x_F - x_R$, associata a EM_3 , DS_3 e $CV_3 = DS_3/EM_3$. Nel caso migliore, in cui il valore di riferimento sia certo (tutte le simulazioni sul periodo presente danno lo stesso risultato, dunque $DS_1 = CV_1 = 0$), allora la variabilità della differenza è dovuta unicamente alla variabilità dei valori futuri, ovvero $DS_3 = DS_2$. Tuttavia, EM_3 sarà uguale a EM_2 sottratta del valore di riferimento (unico), e dunque $EM_3 \leq EM_2$. Di conseguenza, $CV_3 \geq CV_2$: in altre parole, per il solo effetto di aver effettuato un'operazione di

sottrazione, il coefficiente di variazione è aumentato, poiché la deviazione standard si è trovata ad essere molto più grande della media. È inoltre da notare che, quando EM_3 tende a zero (quando cioè la media della variazione attesa è nulla o comunque molto piccola), CV_3 tende rapidamente a infinito. Non è sorprendente quindi ottenere localmente valori di CV_3 “stranamente” elevati, ovvero di svariati ordini di grandezza superiori rispetto agli altri (altri bacini, altri scenari, altri mesi).

Quando invece vi è una variabilità anche per il valore presente, DS_3 è una funzione più articolata di DS_1 e DS_2 , che deve tenere anche conto della eventuale covarianza tra i due campioni: in ogni caso, il suo valore deve essere paragonato con un valore di EM_3 : quanto più esso è piccolo, tanto più grande sarà CV_3 . L’aggiunta poi della divisione per il valore di riferimento per ottenere la variazione percentuale rende il calcolo ulteriormente più complesso, ma il ragionamento può essere comunque applicato. In definitiva, nell’ambito delle valutazioni relative al cambiamento climatico, l’incertezza associata alla stima della variazione futura è da attendersi sia più alta della stima associata ai valori assoluti sia presenti, sia soprattutto futuri. Tuttavia, quanto accennato nel paragrafo precedente rende comunque preferibile presentare i risultati in termini di variazione da attendersi in futuro: tali variazioni saranno però sempre accompagnate dall’informazione relativa al valore di riferimento per facilitarne l’interpretazione.

Nel presente documento, le serie temporali sono state dapprima aggregate su base mensile, mediando, cioè, i dati grezzi (portate giornaliere) per ciascun mese, ottenendo una serie temporale di portate “mensili”. Quindi, ci si è concentrati su due variabili:

Variazione percentuale della portata media annua. La portata media annua non è altro che la media, su ciascun anno, delle portate medie mensili, a sua volta mediata tra i trent’anni che compongono il periodo di riferimento e l’orizzonte futuro. La variazione è definita come differenza percentuale, per ciascuna catena modellistica, tra la portata media annua sull’orizzonte futuro 2021-2050 e la portata media annua sul periodo di



20

CMCC Technical Notes

riferimento 1981-2010, a sua volta divisa per la portata media annua sul periodo di riferimento 1981-2010 e moltiplicata per 100 per ottenere la variazione percentuale.

Variazione percentuale della portata media mensile. La portata media mensile non è altro che la media, per ciascuno dei mesi dell'anno, delle portate mensili sui trent'anni che compongono il periodo di riferimento e l'orizzonte futuro. La variazione è definita come differenza percentuale, per ciascuna catena modellistica, tra la portata media mensile sull'orizzonte futuro 2021-2050 e la portata media mensile sul periodo di riferimento 1981-2010, a sua volta divisa per la portata media mensile sul periodo di riferimento 1981-2010 e moltiplicata per 100 per ottenere la variazione percentuale.

La variazione percentuale può essere sinteticamente espressa mediante la seguente formulazione, da applicarsi separatamente per ciascuno dei diversi scenari *RCP* (2.6, 4.5, 8.5):

$$\Delta Q = 100 \cdot \left(\frac{x_F - x_R}{x_R} \right) \quad (1)$$

dove x_R è il valore di portata per il periodo di riferimento e x_F è il valore di portata per il periodo futuro.



4. RISULTATI

Nella seguente sezione sono presentati i risultati delle analisi in termini di variazione attesa della portata media annua e variazione attesa della portata media mensile. Per ciascuna delle due variabili, dapprima vengono presentati i risultati in termini di ensemble mean **EM**, e successivamente vengono presentate le incertezze in termini di **DS** e **CV**, avendo cura di riportare, accanto a queste informazioni, anche il valore di riferimento, che è l'*ensemble mean* **EM** dei valori di portata media sul periodo di riferimento. La deviazione standard e il coefficiente di variazione associati alla stima del valore di riferimento non sono riportati in questa sezione, ma possono essere desunti dall'insieme delle singole realizzazioni di portata (materiale disponibile su richiesta agli autori).

4.1 VARIAZIONE ATTESA DELLA PORTATA MEDIA ANNUA

La Figura 3 mostra le variazioni attese della portata media annua nei bacini di interesse sull'orizzonte futuro 2021-2050 rispetto al periodo di riferimento 1981-2010 per ciascuna catena di simulazione climatica e ciascun scenario *RCP*; la stessa figura riporta inoltre l'*ensemble mean* (media inter-modello) e l'incertezza (deviazione standard inter-modello). Le informazioni distribuite in tale figura sono sintetizzate nella Tabella 3, dove inoltre è riportata l'informazione del valore di riferimento. Le campiture delle tabelle seguono una palette verde per la **EM** della portata media annua di riferimento (con il massimo riempimento per valori maggiori o uguali a 6 mc/s); dal rosso al blu per la **EM** delle variazioni attese (dove il colore rosso pieno corrisponde ad una variazione negativa $\leq -30\%$, e il blu pieno corrisponde ad una variazione positiva $\geq +30\%$); gialla per il **CV** (dove il massimo riempimento si ha per valori maggiori o uguali a 1.5). Tutte le soglie sono state stabilite arbitrariamente, sulla base dell'insieme delle realizzazioni ottenute.



Figura 3. Variazioni di portata media annua fornite dalle diverse catene modellistiche per i bacini considerati, per i diversi scenari RCP. Sono indicate anche la media di ensemble e la deviazione standard della variazione. Tutte le variabili sono espresse in [%].

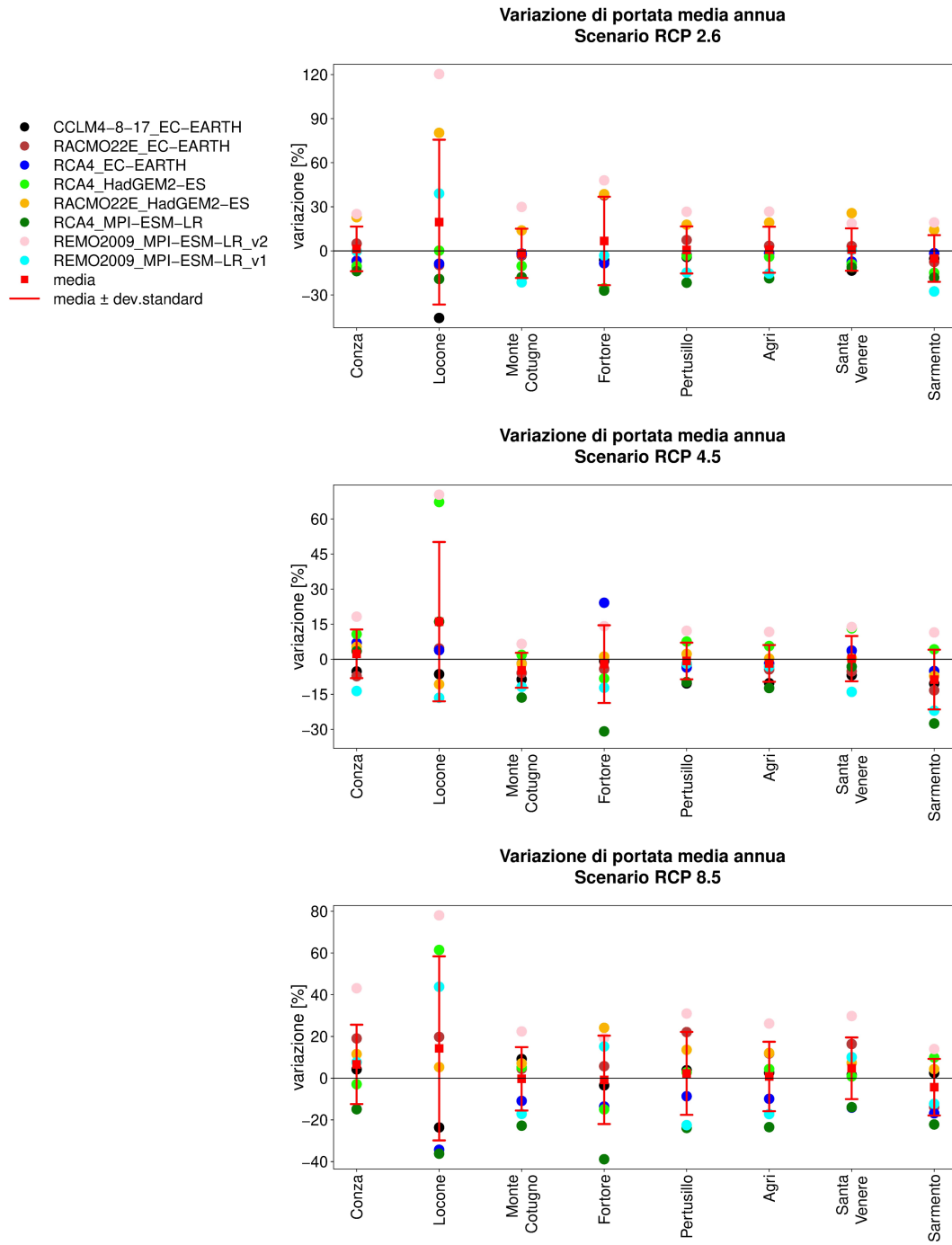


Tabella 3. Per ciascun bacino, ensemble mean della portata media annua sul periodo di riferimento, in [mc/s]; ensemble mean EM, deviazione standard DS (entrambi in [%]) e coefficiente di variazione CV (adimensionale) della variazione, per i tre scenari RCP.

Invaso	Riferimento (1981-2010)	RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Conza	1.54	1.36	15.22	11.2	2.32	10.4	4.5	6.62	19.0	2.9
Locone	0.23	19.57	56.09	2.9	16.07	34.1	2.1	14.28	44.1	3.1
Monte Cotugno	6.22	-1.70	16.77	9.9	-4.75	7.5	1.6	-0.31	15.2	49.0
Fortore	2.06	6.72	30.13	4.5	-2.11	16.6	7.9	-0.81	21.2	26.3
Pertusillo	3.81	0.63	16.05	25.4	-0.74	7.8	10.6	2.28	19.9	8.7
Traversa Agri	7.29	0.73	15.66	21.6	-1.79	7.9	4.4	0.81	16.6	20.5
Traversa Santa Venere	3.76	0.88	14.42	16.3	0.24	9.7	40.7	4.74	14.8	3.1
Traversa Sarmiento	2.13	-5.22	15.90	3.0	-8.72	12.8	1.5	-4.31	13.6	3.1

Dall'analisi congiunta della Figura 3 e della Tabella 3 si nota che i bacini *Locone*, *Conza* e *Traversa Santa Venere* sono quelli per i quali si prospetta una variazione positiva (aumento) della portata media annua per tutti gli scenari, mentre i bacini *Monte Cotugno* e *Traversa Sarmiento* vedono una variazione negativa (diminuzione) per tutti gli scenari; per i restanti bacini, la variazione è negativa sotto lo scenario RCP 4.5 (e, per Fortore, anche RCP 8.5), positiva per gli altri scenari. Il bacino per il quale è atteso il maggiore aumento è *Locone* (soprattutto sotto RCP 2.6) seguito da *Conza* (soprattutto sotto RCP 8.5); il bacino per il quale è attesa la maggiore diminuzione è *Traversa Sarmiento*, seguito da *Monte Cotugno*, entrambi soprattutto sotto RCP 4.5. L'aumento atteso sul bacino del *Locone* è particolarmente elevato rispetto agli altri: tuttavia, si fa notare che tale bacino è quello caratterizzato dal valore di portata di riferimento più basso; pertanto, il valore assoluto futuro si attende essere non troppo elevato.

Per quanto attiene l'incertezza, il coefficiente di variazione appare estremamente alto in tutti i casi, attingendo il valore minimo (comunque alto, pari a 1.5) per il bacino *Traversa Sarmiento* sotto RCP 4.5. A riprova di quanto descritto nella nota metodologica, i valori maggiori di incertezza sono quelli associati ai valori di *ensemble mean* più prossimi allo zero: si veda ad esempio i bacini *Monte Cotugno*, *Fortore*, *Traversa Agri* sotto RCP 8.5, e *Pertusillo*, *Traversa Agri*, *Traversa Santa Venere* sotto RCP 2.6. Più alta è l'*ensemble mean* della variazione, più basso è il coefficiente di variazione. Come



CMCC Technical Notes

detto in precedenza, era lecito aspettarsi valori di **CV** piuttosto alti, poiché calcolati su un campione di ampiezza estremamente modesta – sebbene l'unico campione a disposizione – dal punto di vista statistico (8 catene di simulazione climatica).

Mettendo insieme il valore di riferimento, la variazione attesa e l'incertezza, la situazione più “critica” dal punto di vista della diminuzione della risorsa idrica fluente è il bacino di *Monte Cotugno*, dove è attesa una importante diminuzione (-4.75% sotto RCP 4.5), associata a un'incertezza contenuta, su un valore di riferimento che è piuttosto alto (il secondo più alto tra i bacini indagati). Per consentire una valutazione più immediata delle portate da attendersi in futuro, la Tabella 4 presenta un “esercizio”, in cui le **EM** in Tabella 3 sono direttamente applicate ai valori di riferimento – sempre in Tabella 3 – per ottenere una stima dei valori di portata media annua da attendersi in futuro. Le singole realizzazioni ottenute per la portata media annua sull'orizzonte futuro sono comunque disponibili su richiesta agli autori.

Tabella 4. Per ciascun bacino, ensemble mean della portata media annua sul periodo di riferimento e ensemble mean della portata media annua sul periodo futuro, per i tre scenari. Valori espressi in [mc/s].

Invaso	Riferimento (1981-2010)	Orizzonte Futuro (2021-2050)		
		RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
Conza	1.54	1.57	1.57	1.65
Locone	0.23	0.26	0.25	0.24
Monte Cotugno	6.22	6.09	5.91	6.18
Fortore	2.06	2.18	2.00	2.03
Pertusillo	3.81	3.82	3.77	3.87
Traversa Agri	7.29	7.33	7.15	7.33
Traversa Santa Venere	3.76	3.79	3.75	3.94
Traversa Sarmiento	2.13	2.01	1.93	2.03

4.2 VARIAZIONE ATTESA DELLA PORTATA MEDIA MENSILE

Le Tabelle da 5 a 16 mostrano, per ciascun bacino, l'*ensemble mean* delle variazioni attese della portata media mensile nei bacini di interesse sull'orizzonte futuro 2021-2050 rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, nonché la deviazione standard e il



coefficiente di variazione. Le stesse Tabelle riportano inoltre il valore di riferimento, consistente, per ciascun bacino, nell'*ensemble mean* dei valori di portata media mensile sul periodo di riferimento. Le campiture delle celle seguono lo stesso criterio utilizzato per la Tabella 3. Le singole realizzazioni per catena modellistica sono disponibili su richiesta agli autori.

Si nota, tra i vari scenari, una certa omogeneità di comportamento per i diversi bacini nelle diverse stagioni.

Nella stagione primaverile (Marzo, Aprile e Maggio) le variazioni assume sempre segno negativo, soprattutto sotto *RCP 4.5* e *2.6*, mentre solo per pochi casi isolati la variazione è positiva sotto *RCP 8.5*. Allo stesso modo, durante la stagione autunnale (Settembre, Ottobre e Novembre) la variazione è quasi sempre positiva, soprattutto sotto *RCP 2.6*, e soprattutto a novembre, tranne qualche caso isolato sotto *RCP 4.5* e *RCP 8.5*. In inverno le variazioni attese sono in generale più contenute, ma il segno ha un comportamento disomogeneo, con valori quasi sempre negativi sotto *RCP 2.6* e quasi sempre positivi sotto gli altri scenari. Fa eccezione il mese di Dicembre, dove si osservano forti anomalie negative sotto *RCP 8.5*, variazioni quasi sempre negative (ma meno importanti sotto *RCP 4.5*), e segno alterno per i vari bacini sotto *RCP 2.6*. Una simile disomogeneità si osserva anche in estate, dove si osservano variazioni per lo più negative (soprattutto sotto *RCP 2.6* e, secondariamente, *RCP 4.5*) nei mesi di Giugno e Luglio, mentre all'opposto Agosto vede forti anomalie positive sotto lo scenario *RCP 2.6* e, secondariamente, *RCP 8.5*, e forti anomalie negative sotto *RCP 4.5*.

Le variazioni negative attese in estate, pur significative in valore assoluto, si accompagnano a valori di riferimento per i vari invasi piuttosto bassi. Appaiono invece più critiche le variazioni negative attese in primavera, dove le portate di riferimento sono invece più alte. In questa stagione, appaiono alquanto critiche le diminuzioni attese per *Monte Cotugno* (soprattutto in Marzo e Aprile sotto *RCP 4.5*), *Traversa Agri* (soprattutto in Aprile sotto *RCP 4.5*) e *Traversa Santa Venere* (soprattutto sotto *RCP 2.6* e *4.5*). Gli



stessi bacini sperimentano invece tra i massimi aumenti in autunno e soprattutto nel mese di Novembre sotto *RCP 2.6* e, secondariamente, *RCP 8.5*.

Per le incertezze rimane valido lo stesso ragionamento delle portate medie inter-annuali. Si osservano in particolare valori molto alti di **CV** laddove **EM** è prossima allo zero. I valori più bassi di incertezza sono invece associati in media al mese di Novembre (*RCP 2.6*), al mese di Agosto (*RCP 4.5*), al mese di Dicembre (*RCP 8.5*) e al mese di Luglio (*RCP 2.6*).

Tabella 5: Per il mese di Gennaio, per ciascun bacino, ensemble mean della portata media mensile sul periodo di riferimento, in [mc/s]; ensemble mean EM, deviazione standard DS (entrambi in [%]) e coefficiente di variazione CV (adimensionale) della variazione, per i tre scenari RCP.

Invaso	Riferimento (1981-2010)	JAN								
		RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Conza	3.01	-7.58	11.6	1.5	16.64	19.8	1.2	4.14	18.0	4.3
Locone	0.53	10.34	47.5	4.6	17.46	40.1	2.3	26.32	63.0	2.4
Monte Cotugno	12.47	-5.50	20.2	3.7	7.69	13.9	1.8	8.52	20.0	2.4
Fortore	4.74	1.25	31.1	24.8	7.67	32.7	4.3	-2.63	28.2	10.7
Pertusillo	8.22	-1.09	17.7	16.4	9.90	11.0	1.1	3.92	22.3	5.7
Traversa Agri	15.33	-3.50	17.5	5.0	8.48	12.5	1.5	5.97	18.0	3.0
Traversa Santa Venere	7.03	-9.89	12.3	1.2	9.84	18.2	1.8	5.06	16.2	3.2
Traversa Sarmento	4.5	-11.94	19.4	1.6	3.85	19.2	5.0	7.80	33.7	4.3

Tabella 6: Per il mese di Febbraio, per ciascun bacino, ensemble mean della portata media mensile sul periodo di riferimento, in [mc/s]; ensemble mean EM, deviazione standard DS (entrambi in [%]) e coefficiente di variazione CV (adimensionale) della variazione, per i tre scenari RCP.

Invaso	Riferimento (1981-2010)	FEB								
		RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Conza	3.26	-5.35	20.3	3.8	-1.16	20.1	17.4	7.20	26.2	3.6
Locone	0.62	-1.45	35.4	24.5	10.18	43.3	4.2	18.84	48.0	2.6
Monte Cotugno	14.76	-2.49	22.3	9.0	-4.76	19.9	4.2	2.89	16.2	5.6
Fortore	5.27	4.23	30.7	7.2	7.03	25.8	3.7	9.37	30.8	3.3
Pertusillo	9.06	-2.34	19.3	8.3	3.17	15.1	4.8	3.80	18.6	4.9
Traversa Agri	16.92	-2.18	21.0	9.6	1.02	20.0	19.5	3.11	17.1	5.5
Traversa Santa Venere	7.48	-8.79	20.5	2.3	-3.92	23.0	5.9	5.50	21.7	4.0
Traversa Sarmento	5.06	-5.64	28.5	5.1	-10.01	32.7	3.3	-4.23	14.6	3.4



Tabella 7: Per il mese di Marzo, per ciascun bacino, ensemble mean della portata media mensile sul periodo di riferimento, in [mc/s]; ensemble mean EM, deviazione standard DS (entrambi in [%]) e coefficiente di variazione CV (adimensionale) della variazione, per i tre scenari RCP.

MAR										
Invaso	Riferimento (1981-2010)	RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Conza	2.69	-11.29	25.2	2.2	-9.14	23.3	2.5	4.46	31.6	7.1
Locone	0.55	-13.43	37.7	2.8	-0.37	47.7	130.3	3.60	40.5	11.2
Monte Cotugno	10.96	-10.84	27.9	2.6	-11.97	16.0	1.3	2.80	25.5	9.1
Fortore	5.22	-9.44	26.0	2.8	-8.49	21.9	2.6	-9.08	23.0	2.5
Pertusillo	7.7	-7.43	21.2	2.9	-1.38	20.9	15.1	6.74	24.4	3.6
Traversa Agri	13.25	-9.24	22.3	2.4	-5.46	20.0	3.7	5.75	26.6	4.6
Traversa Santa Venere	6.27	-15.34	23.1	1.5	-12.08	25.7	2.1	-0.71	27.7	38.9
Traversa Sarmento	3.71	-17.06	25.0	1.5	-19.73	18.5	0.9	-3.70	23.9	6.5

Tabella 8: Per il mese di Aprile, per ciascun bacino, ensemble mean della portata media mensile sul periodo di riferimento, in [mc/s]; ensemble mean EM, deviazione standard DS (entrambi in [%]) e coefficiente di variazione CV (adimensionale) della variazione, per i tre scenari RCP.

APR										
Invaso	Riferimento (1981-2010)	RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Conza	1.53	-9.05	22.7	2.5	-18.26	21.6	1.2	0.23	19.4	84.9
Locone	0.27	-10.59	38.7	3.7	0.36	47.9	131.9	4.84	35.2	7.3
Monte Cotugno	6.23	-6.57	28.3	4.3	-19.58	19.1	1.0	-3.73	23.3	6.2
Fortore	2.94	-6.46	32.4	5.0	-18.53	22.7	1.2	5.42	31.3	5.8
Pertusillo	4.65	-3.15	25.8	8.2	-9.77	17.7	1.8	2.10	22.1	10.5
Traversa Agri	7.8	-3.92	24.1	6.2	-11.19	21.6	1.9	-1.61	20.7	12.8
Traversa Santa Venere	3.63	-11.08	18.0	1.6	-17.41	19.8	1.1	-2.55	16.4	6.4
Traversa Sarmento	1.97	-12.82	23.2	1.8	-26.70	17.4	0.7	-11.04	16.2	1.5

Tabella 9: Per il mese di Maggio, per ciascun bacino, ensemble mean della portata media mensile sul periodo di riferimento, in [mc/s]; ensemble mean EM, deviazione standard DS (entrambi in [%]) e coefficiente di variazione CV (adimensionale) della variazione, per i tre scenari RCP.



Invaso	Riferimento (1981-2010)	MAY								
		RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Conza	0.69	-20.68	20.3	1.0	-19.89	23.4	1.2	-5.55	23.2	4.2
Locone	0.09	-14.05	55.5	3.9	-12.07	49.9	4.1	1.49	49.1	33.1
Monte Cotugno	2.85	-6.75	16.0	2.4	-0.56	28.2	50.1	-0.74	40.6	55.2
Fortore	1.2	-19.97	41.3	2.1	-32.14	29.7	0.9	-6.81	43.1	6.3
Pertusillo	2.48	-11.52	14.1	1.2	-12.39	16.7	1.4	-7.34	23.1	3.1
Traversa Agri	3.89	-11.24	15.6	1.4	-9.06	19.6	2.2	-5.17	30.7	5.9
Traversa Santa Venere	1.69	-22.19	18.9	0.8	-17.50	25.9	1.5	-4.16	23.9	5.8
Traversa Sarmento	0.83	-1.57	18.8	12.0	-0.44	28.6	64.3	1.99	44.7	22.5

Tabella 10: Per il mese di Giugno, per ciascun bacino, ensemble mean della portata media mensile sul periodo di riferimento, in [mc/s]; ensemble mean EM, deviazione standard DS (entrambi in [%]) e coefficiente di variazione CV (adimensionale) della variazione, per i tre scenari RCP.

Invaso	Riferimento (1981-2010)	JUN								
		RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Conza	0.39	-6.65	18.3	2.8	-6.45	31.0	4.8	30.97	52.9	1.7
Locone	0.03	-10.16	52.0	5.1	9.77	57.3	5.9	9.09	55.7	6.1
Monte Cotugno	1.29	-8.01	18.9	2.4	0.22	27.1	123.7	-2.10	25.5	12.1
Fortore	0.25	-18.47	54.2	2.9	-9.99	97.0	9.7	189.17	535.5	2.8
Pertusillo	0.93	-22.34	17.8	0.8	-13.05	22.1	1.7	-9.31	30.7	3.3
Traversa Agri	1.49	-19.33	18.9	1.0	-10.61	24.0	2.3	-8.56	30.5	3.6
Traversa Santa Venere	0.96	-5.31	22.9	4.3	-0.31	31.7	102.1	23.54	40.8	1.7
Traversa Sarmento	0.45	-6.53	14.3	2.2	-3.70	23.0	6.2	-2.94	20.1	6.9

Tabella 11: Per il mese di Luglio, per ciascun bacino, ensemble mean della portata media mensile sul periodo di riferimento, in [mc/s]; ensemble mean EM, deviazione standard DS (entrambi in [%]) e coefficiente di variazione CV (adimensionale) della variazione, per i tre scenari RCP.

Invaso	Riferimento (1981-2010)	JUL								
		RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Conza	0.24	-8.12	20.3	2.5	-7.23	14.7	2.0	3.21	13.1	4.1
Locone	0.02	-8.29	42.9	5.2	7.85	40.7	5.2	9.16	42.6	4.7
Monte Cotugno	0.72	-12.13	11.3	0.9	-15.13	13.5	0.9	-18.67	10.3	0.5
Fortore	0.03	-5.32	64.2	12.1	105.38	169.8	1.6	371.38	624.5	1.7
Pertusillo	0.19	-21.08	22.6	1.1	-8.74	36.5	4.2	-11.04	30.3	2.7
Traversa Agri	0.42	-20.39	19.1	0.9	-11.23	28.0	2.5	-17.89	18.3	1.0
Traversa Santa Venere	0.64	-11.07	18.3	1.6	-5.22	13.8	2.6	-2.35	12.6	5.4
Traversa Sarmento	0.32	-9.13	10.6	1.2	-10.32	8.3	0.8	-6.95	10.3	1.5

Tabella 12: Per il mese di Agosto, per ciascun bacino, ensemble mean della portata media mensile sul periodo di riferimento, in [mc/s]; ensemble mean EM, deviazione standard DS (entrambi in [%]) e coefficiente di variazione CV (adimensionale) della variazione, per i tre scenari RCP.

Variazioni attese sul regime delle portate per i bacini sottesi agli invasi artificiali di interesse di Acquedotto Pugliese S.p.A. - Implicazioni sul pericolo di indisponibilità della risorsa idrica



		AUG								
Invaso	Riferimento (1981-2010)	RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Conza	0.31	35.01	79.9	2.3	-22.97	25.0	1.1	31.68	75.9	2.4
Locone	0.01	9.02	78.4	8.7	45.43	89.4	2.0	75.14	138.1	1.8
Monte Cotugno	0.79	14.17	39.3	2.8	-26.56	13.3	0.5	0.25	27.3	110.3
Fortore	0.03	131.99	242.1	1.8	25.06	250.1	10.0	172.89	285.6	1.7
Pertusillo	0.08	1.87	59.0	31.6	-57.03	21.8	0.4	-8.79	69.4	7.9
Traversa Agri	0.48	25.12	51.3	2.0	-37.85	13.6	0.4	12.16	45.5	3.7
Traversa Santa Venere	0.89	31.10	64.9	2.1	-17.55	26.2	1.5	30.18	61.8	2.0
Traversa Sarmento	0.28	9.12	28.5	3.1	-15.27	13.9	0.9	7.75	23.2	3.0

Tabella 13: Per il mese di Settembre, per ciascun bacino, ensemble mean della portata media mensile sul periodo di riferimento, in [mc/s]; ensemble mean EM, deviazione standard DS (entrambi in [%]) e coefficiente di variazione CV (adimensionale) della variazione, per i tre scenari RCP.

		SEP								
Invaso	Riferimento (1981-2010)	RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Conza	0.69	29.23	91.1	3.1	12.27	38.1	3.1	20.54	53.4	2.6
Locone	0.02	603.20	1213.9	2.0	338.43	525.1	1.5	240.43	451.0	1.9
Monte Cotugno	2.06	39.56	80.0	2.0	-5.48	29.8	5.4	2.53	33.8	13.4
Fortore	0.27	301.87	531.0	1.8	-47.02	83.3	1.8	29.36	222.2	7.6
Pertusillo	0.3	108.10	362.6	3.4	-52.72	23.0	0.4	-45.89	29.3	0.6
Traversa Agri	1.62	57.38	127.4	2.2	-8.75	37.8	4.3	-8.80	30.6	3.5
Traversa Santa Venere	1.91	38.95	93.7	2.4	15.53	34.8	2.2	20.27	34.9	1.7
Traversa Sarmento	0.58	37.24	50.6	1.4	1.34	44.5	33.2	15.42	52.1	3.4

Tabella 14: Per il mese di Ottobre, per ciascun bacino, ensemble mean della portata media mensile sul periodo di riferimento, in [mc/s]; ensemble mean EM, deviazione standard DS (entrambi in [%]) e coefficiente di variazione CV (adimensionale) della variazione, per i tre scenari RCP.

		OCT								
Invaso	Riferimento (1981-2010)	RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Conza	1.01	12.13	52.9	4.4	17.83	29.5	1.7	32.82	61.0	1.9
Locone	0.06	177.13	231.5	1.3	54.07	85.7	1.6	118.67	185.1	1.6
Monte Cotugno	3.86	2.23	21.7	9.8	7.16	31.4	4.4	-9.73	27.5	2.8
Fortore	0.57	330.86	460.0	1.4	122.18	246.0	2.0	151.20	203.2	1.3
Pertusillo	1.38	3.20	62.0	19.4	-12.45	32.5	2.6	-7.64	44.4	5.8
Traversa Agri	3.94	2.24	33.3	14.8	-0.89	24.5	27.6	-9.76	27.8	2.8
Traversa Santa Venere	2.82	16.57	43.4	2.6	16.09	22.0	1.4	26.71	45.0	1.7
Traversa Sarmento	1.1	6.17	24.6	4.0	9.33	45.4	4.9	-4.32	44.6	10.3

Tabella 15: Per il mese di Novembre, per ciascun bacino, ensemble mean della portata media mensile sul periodo di riferimento, in [mc/s]; ensemble mean EM, deviazione



standard DS (entrambi in [%]) e coefficiente di variazione CV (adimensionale) della variazione, per i tre scenari RCP.

Invaso	Riferimento (1981-2010)	NOV								
		RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Conza	1.85	48.90	23.4	0.5	27.98	27.9	1.0	34.44	31.7	0.9
Locone	0.19	101.18	122.5	1.2	55.89	51.7	0.9	43.83	67.9	1.5
Monte Cotugno	7.6	22.91	26.3	1.1	3.99	20.3	5.1	20.46	32.4	1.6
Fortore	1.34	52.99	76.3	1.4	19.92	67.2	3.4	19.12	59.1	3.1
Pertusillo	3.72	34.02	30.5	0.9	8.00	19.0	2.4	22.34	43.7	2.0
Traversa Agri	8.55	32.83	23.5	0.7	6.58	17.3	2.6	21.06	31.8	1.5
Traversa Santa Venere	4.86	45.35	15.8	0.3	19.68	23.7	1.2	28.86	24.4	0.8
Traversa Sarmento	2.61	23.58	33.8	1.4	-0.40	29.8	74.8	17.97	42.3	2.4

Tabella 16: Per il mese di Dicembre, per ciascun bacino, ensemble mean della portata media mensile sul periodo di riferimento, in [mc/s]; ensemble mean EM, deviazione standard DS (entrambi in [%]) e coefficiente di variazione CV (adimensionale) della variazione, per i tre scenari RCP.

Invaso	Riferimento (1981-2010)	DEC								
		RCP 2.6			RCP 4.5			RCP 8.5		
		EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV	EM (%)	±DS (%)	CV
Conza	2.98	4.06	27.0	6.6	1.49	12.7	8.5	-10.74	15.8	1.5
Locone	0.35	90.11	120.3	1.3	42.94	48.1	1.1	12.65	62.6	4.9
Monte Cotugno	11.52	-4.26	22.9	5.4	-10.59	10.4	1.0	-17.13	9.1	0.5
Fortore	2.99	25.43	54.8	2.2	-2.56	34.5	13.5	-13.34	32.6	2.4
Pertusillo	7.27	4.94	17.0	3.4	-3.34	8.3	2.5	-4.29	15.8	3.7
Traversa Agri	14.37	1.16	20.7	17.9	-6.20	8.4	1.4	-11.40	10.5	0.9
Traversa Santa Venere	7.13	4.51	27.4	6.1	0.73	14.4	19.7	-12.36	16.6	1.3
Traversa Sarmento	4.26	-4.83	33.0	6.8	-14.24	9.6	0.7	-22.26	13.7	0.6

Per facilitare la lettura dei risultati, giacché non risulta semplice confrontare dalle Tabelle da 5 a 16 cosa accade sinteticamente nella stagione, le Tabelle da 17 a 20 presentano una mediazione dei valori presentati nelle tabelle mensili a livello stagionale, identificando con la sigla “DJF” l’inverno (Dicembre, Gennaio e Febbraio), con “MAM” la primavera (Marzo, Aprile e Maggio), con “JJA” l’estate (Giugno, Luglio e Agosto) e con “SON” l’autunno (Settembre, Ottobre e Novembre). Per ogni bacino, le Tabelle da 17 a 20 presentano quindi la media stagionale dell’ensemble mean e del coefficiente di variazione per ciascuna delle quattro stagioni.

Tabella 17: Per l’inverno, per ciascun bacino, media stagionale dell’ensemble mean della portata media mensile sul periodo di riferimento, in [mc/s]; media stagionale

Variazioni attese sul regime delle portate per i bacini sottesi agli invasi artificiali di interesse di Acquedotto Pugliese S.p.A. - Implicazioni sul pericolo di indisponibilità della risorsa idrica

dell'ensemble mean EM, in [%], e del coefficiente di variazione CV (adimensionale) della variazione di portata media mensile, per i tre scenari RCP.



31

		DJF					
Invaso	Riferimento (1981-2010)	RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 8.5	
		EM (%)	CV	EM (%)	CV	EM (%)	CV
Conza	3.08	-2.96	3.97	5.66	9.03	0.20	3.13
Locone	0.50	33.00	10.13	23.53	2.53	19.27	3.30
Monte Cotugno	12.92	-4.08	6.03	-2.55	2.33	-1.91	2.83
Fortore	4.33	10.30	11.40	4.05	7.17	-2.20	5.47
Pertusillo	8.18	0.50	9.37	3.24	2.80	1.14	4.77
Traversa Agri	15.54	-1.51	10.83	1.10	7.47	-0.77	3.13
Traversa Santa Venere	7.21	-4.72	3.20	2.22	9.13	-0.60	2.83
Traversa Sarmiento	4.61	-7.47	4.50	-6.80	3.00	-6.23	2.77

Tabella 18: Per la primavera, per ciascun bacino, media stagionale dell'ensemble mean della portata media mensile sul periodo di riferimento, in [mc/s]; media stagionale dell'ensemble mean EM, in [%], e del coefficiente di variazione CV (adimensionale) della variazione di portata media mensile, per i tre scenari RCP.

		MAM					
Invaso	Riferimento (1981-2010)	RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 8.5	
		EM (%)	CV	EM (%)	CV	EM (%)	CV
Conza	1.64	-13.67	1.90	-15.76	1.63	-0.29	32.07
Locone	0.30	-12.69	3.47	-4.03	88.77	3.31	17.20
Monte Cotugno	6.68	-8.05	3.10	-10.70	17.47	-0.56	23.50
Fortore	3.12	-11.96	3.30	-19.72	1.57	-3.49	4.87
Pertusillo	4.94	-7.37	4.10	-7.85	6.10	0.50	5.73
Traversa Agri	8.31	-8.13	3.33	-8.57	2.60	-0.34	7.77
Traversa Santa Venere	3.86	-16.20	1.30	-15.66	1.57	-2.47	17.03
Traversa Sarmiento	2.17	-10.48	5.10	-15.62	21.97	-4.25	10.17

Tabella 19: Per l'estate, per ciascun bacino, media stagionale dell'ensemble mean della portata media mensile sul periodo di riferimento, in [mc/s]; media stagionale dell'ensemble mean EM, in [%], e del coefficiente di variazione CV (adimensionale) della variazione di portata media mensile, per i tre scenari RCP.

		JJA					
Invaso	Riferimento (1981-2010)	RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 8.5	
		EM (%)	CV	EM (%)	CV	EM (%)	CV
Conza	0.31	6.75	2.53	-12.22	2.63	21.95	2.73
Locone	0.02	-3.14	6.33	21.02	4.37	31.13	4.20
Monte Cotugno	0.93	-1.99	2.03	-13.82	41.70	-6.84	40.97
Fortore	0.10	36.07	5.60	40.15	7.10	244.48	2.07
Pertusillo	0.40	-13.85	11.17	-26.27	2.10	-9.71	4.63
Traversa Agri	0.80	-4.87	1.30	-19.90	1.73	-4.76	2.77
Traversa Santa Venere	0.83	4.91	2.67	-7.69	35.40	17.12	3.03
Traversa Sarmiento	0.35	-2.18	2.17	-9.76	2.63	-0.71	3.80



Tabella 20: Per l'autunno, per ciascun bacino, media stagionale dell'ensemble mean della portata media mensile sul periodo di riferimento, in [mc/s]; media stagionale dell'ensemble mean EM, in [%], e del coefficiente di variazione CV (adimensionale) della variazione di portata media mensile, per i tre scenari RCP.

Invaso	Riferimento (1981-2010)	SON					
		RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 8.5	
		EM (%)	CV	EM (%)	CV	EM (%)	CV
Conza	1.18	30.09	2.67	19.36	1.93	29.27	1.80
Locone	0.09	293.84	1.50	149.46	1.33	134.31	1.67
Monte Cotugno	4.51	21.57	4.30	1.89	4.97	4.42	5.93
Fortore	0.73	228.57	1.53	31.69	2.40	66.56	4.00
Pertusillo	1.80	48.44	7.90	-19.06	1.80	-10.40	2.80
Traversa Agri	4.70	30.82	5.90	-1.02	11.50	0.83	2.60
Traversa Santa Venere	3.20	33.62	1.77	17.10	1.60	25.28	1.40
Traversa Sarmento	1.43	22.33	2.27	3.42	37.63	9.69	5.37

4.3 SINTESI DEI RISULTATI PER SCENARIO RCP

Per facilitare l'interpretazione dei risultati, e soprattutto per esplicitare il ruolo dello scenario di concentrazione, appare utile mediare i risultati in termini di *ensemble mean* e coefficiente di variazione delle variazioni attese di portata, sui diversi bacini. A tale scopo, la Tabella 21 presenta una sintesi dell'*ensemble mean* e del coefficiente di variazione associati alla variazione percentuale di portata media annua da attendersi in futuro per ogni scenario *RCP*. Allo stesso modo, la Tabella 22 presenta analoga informazione ma per le portate medie mensili e le corrispondenti medie stagionali. Appare interessante notare come la variazione positiva di portata media annua sia più gravosa (anche se modesta in valore assoluto) per lo scenario *RCP 8.5*, appena più leggera sotto lo scenario *RCP 2.6* (Tabella 21). Tuttavia, lo stesso scenario *RCP 8.5* presenta anche il valore di incertezza maggiore associato alla variazione di portata (Tabella 21). Per quanto riguarda le portate medie mensili/stagionali, lo scenario che presenta le maggiori variazioni negative (Tabella 22) è *RCP 2.6*, mentre sotto *RCP 8.5* si hanno le maggiori variazioni positive. Per tutti gli scenari, in primavera si hanno le maggiori diminuzioni, in autunno i maggiori aumenti. Tuttavia, sotto *RCP 8.5* aumenti molto significativi sono attesi in estate, il cui comportamento sotto gli altri scenari è più disomogeneo, così come per l'inverno. La Tabella 22 mostra anche l'incertezza



associata a queste variazioni: è importante notare come questa sia particolarmente elevata in tutti gli scenari e per tutte le stagioni, ma valori particolarmente elevati si riscontrano per *RCP 4.5* e *RCP 8.5* in primavera e estate. Sotto *RCP 2.6*, i risultati per la primavera e l'autunno mostrano il valore di incertezza minore in assoluto. Ancora una volta, i valori maggiori del coefficiente di variazione sono in larga parte associati ai valori assoluti più bassi di variazione attesa.

Il confronto tra le Tabelle 21 e 22 dimostra quanto troppo semplificata risulti l'analisi delle portate alla sola scala annuale. Appare infatti in Tabella 21 che sia attesa, in media nell'anno, una variazione pressoché nulla sotto *RCP 4.5*, mentre la Tabella 22 dimostra che essa è in realtà frutto di una compensazione tra variazioni positive e negative anche molto significative in valori assoluto, le prime per lo più in autunno e inverno, le seconde per lo più in primavera ed estate. Tale effetto di compensazione si registra comunque anche sotto gli altri scenari: sotto *RCP 2.6* le variazioni sono negative in primavera, estate e parte dell'inverno, e positive soprattutto in autunno; sotto *RCP 8.5* le variazioni sono quasi sempre positive (soprattutto in estate, autunno e, secondariamente, inverno) e debolmente negative in primavera.

Le incertezze associate sono in generale, in media tra i bacini, molto grandi, con i valori inferiori raggiunti sotto lo scenario *RCP 2.6* (dove infatti la media dei **CV** mensili è pari a 4.58), seguito da *RCP 8.5* (media dei **CV** mensili pari a 7.39) e infine *RCP 4.5* (media dei **CV** mensili pari a 10.81). Confrontando tali valori medi del **CV** mensili (non riportati in alcuna tabella ma solo nel testo) con i valori medi annui di **CV** in Tabella 21, si intuisce rapidamente come le incertezze legate alla stima della variazione delle portate medie mensili siano, in media, per quanto alte, inferiori a quelle legate alla stima della variazione delle portate medie inter-annuali.

Tabella 21: Valore medio tra i bacini dell'ensemble mean della portata media annua sul periodo di riferimento, in [mc/s]; ensemble mean della variazione, in [%], e del coefficiente di variazione associato, adimensionale, per i tre scenari RCP.



CMCC Technical Notes

Scenario RCP	riferimento (1981-2010)	ΔQ [%]	CV [-]
2.6	3.38	2.87	11.9
4.5		0.07	9.1
8.5		2.91	14.6

5 DISCUSSIONE

I risultati delle analisi presentate dipingono un quadro di non facile interpretazione, in cui l'incertezza legata alle variazioni di portata è un elemento dominante. Tuttavia si possono trarre delle considerazioni importanti sulle variazioni di portata stimate per i diversi scenari *RCP*. Si noti che, all'interno di questa attività, le variazioni sulle portate medie da attendersi in futuro per effetto del cambiamento climatico sono analizzate alla luce dell'utilizzo della risorsa idrica superficiale a scopo idropotabile. Di conseguenza, il pericolo rappresentato dalla variabile "portata media annua/stagionale/mensile" è la diminuzione della risorsa idrica fluente in ingresso agli invasi: una variazione negativa comporta dunque un aumento del pericolo per effetto dei cambiamenti climatici; una variazione positiva comporta invece una diminuzione del pericolo.

Per quanto riguarda la portata media annua, essa è stimata in generale aumento sotto gli scenari *RCP 2.6* e *8.5*, mentre in generale diminuzione sotto lo scenario *RCP 4.5*. Tuttavia sussiste una certa variabilità spaziale, tale per cui bacini come *Conza* e *Locone*, localizzati nella parte settentrionale della regione di studio, mostrano variazioni positive mentre *Monte Cotugno* e *Traversa Sarmiento*, localizzati nella zona più meridionale, presentano variazioni negative. Anche passando alla scala mensile, gli scenari *RCP 2.6* e *8.5* risultano i più impattanti dal punto di vista della variazione dei deflussi. In particolare, le variazioni positive maggiori si riscontrano in autunno sotto lo scenario *RCP 2.6* e in estate e autunno sotto lo scenario *RCP 8.5*. I bacini che contribuiscono maggiormente a determinare questo pattern sono *Conza*, *Locone*, *Fortore* e *Traversa Santa Venere*, tutti localizzati nella parte centro-settentrionale della regione di studio. La primavera è, invece, caratterizzata da una discreta diminuzione delle portate medie sotto gli scenari *RCP 2.6* e *4.5*, in tutti i bacini considerati. Si può quindi concludere che gli scenari a cui prestare maggiore attenzione in ottica di variazione dei deflussi sono *RCP 2.6* e *8.5*, i quali presentano (soprattutto *RCP 2.6*) una stagionalità ben marcata. Entrambi gli scenari mostrano altresì incertezze ben marcate,





36

CMCC Technical Notes

come testimoniato dai valori di coefficiente di variazione medi, sia per la portata media annua che per la portata media mensile. In particolare, lo scenario *RCP 8.5* mostra valori di incertezza particolarmente elevati in primavera ed estate.

Dai risultati presentati si può quindi osservare che, data l'elevata non-linearità di tutti i processi coinvolti (sia quelli atmosferici sia quelli al suolo), non è immediato concludere che, se lo scenario *RCP 8.5* è il più critico dal punto di vista dell'aumento delle temperature, esso sia anche il più critico dal punto di vista delle portate medie. Infatti, è lo scenario *RCP 4.5* a mostrare importanti diminuzioni del deflusso superficiale, che possono dunque comportare una "pericolosa" diminuzione dei volumi idrici in ingresso agli invasi, e dunque una minore disponibilità al prelievo. Da un'altra prospettiva, lo scenario *RCP 8.5* non risulta il più estremo neanche considerando un aumento del deflusso, poiché le maggiori variazioni positive sono attese sotto lo scenario *RCP 2.6*, che risulta più critico. Tali considerazioni suggeriscono più che mai il ricorso a strategie e azioni di adattamento, per gestire quegli impatti negativi che, anche sotto lo scenario più ottimistico, non possono essere evitati.

Tabella 22: Valore medio sui bacini dell'ensemble mean della variazione di portata media mensile, e sua media stagionale per i bacini considerati, per i diversi scenari RCP. Valori di riferimento espressi in [mc/s], valori di variazione espressi in [%].

Variazioni attese sul regime delle portate per i bacini sottesi agli invasi artificiali di interesse di Acquedotto Pugliese S.p.A. - Implicazioni sul pericolo di indisponibilità della risorsa idrica



Scenario RCP	Stagione	riferimento (1981-2010)	ΔQ [%]	CV [-]	Mese	riferimento (1981-2010)	ΔQ [%]	CV [-]
2.6	DJF	7.05	2.88	7.43	Dic	6.36	15.14	6.21
					Gen	6.98	-3.49	7.36
					Feb	7.80	-3.00	8.72
	MAM	3.88	-11.07	3.20	Mar	6.29	-11.76	2.33
					Apr	3.63	-7.95	4.16
					Mag	1.72	-13.50	3.10
	JJA	0.47	2.71	4.22	Giu	0.72	-12.10	2.68
					Lug	0.32	-11.94	3.19
					Ago	0.36	32.18	6.80
	SON	2.20	88.66	3.48	Set	0.93	151.94	3.28
					Ott	1.84	68.82	7.21
					Nov	3.84	45.22	0.96
4.5	DJF	7.05	3.81	5.42	Dic	6.36	1.03	6.04
					Gen	6.98	10.19	2.37
					Feb	7.80	0.19	7.86
	MAM	3.88	-12.24	17.71	Mar	6.29	-8.58	19.82
					Apr	3.63	-15.14	17.61
					Mag	1.72	-13.01	15.71
	JJA	0.47	-3.56	12.20	Giu	0.72	-4.27	32.04
					Lug	0.32	6.92	2.48
					Ago	0.36	-13.34	3.08
	SON	2.20	25.36	7.90	Set	0.93	31.70	6.51
					Ott	1.84	26.66	5.76
					Nov	3.84	17.71	11.42
8.5	DJF	7.05	1.11	3.54	Dic	6.36	-9.86	2.00
					Gen	6.98	7.39	4.51
					Feb	7.80	5.81	4.11
	MAM	3.88	-0.95	14.80	Mar	6.29	1.23	10.45
					Apr	3.63	-0.79	16.93
					Mag	1.72	-3.29	17.01
	JJA	0.47	36.58	8.03	Giu	0.72	28.73	4.78
					Lug	0.32	40.86	3.70
					Ago	0.36	40.16	16.61
	SON	2.20	32.50	3.20	Set	0.93	34.23	4.33
					Ott	1.84	37.25	3.53
					Nov	3.84	26.01	1.73

Variazioni positive attese mediamente sull'anno possono essere il frutto di variazioni istantanee (in altre parole, mensili) di segno opposto. Si veda, ad esempio, il bacino del Locone, per il quale sotto lo scenario RCP 2.6 è attesa una variazione positiva della portata media annua, che è il frutto di un significativo aumento autunnale, mediato a una diminuzione non trascurabile attesa in tutto il resto dell'anno. Più in generale, una diminuzione delle portate in estate e un aumento in autunno esaspera il fenomeno noto come "intensificazione della stagionalità". Alla luce dell'utilizzo materiale della risorsa, è chiaro che una diminuzione dei volumi disponibili in estate, quando le precipitazioni sono generalmente basse, può comportare, tra le altre conseguenze, un maggior utilizzo a scopo irriguo, che si pone in competizione con quello idropotabile quandanche quest'ultimo potesse essere considerato costante nell'anno. Tale competizione può venire esacerbata dai maggiori consumi idropotabili che tipicamente occorrono in estate, per le caratteristiche del clima ma anche per l'aumento della popolazione nei territori a vocazione turistica serviti dagli invasi. Di contro, l'aumento atteso di portata mensile in alcuni mesi dell'anno può costituire un'opportunità di invasare una risorsa idrica "aggiuntiva", che può essere sfruttata, ad esempio, adeguando la regolazione degli



CMCC Technical Notes

invasi in modo tale che questi possano contemplare la possibilità di immagazzinare maggiori volumi in determinati periodi.

Il dataset investigato è il frutto dell'applicazione di modelli idrologici che vedono, in input, proiezioni bias-corrette di precipitazione e temperatura. Pertanto, i risultati sono a rigore analizzabili in valore assoluto, ovvero in termini di portate medie sul periodo di riferimento e sul periodo futuro. Tuttavia, nel presente documento si è scelto di rappresentare i risultati in termini di variazione climatica (ovvero come differenza percentuale dei valori tra il periodo futuro e quello di riferimento), ritenendo tale informazione più credibile a causa delle elevate semplificazioni nel settaggio del modello idrologico, che è stato applicato alla scala pan-europea e non è dunque customizzato sui bacini di interesse. I valori di portata media annua e media mensile sono comunque riportati in disponibili su richiesta agli autori. Un altro importante motivo alla base della rappresentazione dei risultati è costituito dalla necessità di "isolare" il solo effetto del cambiamento climatico, giacché l'evoluzione futura di elementi quali le coperture, gli usi del suolo, le regolazioni antropiche, non è inclusa nella modellazione, rendendo i valori futuri di portata poco realistici in valore assoluto. Per i bacini oggetto di studio manca una raccolta sistematica e ufficiale dei dati di portata giornaliera che consenta un'ampia validazione del modello idrologico, e dunque non è possibile verificare in modo completo l'affidabilità dei risultati. Per quanto discusso, l'assenza di un riferimento esatto con cui confrontare i valori di portata attesi in futuro determina un'ulteriore fonte di incertezza, consistente nella variabilità della stima della portata media sul periodo presente, che, in generale, contribuisce all'elevata incertezza delle stime presentate in questa analisi. Tuttavia, il *Progetto Ô*⁶ (finanziato dall'Unione Europea nell'ambito del programma *Horizon 2020*, e che vede AQP tra i partner) ha messo a disposizione della Convenzione serie di portate giornaliera per i bacini *Conza*, *Locone*, *Monte Cotugno*, *Occhito* e *Pertusillo*, che si intende adoperare a scopo di validazione sia per la presente attività,

⁶ <https://www.eu-project-o.eu/>

Variazioni attese sul regime delle portate per i bacini sottesi agli invasi artificiali di interesse di Acquedotto Pugliese S.p.A. - Implicazioni sul pericolo di indisponibilità della risorsa idrica

sia per l'attività CG01.49.2.13 relativa al target "Invasi – qualità". La validazione sarà comunque parziale, sia perché non riguarda tutti i bacini, sia perché tali dati si riferiscono all'intervallo temporale 2010-2019, che dunque non si sovrappone con il periodo di riferimento. Sarà dunque necessario, per tale verifica, confrontare i dati osservati con serie di dati di portata giornaliera estranei ai campioni analizzati nel presente report.



39

6. CONCLUSIONI E MESSAGGI CHIAVE

La portata media mensile/stagionale/inter-annuale, riferita ai bacini aventi come sezioni di chiusura gli invasi oggetto di interesse, è considerata in questa attività come rappresentativa (“proxy”) dei pericoli connessi alla disponibilità di risorsa idrica fluente a mezzo di tali invasi. In altre parole, *una variazione negativa (diminuzione) di questa variabile rappresenta un aumento del pericolo di indisponibilità di risorsa per effetto del cambiamento climatico*, ed è quindi ciò da cui ci si vuole cautelare; una variazione positiva (aumento) rappresenta invece una diminuzione del pericolo di indisponibilità, per effetto del cambiamento climatico. Non sono presi dunque in considerazione ulteriori elementi che certamente concorrono a una possibile variazione futura della quantità di risorsa idrica fluente, quali le caratteristiche di suolo e copertura o eventuali azioni antropiche regolatrici sui bacini.

In media sull'intero territorio analizzato, e in media sull'anno, tutti gli scenari *RCP* forniscono un aumento atteso della portata, sebbene tale informazione sia associata a un alto valore di incertezza. Tuttavia, scendendo alla scala stagionale, si nota un importante effetto di compensazione. Infatti, in media sul territorio, e in media sulla stagione, *è da attendersi una notevole diminuzione della risorsa (ovvero, un aumento del pericolo) essenzialmente in primavera, soprattutto sotto RCP 4.5* (variazione media attesa del -12.24%, Tabella 22), seguito da *RCP 2.6* (-11.07%) e infine da *RCP 8.5* (-0.95%). *Tali diminuzioni sono rilevanti non soltanto in valore assoluto, ma anche perché sono associate a valori medi di riferimento piuttosto alti*, in particolare durante i primi mesi della stagione. Diminuzioni, sebbene di entità minore, sono inoltre da attendersi d'estate, dove però i valori di riferimento sono più bassi (i minimi dell'anno).

Sempre in termini medi, *è interessante notare come le maggiori opportunità siano rappresentate dalla stagione autunnale, e soprattutto sotto RCP 2.6* (che vede una variazione attesa media di +88.66%, Tabella 22), seguito da *RCP 8.5* (+32.5%) e infine da *RCP 4.5* (+25.36%). Tali variazioni sono certamente significative in valore assoluto, sebbene associate a valori di riferimento più bassi che in primavera (dove invece sono



40



previste diminuzioni). Notevoli aumenti sono inoltre da attendersi in estate sotto RCP 8.5 (+36.58%), sebbene associati a valori di riferimento di portata molto piccoli.

Analizzando invece il comportamento dei singoli bacini, a livello annuo (sebbene, per quanto detto, analisi a tale livello siano fin troppo semplicistiche), il bacino che sperimenta la più grande diminuzione di portata è *Traversa Sarmento* sotto RCP 4.5, che però presenta un valore di riferimento tra i più bassi tra tutti i bacini. Invece, i due bacini che presentano il maggiore valore di riferimento di portata media annua sono *Traversa Agri* e *Monte Cotugno*. Il primo invaso vede la maggiore diminuzione (-1.79%, Tabella 3) sotto RCP 4.5, e anche il secondo (-4.75%). Scendendo a scala stagionale (poiché la scala mensile, rappresentata in Tabella 18, appare troppo erratica per trarre una sintesi dei risultati), il bacino che vede la maggiore diminuzione è *Pertusillo* in estate sotto RCP 4.5 (-26.27%), associato però a un valore di riferimento molto basso. *Nella stagione invernale, che vede i valori di riferimento massimi nell'anno (seguito dalla primavera), il bacino che sperimenta la maggiore diminuzione è Traversa Sarmento sotto RCP 2.6 e sotto RCP 4.5 (-7.47% e -6.8% rispettivamente). I bacini che presentano i valori maggiori sul periodo di riferimento in inverno sono Traversa Agri, che vede una diminuzione massima di -1.51% sotto RCP 2.6, seguito da Monte Cotugno, che vede una diminuzione massima di -4.08% sempre sotto RCP 2.6.*

In primavera, la maggiore diminuzione è attesa sul bacino del Fortore sotto RCP 4.5 (-19.72%), seguito da Traversa Santa Venere sotto RCP 2.6 (-16.2%). Per entrambi i bacini i valori di riferimento sono considerevoli ma non i massimi. I bacini che sperimentano invece il massimo valore di riferimento, per la stagione primaverile, sono ancora una volta Traversa Agri e Monte Cotugno, che vedono una diminuzione massima del -8.57% e del -10.7% rispettivamente, entrambi sotto RCP 4.5.

Tutte le valutazioni appena riportate sono associate ad incertezze, in termini di coefficiente di variazione, molto alte. Il motivo di ciò va ricercato, tra i vari aspetti, nell'utilizzo di un ensemble di proiezioni, nella decisione di rappresentare i risultati come



42

CMCC Technical Notes

variazioni, e nel ridotto numero di catene di simulazione climatica utilizzate. Le motivazioni, le assunzioni e le limitazioni associate ai risultati qui presentati sono ampiamente descritte nella [NOTA METODOLOGICA](#) e nella [DISCUSSIONE](#).



BIBLIOGRAPHY

Beven, K., Binley, A., 1992. The Future of Distributed Models: Model Calibration and Uncertainty Prediction. *Hydrol. Process.*, 6(3), 279-98.

Donnelly, C., Andersson, J. C. M., & Arheimer, B., 2016. Using flow signatures and catchment similarities to evaluate the E-HYPE multi-basin model across Europe. *Hydrol. Sci. J.* 61(2), 255-273. doi:10.1080/02626667.2015.1027710

Hundecha, Y., Arheimer, B., Berg, P., Capell, R., Musuuza, J., Pechlivanidis, I., & Photiadou, C., 2020. Effect of model calibration strategy on climate projections of hydrological indicators at a continental scale. *Climatic Change*, 163(3), 1287-1306.

Lindström, G., Pers, C., Rosberg, J., Strömqvist, J., Arheimer, B., 2010. Development and testing of the HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) water quality model for different spatial scales. *Hydrol Res* 41(3-4):295-319. doi:10.2166/nh.2010.007

Ntegeka, V., Salamon, P., Gomes, G. et al., 2013. EFAS-Meteo: A European daily high-resolution gridded meteorological data set for 1990-2011. Report EUR, 26408.

Pianosi, F., Fanny, S., Wagener, T., 2015. A Matlab Toolbox for Global Sensitivity Analysis. *Environ Modell Softw* 70, 80-85.