

Deflussi di grandi bacini imbriferi

Sommario

Le mappe mostrano le variazioni del deflusso medio mensile, stagionale e annuale, come pure i parametri caratterizzanti le portate minime NM7Q e Q_{347} , per i tre scenari di emissione RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5 per i tre periodi 2020–2049, 2045–2074 e 2070–2099 rispetto al periodo di riferimento 1981–2010. Come da convenzione [1] i valori del parametro Q_{347} sono rappresentati a metà dei periodi decennali sui quali sono stati calcolati. L'attenzione si concentra sul deflusso dei grandi bacini imbriferi, la maggior parte dei quali ha una superficie $> 1000 \text{ km}^2$. I deflussi dei bacini di medie dimensioni sono trattati dalla mappa L01, mentre i bacini alpini fortemente glaciali dalla mappa L03. Va notato che l'approccio metodologico delle tre mappe è diverso.

Autori: Massimiliano Zappa¹, Florian Lustenberger¹, Rolf Weingartner², Alain Bühlmann², Regula Mülchi³

¹ Istituto federale di ricerca WSL, Idrologia di montagna e movimenti di massa, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf

² Atlante idrologico della Svizzera, Hallerstrasse 12, CH-3012 Berna

³ Università di Berna, Istituto di geografia, Hallerstrasse 12, CH-3012 Berna

1 Introduzione

Il clima globale sta cambiando. Negli ultimi decenni le concentrazioni di gas serra emessi dall'attività umana sono cresciute a un ritmo sempre maggiore, portando con sé un aumento globale della temperatura [2] con effetti conseguenti sulla criosfera. Contemporaneamente stanno cambiando anche le condizioni delle precipitazioni [3]. Si prevede che le precipitazioni aumenteranno in inverno e diminuiranno in estate ([2] vedi mappa K01), influenzando direttamente il deflusso. In effetti, i volumi del deflusso estivo di vari bacini imbriferi sono già diminuiti negli ultimi quarant'anni [4]. In Svizzera si prevedono quindi bassi volumi di deflusso o addirittura scarsità d'acqua, soprattutto in estate. L'Altopiano centrale sarà probabilmente più colpito che la regione alpina [5]. Gli scenari di deflusso sono importanti per poter valutare meglio e soprattutto in modo quantitativo i cambiamenti di questa risorsa.

2 Dati e metodi

Per la presente mappa L02, i deflussi medi dei grandi bacini imbriferi sono stati simulati con il modello PREVAH (Precipitation-Runoff-EVapotranspiration-HRU related hydrological Model). È stata utilizzata la versione del modello spazialmente esplicito con una risoluzione di $200 \text{ m} \cdot 200 \text{ m}$ [6]. I parametri del modello sono stati precedentemente calibrati, convalidati e regionalizzati per la Svizzera negli studi di Viviroli et al. [7], Viviroli et al. [8] e Köplin et al. [9]. A partire da questi, è stato compilato un set completo di parametri a griglia con una risoluzione spaziale di $2 \text{ km} \cdot 2 \text{ km}$, già utilizzato precedentemente da Bernhard e Zappa [10] e Speich et al. [6]. Per l'interpolazione spaziale è stato utilizzato il metodo Kriging. I parametri PREVAH sono stati presi da questo set.

Come input per i modelli sono stati utilizzati i valori delle precipitazioni, della temperatura, dell'umidità relativa, della radiazione globale e del vento in prossimità del suolo di stazioni rappresentative di MeteoSvizzera durante il periodo 1975–2016. I dati meteorologici sono stati interpolati spazialmente utilizzando una re-

gressione dipendente dall'altitudine e un'interpolazione dipendente dalla distanza [7]. Per l'utilizzo del suolo e il modello altimetrico digitale si è attinto alle statistiche riguardanti la superficie nazionale dell'Ufficio federale di statistica (GEOSTAT) (versione 1992/97). Le misurazioni della neve utilizzate provengono dal sistema di misurazione e informazione intercantonale (IMIS) e dall'Istituto WSL per lo studio della neve e delle valanghe (SLF) [11]. Infine, l'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM) ha fornito dati sui deflussi giornalieri per la calibrazione e la convalida del modello. Prima del loro uso, i dati meteorologici sono stati interpolati spazialmente con una regressione dipendente dall'altitudine e un'interpolazione dipendente dalla distanza [7].

L'estensione futura dei ghiacciai è stata calcolata con il metodo sviluppato da Zekollari et al. [12] e precedentemente utilizzato da Brunner et al. [5] per la modellizzazione del deflusso (vedi anche la mappa L04).

I dati CH2018 [3] sono stati utilizzati come input per la modellizzazione del futuro deflusso medio. Ciò ha richiesto il ridimensionamento delle risposte dei modelli climatici al livello delle stazioni (vedi «Daily Local» in CH2018). In totale sono state utilizzate 39 catene di modelli, basate sugli scenari di emissione RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5 (vedi tabella 1). Questa selezione di modelli è leggermente più limitata di quella della mappa L01, in quanto sono necessarie variabili aggiuntive (come il vento) per calcolare l'evaporazione, che non sono disponibili in tutti i modelli climatici.

Le simulazioni dei deflussi medi si riferiscono a quattro periodi: periodo di riferimento (1981–2010), futuro prossimo (2020–2049), futuro medio (2045–2074) e futuro remoto (2070–2099). Quali indicatori di periodi di portata minima si sono impiegati il valore medio trentennale delle portate minime mediate su 7 giorni consecutivi (NM7Q) nel corso di un anno o di una stagione e il parametro Q_{347} , calcolato come il 5% percentile dei deflussi giornalieri medi su 10 anni. L'intervallo di confidenza è stato derivato dalle simulazioni delle catene di modelli appartenenti ad un RCP.

GCM	init	RCM	RCP8.5		RCP4.5		RCP2.6	
			0.11°	0.44°	0.11°	0.44°	0.11°	0.44°
ICHEC-EC-EARTH	r1i1p1	KNMI-RACMO22E		☑		☑		
		DMI-HIRHAM5	☑		☑		☑	
	r12i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17		☑				
		CLMcom-CCLM5-0-6		☑				
		SMHI-RCA4	☑		☑		☑	
MOHC-HadGEM2-ES	r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17		☑				
		CLMcom-CCLM5-0-6		☑				
		ICTP-RegCM4-3						
		KNMI-RACMO22E		☑		☑		☑
		SMHI-RCA4	☑		☑			☑
MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17			☑			
		CLMcom-CCLM5-0-6			☑			
		MPI-CSC-REM02009						
		SMHI-RCA4	☑		☑			☑
	r2i1p1	MPI-CSC-REM02009						☑
MIROC-MIROC5	r1i1p1	CLMcom-CCLM5-0-6		☑				
		SMHI-RCA4		☑		☑		☑
CCCma-CanESM2	r1i1p1	SMHI-RCA4		☑		☑		
CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0	r1i1p1	SMHI-RCA4						
IPSL-IPSL-CM5A-MR	r1i1p1	SMHI-RCA4						
NCC-NorESM1-M	r1i1p1	SMHI-RCA4		☑		☑		☑
NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M	r1i1p1	SMHI-RCA4						

Tabella 1. L'insieme dei modelli degli scenari climatici CH2018 è il risultato di diverse catene di modelli (simulazioni). Si tratta di una sequenza di modelli climatici globali (GCM) e regionali (RCM), avviati sulla base condizioni iniziali (init) in parte diverse. Il testo di accompagnamento per la mappa K01 o K02 fornisce una panoramica di tutti i modelli disponibili in CH2018. Nella metà destra della figura sono contrassegnati (☑) i modelli presi in considerazione nel presente studio per calcolare le statistiche d'insieme (mediana, minima, massima), suddivisi secondo gli scenari di emissione (RCP) e la loro risoluzione spaziale (0.11° o 0.44°). Il confronto di questa tabella con la stessa di altre mappe (K01/K02, L01, L03 e L04) rivela le differenze nelle serie di modelli considerati. tabella elaborata sulla base di [3].

3 Risultati

Indipendentemente dalla regione e dallo scenario di emissione, i risultati indicano un aumento del deflusso in inverno e in primavera, e una sua diminuzione in estate e in autunno. Per tutti e tre gli RCP, i deflussi medi annui sul periodo di 30 anni tendono a diminuire verso la fine del secolo. Tuttavia, questa tendenza è meno pronunciata se confrontata con i cambiamenti stagionali.

Nei principali bacini imbriferi alpini del Rodano e dell'Inn, l'influsso della neve e, in particolare, dello scioglimento dei ghiacciai diminuisce nel corso del 21° secolo. Abbinato alla diminuzione delle precipitazioni estive (Mappa K01), questo porta ad una diminuzione del deflusso in estate; questo effetto è più pronunciato alla fine del secolo e nello scenario RCP8.5. Tra dicembre e maggio gli scenari mostrano generalmente un aumento del deflusso.

Lungo l'Aar, gli stessi cambiamenti di deflusso si presenta nel corso superiore a quello inferiore entro fine secolo: un aumento del deflusso invernale a causa delle temperature più elevate e un leggero aumento delle precipitazioni, con una contemporanea diminuzione del deflusso estivo per mancanza di precipitazioni (K01) e, soprattutto verso fine secolo, un ridotto scioglimento dei ghiacciai. Sebbene verso fine secolo, in base a RCP8.5, il deflusso mensile massimo nel corso inferiore del fiume si verifichi ancora a inizio estate, questi cambiamenti di deflusso si traducono in una dicotomia con deflussi mensili elevati simili tra dicembre e giugno, e deflussi mensili bassi tra luglio e novembre. È degno di nota il fatto che i deflussi mensili più bassi non si verifichino più in inverno, ma sempre più spesso – a seconda del RCP e del periodo considerato – in estate. Lo stesso andamento è evidente anche nel corso superiore, più influenzato dalle Alpi. È il caso, ad esempio, dell'Aar a Thun. Poiché qui l'influsso dello scioglimento dei ghiacciai è relativamente alto, il drammatico ritiro dei ghiacciai, soprattutto sotto RCP8.5, comporta un drastico calo dei deflussi da luglio a settembre. Lo stesso vale per il corso superiore e inferiore della Reuss e della Limmat. Lungo il Reno, in linea di principio, si può osservare lo stesso andamento come per l'Aar.

Anche nel caso del Reno a Basilea, che drena tutto il versante settentrionale delle Alpi e quindi comprende bacini idrografici alpini, prealpini e dell'Altopiano, i cambiamenti sopra descritti sono ancora una volta evidenti in tutta la loro chiarezza: un aumento della portata in inverno, portate più precoci in primavera e una diminuzione delle portate in estate. È interessante notare che dal periodo 2020–2049 in poi, in tutti gli scenari di emissione, il deflusso minimo mensile si sposta dall'inverno all'estate. Nel complesso, per i grandi bacini imbriferi che comprendono bacini alpini, prealpini e dell'Altopiano, le variazioni dei deflussi medi mensili e annuali entro la fine del secolo, nell'ambito di tutti i RCP, sono meno pronunciate in termini percentuali rispetto ai bacini imbriferi della regione alpina. Ciò è dovuto principalmente al fatto che le zone alpine sono maggiormente influenzate dalle temperature più

elevate (K02) e dall'influsso che queste hanno sullo scioglimento della neve e dei ghiacciai (vedi anche L04). Questa dipendenza dall'altitudine è evidente anche in situazioni di magra. Sull'Altopiano centrale, nel Giura e sul lato sud delle Alpi, i deflussi in situazioni di magra diminuiranno in futuro. Ciò significa che sarà disponibile meno acqua e le situazioni di mancanza d'acqua diventeranno più frequenti. Nelle Alpi, dove i deflussi finora sono stati più bassi in inverno, essi aumenteranno durante le situazioni di bassa portata.

4 Indicazioni per l'interpretazione e l'uso

Le proiezioni idrologiche si basano su una lunga catena di modelli di diverso tipo. Ciò include gli scenari di emissione, la risposta risultante dei modelli climatici e i modelli idrologici. Ogni modello di questa catena contiene delle incertezze. Di questo fatto si è per un certo grado tenuto conto utilizzando, come base per la modellizzazione idrologica, un alto numero di modelli climatici e tre scenari di emissione. È però stato utilizzato un solo modello idrologico: l'uso di altri modelli idrologici potrebbe potenzialmente portare a risultati diversi. Tuttavia, un confronto con altri studi (vedi mappa L01) ha mostrato un buon accordo tra i segni dei segnali di cambiamento.

Poiché ogni simulazione climatica rappresenta una sola evoluzione del clima futuro, e ogni modello è strutturato in modo leggermente diverso, è importante notare che le singole simulazioni rappresentano una sola possibilità sull'insieme totale. Pertanto, si raccomanda di considerare l'intero insieme del modello (intervallo di confidenza) e di utilizzare medie a lungo termine (ad esempio, periodi di 30 anni). Questo permette una stima della robustezza dei risultati e una riduzione dell'influsso della variabilità climatica interna. La mappa mostra quindi non solo la mediana di tutte le esecuzioni del modello – chiamata anche «stima media» – ma pure le stime minime e massime dell'insieme. Queste servono come indicatore di robustezza, mostrando quanto accordo c'è tra le singole esecuzioni dei modelli. I minimi e i massimi di L02 non possono essere confrontati direttamente con quelli delle mappe delle precipitazioni e delle temperature (K01, K02), dove sono raffigurati i percentili del 5% e del 95%. Questo è dovuto al fatto che nel complesso erano disponibili meno modelli per la modellizzazione del deflusso e perciò i percentili non possono essere determinati in modo robusto.

La gamma di tutti gli scenari di deflusso dei grandi bacini imbriferi può essere considerata come il potenziale approvvigionamento idrico futuro per ogni periodo scelto. Tuttavia, poiché gli scenari di deflusso del periodo di riferimento (simulazioni di deflusso con dati meteorologici CH2018) si discostano in singoli casi in modo maggiore o minore dalle simulazioni di controllo dello stesso periodo (simulazioni di deflusso con dati meteorologici misurati) e queste a loro volta si discostano in modo maggiore o minore dai dati misurati effettivamente in quel intervallo di tempo, è necessario prestare attenzione quando si considerano

i valori assoluti degli scenari di deflusso [mm]. Uno dei motivi è che l'influenza dei laghi nei grandi bacini imbriferi è stata presa in considerazione nel modello idrologico solo in modo approssimativo, rappresentando i laghi come serbatoi mono-lineari. Non sono state implementate le dighe per la regolamentazione del livello dei laghi. Altre ragioni fondano nelle incertezze nell'intera catena di modelli e nei dati effettivamente misurati. Pertanto, occorre piuttosto considerare le variazioni tra gli scenari.

5 Esempio di applicazione

La mappa L02 mostra 25 stazioni per le quali sono disponibili scenari di deflusso. Per accedere ai quattro grafici che illustrano i possibili sviluppi futuri dei deflussi, è necessario cliccare su una delle località e poi sul link «Scenari di deflusso».

La prima scheda, «Regime di deflusso», mostra i deflussi mensili. È possibile confrontare il regime per i diversi periodi e scenari di emissione. Per una migliore visione d'insieme, le singole curve o l'intervallo di confidenza possono essere visualizzate o nascoste utilizzando le caselle di controllo nella legenda. Inoltre, è possibile cambiare l'unità dell'asse y da valori assoluti [mm] a valori relativi [%]. Infine, lo scenario di emissione o il periodo di tempo desiderato può essere selezionato nel menu a tendina in centro, sopra al grafico. La figura 1 mostra l'andamento dei deflussi medi mensili fino alla fine del 21° secolo utilizzando l'esempio dell'Aar a Untersiggenthal secondo lo scenario di emissione RCP8.5. Mentre è da prevedere una diminuzione dei deflussi nei mesi estivi, i deflussi aumentano leggermente in quelli invernali.

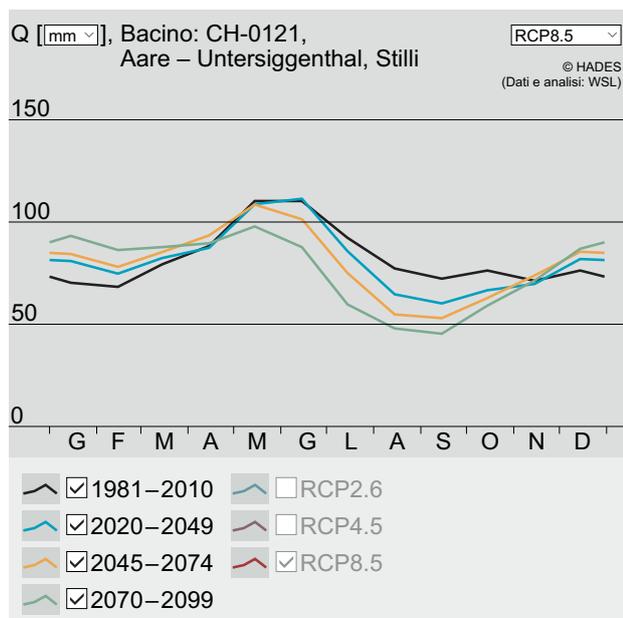


Figura 1. Aar–Untersiggenthal, Stilli: Andamento dei regimi di deflusso fino alla fine del 21° secolo, secondo lo scenario d'emissione RCP8.5, iniziando con il nero (periodo di riferimento) passando dal blu (2035) e al giallo (2060) per terminare con il verde (2085)

Nella seconda scheda «Deflussi medi» è possibile confrontare lo sviluppo temporale dei deflussi medi dei singoli mesi, delle stagioni o dei deflussi annuali per i tre scenari di emissione. La figura 2 mostra che il deflusso medio annuale della stazione tende a diminuire leggermente. La diminuzione dei deflussi estivi e l'aumento dei deflussi invernali si annullano praticamente a vicenda.

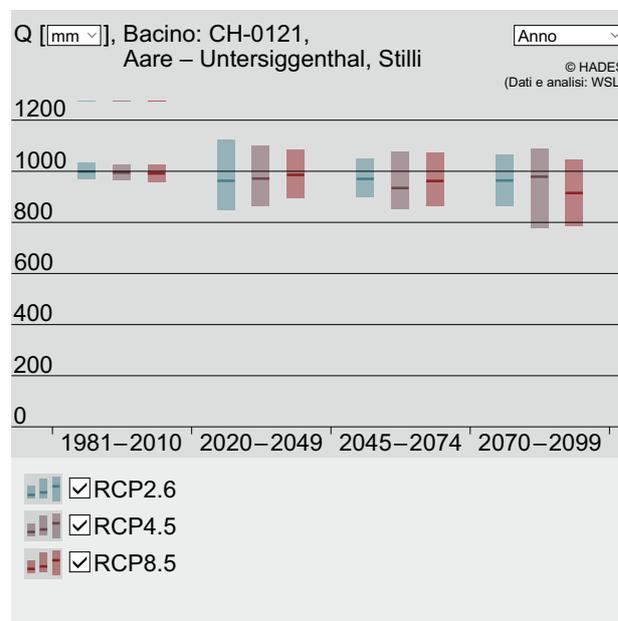


Figura 2. Aar–Untersiggenthal, Stilli: Variazione dei deflussi annuali fino alla fine del 21° secolo, suddivisa secondo i tre scenari di emissione RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5

Le schede tre e quattro – analogamente alla seconda – permettono la rappresentazione dello sviluppo dei parametri caratterizzanti le portate minime NM7Q, rispettivamente Q_{347} .

La quinta scheda, «Dati di base», è una compilazione degli scenari delle precipitazioni, della temperatura e dei ghiacciai, che sono stati presi in considerazione per la modellizzazione del deflusso del bacino imbrifero prescelto. Queste informazioni possono essere utilizzate per interpretare gli scenari di deflusso. Le cifre indicano, per l'esempio sopra riportato, un aumento delle precipitazioni invernali combinato con temperature più elevate (maggiore deflusso in inverno) e meno precipitazioni in estate (minore deflusso in estate). Già ora l'area glaciale di questo bacino è di solo circa 1.5% ed è quindi di importanza minore.

Infine, è possibile confrontare l'andamento spaziale delle variazioni di deflusso per bacini di dimensioni simili. Per fare questo, selezionare «Bacini imbriferi» nella barra laterale sinistra in corrispondenza di L02 e definire il bacino imbrifero desiderato utilizzando il menu a tendina. Ora, nella barra laterale destra, si possono selezionare i parametri caratterizzanti il deflusso (MQ, NM7Q, Q_{347}), lo scenario di emissione, il periodo di tempo, ecc. desiderati nella barra laterale destra. La figura 3 mostra i relativi cambiamenti nel deflusso primaverile fino alla fine del 21° secolo se-

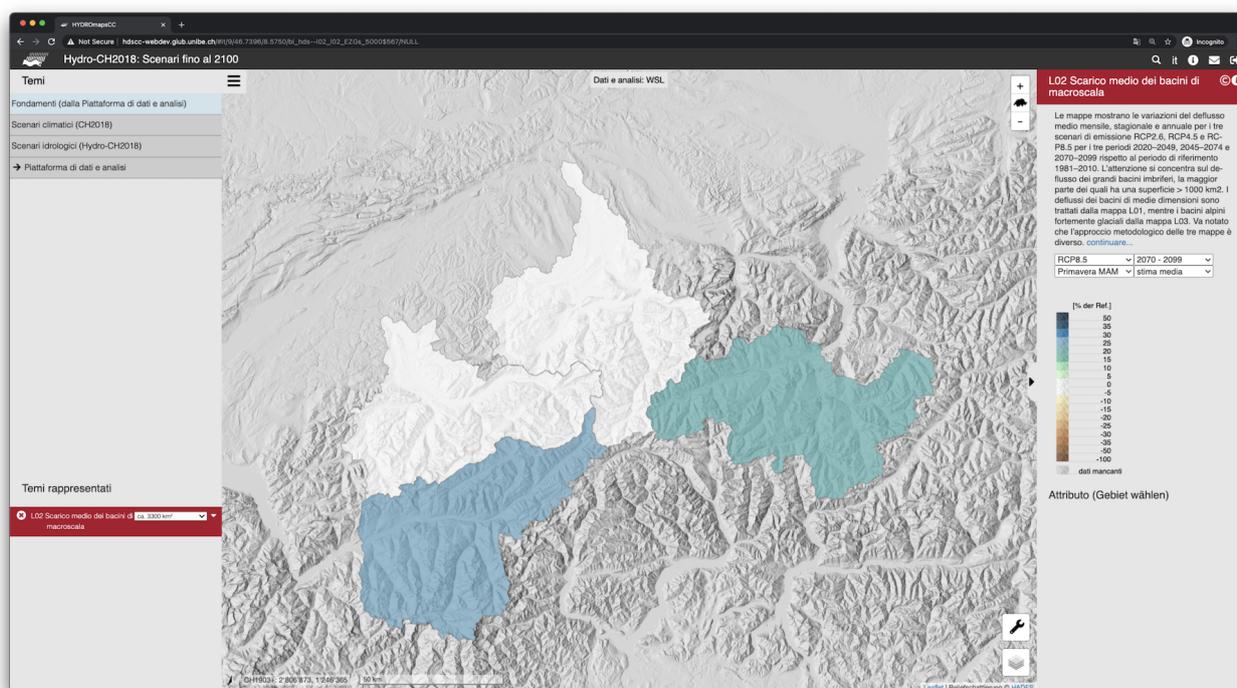


Figura 3. Variazioni relative dei quantitativi di deflusso in primavera secondo lo scenario RCP 8.5. Sono rappresentati i bacini con una superficie di circa 3250 km²: Rodano a Sion, Aar a Bern-Schönau, Reuss a Mellingen e Reno a Domat/Ems (dal basso a sinistra a destra).

condo lo scenario di emissione RCP8.5 per i bacini idrografici con una dimensione di circa 3250 km². Per i bacini idrografici puramente alpini (Rodano, Reno) è da prevedere un aumento del deflusso. Questa tendenza non può essere osservata per i bacini idrografici dell'Aar e della Reuss, poiché la loro proporzione a basse quote è maggiore e quindi il cambiamento nello scioglimento della neve in primavera è relativamente poco significativo.

6 Versioni

Tabella 2. Versioni

Versioni	Descrizione
v1.0 (2020)	Versione della base di dati proposta: Versione 1.0, Settembre 2018.
v2.0 (2022)	Ampliamento delle mappe con i valori caratterizzanti le portate minime NMQ7 e Q ₃₄₇ . Adattamento del titolo della mappa

Bibliografia

[1] L'Assemblea federale della Confederazione Svizzera (1991). Legge federale sulla protezione delle acque, LPac. In: https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1992/1860_1860_1860/it.

- [2] IPCC, Pachauri, R. e Meyer, L., cur. (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*. Geneva, Switzerland: IPCC.
- [3] CH2018 (2018). *CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report*. Zurich: National Centre for Climate Services.
- [4] Michel, A., Brauchli, T., Lehning, M., Schaefli, B. e Huwald, H. (2020). Stream temperature and discharge evolution in Switzerland over the last 50 years: annual and seasonal behaviour. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 24.1. <https://hess.copernicus.org/articles/24/115/2020/>, pp. 115–142. ISSN: 1027-5606. DOI: 10.5194/hess-24-115-2020.
- [5] Brunner, M. I. et al. (2019). Present and future water scarcity in Switzerland: Potential for alleviation through reservoirs and lakes. In: *Science of The Total Environment* 666. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969719306576>, pp. 1033–1047. ISSN: 00489697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.169.
- [6] Speich, M. J., Bernhard, L., Teuling, A. J. e Zappa, M. (2015). Application of bivariate mapping for hydrological classification and analysis of temporal change and scale effects in Switzerland. In: *Journal of Hydrology* 523. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169415001055>, pp. 804–821. IS-

- SN: 00221694. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.086.
- [7] Viviroli, D., Mittelbach, H., Gurtz, J. e Weingartner, R. (2009a). Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results. In: *Journal of Hydrology* 377.1-2. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169409005186>, pp. 208–225. ISSN: 00221694. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.022.
- [8] Viviroli, D., Zappa, M., Schwanbeck, J., Gurtz, J. e Weingartner, R. (2009b). Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part I: Modelling framework and calibration results. In: *Journal of Hydrology* 377.1-2. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169409005174>, pp. 191–207. ISSN: 00221694. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.023.
- [9] Köplin, N., Viviroli, D., Schädler, B. e Weingartner, R. (2010). How does climate change affect mesoscale catchments in Switzerland? – a framework for a comprehensive assessment. In: *Advances in Geosciences* 27. <https://adgeo.copernicus.org/articles/27/111/2010/>, pp. 111–119. ISSN: 1680-7359. DOI: 10.5194/adgeo-27-111-2010.
- [10] Bernhard, L. e Zappa, M. (2012). *Schlussbericht CCHydrologie: Teilprojekt WHH- CH-Hydro: Natürlicher Wasserhaushalt der Schweiz und ihrer bedeutendsten Grosseinzugsgebiete*. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL.
- [11] Jörg-Hess, S., Fundel, F., Jonas, T. e Zappa, M. (2014). Homogenisation of a gridded snow water equivalent climatology for Alpine terrain: methodology and applications. In: *The Cryosphere* 8.2. <https://tc.copernicus.org/articles/8/471/2014/>, pp. 471–485. ISSN: 1994-0424. DOI: 10.5194/tc-8-471-2014.
- [12] Zekollari, H., Huss, M. e Farinotti, D. (2019). Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. In: *The Cryosphere* 13.4. <https://tc.copernicus.org/articles/13/1125/2019/>, pp. 1125–1146. ISSN: 1994-0424. DOI: 10.5194/tc-13-1125-2019.