

Effetti dei cambiamenti climatici sulle acque della Svizzera

Idrologia, ecologia delle acque e gestione delle acque



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Ufficio federale dell'ambiente UFAM

Effetti dei cambiamenti climatici sulle acque della Svizzera

Idrologia, ecologia delle acque e gestione delle acque

Nota editoriale

Editore

Ufficio federale dell'ambiente (UFAM)

L'UFAM è un ufficio del Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni (DATEC).

Gruppo di progetto

Petra Schmockler-Fackel (direzione del progetto), Fabia Hüsler, Carlo Scapozza (presidenza), Michael Sinreich, Roland Hohmann, Sabine Kleppek, Bänz Lundsgaard-Hansen, Adrian Jakob, Carolin Schärpf, Olivier Overney † (UFAM), Andreas Fischer (MeteoSvizzera), Irene Roth, Jan Béguin (Ufficio federale dell'agricoltura UFAG)

Autorie redazione

Petra Schmockler-Fackel, Fabia Hüsler, Edith Oosenbrug (UFAM), Klaus Lanz (international water affairs), Samuel Zahner, Eva Wieser (Ecoplan)

Esperti della Confederazione

Ufficio federale dell'ambiente (UFAM): Martin Barben, Gian Reto Bezzola, Emmanuel Brocard, Therese Bürgi, Damian Dominguez, Katharina Edmaier, Daniel Hefti, Andreas Helbling, Susanne Haertel-Borer, Christian Holzgang, Andreas Inderwildi, Caroline Kan, Sybille Kilchmann, Andreas Knutti, Ronald Kozel, Manuel Kunz, Christian Leu, Roberto Loat, Stephan Müller, Reto Mural, Martin Pfaundler, Michael Schärer, Marc Schürch, Ueli Sieber, David Siffert, Michael Sinreich, Florian Storck, Markus Thommen
MeteoSvizzera: Sven Kotlarski, Cornelia Schwierz, Michiko Hama
Ufficio federale dell'agricoltura (UFAG): Ruth Badertscher, Daniel Felder, Michael Zimmermann
Ufficio federale dell'energia (UFE): Guido Federer

Esperti dei progetti di ricerca e dei rapporti informativi

Agroscope: Annelie Holzkämper
Eawag – l'Istituto di ricerca sull'acqua nel settore dei PF: Florian Altermatt, Simon Benateau, Damien Bouffard, Adrien Gaudard †, Love Råman Vinnå, Martin Schmid, Christian Stamm, Alfred Johny Wüest
PF Losanna (PFL): Hendrik Huwald, Adrien Michel
PF Zurigo (PFZ): Paolo Burlando, Edouard L. Davin, Daniel Farinotti, Lukas Gudmundsson, Martin Hirschi, Ronny Meier, Peter Molnar, Nadav Peleg, Clemens Schwingshackl, Sonia I. Seneviratne, Richard Wartenburger
Scuola tecnica superiore Rapperswil (HSR): Andrea-Kristin Bachmann, Sara Bieler, Sami Gysin, Susanne Kytzia, Aurelian Schumacher, Dominik Schwere, Jürg Speerli
Istituto svizzero di speleologia e carsologia (ISSCA): Pierre-Yves Jeannin
Università di Basilea: Annette Affolter Kast, Jannis Epting, Peter Huggenberger
Università di Berna: Flavio Anselmetti, Regula Mülchi, Olivia Martius, Ole Rössler, Bettina Schaepli, Jan Schwanbeck, Rolf Weingartner, Oliver Wetter, Andreas Zischg
Università di Friburgo: Matthias Huss
Università Albert Ludwig di Friburgo in Brisgovia: Irene Kohn, Kerstin Stahl, Michael Stoelzle
Università di Ginevra: Virginia Ruiz-Villanueva, Markus Stoffel
Università di Losanna: Emmanuel Reynard
Università di Neuchâtel: Marie Arnoux, Philipp Brunner, Daniel Hunkeler
Università di Zurigo: Daphné Freudiger, Jan Seibert, Illja van Meerveld, Daniel Viviroli
Istituto federale di ricerca per la foresta, la neve e il paesaggio (WSL): Norina Andres, Konrad Bogner, Manuela Brunner, Astrid Bjørnsen Gurung, Käthi Liechti, Elke Kellner, Bettina Matti, Heike Lischke, Tobias Jonas, Christoph Marty, Jeannette Nötzli, Marcia Phillips, Matthias Speich, Manfred Stähli, Massimiliano Zappa

Indicazione bibliografica

UFAM (ed.) 2021: Effetti dei cambiamenti climatici sulle acque della Svizzera. Idrologia, ecologia delle acque e gestione delle acque. Ufficio federale dell'ambiente UFAM, Berna. Studi sull'ambiente n. 2101: 136 pagg.

Traduzione

Servizio linguistico italiano, UFAM

Grafica

Zeichenfabrik, Zurigo

Impaginazione

Cavelti AG, Marken. Digital und gedruckt, Gossau

Foto di copertina

Areuabach

© WWF Schweiz / Eduardo Soteras

Link per scaricare il PDF

www.bafu.admin.ch/uw-2101-i

La versione cartacea non può essere ordinata.

La presente pubblicazione è disponibile anche in tedesco, francese e inglese. La lingua originale è il tedesco.

Ringraziamenti

Ringraziamo tutte le persone sopra citate per i loro contributi specialistici e le preziose discussioni. Ringraziamo anche tutti coloro che in un modo o nell'altro hanno contribuito alla buona riuscita di questo rapporto.

© UFAM 2021

Indice

Abstracts	6	7	Gestione delle acque	81
<hr/>		7.1	Utilizzazione delle acque	81
Prefazione	7	7.1.1	Approvvigionamento di acqua potabile	81
<hr/>		7.1.2	Irrigazione agricola e acqua non potabile per attività industriali e commerciali	84
Sintesi	8	7.1.3	Energia idroelettrica	88
<hr/>		7.1.4	Utilizzo termico delle acque	91
1	Introduzione	7.1.5	Tempo libero, svago e turismo	92
<hr/>		7.2	Protezione contro le acque	95
2	Metodologia	7.2.1	Protezione contro le piene	95
2.1	Modelli e relative incertezze	7.2.2	Protezione contro il ruscellamento superficiale	96
2.2	Scenari climatici	7.3	Protezione delle acque	98
2.3	Scenari idrologici	7.3.1	I cambiamenti climatici e la protezione delle acque in mutamento	98
<hr/>		7.3.2	Riduzione delle sostanze inquinanti	99
3	Il regime idrico nel contesto dei cambiamenti climatici	7.3.3	Rinaturazione delle acque	101
<hr/>		7.3.4	Protezione delle risorse idriche e delle acque sotterranee	104
4	Fattori di influenza climatologici	7.4	Importanza internazionale delle acque svizzere	108
4.1	Temperatura dell'aria	<hr/>		
4.2	Precipitazioni	8	Miglioramento delle basi conoscitive	112
4.3	Evaporazione e umidità del suolo	<hr/>		
<hr/>		9	Conclusione: la protezione del clima e l'adattamento ai cambiamenti climatici sono imprescindibili	117
5	Criosfera	<hr/>		
5.1	Neve	10	Bibliografia	119
5.2	Ghiacciai e permafrost	<hr/>		
<hr/>		11	Glossario	131
6	Acque	<hr/>		
6.1	Portate annue	12	Allegato	132
6.2	Portate stagionali			
6.3	Laghi			
6.4	Acque sotterranee			
6.5	Eventi di piena			
6.6	Eventi di magra			
6.7	Temperatura delle acque			
6.7.1	Corsi d'acqua			
6.7.2	Laghi			
6.7.3	Acque sotterranee			
6.8	Nutrienti e sostanze nocive nelle acque			
6.8.1	Nutrienti e sostanze nocive			
6.8.2	Sedimenti			
6.9	Ecologia delle acque			
6.9.1	Effetti sugli habitat e sull'ecosistema			
6.9.2	Effetti su alcune specie e sulla biodiversità			

Abstracts

The Hydro-CH2018 project analysed the effects of climate change on Swiss water bodies. Climate change is altering the entire water balance, especially the seasonal distribution of water resources in the water bodies and groundwater. Low flow is becoming more frequent and the water temperature is increasing. This has a serious effect on water ecology, flood protection and water use. The report "Effects of climate change on Swiss water bodies" gives a concise overview of the results and is a gateway to further technical information and data. The project was treated as a priority theme within the National Centre for Climate Services (NCCS).

Il progetto Hydro-CH2018 ha esaminato gli effetti dei cambiamenti climatici sulle acque della Svizzera. Con i cambiamenti climatici si modifica il regime idrico nel suo complesso, ma in particolare la distribuzione stagionale delle risorse idriche nelle acque superficiali e sotterranee. Le magre diventano più frequenti e le acque si riscaldano. Ciò ha conseguenze importanti sull'ecologia delle acque, sulla protezione contro le piene e sull'utilizzazione delle acque. Il rapporto «Effetti dei cambiamenti climatici sulle acque della Svizzera» offre un compendio dei risultati e costituisce il presupposto per l'accesso a ulteriori dati e informazioni specialistiche. Il progetto è stato condotto come tematica prioritaria nel National Centre for Climate Services (NCCS).

Das Projekt Hydro-CH2018 hat die Auswirkungen des Klimawandels auf die Gewässer in der Schweiz untersucht. Mit dem Klimawandel verändert sich der gesamte Wasserhaushalt, besonders aber die jahreszeitliche Verteilung der Wasserressourcen in Oberflächengewässern und im Grundwasser. Niedrigwasser wird häufiger und die Gewässer werden wärmer. Dies hat grosse Auswirkungen auf die Gewässerökologie, den Hochwasserschutz und die Wassernutzung. Der Bericht «Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer» bietet eine kompakte Übersicht über die Ergebnisse und ist ein Einstieg zu weiteren Fachinformationen und Daten. Das Projekt wurde als Themenschwerpunkt im National Centre for Climate Services (NCCS) durchgeführt.

Le projet Hydro-CH2018 s'est penché sur les effets des changements climatiques sur les eaux suisses, lesquels modifient l'ensemble du régime des eaux, mais plus particulièrement la répartition saisonnière des ressources en eau dans les eaux superficielles et souterraines. Les étiages deviennent plus fréquents et les eaux se réchauffent, entraînant d'importantes répercussions sur l'écologie des eaux, la protection contre les crues et l'utilisation de l'eau. Le rapport «Effets des changements climatiques sur les eaux suisses» propose une vue d'ensemble synthétique des résultats du projet Hydro-CH2018, mené au National Centre for Climate Services en tant que thème prioritaire. Il sert également de base à d'autres données et informations spécialisées.

Keywords:

Hydrology, Climate change, Watercourses, Lakes, Groundwater, Water temperature, Water quality, Water ecology

Parole chiave:

Idrologia, cambiamento climatico, corsi d'acqua, laghi, acque sotterranee, temperatura delle acque, qualità delle acque, ecologia delle acque, gestione delle acque

Stichwörter:

Hydrologie, Klimawandel, Fliessgewässer, Seen, Grundwasser, Wassertemperatur, Wasserqualität, Gewässerökologie, Wasserwirtschaft

Mots-clés:

hydrologie, changements climatiques, cours d'eau, lac, eaux souterraines, température de l'eau, qualité de l'eau, écologie des eaux, gestion des eaux

Prefazione

La Svizzera è il regno dei ghiacciai, della neve, dei fiumi e dei laghi. Ma è anche un Paese ampiamente sottoposto a uno sfruttamento intensivo che riguarda anche l'utilizzazione delle acque. Su di esse viene infatti esercitata una triplice sollecitazione sotto forma di prelievi d'acqua, immissioni di sostanze nocive e prosciugamento e opere di contenimento dei paesaggi acquatici di un tempo. Inoltre, a causa dei cambiamenti climatici si stanno ora modificando le costanti di base idrologiche delle acque svizzere: la disponibilità stagionale delle risorse idriche sta cambiando e l'ambiente vitale nelle e accanto alle acque deve adattarsi alle temperature più elevate e al mutamento delle portate.

Per mantenere il riscaldamento terrestre al di sotto dei 2 °C, nel 2015 la comunità internazionale ha varato l'Accordo di Parigi. Con la ratifica, la Svizzera si è impegnata a dimezzare entro il 2030 le sue emissioni di gas serra rispetto al livello del 1990. Per raggiungere tale obiettivo occorre l'impegno collettivo dell'economia, della politica e della società. Le energie rinnovabili e l'efficienza energetica vengono promosse nell'intento di ridurre le emissioni di gas serra nei settori dei trasporti, dell'industria e dell'agricoltura.

La Svizzera è fortemente a rischio: gli scenari climatici CH2018 elaborati sotto l'egida del National Centre for Climate Services (NCCS) mostrano che senza una protezione coerente del clima la temperatura media annua dell'aria aumenterà di 4 °C entro la fine del XXI secolo. Adottando provvedimenti per la tutela del clima, l'aumento può essere limitato a 1,5 °C.

Quali effetti ha lo scenario appena illustrato su ambiti come il regime idrico, l'ecologia delle acque, la protezione contro le piene, l'utilizzazione e la protezione delle acque? Per rispondere a queste domande, l'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM) in collaborazione con il mondo scientifico e sulla base degli scenari climatici CH2018 ha elaborato basi e scenari idrologici per il futuro («Hydro-CH2018»). Partendo da tali presupposti e insieme ad altri servizi specializzati della Confederazione, l'UFAM ha analizzato gli effetti sulla gestione delle acque e individuato le azioni necessarie per il futuro. Tali attività si sono svolte nel quadro del NCCS e hanno coinvolto diversi settori.

Il presente rapporto offre un compendio sullo stato attuale delle conoscenze in materia di acque e cambiamenti climatici. Insieme alle serie di dati pluriennali e alla moderna infrastruttura di misurazione della Confederazione, i nuovi scenari idrologici costituiscono una base importante per i provvedimenti di adattamento ai cambiamenti climatici in Svizzera. Consentono infatti di imboccare in tempo utile le strade giuste per gestire le acque in futuro e garantirne lo stato di salute. Nel contempo mostrano i limiti della capacità di adattamento, anche nel contesto internazionale, e i risultati che si possono ottenere con una protezione coerente del clima.

Karin Siegwart, vicedirettrice
Ufficio federale dell'ambiente (UFAM)

Sintesi

La Svizzera è uno dei Paesi europei più ricchi d'acqua. Inoltre dispone di ampi serbatoi idrici sotto forma di laghi, ghiacciai, neve e acque sotterranee. È qui che nascono grandi fiumi come il Reno e il Rodano, nonché importanti affluenti del Po e del Danubio. Pertanto, i cambiamenti nel regime idrico della Svizzera si ripercuotono direttamente sui Paesi limitrofi.

Secondo MeteoSvizzera, la temperatura media annua della Svizzera è già aumentata di 2 °C dal 1864, vale a dire a un ritmo doppio rispetto alla media globale. I nuovi scenari climatici CH2018 prevedono un ulteriore incremento di circa 4 °C entro la fine del secolo se non si adotteranno misure di protezione del clima, la cui attuazione coerente potrebbe limitare tale aumento a circa 1,5 °C. Senza tali misure, anche le precipitazioni subiranno variazioni ancora più evidenti, con un ulteriore incremento nei mesi invernali e un'ulteriore riduzione nei mesi estivi.

In mancanza di interventi, i ghiacciai delle Alpi perderanno circa il 95 per cento del loro volume attuale entro la fine del secolo. In futuro cadrà più pioggia che neve. Nei mesi estivi mancherà quindi l'acqua di fusione della neve e dei ghiacciai, con un conseguente calo delle portate estive e un aumento di quelle invernali. In uno scenario senza misure di protezione del clima, il deflusso complessivo dalla Svizzera subirebbe un lieve calo entro la fine del secolo. Il volume complessivo delle acque sotterranee non cambierà di molto, ma la rigenerazione dell'acquifero aumenterà in inverno e diminuirà in estate.

Ciò significa che, in futuro, la Svizzera potrà ancora disporre di acqua a sufficienza sull'arco dell'intero anno. Senza misure di adattamento, però, nei mesi estivi potrebbero verificarsi sempre più problemi di approvvigionamento a livello regionale. Alle portate generalmente inferiori in estate e in autunno si aggiungerebbero fasi di siccità più frequenti e prolungate, che si verificherebbero proprio nel momento in cui il fabbisogno di acqua aumenta sensibilmente, specie in agricoltura, a causa delle temperature più elevate. In futuro sarà sempre più importante applicare una gestione integrale delle risorse idriche che tenga conto di tutte le esigenze e dell'intero bacino imbrifero,

prestando attenzione anche alla qualità dell'acqua e alla riduzione delle immissioni di sostanze. Ma anche la produzione di energia idroelettrica e il turismo dovranno adattarsi ai cambiamenti climatici. Poiché l'aria più calda è in grado di assorbire una maggiore quantità d'acqua, la frequenza e l'intensità delle forti precipitazioni sono già aumentate sensibilmente in Svizzera e gli scenari climatici ne prevedono un ulteriore aumento. Ciò causerà anche un maggiore ruscellamento superficiale e piene a livello locale.

Negli ultimi decenni le temperature medie annue dei corsi e specchi d'acqua sono già notevolmente salite e gli scenari idrologici suggeriscono un ulteriore sensibile innalzamento entro la fine del secolo. L'aumento è particolarmente evidente in estate, quando le temperature critiche per gli organismi acquatici vengono superate con maggiore frequenza. L'innalzamento delle temperature nei laghi ne modifica inoltre la capacità di miscelazione e può avere grosse ripercussioni sugli ecosistemi lacustri. Benché le acque sotterranee reagiscano più lentamente ai cambiamenti climatici subiranno anch'esse un aumento delle temperature.

Già oggi gli ecosistemi acquatici sono fortemente sotto pressione a causa di diversi fattori di stress antropici quali le opere di contenimento, gli inquinanti chimici o le alterazioni delle dinamiche di deflusso determinate dall'energia idroelettrica. A ciò si aggiungono le conseguenze dei cambiamenti climatici: i pesci e altri organismi, ovvero organismi viventi in cui la temperatura del corpo varia con quella dell'ambiente esterno, non riescono ad adattarsi alle temperature più elevate dell'acqua. L'equilibrio degli ecosistemi può inoltre essere notevolmente alterato da altri cambiamenti legati al clima che si manifestano sotto forma di tratti di corsi d'acqua in secca o di variazioni nelle condizioni di stratificazione dei laghi. Le acque prossime allo stato naturale possiedono una maggiore capacità di resistenza e di adattamento agli influssi dei cambiamenti climatici. In tale contesto diventa ancora più urgente attuare in modo possibilmente rapido provvedimenti di protezione delle acque quali la rinaturazione, la riduzione di inquinanti e la garanzia di volumi d'acqua adeguati.

Oltre a tali provvedimenti, non si può prescindere da una solida infrastruttura di misurazione che assicuri il monitoraggio delle acque nonché delle serie di dati pluriennali, come pure dall'ulteriore sviluppo delle previsioni idrologiche in considerazione dei nuovi metodi e tecnologie. Con tali basi conoscitive la Svizzera potrà disporre anche in futuro di basi decisionali affidabili per l'adozione di provvedimenti di adattamento ai cambiamenti climatici.

1 Introduzione

La tematica prioritaria «Basi idrologiche sui cambiamenti climatici» del National Centre for Climate Services (NCCS) – in breve Hydro-CH2018 – ha esaminato gli effetti dei cambiamenti climatici sul regime idrico, sulle acque e sulla gestione delle acque. Sulla base dei nuovi scenari climatici per la Svizzera, gli studi mostrano che i cambiamenti, come per esempio il grado di siccità estiva, saranno ancora più marcati di quanto sinora previsto. I risultati sono liberamente consultabili in diverse pubblicazioni nonché sulla piattaforma web del NCCS (www.nccs.admin.ch) e nell'Atlante idrologico della Svizzera (www.hydromapscc.ch).

Le informazioni riguardo gli effetti dei cambiamenti climatici sulle acque e sul regime idrico in Svizzera costituiscono una base importante per un adattamento mirato. Il Consiglio federale ha pertanto dato mandato all'Ufficio federale dell'ambiente di approntare basi idrologiche affidabili per i provvedimenti di adattamento (Confederazione Svizzera 2014, misura bc2). Ciò include l'elaborazione periodica di scenari idrologici, il miglioramento delle conoscenze dei processi idrologici e l'osservazione e documentazione delle trasformazioni già in atto a causa dei cambiamenti climatici.

Il mandato è stato assolto nell'ambito della tematica prioritaria «Basi idrologiche sui cambiamenti climatici» del National Centre for Climate Services (NCCS) – in breve Hydro-CH2018. La tematica prioritaria prende il nome dagli scenari climatici CH2018 pubblicati dal NCCS alla fine del 2018 (www.klimaszenarien.ch), sulla cui base sono stati ora esaminati gli effetti dei cambiamenti climatici sull'idrologia, sull'ecologia delle acque e sulla gestione delle acque in collaborazione con numerosi istituti di ricerca della Svizzera. I principali risultati sono riassunti nel presente rapporto.

Sintesi e introduzione ad altri prodotti

Il presente rapporto è da intendersi come compendio e introduzione ad altri prodotti e materiali di approfondimento inerenti al progetto Hydro-CH2018. Ove non diversamente indicato, questi sono consultabili sulla piattaforma web del NCCS (www.nccs.admin.ch).

Altri prodotti disponibili in relazione a Hydro-CH2018

- Opuscolo del NCCS «Le acque svizzere al fronte del cambiamento climatico» (www.nccs.admin.ch/hydro_opuscolo)
- Piattaforma web del NCCS con informazioni di carattere generale su questa tematica prioritaria, sugli scenari climatici e su altre tematiche prioritarie del NCCS. Accesso centrale a tutti i prodotti e alle pubblicazioni inerenti a Hydro-CH2018 (www.nccs.admin.ch/hydro_it)
- Atlante interattivo del NCCS¹ con numerosi grafici tratti dal presente rapporto e ulteriori rappresentazioni grafiche tratte da Hydro-CH2018 (www.nccs.admin.ch/nccs/it/home/dati-e-libreria-multimediale/dati.html)
- Rapporti specialistici Hydro-CH2018 sui singoli temi e progetti di ricerca nonché pubblicazioni scientifiche (raccolta di link all'indirizzo www.nccs.admin.ch/nccs/it/home/il-nccs/le-tematiche-prioritarie/hydro-ch2018.html)
- Dati: grafici, carte e indicatori nell'Atlante idrologico della Svizzera (www.hydromapscc.ch) e sul portale delle mappe della Confederazione (www.map.geo.admin.ch).

Quali sono le novità di Hydro-CH2018?

CH2018 ha messo a disposizione per il progetto Hydro-CH2018 nuovi scenari climatici che mostrano una serie di miglioramenti rispetto agli scenari CH2011 (www.ch2011.ch). Sono infatti stati considerati scenari di emissione più moderni, un maggior numero di modelli climatici con risoluzione più elevata e sono stati applicati procedimenti statistici migliori per il trasferimento dei dati dei modelli climatici alla Svizzera. Ciò ha consentito una continuità di dati climatici dal 1981 fino al 2099 e una più elevata risoluzione spaziale (per maggiori informazioni cfr. Rapporto tecnico CH2018).

In Hydro-CH2018 è stato così per la prima volta possibile allestire e analizzare delle serie temporali idrologiche

¹ www.nccs.admin.ch/nccs/it/home/dati-e-libreria-multimediale/dati/atlane-interattivo-ch2018.html

continue dal 1981 al 2099. I risultati di Hydro-CH2018 confermano in gran parte le conoscenze preesistenti acquisite dai progetti «Cambiamenti climatici e idrologia in Svizzera» (UFAM2012), da Brennpunkt Klima Schweiz (SCNAT 2016) o dal programma di ricerca nazionale PRN 61 «Utilizzazione sostenibile delle acque» (www.nfp61.ch). In alcuni ambiti i cambiamenti sono però più marcati di quanto previsto in studi precedenti, per esempio per quanto riguarda il grado di siccità estiva. Hydro-CH2018 ha posto l'accento su temi che in precedenti rapporti erano stati lasciati in secondo piano. Per esempio, tendenze già rilevabili a livello di portata o temperatura delle acque sono state confrontate rispetto all'evoluzione futura. Sono stati inoltre analizzati in maniera approfondita temi d'interesse quali le acque sotterranee, le magre (siccità), la temperatura delle acque e gli effetti

sull'ecologia delle acque e sulla gestione delle acque. Il rapporto offre una visione generale completa e tuttavia compatta dei futuri effetti dei cambiamenti climatici sul regime idrico, sulle acque e sulla gestione delle acque in Svizzera, ricavando indirizzi strategici per l'adattamento ai cambiamenti climatici. In tale contesto sono presentati i risultati di 11 progetti di ricerca eseguiti nel quadro di Hydro-CH2018 da istituti di ricerca svizzeri leader nel settore delle acque (tab. 1-1). L'UFAM ha inoltre dato mandato a diversi istituti di ricerca di redigere rapporti informativi inerenti ai temi trattati nel rapporto. Tre workshop sui temi «adattamento nel settore delle acque», «ulteriore fabbisogno di ricerca» e «basi necessarie» sono serviti al consolidamento del progetto (cap. 8).

Tabella 1-1: Visione d'insieme dei progetti di ricerca Hydro-CH2018

Contenuto del progetto	Istituti di ricerca	Capitolo nel rapporto
Scenari idrologici basati su dati climatici stocastici ad alta risoluzione: quali effetti ha la variabilità naturale dei dati climatici sugli scenari idrologici?	PF Zurigo	4.2
Bilancio idrico e siccità: in che modo i cambiamenti climatici influiscono sulla siccità, sulla fisiologia delle piante in termini di regolazione della traspirazione e sul futuro fabbisogno di irrigazione?	PF Zurigo	4.3
Dinamica del bosco, utilizzazione del suolo e regime idrico: in che modo i futuri cambiamenti nella dinamica del bosco influiscono sull'evaporazione e sulla portata?	WSL	4.3
Quantificazione dell'incidenza della neve e dello scioglimento dei ghiacciai sulla portata: quali effetti hanno sulla portata lo scioglimento dei ghiacciai e il ritiro del manto nevoso?	Università di Zurigo	6.1
Scenari idrologici aggiornati sulla base dei nuovi scenari climatici: in che modo si modificano le portate nei diversi scenari climatici?	Università di Berna	6.2
Serbatoi idrici: i laghi naturali e i serbatoi artificiali possono contribuire a gestire la penuria di acqua estiva?	WSL e HS Rapperswil	6.3
Come cambieranno le risorse idriche sotterranee nei bacini imbriferi alpini a causa dei cambiamenti climatici e come influiscono sulla formazione del deflusso?	Università di Neuchâtel	6.4
Incidenza dei cambiamenti climatici sulle temperature dei corsi e specchi d'acqua: come evolveranno in futuro le temperature delle acque nei corsi d'acqua e nei laghi svizzeri?	PF Losanna, Eawag e Università di Losanna	6.7.1
Evoluzione delle temperature negli acquiferi in rocce incoerenti in Svizzera: quali sono i principali fattori che influenzano l'evoluzione delle temperature degli acquiferi e come evolveranno in futuro le temperature delle acque sotterranee?	Università di Basilea	6.7.3
AgriAdapt: come cambierà il fabbisogno di irrigazione con l'avanzare dei cambiamenti climatici e quali saranno gli effetti sul livello di falda?	Agroscope	7.1.2

2 Metodologia

2.1 Modelli e relative incertezze

Per poter formulare previsioni sui cambiamenti nel futuro regime idrico occorre tutta una catena di modelli del regime idrico e climatici. Ogni passaggio consente una migliore rappresentazione di determinati processi, ma nel contempo sorgono anche nuove incertezze.

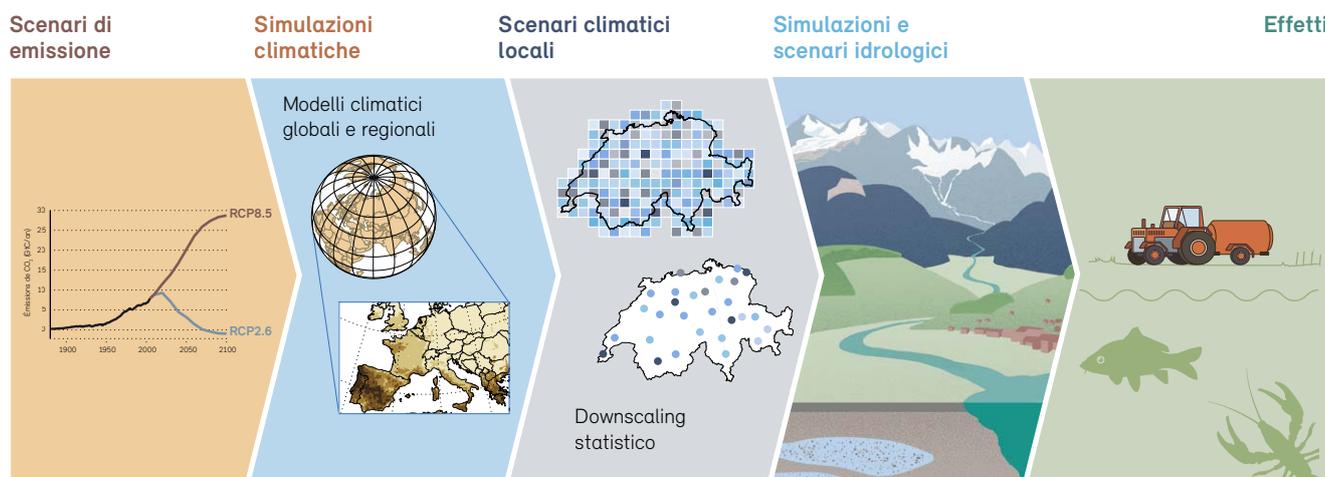
L'elaborazione, sulla base degli scenari delle future emissioni globali di gas serra, degli effetti dei cambiamenti climatici sull'idrologia e sulla gestione delle acque in Svizzera richiede ancora un lungo percorso. A tal fine occorrono diversi modelli, fasi di elaborazione e ipotesi (fig. 2-1). È infatti necessario formulare ipotesi sulle future emissioni globali di gas serra, che a loro volta servono da base per modelli climatici globali e regionali e quindi per gli scenari climatici CH2018. Da questi sono poi stati ricava-

ti, con l'ausilio di modelli idrologici, gli scenari idrologici Hydro-CH2018 che mostrano gli effetti dei cambiamenti climatici sul regime idrico della Svizzera. Tali scenari idrologici sono stati in parte utilizzati per ulteriori modelli (p. es. modelli di vegetazione) al fine di esaminare gli effetti sulla crescita delle piante o sul fabbisogno di irrigazione nell'agricoltura.

Poiché i modelli possono rappresentare le situazioni reali soltanto in forma semplificata, i loro risultati sono inevitabilmente accompagnati da incertezze. A ogni passaggio della catena di elaborazione aumentano il numero delle possibilità di combinazione e la complessità dei calcoli. Per limitare il tempo di calcolo è necessario restringere il numero delle variabili e degli scenari analizzati in ogni fase di applicazione di modelli.

Figura 2-1: Catena di modelli per stimare gli effetti dei cambiamenti climatici sulla gestione delle acque

Le incertezze sorgono a ogni fase di elaborazione: dalla selezione degli scenari di emissione come input per i modelli climatici globali, al processo di regionalizzazione (miglioramento della risoluzione) quale presupposto per la modellizzazione idrologica, fino all'analisi degli effetti sull'ecologia delle acque o sulla gestione delle acque.



Fonti di incertezza:

- Futura evoluzione delle emissioni di gas serra
- Scelta e struttura dei modelli
- Rappresentazione in scala e correzione dei risultati dei modelli
- Dati iniziali
- Condizioni iniziali
- Parametri dei modelli
- Dati per la calibrazione e validazione
- Variabilità naturale
- Comprensione dei processi
- Eventi imprevedibili che causano il tracollo dei sistemi

Se è vero che a ogni fase cresce l'incertezza, aumenta pure la precisione delle previsioni a livello specialistico e regionale, in quanto i modelli possono essere calibrati e validati con i valori osservati. Per esempio, soltanto la combinazione di modelli climatici e idrologici consente previsioni affidabili sulla futura evoluzione delle portate di un bacino imbrifero.

Le incertezze insite nei modelli climatici sono tenute in considerazione negli scenari climatici attraverso l'indicazione di una gamma di possibili evoluzioni future basata su diverse catene di modelli. Tale ventaglio e l'intervallo di incertezza dei modelli climatici sono quindi rispecchiati anche nei modelli idrologici. Quanto sia effettivamente ampio l'intervallo di incertezza della modellizzazione idrologica lo si può stimare per esempio confrontando diversi modelli idrologici.

2.2 Scenari climatici

Come evolverà il clima in Svizzera con una protezione coerente del clima o in assenza di provvedimenti? Le diverse evoluzioni possono essere illustrate sulla scorta di scenari di emissione e climatici. A tal fine, un Paese piccolo come la Svizzera deve affinare i risultati dei modelli climatici globali e regionali applicando metodi statistici.

La maggiore incertezza per le previsioni a lungo termine riguarda le future emissioni globali di gas serra. Per rappresentare una gamma di possibili evoluzioni vengono mostrati i risultati di due possibili percorsi di emissione sia per gli scenari climatici sia per gli scenari idrologici CH2018 (IPCC 2013) (fig. 2-2):

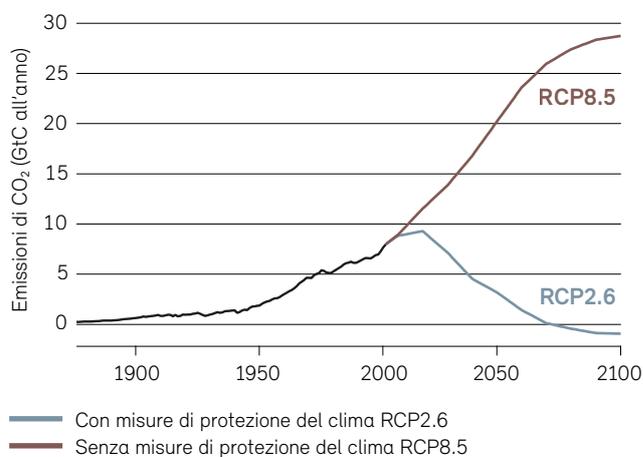
- «protezione coerente del clima» (RCP2.6): il riscaldamento globale sarà mantenuto al di sotto di 2 °C per mezzo di una continua e drastica riduzione delle emissioni di gas serra, secondo quanto stabilito dall'Accordo di Parigi o Accordo sul clima del 2015;

- «nessuna protezione del clima» (RCP8.5): non saranno adottate misure di protezione del clima e le emissioni e il riscaldamento continueranno a crescere.

Nella tematica prioritaria Hydro-CH2018 vengono sempre affiancati entrambi gli scenari; dei due, lo scenario «senza misure di protezione del clima» riveste importanza quale riferimento per le misure di adattamento. Per una migliore leggibilità, alcuni grafici del presente rapporto mostrano soltanto lo scenario «senza misure di protezione del clima». I risultati per entrambi gli scenari possono essere estrapolati dagli altri prodotti di Hydro-CH2018.

Figura 2-2: Scenari di emissione esaminati

Emissioni nette globali di CO₂ da fonti fossili e industriali. Sono rappresentate due possibili evoluzioni.



Fonte iconografica: adattato da IPCC 2013 / WGI / Box 1.1 / Figure 3b

Modellizzazione climatica e scenari climatici CH2018

Gli effetti dei diversi scenari di emissione di gas serra sul clima globale sono calcolati con modelli climatici globali. Per migliorare la loro risoluzione spaziale, i risultati dei modelli climatici globali vengono utilizzati come condizioni limite per simulazioni dei modelli climatici regionali per l'Europa.

Per lo scenario di emissione RCP8.5, gli scenari climatici CH2018 utilizzano i risultati di 31 simulazioni di modelli climatici provenienti dal progetto europeo EURO-CORDEX (www.euro-cordex.net), laddove ogni simulazione è il risultato del collegamento di uno tra nove modelli

2 Representative Concentration Pathway: RCP è un'abbreviazione per percorsi di concentrazione rappresentativi, che significa che gli scenari si basano su ipotesi in merito alle future concentrazioni di gas serra e di aerosol.

climatici globali con uno tra sette modelli climatici regionali. I modelli climatici regionali effettuano i calcoli con una risoluzione spaziale di 12 km o 50 km. Per lo scenario RCP2.6 è disponibile soltanto un numero nettamente inferiore di simulazioni (12). Il confronto tra le diverse simulazioni dei modelli climatici consente di stimare le incertezze associate agli scenari climatici.

La risoluzione spaziale dei modelli climatici regionali è ancora troppo approssimativa per un Paese piccolo e montuoso come la Svizzera per poter essere utilizzata direttamente dai modelli idrologici. Con il metodo statistico empirico *Quantile Mapping* è stato possibile correggere e adattare alle scale locali i dati a risoluzione approssimativa dei modelli climatici regionali sulla scorta di valori misurati. I dati climatici di CH2018 sono disponibili come serie temporali per sette parametri climatici presso le stazioni meteorologiche esistenti. Inoltre sono state create mappe capillari con una risoluzione a griglia di 2 km per i valori di temperatura e la somma delle precipitazioni giornaliere. Tutte le serie temporali e i dati raster sono disponibili in maniera continuativa, con risoluzione giornaliera, per il periodo 1981-2099 (www.nccs.admin.ch).

2.3 Scenari idrologici

I risultati elaborati dei modelli climatici servono come dati iniziali per le modellizzazioni idrologiche. Nel progetto Hydro-CH2018 sono stati impiegati diversi modelli idrologici specializzati a seconda dell'obiettivo di ricerca. Il risultato sono gli scenari idrologici che mostrano le future evoluzioni nelle acque della Svizzera.

L'area esaminata per la modellizzazione idrologica comprendeva sostanzialmente tutta la Svizzera, il Principato del Liechtenstein e altri territori esteri le cui acque defluiscono in suolo svizzero, denominati complessivamente «Svizzera idrologica». Nella tabella 2-1 sono elencati i modelli idrologici utilizzati in Hydro-CH2018 e la dimensione di volta in volta esaminata. Gli scenari del regime idrico per la Svizzera idrologica sono stati calcolati con il modello PREVAH-WSL, gli scenari idrologici per 93 bacini imbriferi sono stati allestiti con il modello PREVAH-UniBE, mentre per 190 aree ricoperte da ghiacciai è stato utilizzato il modello HBV Light dell'Università di Zurigo. Alcuni quesiti specifici sono stati elaborati soltanto per bacini imbriferi selezionati della Svizzera. Per esempio, a causa dei lunghi tempi di calcolo, per le modellizzazioni della temperatura dell'acqua e della rigenerazione dell'acquifero si sono potute considerare solo poche aree e corsi d'acqua (cfr. tab. 3-1 e tab. A1 nell'allegato).

Tabella 3-1: Modelli utilizzati nel progetto Hydro-CH2018

Dimensione esaminata	Modello	Risultati specifici per	Numero di catene di modelli RCP2.6	Numero di catene di modelli RCP8.5
Regime idrico, in particolare portata	PREVAH-WSL	<ul style="list-style-type: none"> • affermazioni di carattere generale a proposito del regime idrico della Svizzera idrologica • 30 grandi bacini imbriferi di dimensioni comprese tra 700 e 35 900 km² con misurazioni di portata 	7	14
	PREVAH-UniBE	<ul style="list-style-type: none"> • affermazioni relative a diversi parametri di portata di bacini imbriferi specifici • 93 bacini imbriferi di dimensioni comprese tra 10 e 1700 km² con misurazioni di portata • una varietà di caratteristiche e altitudini dei bacini imbriferi 	8	20
	HBV Light-UniZH	<ul style="list-style-type: none"> • 190 bacini di testa ghiacciati • accento sulla modellizzazione dello scioglimento della neve e dei ghiacciai 	8	21
Umidità del terreno ed evaporazione	Modello climatico regionale combinato COSMO-CLM2 PF di Zurigo	Europa nella griglia 0,44 × 0,44° (50 km). Sono stati eseguiti tre cicli RCP8.5 a parte sulla base del GCM MPI-ESM-LR	0	3
Temperatura dell'acqua	Simstrat (v. 2.1.2) Eawag	29 laghi	7	17
	Alpine3D PFL	10 corsi d'acqua	4	7
Rigenerazione dell'acquifero e livelli di falda	Hydrogeosphere e HBV Light Università di Neuchâtel	<ul style="list-style-type: none"> • 11 bacini imbriferi alpini • area di prova nel Seeland (Broye) • 3 località per il calcolo della rigenerazione dell'acquifero tramite precipitazioni 	0 1 0	3 1 6
	Feflow: ArcMap Università di Basilea Alpine 3 D PFL	<ul style="list-style-type: none"> • 5 regioni svizzere e 35 acquiferi • derivazione della variazione di temperatura risultante da processi modificati di rigenerazione dell'acquifero 	1	1
Studi sui processi	PREVAH-WSL, in combinazione con il modello di sviluppo del bosco	6 bacini imbriferi	8	18
	Topkapi-ETH PFZ, alimentato con generatore meteo AWE-GEN-2d	Thur, Kleine Emme e Maggia	0	9
	Modello di simulazione dei sistemi colturali CropSyst	Area di prova nel Seeland	4	6

Dati di base utilizzati

La tabella 2-2 mostra i dati principali utilizzati per la modellizzazione idrologica e la loro provenienza. Ulteriori dati utilizzati nei rispettivi progetti di ricerca Hydro-CH2018 possono essere ricavati dai rapporti di progetti specifici.

Tabella 2-2: Dati utilizzati per la modellizzazione idrologica

Dati	Provenienza dei dati
Portata, livello d'acqua, livelli di falda, temperature dell'acqua	Ufficio federale dell'ambiente UFAM, Cantoni, produttori di energia e istituti di ricerca
Dati climatici quali temperatura, precipitazioni, radiazione, vento, umidità dell'aria	Ufficio federale di meteorologia e climatologia (MeteoSvizzera)
Scenari climatici CH2018 Dati dei modelli climatici di EURO-CORDEX e CMIP5	NCCS Earth System Grid Federation
Modello digitale di elevazione, informazioni su geologia e suoli, basi cartografiche topografiche	Ufficio federale di topografia (swisstopo) e programma Copernicus dell'Agenzia spaziale europea (ESA)
Livelli dei ghiacciai e scenari inerenti ai ghiacciai	Glacier monitoring service GLAMOS, Zekollari et al. 2019
Dati sulla neve Prodotto di mappatura della copertura nevosa MODIS MOD10A1 e MYD10A1	Istituto federale di ricerca per la foresta, la neve e il paesaggio WSL US National Snow and Ice Data Center (NSIDC)
Utilizzazione del suolo	Ufficio federale di statistica UST, Ufficio federale dell'agricoltura UFAG (AGIS), programma Copernicus dell'Agenzia spaziale europea (ESA)

Periodi considerati

Nel presente rapporto si considera come periodo di riferimento, ove non diversamente indicato, il periodo 1981 – 2010 (periodo di riferimento dell'OMM). Tale periodo è servito da punto di partenza per il calcolo degli scenari. Quando nel rapporto si parla di clima attuale, si intende dunque il clima del periodo di riferimento.

Gli scenari descrivono, ognuno, il valore medio atteso delle condizioni climatiche su un periodo di 30 anni. Nel testo, le affermazioni concernenti «la metà del secolo» si riferiscono al 2060 (vale a dire al periodo 2045-2074), mentre quelle riguardanti «la fine del secolo» o «il lontano futuro» si riferiscono al 2085 (vale a dire al periodo 2070-2099). Per poter formulare affermazioni significative nonostante l'elevata variabilità tra i singoli anni, si utilizzano ogni volta i valori medi su 30 anni. Il rapporto indica quando sono considerati periodi diversi.

Simulazioni dei modelli climatici considerate

Quale input per le modellizzazioni idrologiche si è potuta utilizzare di volta in volta solo una selezione di tutte le possibili simulazioni dei modelli climatici risultanti dagli scenari climatici CH2018, in quanto non tutti i parametri climatici necessari per i modelli idrologici sono disponibili per tutti i modelli climatici. Le catene di modelli utilizzate dai tre modelli idrologici PREVAH-UniBE, PREVAH-WSL e HBV Light-UniZH non sono identiche. Mentre tra PREVAH-UniBE e HBV Light-UniZH la differenza delle catene utilizzate è minima, con il modello PREVAH-WSL è stato calcolato un numero inferiore di catene per RCP8.5. Laddove per la stessa catena di modelli climatici esistevano risultati in due risoluzioni, è stata considerata soltanto la risoluzione a 12 km. A causa dei lunghi tempi di calcolo per modelli idrologici specifici, come i modelli delle acque sotterranee o i modelli di temperatura delle acque, in alcuni progetti si è potuto elaborare soltanto un numero esiguo di simulazioni dei modelli climatici (tab. 3-1). In questa sede è stata effettuata una selezione preliminare al fine di rappresentare per quanto possibile l'intera gamma e incertezza dei modelli climatici. Il grado di copertura dell'intervallo di incertezza diminuisce al calare del numero di proiezioni. Le proiezioni climatiche utilizzate negli studi sono elencate nell'allegato (tab. A2).

Incerteze nella modellizzazione idrologica

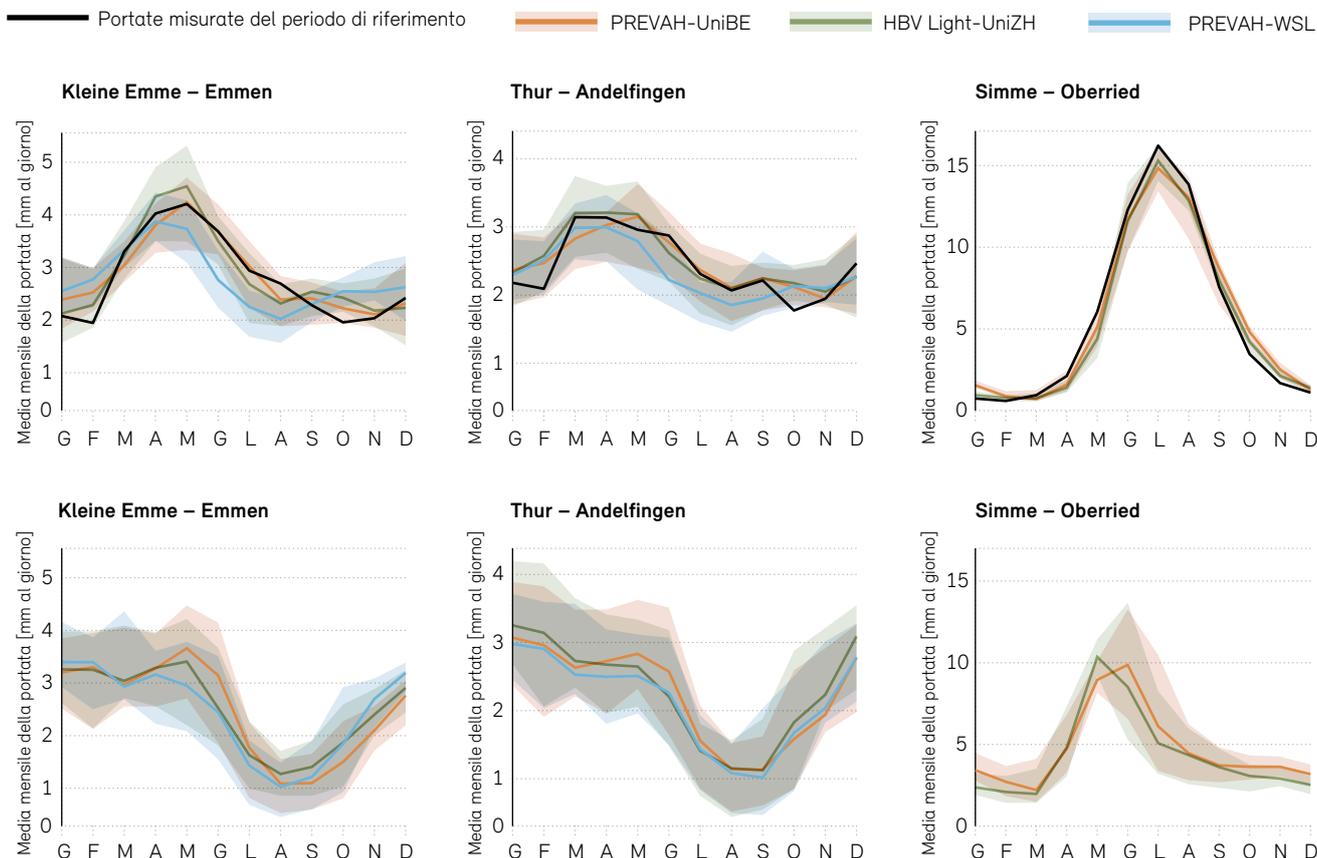
Gli scenari climatici CH2018 forniscono i dati iniziali per la modellizzazione idrologica e sono già accompagnati da incerteze. Inoltre mettono a disposizione solo valori giornalieri per diversi parametri climatici, mentre molti modelli idrologici necessitano di valori orari quale variabile di input. Per tale ragione, per esempio per le precipitazioni o la temperatura, vengono applicati ulteriori procedimenti allo scopo di affinare la risoluzione temporale. In

altri modelli i calcoli sono effettuati direttamente sulla base dei valori giornalieri, con il risultato che l'andamento giornaliero di processi come lo scioglimento della neve o i processi che si svolgono nell'arco di ore, come le piene in aree poco estese, non possono essere rappresentati o possono esserlo solo in maniera sommaria. Ulteriori incertezze riguardano la scelta del modello idrologico e il metodo di calcolo di processi quali la formazione del deflusso, l'evaporazione, lo scioglimento della neve o dei ghiacciai. Esiste poi un'altra fonte di incertezza legata alla determinazione dei parametri dei modelli. Ove possibile, questi sono stabiliti mediante calibrazione con valori misurati quali la portata o la copertura nevosa. Nelle aree

prive di misurazioni si devono trasferire i dati di aree di cui si dispongono misurazioni idrologiche. A tal fine si utilizzano le caratteristiche del bacino imbrifero, aumentando così ulteriormente l'incertezza. Per evitare questa fonte di incertezza, nel modello PREVAH-UniBE sono state modellate soltanto le aree che disponevano di misurazioni di portata. Tutti i modelli partono inoltre dal presupposto che i parametri calibrati per le condizioni attuali resteranno validi anche in futuro, il che costituisce un ulteriore fattore di incertezza soprattutto per la modellizzazione degli estremi idrologici i cui processi prevalenti potrebbero subire variazioni (Matti et al. i. E.).

Figura 2-3: Confronto dell'andamento annuale delle portate calcolate con tre modelli idrologici per i bacini imbriferi dei fiumi Kleine Emme, Thur e Simme

Sono rappresentate le portate mensili medie misurate così come le portate mensili medie calcolate per il periodo di riferimento (1981-2010) (di volta in volta mediana e intervallo di incertezza; riga superiore). Sono inoltre rappresentati i valori calcolati per la fine del secolo senza misure di protezione del clima (RCP8.5) (riga inferiore). In linea di principio si rileva una buona corrispondenza dei regimi e delle relative variazioni tra i diversi modelli e con i valori misurati.



Fonte iconografica: Mülchi et al. (2020)

Confronto degli scenari idrologici

Per stimare gli effetti dei fattori di incertezza sui risultati, si è proceduto a un confronto tra le portate stagionali calcolate per il periodo di riferimento e lo scenario RCP8.5 dei tre modelli PREVAH-WSL, PREVAH-UniBE e HBV Light-UniZH (fig. 2-3), considerando soltanto le catene di modelli climatici utilizzate da tutti i modelli. I tre modelli riproducono adeguatamente l'andamento annuale misurato delle portate per il periodo di riferimento, e sia la mediana dei valori medi mensili sia gli intervalli di incertezza coincidono bene. Anche per il futuro tutti i modelli mostrano un'analogia variazione delle portate per Thur e Kleine Emme. Per quanto riguarda la Simme, che nasce in regioni con presenza di ghiacciai, il picco di portata annuale evidenzia una lieve asimmetria temporale tra i modelli PREVAH-UniBE e HBV Light-UniZH. In generale, l'incertezza nella modellizzazione idrologica delle aree glaciali è leggermente superiore rispetto alle aree prive di

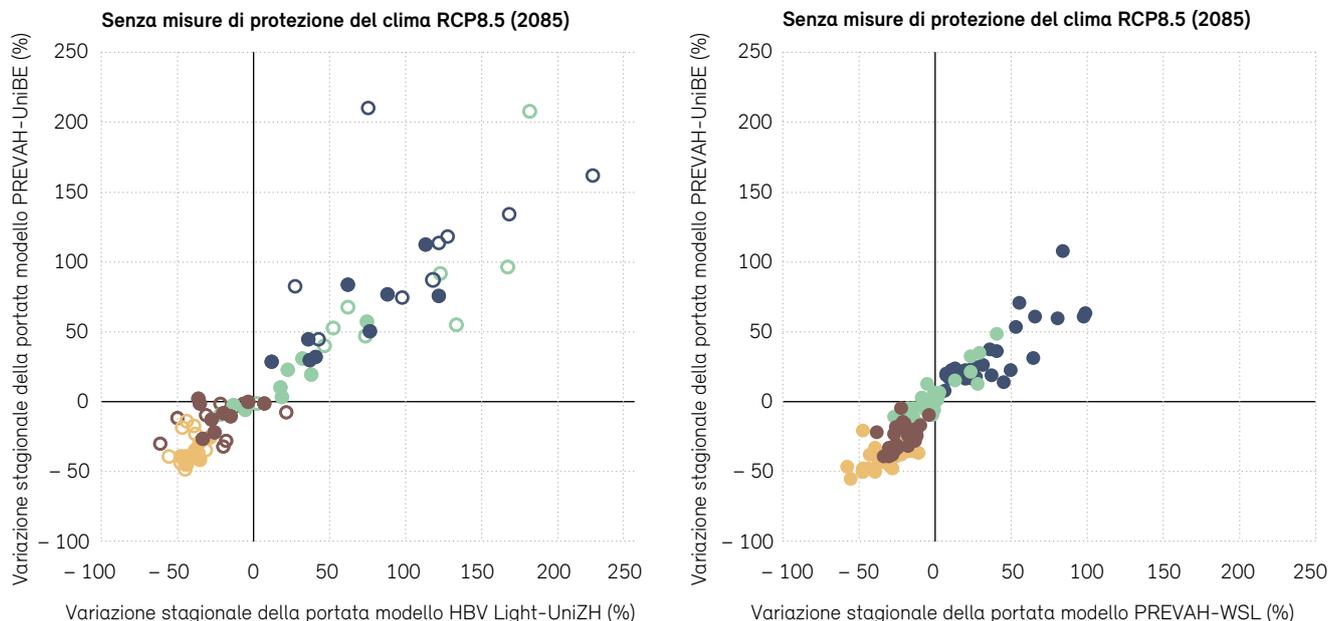
ghiacciai. I modelli PREVAH adottano un approccio piuttosto semplice per calcolare lo scioglimento dei ghiacciai. Il modello HBV Light-UniZH è stato invece perfezionato e calibrato appositamente per il calcolo dello scioglimento della neve e dei ghiacciai. Nel presente rapporto, per i bacini imbriferi che presentano una superficie ghiacciata superiore al 10 per cento sono pertanto rappresentati i risultati del modello HBV Light-UniZH. Informazioni più dettagliate sui modelli sono disponibili nella tabella A1 nell'allegato.

Per un confronto statistico dei risultati, per ogni modello idrologico e ogni bacino imbrifero è stato determinato il segnale di cambiamento tra il periodo di riferimento e il periodo 2070-2099 per lo scenario senza misure di protezione del clima RCP8.5, una volta per le portate annue e una volta per le portate stagionali (fig. 2-4 e tab. 2-3).

Figura 2-4: Confronto del segnale di cambiamento per le portate stagionali

Sono rappresentate le variazioni relative dei deflussi stagionali verso la fine del secolo per lo scenario senza misure di protezione del clima (RCP8.5) a confronto con il periodo di riferimento (1981-2010) per i tre modelli di regime idrico utilizzati in Hydro-CH2018 PREVAH-UniBE, PREVAH-WSL e HBV Light-UniZH. In linea di principio si rileva una corrispondenza delle variazioni tra i diversi modelli. Le differenze più grandi riguardano le aree ghiacciate in inverno e in primavera, quando i deflussi sono molto scarsi e bastano differenze minime per determinare importanti variazioni percentuali.

- Inverno ● Estate ● Percentuale ghiacciai < 10%
- Primavera ● Autunno ● Percentuale ghiacciai > 10%



La tabella 2-3 mostra la percentuale di aree per le quali i segnali di cambiamento si discostano di meno del 10 per cento tra due modelli. I modelli HBV Light-UniZH e PREVAH-WSL hanno solo tre aree in comune e sono dunque difficilmente comparabili. I tre modelli mostrano complessivamente una buona corrispondenza dei risultati, e anche nelle aree con scostamenti percentuali più elevati la direzione della variazione (aumento o calo) coincide per tutti i decenni.

Tabella 2-3: Confronto dei risultati dei modelli

È stata considerata la differenza nel segnale di cambiamento climatico tra il periodo di riferimento (1981-2010) e il periodo 2070-2099 per lo scenario senza misure di protezione del clima (RCP8.5) in termini di portata annua e di portate stagionali dei modelli PREVAH-UniBE, PREVAH-WSL e HBV Light-UniZH.

	PREVAH-WSL	HBV Light-UniZH	
Numero di aree in comune	29	18	
PREVAH-UniBE	Percentuale di aree con differenza nel segnale di cambiamento climatico < 10% per la portata annua	95 %	83 %
	Percentuale di aree con differenza nel segnale di cambiamento climatico < 10% per le portate stagionali	60 %	55 %

Gli scostamenti percentuali più rilevanti tra i modelli si verificano in inverno e in primavera, in particolare nelle aree fortemente ghiacciate o ad alta quota. Ciò si spiega con il fatto che nei mesi invernali e primaverili i deflussi sono generalmente molto esigui e bastano scostamenti minimi per generare una deviazione percentuale elevata. Le differenze assolute maggiori in termini di portata si verificano anch'esse nelle aree ghiacciate nei mesi estivi.

Poiché i tre modelli presentano solo un piccolo insieme d'intersezione di aree in comune, non è possibile fornire un'indicazione sistematica dell'intervallo di incertezza idrologica, come accade invece per i modelli climatici. L'incertezza risultante dagli scenari climatici viene pertanto utilizzata come intervallo di incertezza anche per la modellizzazione idrologica. In generale, per tutti i risul-

tati si dovrebbe considerare il segnale di cambiamento rispetto al periodo di riferimento e non i valori assoluti. Nel rapporto, per ciascun bacino imbrifero sono presentati soltanto i risultati di un modello nell'ordine di selezione seguente:

- PREVAH-UniBE: 93 aree di piccole o medie dimensioni, con superficie ghiacciata assente o inferiore al 10 per cento;
- PREVAH-WSL: per il regime idrico della Svizzera e per 30 grandi bacini imbriferi;
- HBV Light-UniZH: bacini imbriferi di testa ghiacciati.

Maggiori informazioni e riferimenti sul tema «metodi e incertezze»

- Matti et al. (i. E.): Uncertainty and further methodological topics. Hydro-CH2018 report.

3 Il regime idrico nel contesto dei cambiamenti climatici

I cambiamenti climatici influiscono sul regime idrico nel suo complesso: precipitazioni e portate si modificano, le temperature salgono, l'evaporazione aumenta e i ghiacciai si sciolgono sempre più rapidamente. In inverno si verificano meno nevicate e di conseguenza nel semestre estivo manca l'acqua prodotta dallo scioglimento della neve.

Con oltre 1400 mm di precipitazioni annue, la Svizzera è uno dei Paesi europei più ricchi d'acqua. Inoltre dispone di vasti serbatoi idrici come i laghi naturali e artificiali, i ghiacciai, il manto nevoso, il suolo e le acque sotterranee (fig. 3-1). Nelle Alpi svizzere nascono grandi fiumi come il Reno e il Rodano, nonché importanti affluenti del Po e del Danubio. I cambiamenti nei singoli elementi del regime idrico della Svizzera hanno pertanto effetti diretti sui Paesi limitrofi.

L'equazione relativa al regime idrico descrive la relazione tra deflusso (Q), precipitazioni (N), evaporazione (V) e variazioni di accumulo (dS) per unità temporale (dt) e costituisce quindi la base per tutte le modellizzazioni e gli scenari idrologici.

$$Q = N - V + dS/dt$$

Tutti gli elementi dell'equazione sono influenzati in varia misura dai cambiamenti climatici (fig. 3-1), tra cui in particolare i cambiamenti nelle precipitazioni e l'aumento delle temperature. A lungo andare, il riscaldamento fa aumentare l'evaporazione e diminuire il deflusso dallo scioglimento dei ghiacciai. In inverno le precipitazioni avvengono con sempre maggiore frequenza sotto forma di pioggia anziché di nevicate, con un minore scioglimento della neve nel semestre estivo. La conseguenza in molte regioni della Svizzera è un calo dei deflussi nei mesi estivi e autunnali. In inverno e in primavera i deflussi tendono invece ad aumentare. Considerando l'intero anno, in molti bacini imbriferi non si registrano praticamente variazioni dei deflussi, al massimo lievi cali (cap. 6.1).

I serbatoi idrici hanno tempi di reazione diversi ai cambiamenti climatici

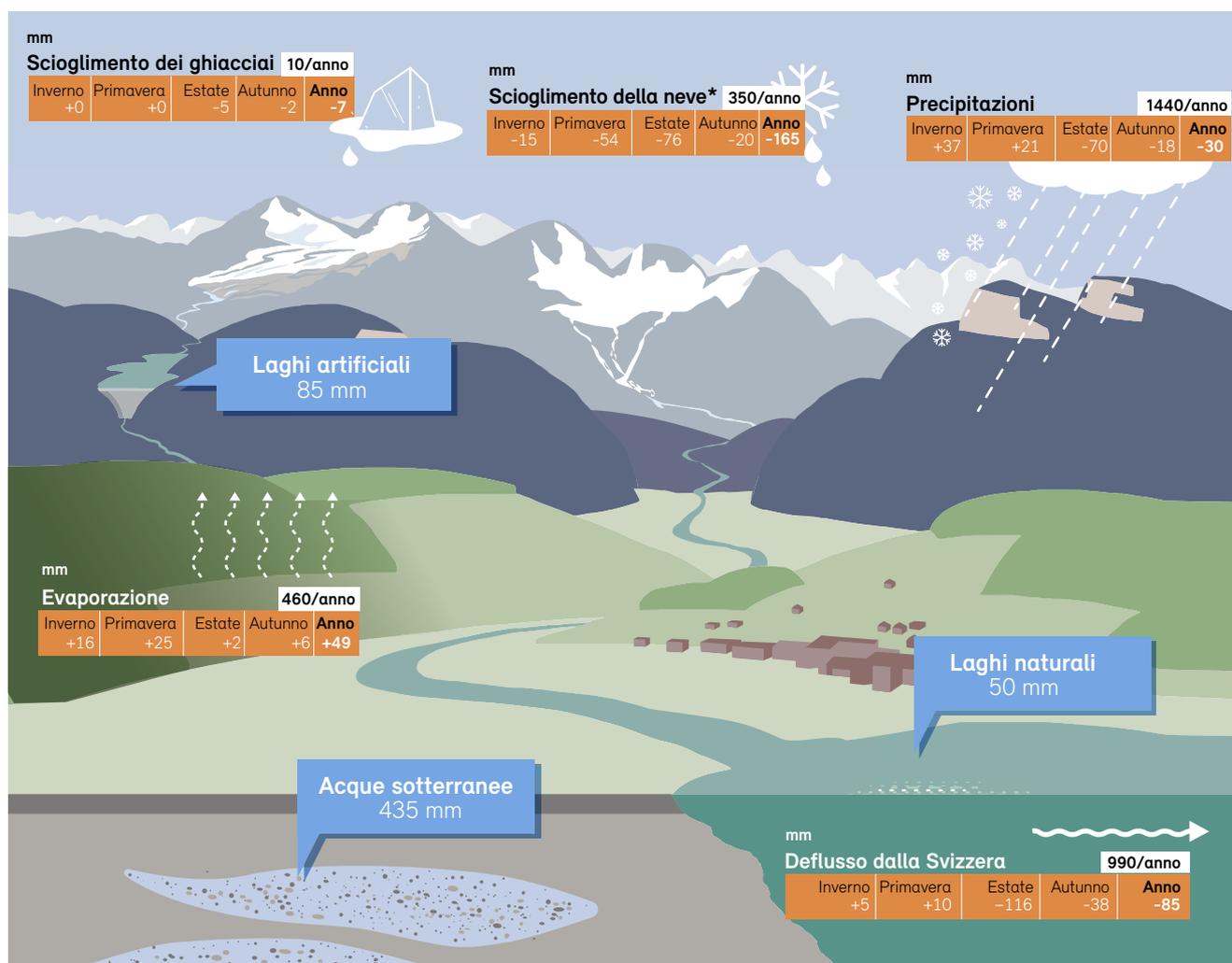
I cambiamenti climatici incidono sul grado di riempimento dei bacini nel corso dell'anno, determinando una riduzione complessiva del contenuto idrico medio del manto nevoso e del volume dei ghiacciai. A tali cambiamenti dei serbatoi idrici causati dal clima si sovrappongono nel breve periodo le condizioni meteorologiche di volta in volta prevalenti e i prelievi operati dall'uomo.

I tempi di reazione sono variabili: il primo a reagire è il suolo, che a seconda delle sue caratteristiche rilascia l'acqua assorbita durante una precipitazione nei corsi e specchi d'acqua o, tramite evaporazione, nell'atmosfera in un tempo compreso tra alcuni minuti e diversi mesi. All'estremità opposta si trovano i ghiacciai e le falde freatiche più profonde che sono in grado di immagazzinare acqua per anni, decenni o addirittura secoli (tab. 3-1). Quanto più lunghi sono i tempi di accumulo di un bacino idrico, tanto più lentamente reagirà ai cambiamenti climatici.

I serbatoi idrici sono fattori centrali nel sistema idrologico: i cambiamenti al loro interno possono avere ripercussioni sulla formazione del deflusso, sulla temperatura delle acque, sul trasporto di sostanze e infine sugli ecosistemi acquatici. La tabella 3-1 mostra gli effetti nel tempo e offre anche una panoramica dei volumi dei singoli bacini.

Figura 3-1: Effetti dei cambiamenti climatici sul regime idrico

I cambiamenti climatici si ripercuotono su tutti gli elementi del regime idrico. Sono indicati gli elementi modellati del regime idrico deflusso, precipitazioni, evaporazione e scioglimento dei ghiacciai e della neve per il periodo di riferimento (1981-2010) (in bianco) e per il lontano futuro (2070-2099) (in arancione) senza misure di protezione del clima (RCP8.5), calcolati per la Svizzera idrologica con il modello PREVAH-WSL (dati tratti da Brunner et al. 2019c). La capacità di accumulo annua utilizzabile (in azzurro) può essere indicata soltanto per il periodo di riferimento. Per i laghi artificiali e naturali è stata calcolata sulla base delle oscillazioni medie annue del livello idrometrico o delle norme di regolazione dei laghi (Brunner et al. 2019a). La capacità di accumulo utilizzabile per le acque sotterranee è tratta da Sinreich et al. (2012). I dati relativi ai laghi e alle acque sotterranee si riferiscono al territorio nazionale svizzero, mentre per i laghi di confine si considera la superficie intera.



350 Totali annui in mm per il periodo di riferimento (1981-2010)

+21 Aumento e/o diminuzione in mm per stagione e anno per il periodo 2070-2099 senza misure di protezione del clima (RCP8.5) a confronto con il periodo di riferimento

85 Acqua utilizzabile annualmente da elementi di stoccaggio in mm

* Lo scioglimento della neve fa parte delle precipitazioni.

Tabella 3-1: Serbatoi idrici importanti in Svizzera

Volumi dei serbatoi idrici importanti in Svizzera e indicazione della loro capacità di immagazzinare acqua nel tempo, denominata anche tempo di permanenza dell'acqua. Il volume del suolo non può essere stimato. Il concetto di capacità utilizzabile in modo sostenibile è applicato soltanto ai laghi e alle acque sotterranee, gli unici bacini idrici che consentono un prelievo attivo dell'acqua a scopi di utilizzazione.

	Volume complessivo km ³	Capacità utilizzabile in modo sostenibile km ³ all'anno	Tempo di permanenza dell'acqua nel bacino idrico						Maggiori informazioni nel capitolo	Riferimento per i dati volumetrici
			Minuti	Ore	Giorni	Settimane	Mesi	Anni		
Suolo	–	–							4.3	
Neve	22 ¹	–							5.1	Brunner et al. 2019c
Ghiacciai	53 ²	–							5.2	Langhammer et al. 2019
Laghi naturali	130 ³	2							6.3	Indicatori dei laghi forniti dall'UFAM Brunner et al. 2019a
Laghi artificiali (serbatoi)	3,5 ²	3,5							6.3	Ufficio federale dell'energia
Acque sotterranee	150	18							6.4	Sinreich et al. 2012

¹ Media 1981 – 2010² Stato 2019³ Volume complessivo con i laghi di confine

4 Fattori di influenza climatologici

La temperatura dell'aria, le precipitazioni o l'evaporazione influiscono notevolmente sul regime idrico e sulle acque. A causa dei cambiamenti climatici, la temperatura e l'evaporazione aumentano e i quantitativi di precipitazione cambiano, intensificandosi in inverno e diminuendo in estate.

4.1 Temperatura dell'aria

Negli ultimi 150 anni la temperatura media annua dell'aria in Svizzera è già aumentata di circa 2 °C, quindi due volte tanto la media globale. Anche in futuro continuerà la forte tendenza al riscaldamento e i periodi di canicola diventeranno più frequenti, intensi e prolungati.

Dall'inizio delle misurazioni nel 1864, la temperatura media in Svizzera è aumentata di quasi 2 °C (fig. 4-1), quindi due volte tanto la media globale (Begert et al. 2018). Dagli anni Ottanta si osserva un'accelerazione del riscaldamento: nove dei dieci anni più caldi sono occorsi dopo il 2000. Il riscaldamento causa fasi di canicola più intense e frequenti: il numero dei giorni di canicola (tem-

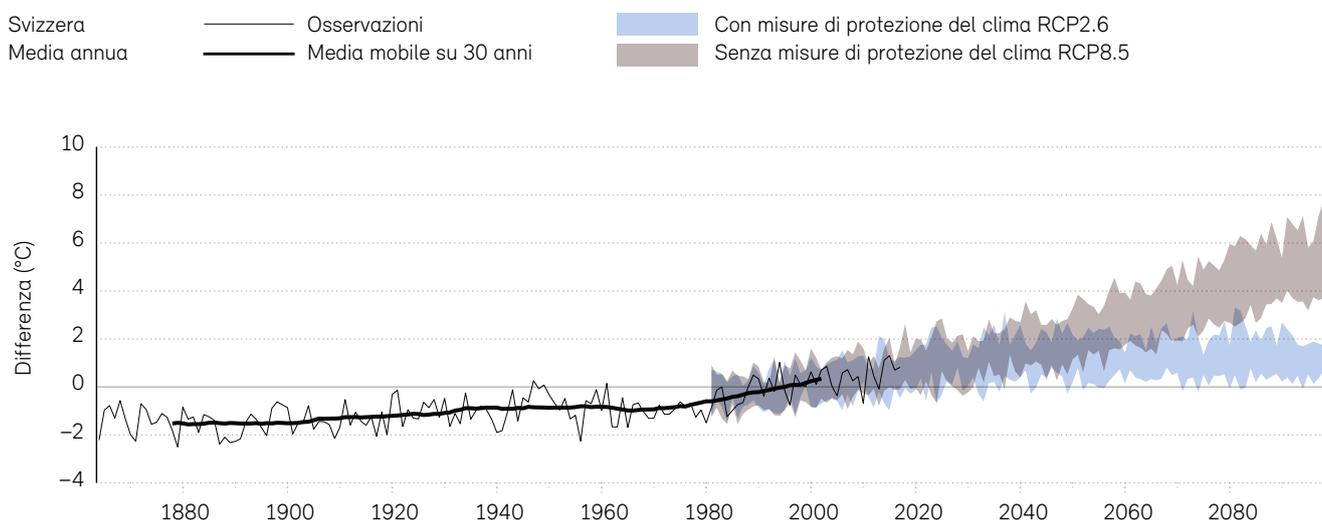
peratura massima giornaliera superiore a 30 °C) è sensibilmente aumentato alle quote più basse, mentre il numero dei giorni di gelo (temperatura massima giornaliera inferiore a 0 °C) è diminuito. Dal 1961 la quota media dell'isoterma di zero gradi nei mesi invernali si è alzata di 300 – 400 m (Rapporto tecnico CH2018). Questo è un valore che riveste grande importanza idrologica nel corso dell'anno, in quanto stabilisce se le precipitazioni cadranno sotto forma di neve, e verranno quindi immagazzinate stagionalmente, o sotto forma di pioggia che si trasforma in deflusso immediato. Esso determina inoltre la quota al di sotto della quale può avvenire lo scioglimento della neve e dei ghiacciai.

Continuo aumento della temperatura

Gli scenari climatici CH2018 mostrano un ulteriore aumento significativo delle temperature in tutte le stagioni. Nello scenario con misure di protezione coerente del clima (RCP2.6) si deve prevedere per la Svizzera un aumento supplementare della temperatura media annua di circa 0,6 – 1,9 °C entro la fine del secolo (fig. 4-1). Nello scenario senza misure di protezione del clima (RCP8.5) l'aumento sarebbe invece di 3,3 – 5,4 °C. Ad aumentare saranno soprattutto le temperature massime estive. Le ondate di

Figura 4-1: Evoluzione della temperatura media annua dell'aria al suolo in passato e in futuro

Sono rappresentati gli scostamenti attesi dal periodo di riferimento (1981-2010) in caso di protezione coerente del clima (RCP2.6) e senza misure di protezione del clima (RCP8.5).



calore come pure i giorni e le notti molto caldi diventerebbero non solo più estremi ma si verificano con maggiore frequenza. Senza misure di protezione del clima, l'isoterma di zero gradi durante l'inverno potrebbe salire entro il 2085 dalla quota attuale di circa 850 m s.l.m. a circa 1700 m s.l.m.

4.2 Precipitazioni

Dall'inizio delle misurazioni le precipitazioni medie in Svizzera non hanno praticamente subito variazioni e anche per il futuro non si attendono cambiamenti sostanziali. Cambierà però notevolmente la distribuzione stagionale delle precipitazioni, con un aumento nei mesi estivi e una diminuzione in quelli invernali. Dovrebbe continuare l'aumento già osservato di precipitazioni intense.

In Svizzera le somme giornaliere delle precipitazioni sono misurate dal 1864, e dal 1978 anche a intervalli di 10 minuti. I quantitativi annui di precipitazione variano fortemente da un luogo all'altro, passando da meno di 600 mm nelle valli secche del Vallese a più di 3000 mm nelle Alpi ad alta quota.

Cambiamenti registrati finora

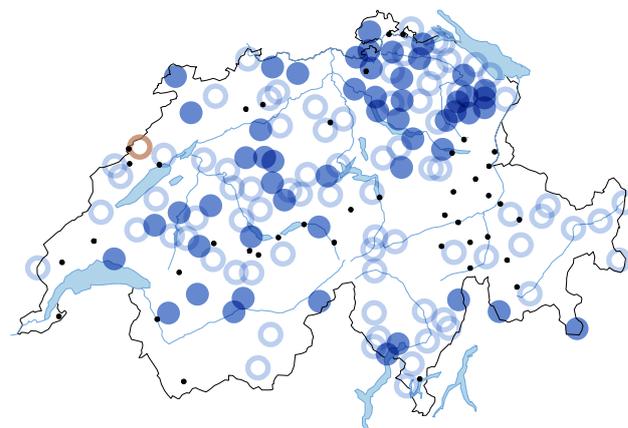
Le precipitazioni annue e stagionali non hanno subito variazioni significative dall'inizio delle misurazioni, ad eccezione delle precipitazioni invernali sul versante alpino settentrionale che nell'ultimo secolo sono aumentate del 20 per cento. Sono invece cambiate la frequenza e l'intensità delle forti precipitazioni. Considerando la media di tutte le stazioni di misura, l'intensità delle precipitazioni giornaliere più forti nell'arco di un anno è infatti aumentata in 100 anni del 10,4 per cento circa, che corrisponde a un aumento di intensità del 7,7 per cento per grado Celsius. Ciò equivale indicativamente al valore previsto dalla fisica per l'aumento di temperatura (equazione di Clausius-Clapeyron). Per il periodo 1961 – 1990 sono stati quantificati gli eventi di precipitazione giornaliera che si verificano una volta ogni 100 anni per ogni stazione. La frequenza di tali eventi intensi è aumentata del 26,5 per cento in 100 anni (Scherrer et al. 2016). In Svizzera le forti precipitazioni a livello locale con durata di minuti e ore sono causate soprattutto dai temporali esti-

vi. Le forti precipitazioni su aree estese con durata pari o superiore a un giorno possono essere determinate da una varietà di condizioni meteorologiche. A seconda della regione presentano un'intensità variabile e si concentrano in stagioni diverse.

Figura 4-2: Tendenze osservate nelle precipitazioni giornaliere intense nel corso dell'anno

I cerchi blu mostrano un sensibile aumento, gli anelli azzurri un leggero aumento e l'anello marrone un calo dei quantitativi di precipitazione misurati nel periodo 1901 – 2014. I puntini neri indicano una variazione minima dei quantitativi di precipitazione.

-  Lieve aumento
-  Sensibile aumento
-  Lieve calo
-  Variazione minima



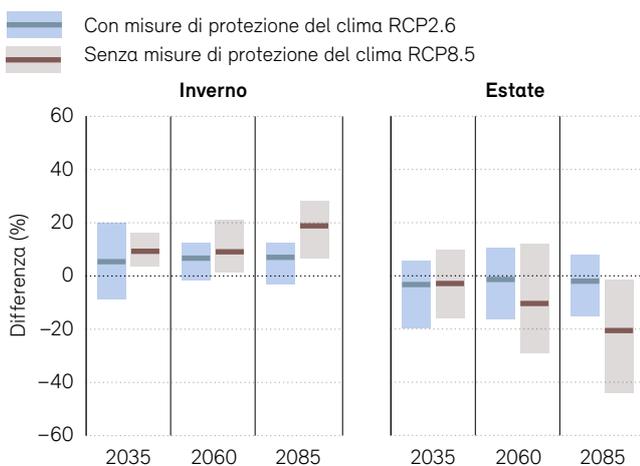
Fonte iconografica: NCCS (2018) e Scherrer et al. (2016)

Spostamenti stagionali in futuro

Secondo gli scenari climatici CH2018, le precipitazioni annue non dovrebbero praticamente subire variazioni in futuro. Soltanto nello scenario senza misure di protezione del clima si prevede un lieve calo nel lontano futuro. Cambierà però la distribuzione stagionale delle precipitazioni (fig. 4-3). In uno scenario senza misure di protezione del clima le precipitazioni invernali dovrebbero aumentare, e quelle estive calare, del 20 per cento circa entro la fine del secolo. Riguardo alle precipitazioni estive sussistono però maggiori incertezze. Nei mesi invernali, inoltre, il rialzo della quota dell'isoterma di zero gradi comporterà più precipitazioni sotto forma di pioggia che non di neve.

Figura 4-3: Future precipitazioni medie estive e invernali per tre orizzonti temporali in Svizzera

Sono rappresentati gli scostamenti attesi (mediana e intervallo di incertezza) dal periodo di riferimento (1981 – 2010) in inverno (a sinistra) e in estate (a destra) per due scenari di emissione e tre periodi futuri prima della fine del secolo (2035, 2060 e 2085).



Fonte iconografica: NCCS (2018)

In futuro, fasi di siccità più prolungate e aumento delle forti precipitazioni

Nello scenario senza misure di protezione del clima, entro la fine del XXI secolo quasi tutta la Svizzera dovrà fare i conti con fasi di siccità più frequenti e prolungate. In tale scenario, le fasi di giorni consecutivi senza pioggia si prolungheranno infatti nel lontano futuro di 1 – 9 giorni (Rapporto tecnico CH2018).

Gli scenari climatici CH2018 prevedono inoltre un aumento dell'intensità e della frequenza delle forti precipitazioni per tutte le durate di precipitazione. L'aumento dell'intensità sarà simile in tutte le stagioni e senza misure di protezione del clima dovrebbe raggiungere il 20 per cento circa entro la fine del secolo. L'incertezza e le differenze tra i modelli climatici sono più marcate per quanto riguarda le forti precipitazioni nei mesi estivi. In generale, i modelli climatici non sono ancora in grado di riprodurre in maniera adeguata i complessi processi meteorologici legati alle forti precipitazioni convettive di un Paese piccolo e montuoso come la Svizzera.

Incerteze riguardo alle condizioni meteorologiche

L'intensità e la frequenza delle forti precipitazioni così come delle fasi di siccità acuta sono influenzate dall'aumento delle temperature (termodinamica) e dai cambiamenti nella circolazione atmosferica e nella stratificazione dell'atmosfera (Rapporto tecnico CH2018). In passato si verificavano sistematicamente variazioni decadiche della frequenza dei modelli di circolazione atmosferica e delle conseguenti condizioni meteorologiche (Weusthoff 2011), con il risultato che in alcuni decenni si concentravano per esempio estesi eventi di piena o di magra.

Anche in relazione alla futura frequenza delle condizioni meteorologiche, gli scenari climatici CH2018 mostrano variazioni decadiche che però, nel caso delle condizioni meteorologiche frequenti, si discostano solo minimamente dalle variazioni osservate in passato. Finora non è stato possibile formulare affermazioni attendibili per le condizioni climatiche rare e di lunga durata (persistenti) che sono responsabili di estremi idrologici quali eventi di piena su aree estese o fasi di siccità estrema: diversi modelli climatici forniscono infatti risultati discordanti in termini di frequenza e persistenza. Inoltre, a causa della rarità di questi estremi idrologici non è possibile elaborare alcuna analisi statistica (Huguenin et al. 2020). Per quanto riguarda gli estremi permane dunque un certo grado di incertezza in relazione all'evoluzione futura.

Scenari idrologici basati su dati climatici ad alta risoluzione: quali effetti ha la variabilità naturale dei dati climatici sugli scenari idrologici?

Procedura

Per nove proiezioni climatiche di CH2018 è stata simulata la variabilità naturale dell'atmosfera con l'ausilio di un generatore meteo. Per i tre bacini imbriferi di Thur, Kleine Emme e Maggia è stato così possibile calcolare con elevata risoluzione temporale e spaziale i parametri meteorologici (p. es. valori orari delle precipitazioni) attesi in condizioni climatiche future. Sulla base di tali dati climatici sono stati quindi calcolati degli scenari idrologici con il modello idrologico Topkapi-ETH. I risultati sono stati confrontati con la variabilità naturale attuale.

Risultati principali

- I modelli mostrano variazioni nelle precipitazioni annue già per il periodo 2020-2049. Le variazioni sono però superiori all'attuale variabilità naturale soltanto in uno scenario senza misure di protezione del clima e alla fine del secolo.
- L'intensità delle forti precipitazioni può variare considerevolmente nel raggio di brevi distanze, anche all'interno dello stesso bacino imbrifero. Per esempio, verso la fine del secolo le forti precipitazioni nel bacino della Kleine Emme e della Thur aumenteranno alle quote più basse, registrando invece un calo tendenziale alle quote più elevate.
- Senza misure di protezione del clima, da qui alla fine del secolo i valori orari delle forti precipitazioni segneranno un aumento (mediana attorno al 5 % per la Thur e la Kleine Emme e attorno al 20 % per la Maggia). Tale aumento, calcolato sia per gli eventi di forti precipitazioni con probabilità di accadimento ogni due anni sia per quelli che dovrebbero verificarsi una volta ogni 30 anni, non è tuttavia statisticamente rilevante e si colloca nell'intervallo di variabilità naturale.
- Le variazioni nelle portate di piena annue non sono significative dal punto di vista statistico e rientrano anch'esse entro i limiti dell'attuale variabilità naturale.

Progetto Hydro-CH2018 dell'Istituto di ingegneria ambientale del Politecnico Federale di Zurigo (PFZ)

4.3 Evaporazione e umidità del suolo

Quale anello di congiunzione tra l'atmosfera e le acque, la superficie terrestre riveste un ruolo centrale nel sistema idrologico. Quando le temperature dell'aria aumentano, l'evaporazione si intensifica e l'umidità del suolo diminuisce, un fenomeno che a sua volta produce una retroazione sul clima.

Il suolo rappresenta il serbatoio idrico principale per la vegetazione. Questo perché esso conserva l'umidità necessaria per la crescita anche in fasi prolungate di assenza di precipitazioni. Il suolo è inoltre fondamentale per l'idrologia. A seconda della conformazione, della struttura e del momentaneo tenore di umidità, le pre-

cipitazioni possono defluire rapidamente sotto forma di ruscellamento superficiale, rimanere immagazzinate nel suolo o infiltrarsi al suo interno fino a raggiungere con un ritardo temporale le acque superficiali o sotterranee. Il suolo e l'umidità ivi accumulata influiscono quindi su tutte le dinamiche di deflusso e di accumulazione (p. es. rigenerazione dell'acquifero, formazione di piene).

Attraverso l'evaporazione, l'acqua immagazzinata raggiunge l'atmosfera facendo diminuire l'umidità del suolo. L'evaporazione può avvenire direttamente sulla superficie delle acque e del suolo (evaporazione in senso stretto), ma anche attraverso il metabolismo delle piante (traspirazione). L'evaporazione, in gergo tecnico anche evapotraspirazione, influisce a sua volta sulla formazione delle

precipitazioni, sulla temperatura dell'aria e sulla circolazione atmosferica (p. es. persistenza delle condizioni meteorologiche).

Per adesso nessun aumento dell'evaporazione

La più lunga serie di misurazioni dell'evaporazione in Svizzera inizia nel 1976 e proviene dal lisimetro del PF Zuri-go situato nel Rietholzbach nel distretto del Toggenburg. Negli ultimi 40 anni non si è osservata alcuna tendenza significativa dei terreni prativi locali in termini di evaporazione (Hirschi et al. 2017). L'evaporazione viene perlopiù calcolata come parametro meteorologico e non è misurata direttamente.

In Svizzera non esiste una rete di misurazione nazionale per l'umidità del suolo. È vero che molti Cantoni e anche istituti di ricerca effettuano misurazioni dell'umidità del suolo, ma lo fanno spesso con finalità differenti. Sul fronte della ricerca, SwissSMEX fornisce per esempio dati sull'umidità del suolo provenienti da 19 stazioni. Le serie di misurazioni sono però ancora troppo brevi per poter formulare affermazioni sulle tendenze a lungo termine. In Svizzera mancano inoltre carte dei suoli dettagliate con

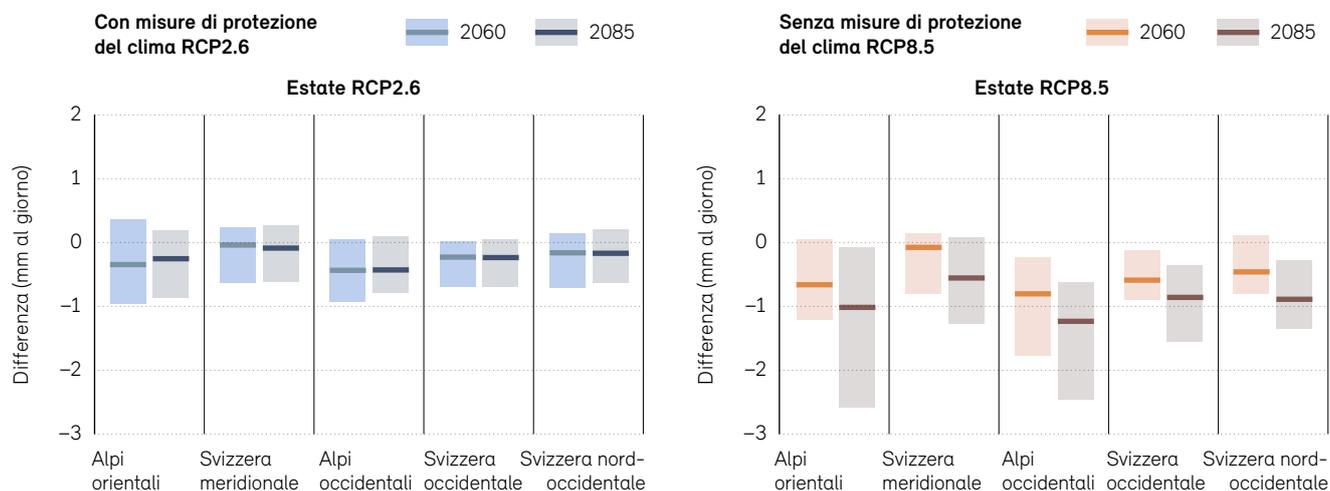
una risoluzione spaziale sufficiente per rispondere ai quesiti idrologici.

Futuro aumento dell'evaporazione

Con l'innalzamento delle temperature a causa dei cambiamenti climatici aumenterà anche l'evaporazione potenziale, ossia la massima evaporazione possibile in presenza di risorse illimitate d'acqua, come per esempio nel caso di un lago. L'andamento dell'evaporazione (effettiva) in un determinato luogo a fronte di un innalzamento delle temperature dipende dalla disponibilità d'acqua locale. È infatti addirittura possibile che in uno scenario di aumento delle temperature l'evaporazione diminuisca a seguito dell'esaurimento delle riserve d'acqua nel suolo. Gli scenari idrologici mostrano un aumento entro la fine del secolo dell'evaporazione media in Svizzera del 5 per cento in caso di protezione coerente del clima e del 10 per cento senza misure di protezione del clima (Brunner et al. 2019c). Per il momento gli scenari climatici non tengono conto dei futuri cambiamenti nell'utilizzazione del suolo che possono causare un aumento o una diminuzione dell'evaporazione, o li considerano solo in parte.

Figura 4-4: Variazione stagionale dell'indicatore «precipitazioni meno evaporazione» ($d[N-V]$) per la Svizzera

Sono rappresentati gli scostamenti futuri (mediana e intervallo di incertezza) per i mesi estivi di giugno, luglio e agosto a confronto con il periodo di riferimento (1981-2010) per i due scenari di emissione con e senza misure di protezione coerente del clima per diverse regioni della Svizzera. Questo indicatore consente di formulare affermazioni in merito ai cambiamenti nelle acque accumulate nel suolo. Senza misure di protezione del clima lo scostamento entro la fine del secolo diminuirebbe di circa 1 mm al giorno.



I cambiamenti climatici possono influire sull'evaporazione in vario modo. Uno scioglimento anticipato della neve nelle Alpi e un innalzamento del limite del bosco possono farla aumentare, in quanto il suolo e la vegetazione riflettono meno raggi rispetto alla neve, si riscaldano maggiormente e lasciano quindi anche evaporare più acqua. Un calo dell'evaporazione può invece verificarsi per esempio in una situazione di siccità prolungata in cui le piante appassiscono e perdono le foglie, riducendo la traspirazione. È altresì noto che in presenza di un più elevato tenore di CO₂ nell'atmosfera molte piante riescono a utilizzare meglio l'acqua, con una conseguente diminuzione dell'evaporazione (Bernacchi e Van Loocke 2015).

Prosciugamento del suolo nei mesi estivi

In estate la combinazione di minori precipitazioni e maggiore evaporazione fa sì che il suolo diventi più secco. La figura 4-4 mostra in che modo evolverà il bilancio di pre-

cipitazioni ed evaporazione con l'avanzare dei cambiamenti climatici in diverse regioni della Svizzera. In uno scenario senza misure di protezione del clima, nella maggior parte delle regioni si dovrebbe registrare in media, entro la fine del secolo, un millimetro di acqua in meno al giorno nel suolo e nel deflusso durante i mesi estivi. Questo calo equivale all'incirca al 20 per cento delle precipitazioni estive medie attualmente misurate in Svizzera. Durante fasi di siccità straordinaria con una carenza persistente di precipitazioni, il calo della disponibilità d'acqua potrebbe essere ancora più marcato.

Un ruolo importante negli eventi di siccità e nelle ondate di calore hanno anche le retroazioni con la superficie terrestre. L'evaporazione fa aumentare il tenore d'acqua nell'atmosfera, con un conseguente raffreddamento di piante, suolo e aria. La traspirazione protegge quindi le piante dal surriscaldamento, mentre l'evaporazione del

Bilancio idrico e siccità: in che modo i cambiamenti climatici influiscono sulla siccità, sulla fisiologia delle piante in termini di regolazione della traspirazione e sul futuro fabbisogno di irrigazione?

Procedura

Il modello climatico regionale combinato COSMO-CLM² è stato usato per calcolare gli effetti dei cambiamenti climatici sul bilancio idrico e sui periodi di siccità in Europa in una griglia di 50 km (scenario RCP8.5). Sono stati esaminati in particolare il futuro fabbisogno di irrigazione e gli adattamenti fisiologici delle piante alle più elevate concentrazioni CO₂. Inoltre le catene di modelli tratte da CH2018 sono state analizzate in maniera approfondita per quanto riguarda futuri eventi di siccità.

Risultati principali

- Senza misure di protezione del clima, in Svizzera si prevedono periodi di siccità prolungati, una diminuzione dell'umidità del suolo e un calo del deflusso. Il grado esatto del prosciugamento nei mesi estivi è ancora incerto.
- Per le colture attuali a superficie agricola utile invariata, entro la fine del secolo il fabbisogno di irrigazione dovrebbe raddoppiare a causa dei cambiamenti climatici.
- Le piante reagiscono all'aumento delle concentrazioni di CO₂ chiudendo le fessure sulla loro superficie (stomi), una reazione che riduce anche la fuoriuscita d'acqua. Ciò determina un calo generalizzato dell'evapotraspirazione, che in ampie parti dell'Europa centrale e settentrionale potrebbe concorrere ad aggravare l'aumento della temperatura dell'aria e gli estremi di temperatura.
- Mentre i modelli climatici globali tengono conto di questo effetto fisiologico delle piante, esso è assente nelle proiezioni climatiche regionali che sono state utilizzate per gli scenari climatici CH2018. Considerando tale processo, la temperatura massima prevista nei mesi estivi aumenterebbe ulteriormente rispetto a CH2018 (Schwingshackl et al. 2019).

Dinamica del bosco, utilizzazione del suolo e regime idrico: in che modo i futuri cambiamenti nella dinamica del bosco influiscono sull'evaporazione e sulla portata?

Procedura

Il modello del regime idrico PREVAH-WSL è stato combinato con un modello di sviluppo del bosco. Sulla base degli scenari climatici CH2018 sono stati calcolati gli effetti sullo sviluppo del bosco e sul regime idrico in sei bacini imbriferi.

Risultati principali

- Nell'Altipiano e nelle Prealpi non si prevedono grandi cambiamenti nel deflusso a causa della mutata dinamica del bosco.
- I cambiamenti climatici favoriscono l'aumento della copertura forestale nelle Alpi. L'aumento delle superfici boschive dipende anche dall'ulteriore sviluppo dell'economia alpestre, in quanto non si vuole l'espansione del bosco sulle superfici pascolate.
- Una crescente copertura forestale nelle Alpi avrebbe notevoli ripercussioni sull'evaporazione e sul deflusso. Nel lontano futuro, questo aspetto potrebbe dare luogo a un aumento dell'evaporazione nei bacini imbriferi alpini e quindi a una riduzione del deflusso annuo fino al 10 per cento. A causa della crescente profondità delle radici questo effetto è più evidente in autunno e potrebbe ridurre ulteriormente il deflusso minimo causato dal clima nei mesi autunnali (Speich et al. 2020).

Progetto Hydro-CH2018 dell'unità di ricerca Idrologia di montagna dell'Istituto federale di ricerca per la foresta, la neve e il paesaggio (WSL)

suolo umido fa rallentare l'aumento di temperatura durante le ondate di calore (Vogel et al. 2017). Una volta che il suolo è prosciugato, può però subentrare anche un prolungamento dei periodi di siccità e di canicola (Lorenz et al. 2010) e persino un rafforzamento delle zone ad alta pressione stazionarie (Merrifield et al. 2019). Con l'avanzare dei cambiamenti climatici, questo effetto a retroazione potrebbe condurre a un'intensificazione dei periodi di siccità.

Maggiori informazioni e riferimenti sul tema «evaporazione e umidità del suolo»

- Hirschi M. et al. 2020: Soil moisture and evapotranspiration. Hydro-CH2018 report.
- Speich M. et al. (i. E.): Einfluss der Walddynamik auf den zukünftigen Wasserhaushalt von Schweizer Einzugsgebieten. Hydro-CH2018 Bericht.

5 Criosfera

In Svizzera si può osservare già da tempo l'innalzamento della quota dell'isoterma di zero gradi, lo scioglimento dei ghiacciai e lo scongelamento del permafrost quale risultato dell'aumento della temperatura dell'aria, sviluppi destinati ad acuirsi ulteriormente a causa dei cambiamenti climatici. I pericoli naturali in alta montagna aumenteranno e la gestione delle acque dovrà adeguarsi alla mutata offerta d'acqua.

5.1 Neve

Lo scioglimento della neve contribuisce oggi in misura determinante ai deflussi in territorio svizzero. In futuro, a causa dei cambiamenti climatici, la quota dell'isoterma di zero gradi si alzerà anche nei mesi invernali. L'innalzamento comporterà un minore accumulo di precipitazioni in forma di manto nevoso e uno scioglimento anticipato della neve in primavera.

Il manto nevoso quale serbatoio idrico naturale riveste straordinaria importanza per il regime idrico stagionale della Svizzera. Secondo i calcoli dei modelli, nel periodo di riferimento 1981 – 2010 circa il 40 per cento (22 km³) del deflusso annuo totale proveniva da tale fonte. Il manto nevoso si forma nelle regioni alpine nel corso dell'inverno (in concomitanza con deflussi ridotti soprattutto nelle acque alpine) e raggiunge solitamente il suo massimo nel mese di marzo. I deflussi in molti bacini imbriferi sono alimentati principalmente dal successivo scioglimento della neve in primavera e inizio estate.

Il ritiro dei ghiacciai è già osservabile

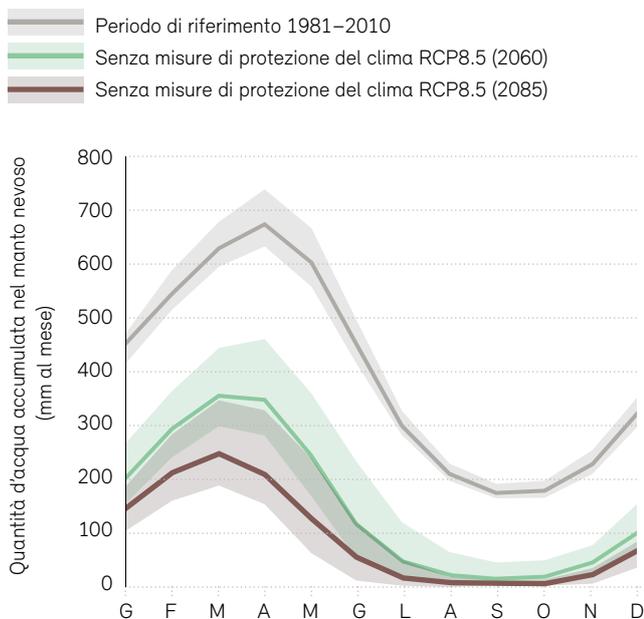
La percentuale di precipitazioni che cadono sotto forma di neve è determinata dalla temperatura dell'aria ed è già fortemente diminuita a causa del riscaldamento. Finora tale fenomeno si è manifestato soprattutto a bassa e media quota. La percentuale dei giorni con nevicate al di sotto dei 500 m s.l.m. è infatti diminuita dal 1961 del 40 per cento circa e la quantità d'acqua accumulata nella neve in primavera (equivalente in acqua della neve) al di sotto dei 1000 m s.l.m. addirittura del 75 per cento circa (Marty et al. 2017).

Il volume di neve continuerà a diminuire in futuro

Insieme alle temperature invernali aumenterà anche la quota dell'isoterma di zero gradi, che si alzerà di circa 150 metri per grado Celsius di aumento della temperatura (CH2018) facendo diminuire ulteriormente la percentuale di neve rispetto alle precipitazioni totali. Il manto nevoso permanente inizierà a formarsi più tardi nel corso dell'anno e rimarrà limitato alle quote elevate. In primavera lo scioglimento della neve inizierà prima. Gli scenari idrologici lasciano prevedere un calo della quantità d'acqua media annua accumulata nel manto nevoso, con un calo atteso entro la fine del secolo del 42 per cento in caso di protezione coerente del clima e del 78 per cento senza misure di protezione del clima (fig. 5-1). Nel contempo l'accumulo di neve raggiungerà lo spessore massimo non più a marzo bensì a febbraio. A causa del contestuale innalzamento delle temperature, l'aumento atteso delle precipitazioni invernali avrà effetti positivi sul manto nevoso soltanto a quote molto elevate e non riuscirà a compensare il calo generalizzato dei quantitativi di neve. Questi cambiamenti nel manto nevoso avranno importanti conseguenze sulla distribuzione stagionale dei deflussi (cap. 6.2).

Figura 5-1: Variazione media della quantità d'acqua accumulata nel manto nevoso senza misure di protezione del clima entro la fine del secolo per altitudini al di sopra di 1500 m s.l.m.

Entro la fine del XXI secolo la percentuale di acqua immagazzinata sotto forma di neve (mediana e intervallo di incertezza) diminuirà in tutte le stagioni. I cambiamenti in uno scenario senza misure di protezione del clima (RCP8.5) rispetto al periodo di riferimento (1981-2010) mostrano che alla fine dell'estate la quantità d'acqua accumulata nella neve sarà scarsa anche alle quote più elevate. La mancanza di neve significa anche un minore deflusso generato dal suo scioglimento, nonché una ridotta disponibilità di neve per i ghiacciai.



Fonte iconografica: rappresentazione propria con dati tratti da Brunner et al. (2019c)

Maggiori informazioni e riferimenti sul tema «neve»

- Marty C. et al. 2020: Snow. Hydro-CH2018 report.

5.2 Ghiacciai e permafrost

Dal 1850 i ghiacciai svizzeri hanno già perso il 60 per cento del loro volume. Entro la fine del XXI secolo, dei grandi ghiacciai rimarranno solo tracce a quote molto elevate. Questo sviluppo causerà un forte calo dei deflussi estivi dallo scioglimento dei ghiacciai. Anche il permafrost si scongelerà, facendo aumentare il rischio di pericoli naturali.

I ghiacciai si formano quando la neve caduta a quota elevata (area di accumulo del ghiacciaio) nel corso dell'anno non si scioglie completamente e si trasforma in ghiaccio. Per effetto della forza di gravità, il ghiaccio scivola lentamente a valle, sciogliendosi alle quote più basse durante il semestre estivo (area di ablazione). L'aumento delle temperature causa, da un lato, un maggiore scioglimento dei ghiacciai e, dall'altro, il ridimensionamento delle aree di accumulo e una diminuzione della crescita. Ciò fa sì che i ghiacciai perdano volume. Quanto più piccolo è un ghiacciaio, tanto più rapidamente reagisce ai cambiamenti climatici.

Massiccio ritiro dei ghiacciai dal 1850

Si stima che il volume di ghiaccio nelle Alpi svizzere sul finire della piccola era glaciale verso il 1850 si aggirasse attorno ai 130 km³. Nel 2010 era sceso a circa 60 km³ (Fischer et al. 2015) e nel 2019 addirittura a 53 km³ (Langhammer et al. 2019). Nel complesso, dal 1850 i ghiacciai hanno quindi perso circa il 60 per cento del loro volume, con un calo del 10 per cento soltanto negli ultimi cinque anni (2015 – 2019) (www.glamos.ch).

I ghiacciai rivestono grande importanza per il regime idrico, in quanto immagazzinano le precipitazioni nel corso delle stagioni, degli anni o addirittura dei decenni e dei secoli. Soprattutto durante le fasi di canicola e di siccità nei mesi estivi, i ghiacciai contribuiscono in maniera determinante al deflusso di molti corsi d'acqua alpini, ma anche dei grandi fiumi Reno e Rodano.

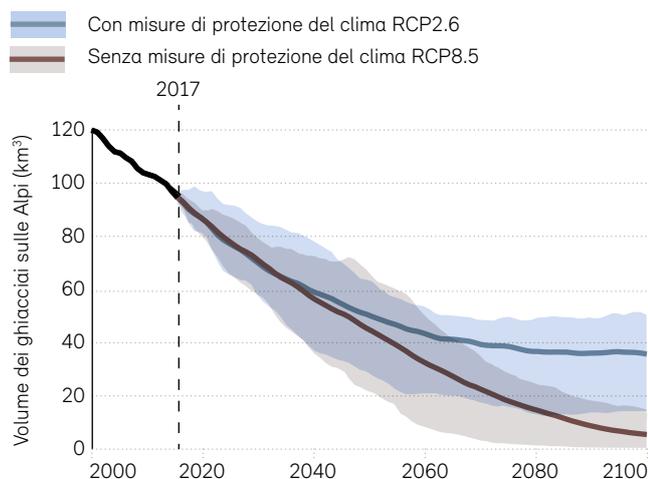
Per la fine del secolo resteranno solo pochi ghiacciai

Gli scenari dei ghiacciai mostrano che gran parte delle masse di ghiaccio nelle Alpi saranno scomparse per la fine del secolo (fig. 5-2). L'adozione di misure di protezione coerente del clima consentirà di preservare il 37 per cen-

to circa del volume dei ghiacciai del 2017; senza misure di protezione del clima solo il 5 per cento circa. Poiché i ghiacciai impiegano spesso decenni per adeguarsi a un nuovo clima, il loro ritiro non potrà più essere evitato neppure con misure di protezione coerente del clima, in quanto hanno un volume comunque «eccessivo» per il clima attuale (Zekollari et al. 2019).

Figura 5-2: Cambiamenti nel volume di ghiaccio di tutti i ghiacciai alpini entro la fine del secolo

È rappresentato il volume residuo dei ghiacciai nelle Alpi (mediana e intervallo di incertezza) nei diversi scenari climatici regionali. Prima del 2017 sono stati utilizzati i dati climatici osservati. Senza l'adozione di misure di protezione del clima, entro il 2100 si sarà sciolto il 95 per cento dell'attuale volume dei ghiacciai.



Fonte iconografica: adattata da Zekollari et al. (2019)

Il permafrost si riscalda e aumentano i pericoli naturali

È definito permafrost il sottosuolo perennemente a temperature inferiori a 0°C. Il permafrost è ampiamente diffuso nelle Alpi al di sopra di 2500 m s.l.m. e si trova nascosto in morene e falde detritiche ghiacciate, ghiacciai rocciosi e ripide pareti di roccia con interstizi e fratture pieni di ghiaccio. Le osservazioni condotte nell'ultimo ventennio nelle Alpi svizzere mostrano un aumento generalizzato delle temperature del permafrost, un calo del tenore di ghiaccio e un incremento delle velocità di scorrimento dei ghiacciai rocciosi (PERMOS 2019). A causa del volume di ghiaccio relativamente ridotto (circa un quarto del volume dei ghiacciai), l'acqua di fusione del permafrost

nelle Alpi contribuisce in misura minore al deflusso complessivo. Il riscaldamento del permafrost può a sua volta avere ampie conseguenze in termini di pericoli naturali e di habitat. I cambiamenti nel permafrost influiscono sulla stabilità dei pendii ripidi delle montagne e sull'infrastruttura in alta montagna. Colate detritiche e cadute di roccia potrebbero infatti aumentare di frequenza ed entità.

Maggiori informazioni e riferimenti sul tema «ghiacciai e permafrost»

- Ayala A. et al. 2020: Glaciers. Hydro-CH2018 report.
- Nötzli J., Phillips M. 2019: Mountain permafrost hydrology. Hydro-CH2018 report.

6 Acque

Gli scenari idrologici mostrano come i cambiamenti climatici modificheranno i deflussi delle acque superficiali, la rigenerazione dell'acquifero e le temperature delle acque. A risentirne saranno la qualità dell'acqua e l'ecologia delle acque, con un'intensificazione degli eventi di piena e di magra.

6.1 Portate annue

A causa dei cambiamenti climatici le portate annue medie cambieranno solo in minima misura e subiranno un lieve calo entro la fine del secolo soltanto nello scenario senza misure di protezione del clima. La riduzione più evidente interesserà le aree ad oggi ancora ricoperte da ghiacciai. Cambieranno però in larga misura le portate stagionali, con conseguenze importanti per l'utilizzazione delle acque (cap. 6.2).

Se le portate annue nei corsi d'acqua svizzeri variano fortemente da un anno all'altro, è anche vero che dall'inizio delle misurazioni della portata al principio del XX secolo la loro media pluriennale è rimasta praticamente invariata. Per esempio, per quanto riguarda il Reno a Basilea, la serie di misurazioni avviata nel 1871 non evidenzia alcuna tendenza di aumento o diminuzione delle portate annue (Weingartner 2018). Ciò perché anche le precipitazioni annue non sono praticamente cambiate in un orizzonte pluriennale. Solo i bacini imbriferi il cui deflusso proviene dallo scioglimento dei ghiacciai mostrano un aumento delle portate annue a causa dell'intensificarsi di tale fenomeno.

Parziale calo delle portate annue se non si porrà un freno ai cambiamenti climatici

Anche nei prossimi decenni le portate annue medie subiranno solo lievi variazioni nella maggior parte dei bacini imbriferi (fig. 6-1). Entro la fine del secolo, in uno scenario con misure di protezione coerente del clima, gli scenari idrologici non indicano infatti alcun chiaro segnale di cambiamento in gran parte dei bacini imbriferi. Con uno scenario senza misure di protezione del clima si verificherà invece entro la fine del secolo una riduzione delle portate annue medie, in Svizzera mediamente attorno

al 9 per cento. Nel 25 per cento circa dei bacini, le portate annue resteranno pressoché invariate anche senza misure di protezione del clima (segnale di cambiamento del +/- 5% entro la fine del secolo), mentre nel restante 65 per cento il segnale di cambiamento oscilla tra -5 e -20 per cento. Il calo delle portate annue è imputabile a una diminuzione delle precipitazioni annue così come all'aumento della temperatura dell'aria e ai processi che ne conseguono come i periodi vegetativi più lunghi e una maggiore evaporazione. Per quanto riguarda le Alpi va inoltre considerato che alla fine del secolo i ghiacciai saranno scomparsi o fortemente ridotti e quindi la percentuale di acqua di fusione sarà di gran lunga inferiore rispetto ad oggi (Freudiger et al. 2020). In tali aree potrebbe verificarsi un calo significativo anche delle portate annue. In un anno medio, la Svizzera continuerà comunque a disporre di una quantità d'acqua distribuita su tutto l'anno analoga a quella attuale.

Il contributo dell'acqua di fusione diminuirà sensibilmente

Nello scenario senza misure di protezione del clima, la portata annua nei bacini imbriferi fortemente ghiacciati potrebbe continuare ad aumentare ancora fino al 2050 (+/- 15 anni) per effetto dello scioglimento dei ghiacciai. La quota massima di acqua di fusione dei ghiacciai («peak water») è stata però già raggiunta in oltre il 90 per cento di tutti i bacini imbriferi ghiacciati e in futuro continuerà a calare nella maggior parte dei bacini imbriferi di testa. Entro la fine del secolo la percentuale dell'acqua di fusione dei ghiacciai rispetto alla portata annua, per esempio, del Rodano all'altezza di Gletsch scenderà dall'attuale 27 per cento al 10 per cento (con misure di protezione del clima) o addirittura al 4 per cento (senza misure di protezione del clima) (fig. 6-2).

Ancora più rilevante per il deflusso nei bacini imbriferi di testa è la neve: nel Rodano all'altezza di Gletsch e nella Weisse Lütschine all'altezza di Zweilütschinen la sua incidenza è pari rispettivamente al 40 per cento circa. In futuro la percentuale dell'acqua di fusione della neve rispetto alla portata annua calerà nella maggioranza dei bacini imbriferi di testa e in tutti gli scenari. La percentuale del deflusso proveniente dal manto nevoso aumenterà sol-

tanto in alcuni bacini imbriferi a quote molto elevate, con il risultato che in taluni casi, quantomeno in uno scenario di protezione coerente del clima, l'aumento della percen-

tuale di acqua di fusione della neve potrà compensare in parte il calo dell'acqua di fusione dei ghiacciai (Freudiger et al. 2020).

Figura 6-1: Variazione della portata annua per bacino imbrifero e scenario

Sono rappresentate le mediane calcolate negli scenari idrologici della variazione percentuale delle portate annue rispetto al periodo di riferimento (1981-2010) per gli scenari con (RCP2.6) e senza misure di protezione del clima (RCP8.5) per il futuro prossimo e remoto. Le variazioni delle portate annue sono limitate; senza misure di protezione del clima aumenterebbero leggermente entro la fine del secolo.

Differenza percentuale dal periodo di riferimento in %

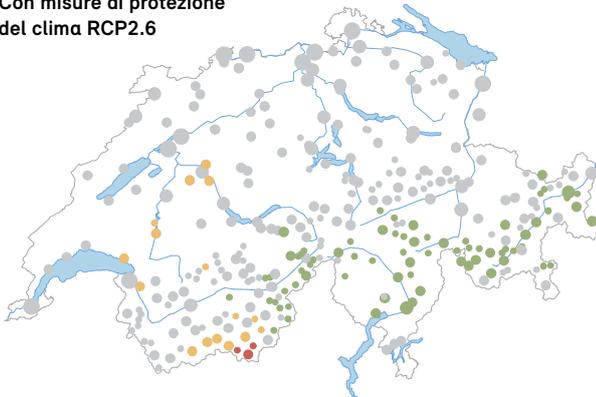
- da -60 a -40 ● da -5 a 5
- da -40 a -20 ● da 5 a 20
- da -20 a -5 ● da 20 a 40

Dimensioni dei bacini imbriferi in km²

- < 50
- da 50 a 1000
- > 1000
- > 5000

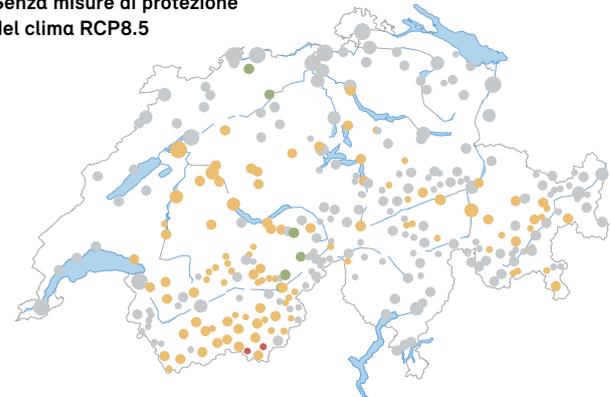
2060

Con misure di protezione del clima RCP2.6



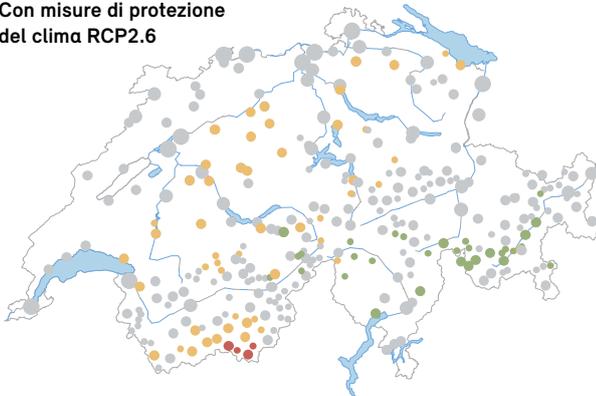
2060

Senza misure di protezione del clima RCP8.5



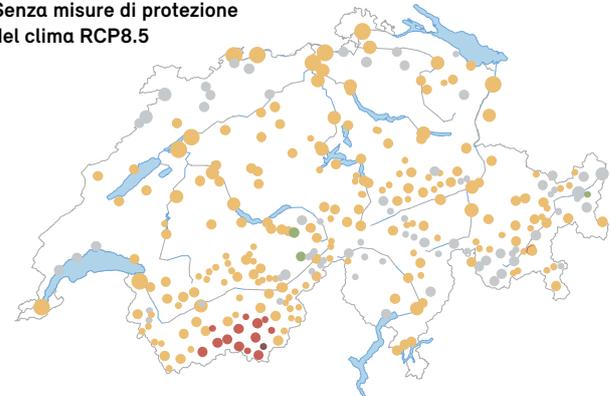
2085

Con misure di protezione del clima RCP2.6



2085

Senza misure di protezione del clima RCP8.5

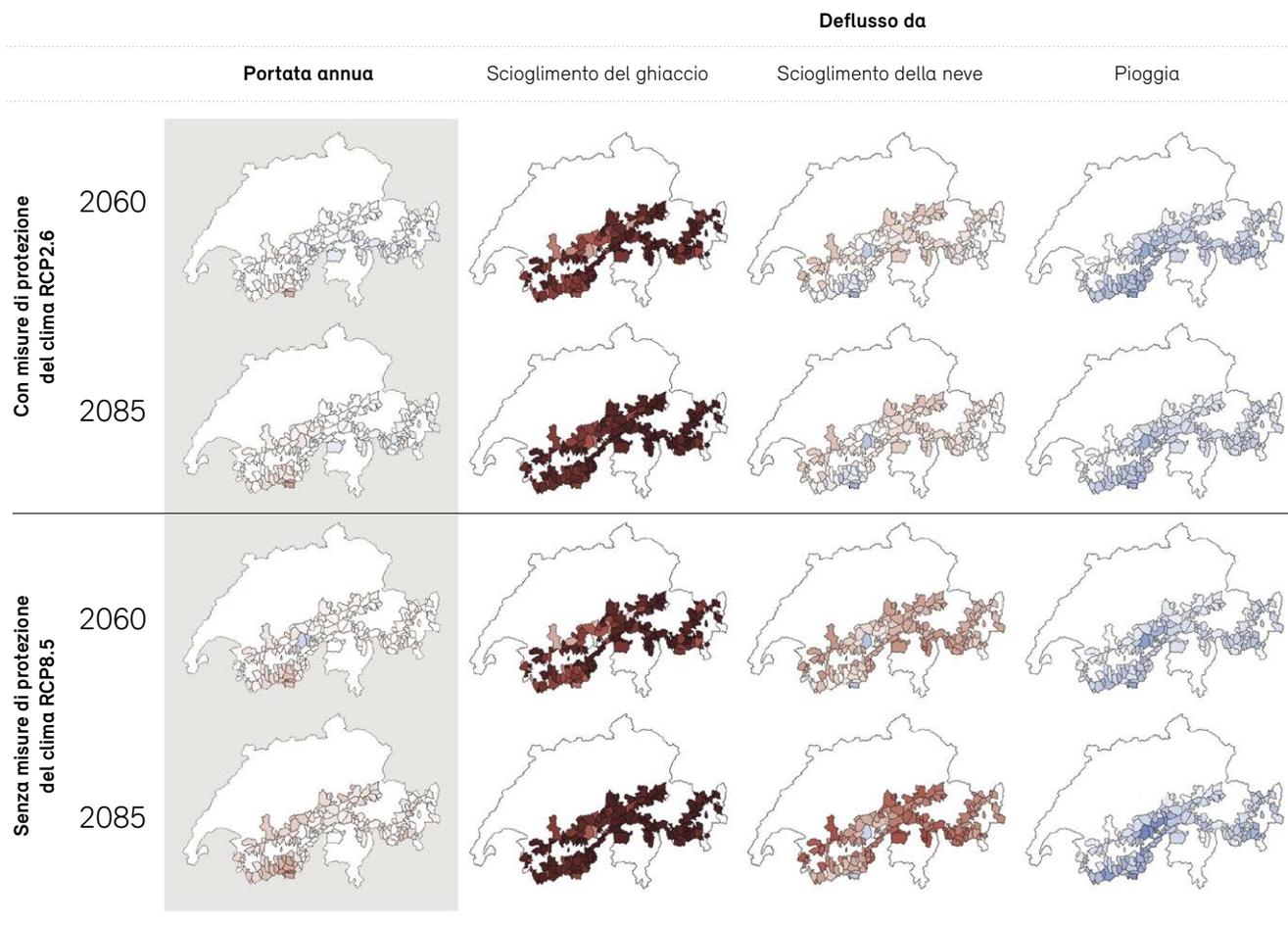


Fonte iconografica: dati di Mülchi et al. (2020), Freudiger et al. (2020), Brunner et al. (2019c)

Figura 6-2: Variazione delle percentuali di deflusso da pioggia, scioglimento della neve e dei ghiacciai e variazione della portata complessiva
 Sono rappresentate le variazioni in 190 bacini imbriferi di testa ghiacciati della Svizzera rispetto al periodo di riferimento (1981–2010) con (RCP2.6) e senza misure di protezione del clima (RCP8.5). 0 per cento indica l'assenza di variazioni rispetto al periodo di riferimento; -100 per cento indica la totale scomparsa della quota di pertinenza e +100 per cento indica il raddoppiamento della quota. Soprattutto lo scioglimento dei ghiacciai diminuirà fortemente in tutti gli scenari: nello scenario senza misure di protezione del clima, entro la fine del secolo non contribuirà più al deflusso in molte aree, e anche lo scioglimento della neve avrà subito un calo significativo.



Differenza dal periodo di riferimento 1981–2010 in %



Fonte iconografica: Freudiger et al. (2020)

Quantificazione dell'incidenza della neve e dello scioglimento dei ghiacciai sulla portata: quali effetti hanno lo scioglimento dei ghiacciai e il ritiro del manto nevoso?

Procedura

Le percentuali di deflusso da pioggia, scioglimento della neve e dei ghiacciai sono state determinate in 190 bacini imbriferi di testa ghiacciati delle Alpi svizzere con il modello idrologico HBV Light-UniZH. I moduli relativi a neve e ghiacciai del modello sono stati appositamente adattati per rappresentare nel miglior modo possibile il manto nevoso e i ghiacciai. La calibrazione del modello è stata effettuata sulla base dei dati di portata, della copertura nevosa e dei dati dei ghiacciai. La disponibilità capillare dei dati relativi alla copertura nevosa e alla superficie dei ghiacciai ha consentito di calcolare le percentuali di deflusso anche per le aree senza dati di portata.

Risultati principali

Le affermazioni relative allo scioglimento della neve e dei ghiacciai nel capitolo 6.1 e in parti dei capitoli 6.2 e 6.4 del rapporto si basano sui risultati di questo progetto. Il contributo complessivo dallo scioglimento dei ghiacciai dei 190 bacini imbriferi di testa rappresenta oggi l'8 per cento della portata annua e senza misure di protezione del clima scenderà a meno del 2 per cento verso la fine del secolo. Senza misure di protezione del clima (RCP8.5), il contributo della neve passerà dall'attuale 34 per cento della portata annua al 25 per cento alla fine del secolo.

Progetto Hydro-CH2018 dell'Istituto di geografia dell'Università di Zurigo

6.2 Portate stagionali

La distribuzione stagionale delle portate è già cambiata nel corso degli ultimi decenni, con un calo nei mesi estivi e un aumento nei mesi invernali. Tale andamento continuerà di pari passo con i cambiamenti climatici e potrebbe condurre a limitazioni nell'utilizzazione delle acque.

Le portate dei corsi d'acqua svizzeri mostrano andamenti stagionali discordanti (regime di deflusso). I regimi sono condizionati dalla distribuzione stagionale delle precipitazioni, dall'evaporazione e dal contributo dello scioglimento della neve e dei ghiacciai. Nel caso dei regimi pluviali, la portata è determinata principalmente dalla distribuzione delle precipitazioni e dall'evaporazione. I bacini a quote più basse sul versante settentrionale delle Alpi rientrano in questo tipo di regime e si contraddistinguono per portate relativamente equilibrate nel corso dell'anno (fig. 6-1). Nel caso dei regimi nivali, alla distribuzione delle precipitazioni si sovrappongono le nevicate e lo scioglimento della neve. Le portate sono pertanto ridotte nei mesi invernali (da dicembre a febbraio) in cui la neve si accumula, ed

elevate in primavera (da marzo a maggio) quando inizia a sciogliersi. I bacini alpini senza ghiacciai hanno regimi nivali. Infine, nel caso dei regimi glaciali, nei mesi estivi (da giugno a luglio) si aggiunge anche lo scioglimento dei ghiacciai che determina un forte aumento delle portate. Sul versante meridionale delle Alpi, la maggior parte dei regimi di deflusso è caratterizzata da picchi di portata in primavera e autunno (da settembre a novembre), che sono le stagioni in cui si concentrano le precipitazioni. Tali regimi sono designati di seguito come regimi sudalpini. A questi regimi principali si affiancano anche regimi transitori e sottotipi regionali (Weingartner e Aschwanden 1992).

Variazione dei regimi di portata

I regimi di portata sono cambiati nel corso del periodo di osservazione 1961 – 2015 (Weingartner 2018). Nei mesi invernali le portate sono aumentate nella maggior parte dei bacini imbriferi (cfr. fig. 6-3) in seguito all'innalzamento della temperatura dell'aria e quindi al manifestarsi di precipitazioni più sotto forma di pioggia che di neve. In estate si osserva invece un calo generalizzato delle portate medie (tranne nei bacini imbriferi fortemente ghiacciati). In primavera le portate sono tendenzialmente

aumentate nelle regioni alpine per effetto dello scioglimento anticipato della neve e sono tendenzialmente calate nell’Altipiano e nel Giura. Le variazioni più evidenti riguardano le regioni alpine. In generale si rileva un passaggio dei regimi di portata da glaciali a nivali e da nivali a pluviali.

Nei bacini imbriferi con molti ghiacciai, come per esempio il Massa (fig. 6-3b) con regime glaciale, le portate stagionali sono aumentate in inverno, primavera ed estate, laddove l’aumento della portata estiva è attribuibile allo scioglimento dei ghiacciai. Nei regimi nivali le portate medie più elevate si concentrano nei mesi primaverili a causa dello scioglimento della neve. Poiché tale fenomeno inizia sempre prima, le portate nei mesi di marzo e apri-

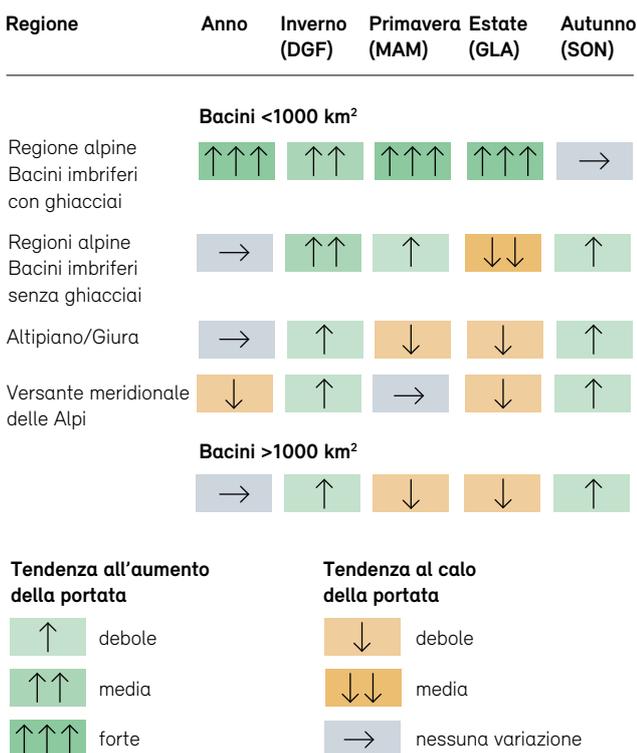
le sono aumentate nella maggioranza dei bacini imbriferi. Ciò significa anche che il manto nevoso si scioglie prima, con una conseguente riduzione della portata media nei mesi estivi (come nel caso del fiume Plessur).

Nei bacini imbriferi pluviali nell’Altipiano e nel Giura le portate tendono a diminuire in primavera ed estate. Le variazioni osservate sono però complessivamente limitate, come mostra anche l’esempio dell’Aach. Nei bacini sudalpini si registra un calo delle portate annue, con una flessione particolarmente forte delle portate estive. Occorre però considerare che questa affermazione si riferisce a medie stagionali pluriennali e che le portate medie stagionali di singoli anni possono anche discostarsi sensibilmente da tali valori.

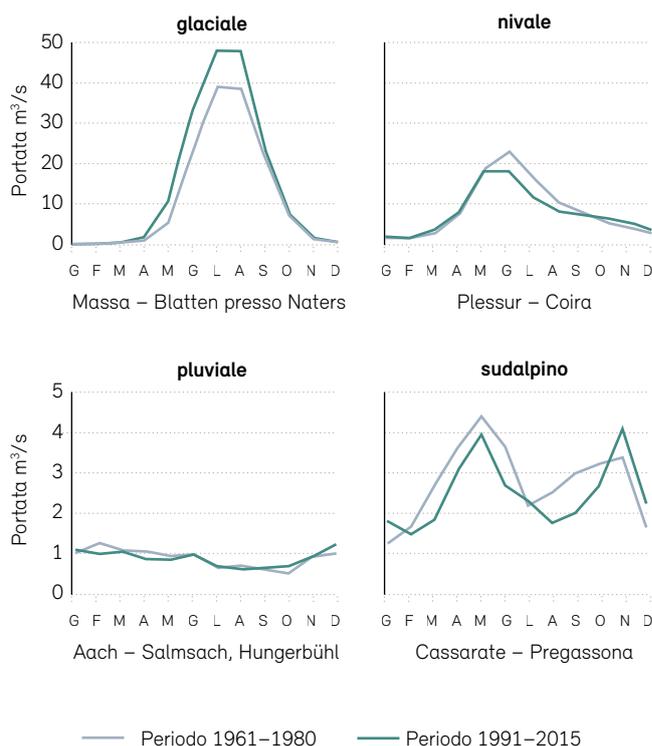
Figura 6-3: Variazioni osservate delle portate e dei regimi di portata in Svizzera

Sono rappresentate le variazioni delle portate in diverse regioni (a) nonché in quattro bacini imbriferi selezionati con regimi di portata differenti (b). Si può già osservare un aumento delle portate in inverno e un calo in estate.

a Variazione delle portate stagionali e annue per diverse regioni della Svizzera dal 1961 al 2015.



b Portate medie mensili per i periodi 1961–1980 e 1991–2015 per quattro bacini imbriferi con tipo di deflusso glaciale, nivale, pluviale e sudalpino.



Fonte iconografica: Weingartner (2018), dati: UFAM

Continua l'aumento delle portate nei mesi invernali

Gli scenari idrologici lasciano prevedere un ulteriore aumento delle portate invernali su tutto il territorio nazionale, quale risultato del previsto aumento delle precipitazioni invernali e della sostituzione della neve con pioggia. La figura 6-4 mostra, per bacini imbriferi e regimi di deflusso tipici, in che modo cambieranno le portate stagionali nel corso dell'anno entro la metà e la fine del secolo. La figura 6-5 offre una panoramica dei cambiamenti in tutte le stazioni modellate.

Nella Svizzera idrologica, per la fine del secolo si prevede mediamente un aumento delle portate invernali del 10 per cento circa in uno scenario di protezione del clima e del 30 per cento circa senza misure di protezione del clima (Brunner et al. 2019c). Le portate invernali aumenteranno soprattutto negli attuali regimi nivali, mentre le variazioni minori interesseranno i bacini imbriferi nell'Altipiano, dove già oggi il manto nevoso contribuisce ben poco al deflusso, e quelli a quote molto elevate, dove anche in futuro le precipitazioni cadranno perlopiù sotto forma di neve a causa delle basse temperature invernali (Mülchi et al. 2021a).

Aumento o calo delle portate in primavera a seconda dell'altitudine

Nei mesi primaverili, l'andamento delle portate nell'Altipiano e nel Giura si differenzia da quello nelle regioni a quote più elevate. A bassa e media quota le portate primaverili stanno diminuendo, come mostrano gli esempi dei fiumi Plessur e Thur (fig. 6-4). Le cause di tale fenomeno sono da ricercarsi nel manto nevoso meno spesso e nella maggiore evaporazione dovuta all'inizio anticipato del periodo vegetativo e alle temperature più elevate. Nelle regioni alpine si registra invece un aumento delle portate primaverili a causa dello scioglimento anticipato della neve. Il deflusso di grandi bacini imbriferi quali il Rodano e il Reno sta divenendo più equilibrato per effetto di sviluppi contrastanti, con portate più elevate a marzo e più contenute a maggio. Nel complesso, i deflussi dalla Svizzera verso i Paesi limitrofi non subiscono particolari variazioni.

Portate in calo nei mesi estivi e autunnali

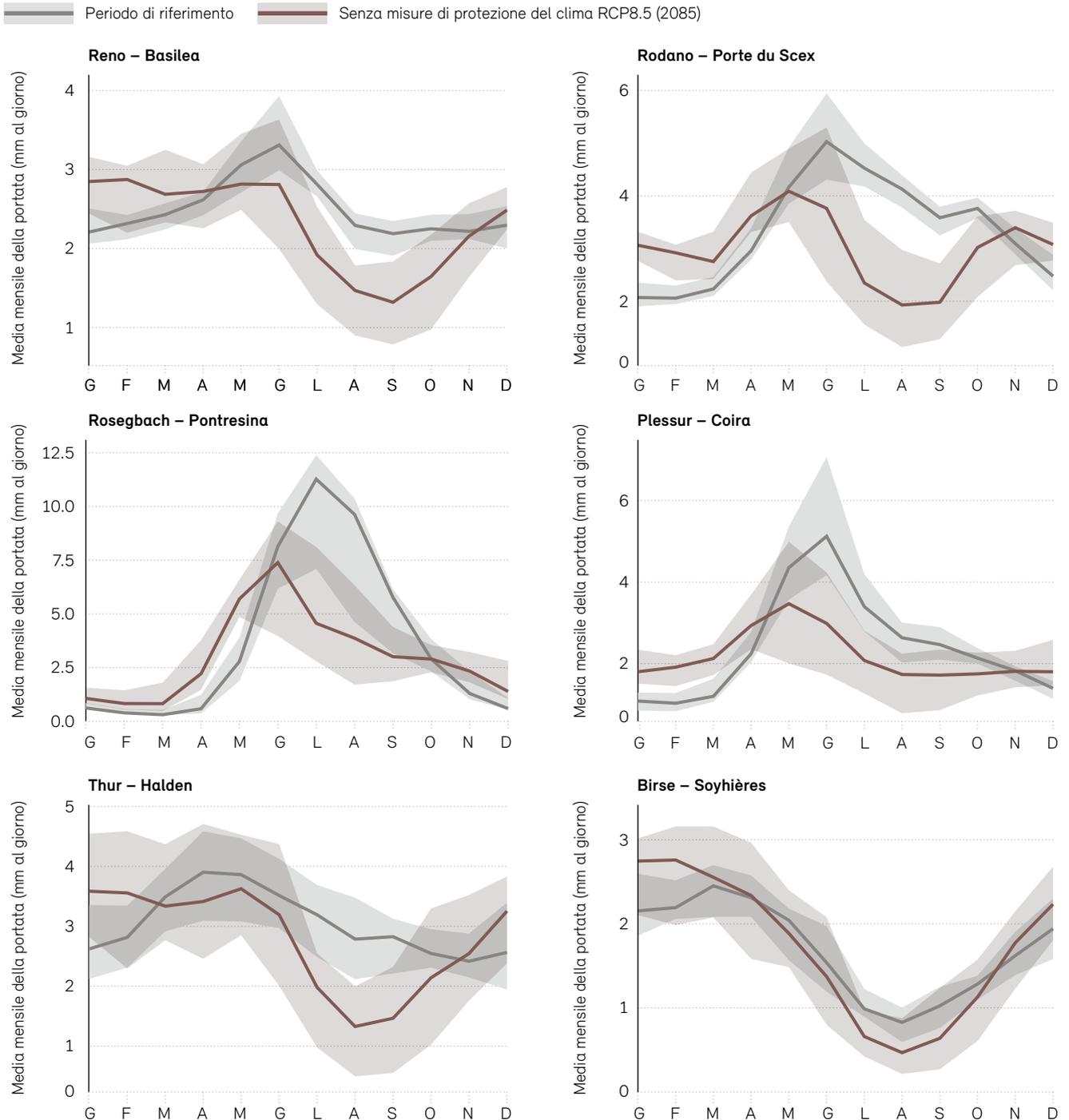
In estate gli scenari per la Svizzera idrologica mostrano un calo medio delle portate entro la fine del secolo pari al 10 per cento circa con misure di protezione del cli-

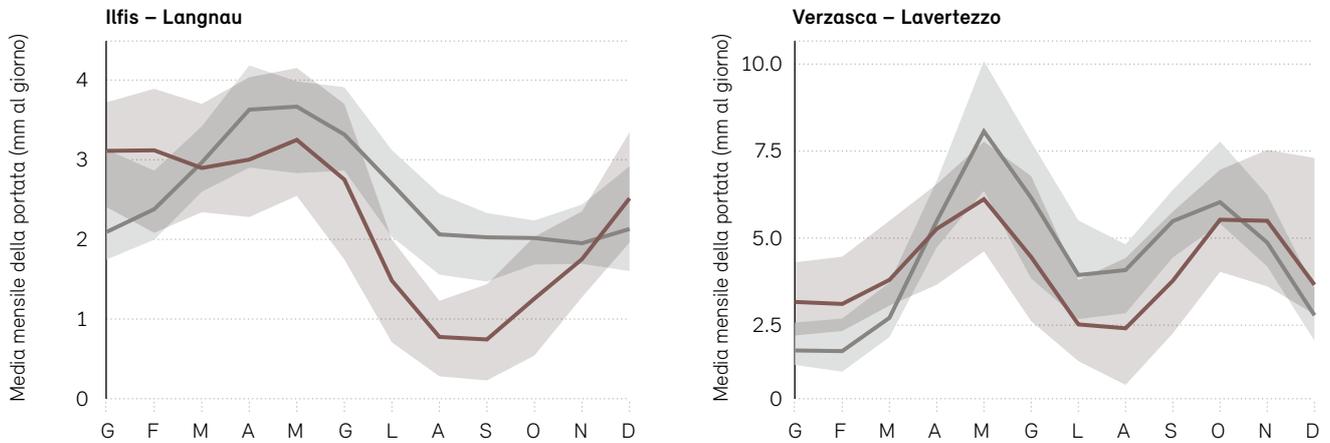
ma e al 40 per cento senza misure di protezione del clima. La responsabilità di tale fenomeno è da attribuirsi alla diminuzione delle precipitazioni estive, alla maggiore evaporazione e alla minore acqua di fusione della neve e dei ghiacciai (fig. 6-2). I bacini a tutte le quote e in tutte le regioni mostrano portate estive in calo. Una riduzione significativa è prevista nell'Altipiano, nel Giura e nelle Prealpi soprattutto sul finire dell'estate (p. es. Birs, Thur e Ilfis), così come in Ticino (p. es. Verzasca) e in bacini ad oggi ancora ricoperti parzialmente da ghiacciai (p. es. Rosegbach).

Entro la fine del secolo le portate diminuiranno a tutte le quote e in tutte le regioni anche nei mesi autunnali. Nella Svizzera idrologica si prevede una flessione complessiva del 5 per cento circa con misure di protezione del clima e del 20 per cento senza misure di protezione del clima. Come somma dei piccoli bacini imbriferi, il calo delle portate estive e autunnali è evidente anche nei grandi bacini di fiumi quali il Reno e il Rodano (fig. 6-4). Nel complesso, da questa rassegna si evince con chiarezza che in futuro le portate subiranno una redistribuzione stagionale in parte marcata. Per la gestione delle acque e l'ecologia delle acque saranno problematiche soprattutto le minori portate estive a causa della loro concomitanza con elevate temperature dell'acqua e un forte fabbisogno idrico.

Figura 6-4: Variazione delle portate medie mensili in otto bacini imbriferi caratteristici

Con i modelli PREVAH-UniBE e PREVAH-WSL (Reno e Rodano) sono stati calcolati gli scenari idrologici (mediana e intervallo di incertezza) per il periodo di riferimento (1981-2010) (grigio) e gli scenari senza misure di protezione del clima (RCP8.5) per la fine del secolo (rosso). In tutti i bacini si prevede un sensibile calo delle portate in estate e un aumento in inverno.





Fonte iconografica: Mülchi et al. (2020)

Figura 6-5: Variazione delle portate in inverno, primavera, estate e autunno

Sono rappresentate le mediane calcolate negli scenari idrologici delle variazioni percentuali delle portate stagionali rispetto al periodo di riferimento (1981-2010) per gli scenari con (RCP2.6) e senza misure di protezione del clima (RCP8.5) per il futuro prossimo e remoto. In tutta la Svizzera, le portate aumentano in inverno e diminuiscono in estate e autunno. La reazione in primavera è differenziata per basse e alte quote.

Scostamento percentuale rispetto al periodo di riferimento in %

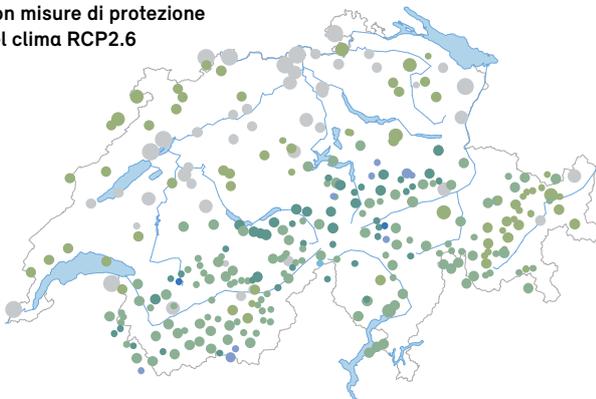
- da -60 a -40
- da -5 a 5
- da 40 a 60
- da 100 a 150
- da -40 a -20
- da 5 a 20
- da 60 a 80
- > 150
- da -20 a -5
- da 20 a 40
- da 80 a 100

Dimensioni dei bacini imbriferi in km²

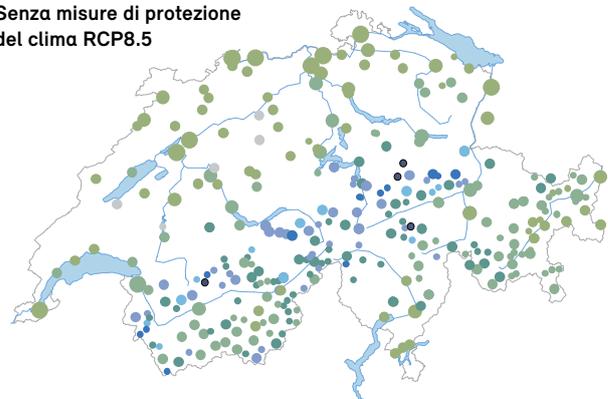
- < 50
- da 50 a 1000
- > 1000
- > 5000

Inverno

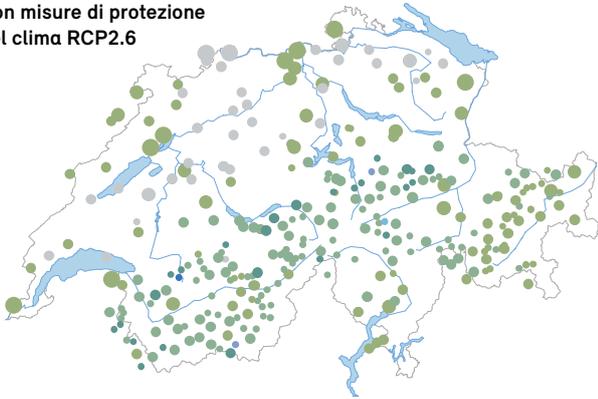
2060
Con misure di protezione
del clima RCP2.6



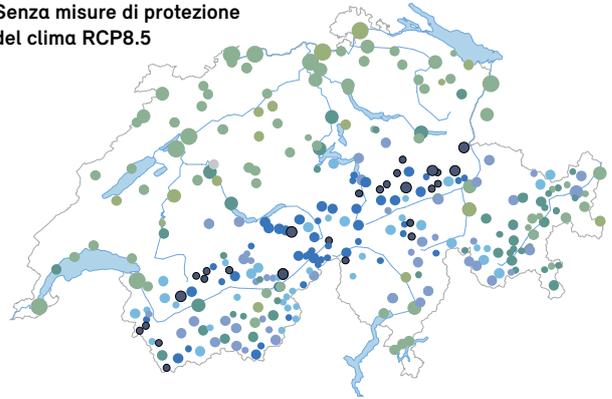
2060
Senza misure di protezione
del clima RCP8.5



2085
Con misure di protezione
del clima RCP2.6

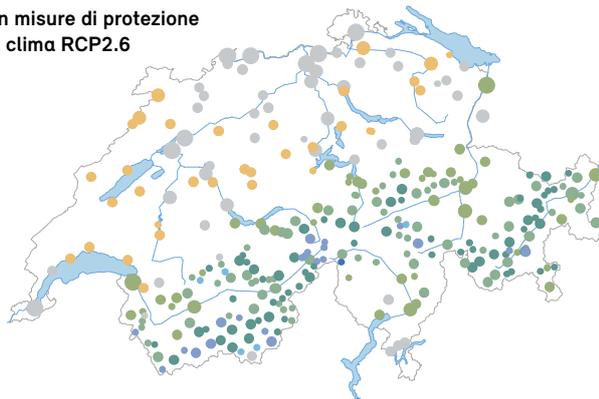


2085
Senza misure di protezione
del clima RCP8.5

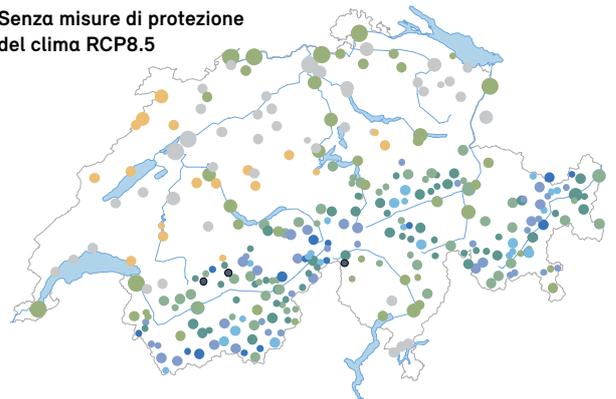


Primavera

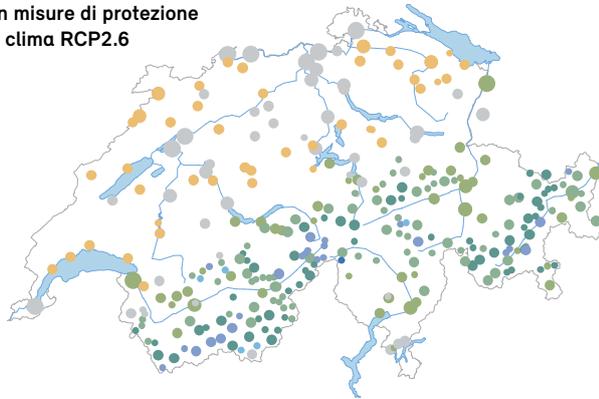
2060
Con misure di protezione
del clima RCP2.6



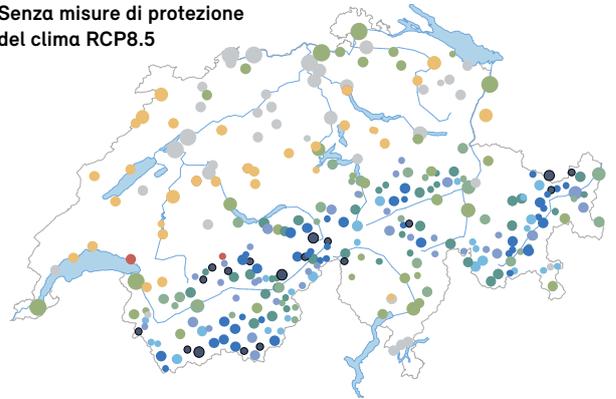
2060
Senza misure di protezione
del clima RCP8.5



2085
Con misure di protezione
del clima RCP2.6



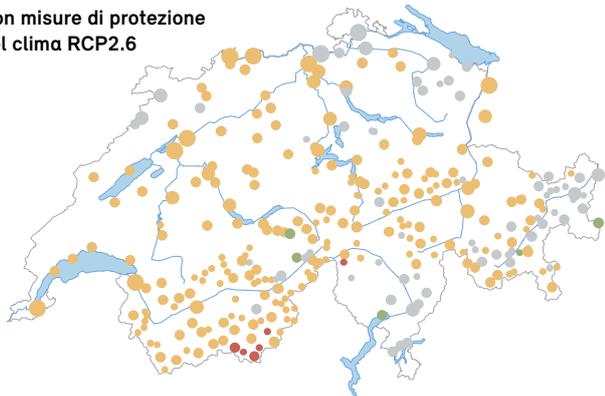
2085
Senza misure di protezione
del clima RCP8.5



Estate

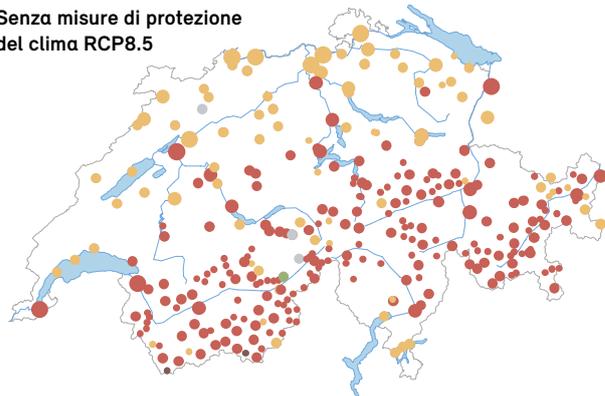
2060

Con misure di protezione
del clima RCP2.6



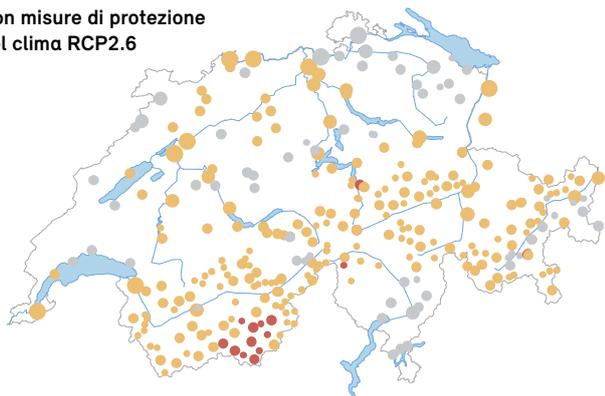
2060

Senza misure di protezione
del clima RCP8.5



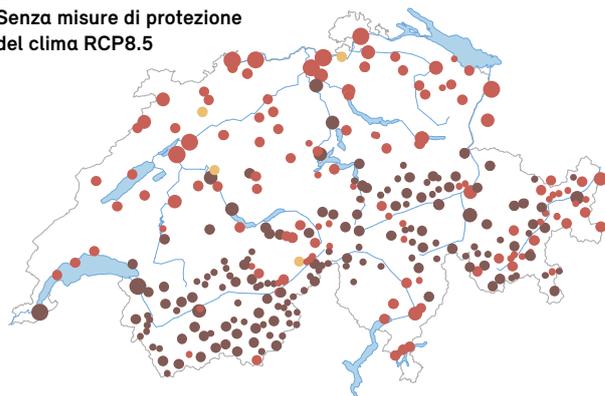
2085

Con misure di protezione
del clima RCP2.6



2085

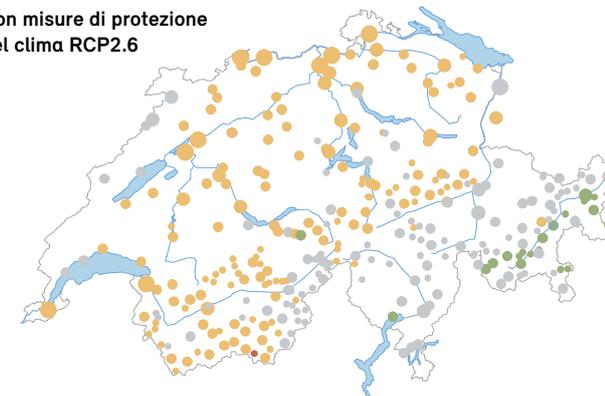
Senza misure di protezione
del clima RCP8.5



Autunno

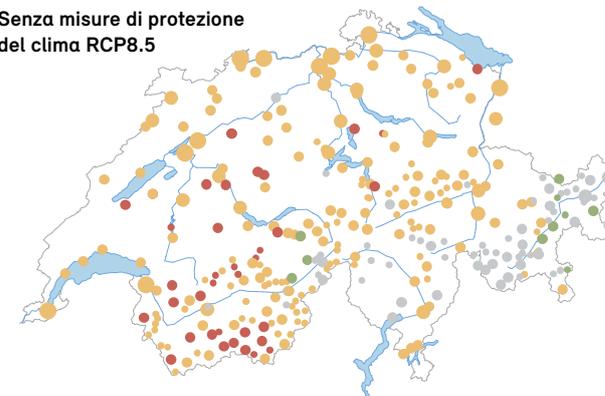
2060

Con misure di protezione
del clima RCP2.6

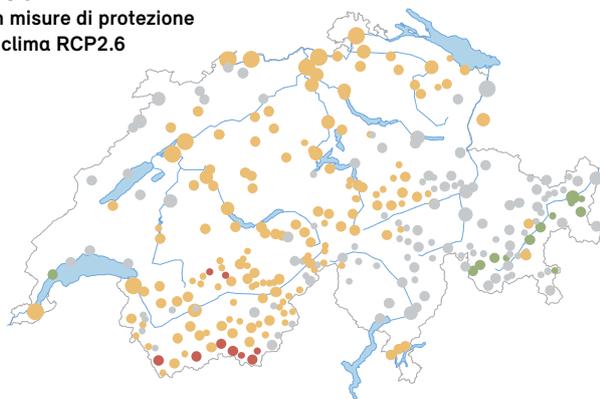


2060

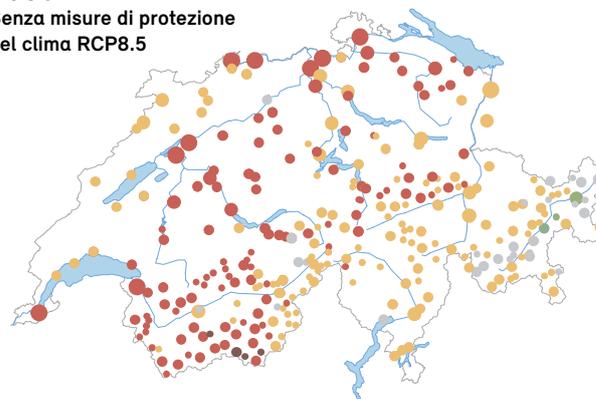
Senza misure di protezione
del clima RCP8.5



2085

Con misure di protezione
del clima RCP2.6

2085

Senza misure di protezione
del clima RCP8.5

Fonte iconografica: dati da Mülchi et al. (2020), Freudiger et al. (2020), Brunner et al. (2019c)

Aggiornamento degli scenari idrologici sulla base dei nuovi scenari climatici: in che modo si modificano le portate nei diversi scenari climatici?

Procedura

Con il modello PREVAH-UniBE sono stati calibrati e validati in totale 93 bacini imbriferi (stazioni dell'UFAM) che coprono diversi regimi di deflusso (pluviale, nivale, glaciale, sudalpino) ed estensioni (10 – 1700 km²). Per ogni bacino imbrifero sono state quindi calcolate serie temporali del deflusso per diversi scenari di emissione (RCP2.6, 4.5, 8.5) con risoluzione giornaliera. Le portate giornaliere risultanti sono state analizzate in relazione a diversi indicatori di acque medie, piena e magra. Poiché i nuovi scenari climatici sono disponibili in maniera continuativa lungo un periodo di 120 anni, per la prima volta è possibile determinare anche il momento in cui si verificano variazioni significative della portata.

Risultati principali

- Le variazioni significative della portata si verificano tendenzialmente prima nei bacini imbriferi a quote più elevate che in quelli dell'Altipiano.
- I capitoli 6.1, 6.2 e 6.4 del rapporto si basano in gran parte sui risultati di questo progetto. Ulteriori risultati sono disponibili nell'Atlante interattivo del NCCS e nell'Atlante idrologico della Svizzera HADES (www.hydrologischeratlas.ch).

Progetto Hydro-CH2018 dell'Istituto di geografia dell'Università di Berna

Maggiori informazioni e riferimenti sul tema «cambiamenti della portata»

- Freudiger D. et al. 2020: Quantifying the contributions to discharge of snow and glacier melt. Hydro-CH2018 report.
- Mülchi R. et al. 2020: Neue hydrologische Szenarien für die Schweiz. Hydro-CH2018 report.
- Weingartner R. 2018: Veränderung der Abflussregimes der Schweiz in den letzten 150 Jahren. Hydro-CH2018 Bericht.

6.3 Laghi

I laghi naturali e i serbatoi artificiali sono riserve idriche importanti per la gestione delle acque. A causa dei cambiamenti climatici cambia anche l'apporto d'acqua. Le ripercussioni sui livelli idrometrici e sulle portate dipendono dalla regolazione dei laghi e dalla gestione dei serbatoi. Nelle regioni alpine, il ritiro dei ghiacciai fa nascere nuovi laghi nei margini proglaciali.

Con un volume di circa 130 km³ i laghi naturali sono il secondo maggiore serbatoio idrico della Svizzera (dopo le acque sotterranee). Molti laghi sono regolati, nel senso che l'acqua in uscita passa attraverso una diga il cui livello idrometrico è gestito secondo norme di regolazione. Molte di queste norme sono nate allo scopo di garantire una protezione migliore contro le piene, ma oggi tengono conto anche di aspetti quali l'ecologia, l'ottenimento di energia idroelettrica o il turismo (navigazione turistica, accessibilità delle rive). Solo pochi grandi laghi non sono regolati, vale a dire il lago di Costanza, il lago di Walen, il Greifensee e il lago di Baldegg. Qui il livello idrometrico segue l'andamento degli affluenti con un ritardo temporale. Naturalmente, le oscillazioni del livello idrometrico nei laghi non regolati sono perlopiù superiori rispetto quelle dei laghi regolati. Dalla differenza tra il livello idrometrico massimo e minimo secondo le norme di regolazione si può stimare a grandi linee la quantità d'acqua potenzialmente utilizzabile. Per i laghi non regolati la stima viene effettuata sulla base della differenza media tra il livello idrometrico annuo minimo e massimo. Il volume effettivamente utilizzabile in un dato momento dipende dal livello idrometrico in quel momento presente e può essere pressoché nullo per esempio durante le fasi di siccità, quando il livello lacustre è basso. In passato alcuni laghi, per esempio il lago di Zurigo e il lago dei Quattro Cantoni, sono stati addirittura abbassati al di sotto dei livelli minimi previsti dalle norme di regolazione al fine di mantenere una portata sufficiente nei corsi d'acqua a valle (p. es. nel 2018). Si sono così potuti ridurre gli effetti negativi della siccità sull'ecologia delle acque della Limmat e della Reuss a valle dei laghi.

Nel caso dei laghi artificiali si può invece utilizzare quasi l'intero volume (Brunner et al. 2019a). È questo il caso solitamente di serbatoi alpini creati attraverso la costru-

zione di una diga. Secondo l'Ufficio federale dell'energia, la loro capacità di accumulo utile è nell'ordine di 3,5 km³. Lo scopo principale della maggior parte dei serbatoi è la produzione di energia idroelettrica, ma in parte servono anche per la protezione contro le piene, l'innevamento o l'approvvigionamento di acqua potabile.

Variazioni osservate nei livelli lacustri

Il lago di Costanza e il lago di Walen, i due più grandi laghi non regolati della Svizzera, hanno fatto osservare negli ultimi decenni cambiamenti dei livelli idrometrici, con un sensibile calo nei mesi estivi e un lieve aumento nei mesi invernali (fig. 6-6). I livelli lacustri seguono quindi i regimi di deflusso modificati dai cambiamenti climatici degli affluenti (cap. 6.2).

Futuri livelli lacustri

I cambiamenti climatici avranno forti ripercussioni sugli apporti d'acqua nei laghi e serbatoi (cap. 6.1). Nel caso dei laghi non regolati, questo aspetto influirà direttamente sui livelli lacustri determinandone l'abbassamento nei mesi estivi e autunnali. Nei laghi regolati sarà invece possibile compensare una parte degli effetti, sebbene le norme di regolazione non siano state concepite con tale scopo. Si sta pertanto esaminando in che modo il cambiamento nell'apporto d'acqua si ripercuoterà sui livelli idrometrici e se sussiste una necessità d'intervento sulle norme di regolazione (Confederazione Svizzera 2014), per esempio attraverso il mantenimento, in primavera, di livelli idrometrici più alti rispetto al passato al fine di avere più acqua a disposizione nei mesi estivi. Si può prevedere un aumento della domanda di prelievi dai laghi soprattutto in estate e un conseguente conflitto a seguito della minore disponibilità d'acqua. Nel caso dei serbatoi artificiali si pone la questione dell'utilizzo per il superamento di periodi di penuria d'acqua. In uno dei progetti elaborati in Hydro-CH2018 è stato esaminato se e come i laghi naturali e artificiali possono contribuire a gestire la futura penuria d'acqua.

Nei margini proglaciali nascono nuovi laghi

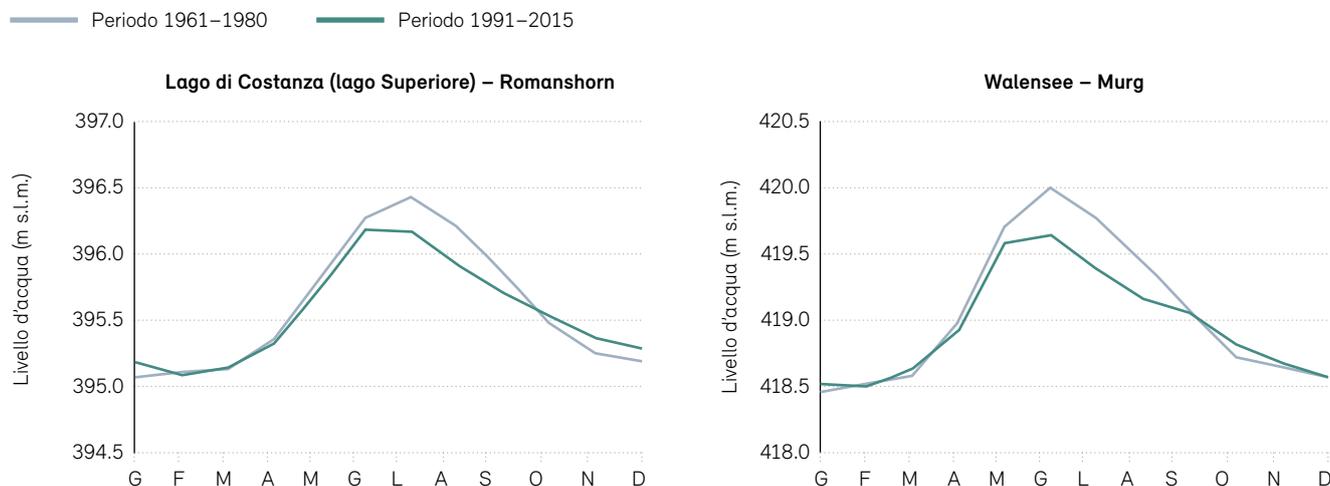
Quale risultato dello scioglimento dei ghiacciai, nelle Alpi nascono nuovi laghi, ruscelli e paesaggi golenali. I ricercatori dell'Università di Zurigo stimano che potrebbero nascere fino a 500 laghi con una superficie di 50 km² e un volume di 2 km³ (Haeberli et al. 2012). I laghi di dimensioni

più piccole scompariranno però relativamente in fretta a seguito di processi di interrimento. Alcuni dei nuovi laghi ed ex valli d'origine glaciale potrebbero essere utilizzati come serbatoi, se necessario costruendovi delle dighe

(Farinotti et al. 2016). A fronte della nascita di questi laghi e paesaggi d'alta montagna la società deve interrogarsi su come utilizzarli e proteggerli, una questione fondamentale ancora in attesa di risposta.

Figura 6-6: Livelli medi dei laghi non regolati di Costanza e di Walen

Nel periodo 1991-2015, i livelli idrometrici sono sensibilmente diminuiti in estate e leggermente aumentati in inverno rispetto al periodo 1961-1980.



Fonte: dati misurati dall'UFAM

Figura 6-7: Ritiro del ghiacciaio del Trift dal 1984 al 2019

Un esempio impressionante del progressivo ritiro dei ghiacciai negli ultimi decenni è dato dal ghiacciaio del Trift, sul cui margine proglaciale si è formato un nuovo lago. Sono mostrati i livelli del ghiacciaio nel 1984, 2011 e 2019.



Fonte iconografica: centrale idroelettrica di Oberhasli KWO (a sinistra e al centro: associazione per la promozione della cultura di Gadmen, a destra: Françoise Funk-Salamì)

Serbatoi idrici: i laghi naturali e i serbatoi artificiali possono contribuire a gestire la penuria di acqua estiva?

Procedura

Con il modello idrologico PREVAH-WSL sono stati calcolati scenari idrologici per tutta la Svizzera, utilizzando a tal fine otto catene di modelli climatici con misure di protezione del clima (RCP2.6) e 18 catene di modelli climatici senza misure di protezione del clima (RCP8.5). Sulla base di tali risultati è possibile determinare le variazioni dell'offerta complessiva d'acqua in Svizzera. Sulla base degli scenari idrologici è stato inoltre stimato il futuro fabbisogno d'acqua.

Risultati principali

- Nel caso dei serbatoi artificiali la capacità di accumulo è effettivamente utilizzabile quasi per intero, anche se oggi è solitamente riservata alla produzione di energia idroelettrica. Nel caso dei laghi naturali si può utilizzare in modo sostenibile solo una piccola parte, in quanto non è consentito scendere al di sotto di un livello idrometrico minimo. Per tutti i laghi occorre anche considerare i deflussi minimi nei corsi d'acqua a valle.
- Si prevede una penuria d'acqua nei mesi estivi soprattutto nell'Altipiano e in misura solo limitata nelle regioni alpine. I serbatoi artificiali si trovano soprattutto nelle Alpi, quindi molto distanti dalle aree che potrebbero essere interessate da una carenza d'acqua. Pertanto il possibile contributo dei laghi artificiali alpini alla riduzione della penuria d'acqua estiva nell'Altipiano è piuttosto esiguo. Sarebbe più utile disporre di serbatoi locali, per i quali però l'Altipiano non offre spazio sufficiente.

Progetto Hydro-CH2018 delle unità di ricerca Idrologia di montagna e Scienze economiche e sociali dell'Istituto federale di ricerca per la foresta, la neve e il paesaggio (WSL) e dell'Istituto per l'edilizia e l'ambiente della Scuola tecnica superiore di Rapperswil (HSR)

Maggiori informazioni e riferimenti sul tema «serbatoi idrici»

- Brunner M. et al. 2019a: Wasserspeicher. Welchen Beitrag leisten Mehrzweckspeicher zur Verminderung zukünftiger Wasserknappheit? Hydro-CH2018 Bericht.
- Brunner M. et al. 2019c: Present and Future Water Scarcity in Switzerland: Potential for Alleviation through Reservoirs and Lakes.

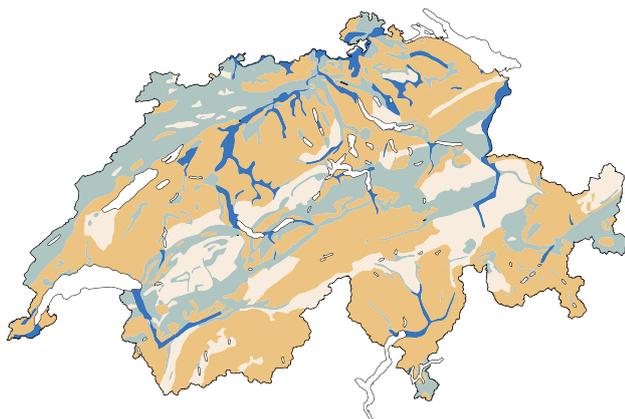
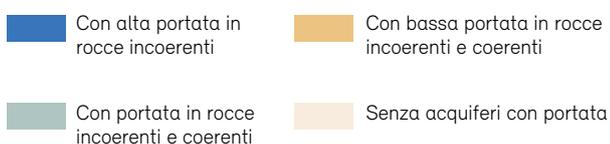
6.4 Acque sotterranee

La Svizzera dispone di risorse idriche sotterranee ampie ma distribuite geograficamente in modo eterogeneo. È per questa ragione che già oggi, in caso di siccità, si verificano sempre più problemi legati alla disponibilità locale e temporale delle acque sotterranee. Una tendenza che è destinata ad aumentare con i cambiamenti climatici. La rigenerazione dell'acquifero aumenterà in inverno e primavera e diminuirà in estate e in autunno.

Le acque sotterranee sono il più grande e importante serbatoio idrico della Svizzera. Esse si differenziano a seconda che si trovino in rocce incoerenti, rocce fessurate o rocce carsificate. Si stima che abbiano un volume complessivo di 150 km³, con una resistenza variabile (fig. 6-8). La quota maggiore è rappresentata dalle rocce carsificate con 120 km³ circa, seguite dalle rocce fessurate con 20 km³ e dagli acquiferi in rocce incoerenti con 10 km³. In tutta la Svizzera il volume utilizzabile in modo sostenibile si aggira attorno a 18 km³ all'anno, gran parte dei quali proviene da acquiferi in rocce incoerenti molto resistenti, situati nelle valli fluviali (Sinreich et al. 2012).

Figura 6-8: Carta sinottica della resistenza delle falde freatiche in Svizzera

Le falde freatiche molto resistenti si trovano soprattutto negli acquiferi in rocce incoerenti nelle valli fluviali.



Fonte iconografica: Sinreich et al. (2012)

È considerata utilizzabile in modo sostenibile la quantità di acque sotterranee che può essere prelevata in media nel corso di un anno normale, senza che ciò comporti un abbassamento permanente del livello di falda freatica o altri effetti negativi sull'ambiente. Soprattutto in caso di magra, la portata dei corsi d'acqua di piccole e medie dimensioni proviene principalmente dalle acque sotterranee. Anche gli ecosistemi umidi sensibili necessitano di un livello di falda freatica sufficientemente elevato (cap. 7.3.4). Negli anni di siccità la disponibilità di acque sotterranee utilizzabili in modo sostenibile è dunque decisamente inferiore. Nella pratica però la quantità effettivamente utilizzabile è spesso ancora più esigua, da un lato a causa di conflitti d'utilizzazione e della qualità compromessa dell'acqua, dall'altro perché la distribuzione delle risorse idriche sotterranee è molto eterogenea a livello spaziale e non sempre sono disponibili lì dove ce n'è bisogno.

Variazione osservata del volume di acque sotterranee

Riferite all'intero volume delle acque sotterranee svizzere, le variazioni dei livelli di falda rappresentano di norma solo una piccola percentuale. Le oscillazioni naturali osservate per gli acquiferi in rocce incoerenti sono infatti nell'ordine di centimetri o metri, a confronto di uno spessore complessivo della falda freatica che raggiunge spesso alcune decine di metri. Diverso è il discorso per gli acquiferi in rocce carsificate, in cui forti oscillazioni della portata in corrispondenza delle sorgenti o il completo esaurimento sono indice di importanti variazioni del grado di riempimento nel corso dell'anno. A seconda del tempo di permanenza delle acque nella falda freatica, vale a dire della rapidità con cui questa reagisce a fasi di siccità o di precipitazioni abbondanti, ciò può ripercuotersi per mesi o addirittura fino all'anno seguente sui livelli di falda e sulle portate delle sorgenti. I sistemi di acque sotterranee poco estesi e vicini alla superficie reagiscono più rapidamente. In essi si presentano spesso problemi locali di penuria d'acqua durante i periodi di siccità.

L'Osservazione nazionale delle acque sotterranee NAQUA mostra che le risorse idriche sotterranee si rigenerano periodicamente in modo completo in tutta la Svizzera. Anche se ricorrono sistematicamente periodi di più anni in cui i livelli di falda sono piuttosto bassi o elevati, considerando l'intero periodo di misurazione ormai circa ven-

tennale non si lasciano individuare tendenze generali. In termini quantitativi, almeno su un bilancio pluriennale, si può parlare di uno stato tendenzialmente stabile delle acque sotterranee in territorio svizzero (UFAM 2019b).

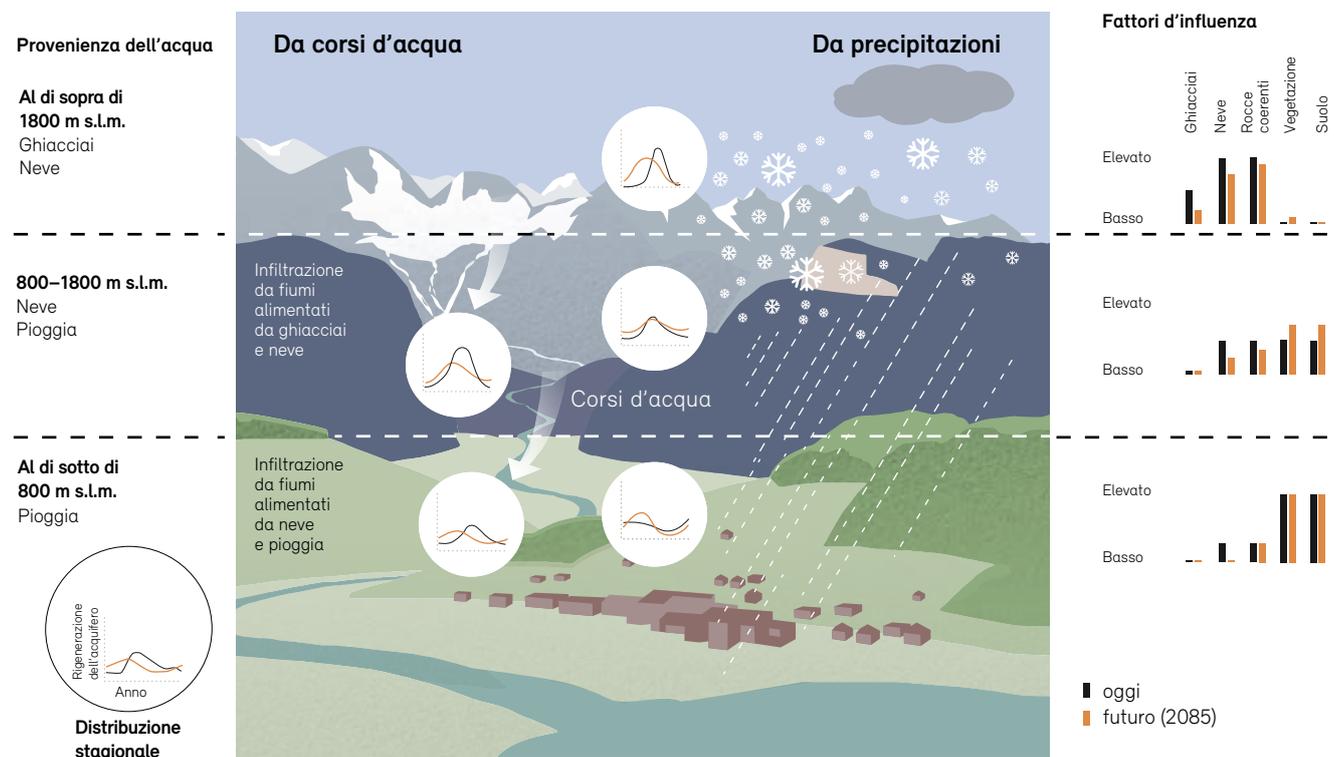
La rigenerazione dell’acquifero come processo chiave
 La rigenerazione dell’acquifero è un processo chiave per la comprensione degli effetti dei cambiamenti climatici sul volume e sulla temperatura delle acque sotterranee. A tal fine occorre distinguere tra le falde freatiche con rigenerazione diffusa per infiltrazione delle precipitazioni e quelle con infiltrazione concentrata delle acque superficiali. In genere la quantità di acque sotterranee di nuova formazione non viene misurata direttamente, bensì stimata sulla base delle precipitazioni, dell’evaporazione e del deflusso. Essa varia notevolmente a livello spaziale e temporale

ed equivale in media a circa un terzo delle precipitazioni annue in tutta la Svizzera.

La rigenerazione dell’acquifero per effetto delle precipitazioni è maggiore in inverno e primavera
 Nelle aree in cui la rigenerazione avviene per effetto delle precipitazioni, le acque sotterranee si formano principalmente per infiltrazione di pioggia e acqua di fusione. In generale vale il principio per cui l’infiltrazione dell’acqua è maggiore in presenza di suoli e strutture geologiche permeabili. Non tutta l’acqua infiltrata raggiunge però la falda freatica, ma può essere assorbita dalla vegetazione per coprire il proprio fabbisogno idrico, evaporare o raggiungere le acque superficiali. La rigenerazione dell’acquifero varia dunque in funzione della stagione e dell’altitudine (fig. 6-9).

Figura 6-9: Rigenerazione dell’acquifero e fattori d’influenza dei cambiamenti climatici

La quantità di acque sotterranee formate dalle precipitazioni o dall’acqua dei fiumi dipende dalle caratteristiche del bacino imbrifero. Essa varia in funzione della stagione e dell’altitudine del bacino conservato. Quale risultato dei cambiamenti climatici, la rigenerazione dell’acquifero aumenterà a tutte le altitudini in inverno e all’inizio della primavera mentre diminuirà in estate e in autunno.



Fonte iconografica: Hunkeler et al. (2020)

A seguito dell'atteso aumento delle precipitazioni invernali, della maggiore incidenza di pioggia e dello scioglimento anticipato della neve, la rigenerazione dell'acquifero aumenterà a tutte le altitudini in inverno e all'inizio della primavera. A più alta quota tale fenomeno sarà ulteriormente rafforzato dal fatto che nel semestre invernale il suolo rimarrà per meno tempo ghiacciato e coperto di neve.

Per tre località nell'Altipiano è stato calcolato come cambierà la rigenerazione per effetto delle precipitazioni (fig. 6-10). In uno scenario senza misure di protezione del clima, dovrebbe aumentare leggermente nei mesi invernali e primaverili entro la fine del secolo.

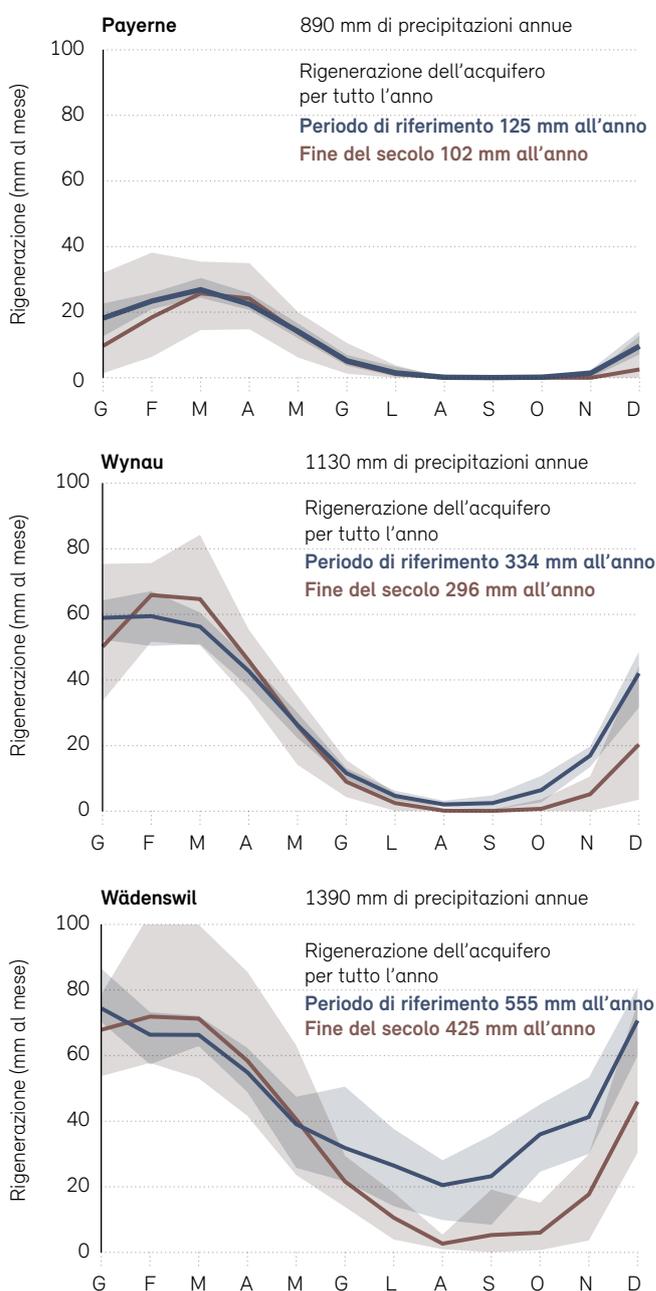
Calo della rigenerazione dell'acquifero in estate e autunno

In estate la rigenerazione dell'acquifero è praticamente assente nelle regioni caratterizzate da scarse precipitazioni (p. es. Payerne), mentre nelle regioni più umide (p. es. Wynau e Wädenswil) subirà un calo nei mesi estivi per effetto delle minori precipitazioni e della maggiore evaporazione causata dalle temperature più elevate (fig. 6-10). In futuro, in aree dell'Altipiano la rigenerazione delle risorse idriche sotterranee inizierà più tardi nel corso dell'anno, poiché il suolo dovrà prima compensare il deficit estivo di umidità e solo successivamente l'acqua potrà tornare a infiltrarsi fino alla falda freatica. Inoltre, a causa del prolungarsi del periodo vegetativo e delle temperature più elevate aumenterà anche l'evaporazione. Per contro, nelle regioni alpine la rigenerazione dell'acquifero si protrarrà più a lungo nei mesi autunnali a causa dell'inizio ritardato della copertura nevosa.

Nel semestre estivo calerà sensibilmente anche la rigenerazione dell'acquifero per infiltrazione delle acque superficiali, un fenomeno che in Svizzera ha luogo solitamente lungo le valli fluviali con imponenti depositi di ghiaia (p. es. grandi valli dell'Altipiano, valle del Rodano, valle dell'Alto Reno). La rigenerazione dell'acquifero non dipende quindi soltanto dalle condizioni climatiche locali, bensì anche dalla portata delle acque superficiali. Nel caso di un fiume che nasce nelle Alpi, si verifica durante il picco di portata in primavera o estate. Le tempistiche della rigenerazione dell'acquifero per infiltrazione variano dunque in funzione dei cambiamenti legati al clima nel regime delle acque superficiali che alimentano tale fenomeno.

Figura 6-10: Variazioni nella rigenerazione dell'acquifero per effetto delle precipitazioni

Variazioni nella rigenerazione dell'acquifero per effetto delle precipitazioni in percentuale (mediana e intervallo di incertezza) in tre località nell'Altipiano con suolo di media permeabilità. È rappresentato lo scenario senza misure di protezione del clima (RCP8.5) per il lontano futuro a confronto con il periodo di riferimento (1981–2010). La rigenerazione dell'acquifero aumenterà in inverno e diminuirà in estate, ma con un bilancio annuo negativo.



Fonte iconografica: Hunkeler et al. (2020)

Come cambieranno le risorse idriche sotterranee nei bacini imbriferi alpini a causa dei cambiamenti climatici e come influiscono sulla formazione del deflusso?

Procedura

Per undici bacini imbriferi alpini è stata esaminata la correlazione tra la dinamica del deflusso e quella delle acque sotterranee. I dati misurati e le informazioni geologiche sono quindi stati integrati in modelli su base fisica. Tali simulazioni consentono di quantificare l'incidenza dei cambiamenti climatici sulle risorse idriche sotterranee e la reazione dei bacini imbriferi.

Risultati principali

- Le falde freatiche alpine presenti in rocce coerenti e incoerenti reagiscono diversamente ai cambiamenti climatici. Nelle rocce incoerenti si modifica soprattutto la dinamica stagionale, ma il volume sull'intero anno rimane invariato. Diversamente dalle località nell'Altipiano, nelle rocce incoerenti alpine si registra una riduzione della dinamica stagionale delle acque sotterranee.
- Nelle rocce coerenti alpine potrebbe anche manifestarsi, nel lungo periodo, un calo tendenziale della quantità di acque sotterranee accumulate.
- Nonostante lo scioglimento anticipato della neve e la maggiore evapotraspirazione nei mesi estivi, la quantità di acque sotterranee accumulate e il tasso di deflusso nelle regioni alpine rimarranno più elevati in estate che in inverno. Estesi depositi di rocce incoerenti hanno un effetto stabilizzatore sul deflusso, in quanto sono in grado di accumulare per poi rilasciare nuovamente i volumi stagionalmente più elevati di acque sotterranee.

Progetto Hydro-CH2018 del centro per l'idrogeologia e la geotermia dell'Università di Neuchâtel

Bilancio annuo negativo senza misure di protezione del clima

Considerata sull'intero anno, la quantità di acque sotterranee di nuova formazione diminuirà in tutte le tre località esaminate (fig. 6-10) in quanto la perdita in autunno (e in estate nelle località più umide) non sarà completamente compensata nei mesi invernali. Tale evoluzione sarà più evidente nelle località che oggi registrano ancora precipitazioni abbondanti, in quanto qui la rigenerazione subirà un calo anche durante l'estate, nonché nelle località caratterizzate da un suolo poco permeabile e quindi meno capace di assorbire l'acqua supplementare in inverno e primavera, con un conseguente aumento del ruscellamento superficiale prodotto dalle precipitazioni. Fintantoché negli anni la rigenerazione dell'acquifero sarà sufficiente a garantirne il riempimento, il volume complessivo dei bacini idrici sotterranei non subirà variazioni significative, nonostante i cambiamenti climatici. I cambiamenti nella rigenerazione dell'acquifero si ripercuoteranno però sulla distribuzione stagionale dei livelli

di falda e quindi anche sul volume di acque sotterranee utilizzabile in modo sostenibile.

Maggiori informazioni e riferimenti sul tema «acque sotterranee»

- Epting J. et al. 2020: Ist-Zustand und Temperatur-Entwicklung Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen. Hydro-CH2018 Bericht.
- Hunkeler D. et al. 2020: Effect of Climate Change on Groundwater Quantity and Quality in Switzerland. Hydro-CH2018 report.
- Arnoux M. et al. 2020a: Dynamiques du stockage en eau souterraine et du régime hydrologique des bassins versants alpins face aux changements climatiques. Rapport Hydro-CH2018.

6.5 Eventi di piena

Gli scenari idrologici non consentono ancora di formulare affermazioni quantitative fondate sui cambiamenti in atto nella frequenza delle piene e nelle relative portate.

Diversi processi legati al clima indicano però che le piene e il ruscellamento superficiale aumenteranno con l'avanzare dei cambiamenti climatici.

Quando si verifica una piena, il livello idrologico di un corso o specchio d'acqua sale nettamente al di sopra della sua media pluriennale. Le portate di piena sono classificate come HQx in base alla probabilità con cui si verificheranno una o più volte in x anni. Gli indicatori di piena HQ30, HQ100 e HQ300 sono utilizzati per il dimensionamento delle misure di protezione contro le piene e per l'elaborazione della documentazione sui pericoli.

Le forti precipitazioni estese e persistenti che durano diverse ore o giorni, talvolta in combinazione con lo scioglimento della neve, possono causare estesi eventi di piena che interessano grandi bacini imbriferi o intere regioni, determinando anche l'innalzamento dei livelli altimetrici di laghi e acque sotterranee. Nel caso di forti precipitazioni localizzate e di breve durata, soprattutto in estate, si verificano eventi di piena a livello locale in corsi d'acqua e torrenti di piccole dimensioni o un ruscellamento superficiale al di fuori dell'alveo.

La frequenza degli eventi di piena sta cambiando

Dalle analisi dei sedimenti e dalle registrazioni storiche si possono in parte ricostruire estesi eventi di piena del passato. Tali ricostruzioni mostrano che negli ultimi 10 000 anni in Svizzera le fasi con eventi di piena frequenti si sono continuamente alternate a quelle con eventi sporadici (Ruiz-Villanueva e Molnar 2020). Negli ultimi 500 anni queste oscillazioni si sono solitamente verificate a intervalli di circa 30-100 anni (Schmocker-Fackel e Naef 2010) e sono state causate da cambiamenti nella circolazione atmosferica su ampie aree dell'Europa centrale (Stucki et al. 2012). Ciò significa che gli indicatori di piena non sono costanti nel corso del tempo e cambiano insieme al clima. Questo rappresenta una sfida per la protezione contro le piene.

Un periodo con eventi di piena estesi e molto frequenti in tutta la Svizzera si è verificato dopo la fine della piccola era glaciale nella seconda metà del XIX secolo. Ad esso hanno fatto seguito numerosi progetti di protezione contro le piene e correzioni dei corsi d'acqua. Il periodo tra il 1940 e il 1970 è stato invece caratterizzato in Svizzera da un numero straordinariamente basso di eventi di piena estesi (cosiddetto «vuoto di eventi»), mentre negli ultimi decenni si è osservata una loro intensificazione. Questo ha condotto ad adattamenti nella protezione contro le piene e all'introduzione della gestione integrale dei rischi (cap. 7.2).

Figura 6-11: Piena e ruscellamento superficiale

Le immagini mostrano a sinistra la piena della Lüttschine verificatasi il 25 agosto 2005 a Lüttschental, e a destra un evento di ruscellamento superficiale locale nel Cantone di Sciaffusa a maggio 2013.



Fonti iconografiche: a sinistra: UFAM, a destra: Ufficio tecnico del Cantone di Sciaffusa

Si tratta di un'evoluzione recente osservata anche in molte altre regioni d'Europa. Negli ultimi 30 anni, nel Vecchio continente, si è infatti registrato il maggior numero di piene da 500 anni a questa parte. Questo dato è tanto più degno di nota se si considera che in passato le fasi contraddistinte da numerosi eventi di piena in Europa sono state registrate principalmente durante fasi climatiche fredde, mentre gli ultimi 30 anni sono stati straordinariamente caldi. Dal punto di vista climatico, la fase attuale è dunque senza precedenti (Blöschl et al. 2020).

Cambiamento dei fattori che influiscono sulle piene

Il verificarsi o meno di un evento di piena e il picco di portata che ne consegue dipendono da una combinazione di numerosi fattori. Se è vero che le piene sono causate da precipitazioni intense, è altrettanto vero che lo stesso evento di precipitazione può causare in un caso una grande piena, mentre in un altro può risultare in una portata nettamente inferiore per esempio quale risultato dell'isoterma di zero gradi a una quota più bassa o della minore umidità del suolo prima della piena. Con i cambiamenti climatici non cambiano solo le forti precipitazioni ma anche altri fattori che influiscono sui fenomeni di piena (fig. 6-12).

Più energia e umidità nell'atmosfera

Con l'avanzare dei cambiamenti climatici aumenta anche la probabilità di precipitazioni, in quanto per ogni grado Celsius di riscaldamento l'aria è in grado di assorbire dal 6 al 7 per cento in più di acqua. I modelli climatici globali mostrano inoltre che in futuro, senza misure di protezione del clima, una maggiore quantità di umidità atmosferica sarà convogliata verso le Alpi e farà aumentare la probabilità di precipitazioni più intense e di eventi di piena (Brönnimann et al. 2018). Wernli et al. (2016) hanno esaminato gli effetti di questo cambiamento climatico sui fenomeni di piena nell'ambito di un esperimento teorico. Con l'ausilio di un modello meteorologico e di un modello idrologico, hanno calcolato a posteriori alcuni eventi di piena del passato applicando condizioni iniziali modificate e ipotizzando un'umidità superiore fino al 10 per cento e una temperatura fino a 3 °C più elevata sopra l'Atlantico. Gli esperimenti mostrano che le portate di piena possono aumentare con lo stesso ordine di grandezza dell'umidità dell'aria.

In linea di principio, i cambiamenti climatici fanno quindi aumentare la quantità potenziale di precipitazioni, con possibili ripercussioni sia sugli eventi di forti precipitazioni brevi sia sulle precipitazioni persistenti. Dal punto di vista fisico si possono prevedere eventi più intensi e frequenti almeno per quanto riguarda i fenomeni di piena e il ruscellamento superficiale a livello locale, come pure un aumento delle portate nel caso di fenomeni estesi. Gli scenari idrologici possono però rappresentare questi cambiamenti soltanto per sommi capi: senza misure di protezione del clima mostrano sì un aumento della frequenza e dell'intensità delle piene entro la fine del secolo, ma solo lieve e tutt'altro che significativo (Mülchi et al. 2020). In particolare resta molto incerto se i grandi eventi di piena finora rari si verificheranno più frequentemente.

Incertezze riguardo alla circolazione atmosferica

Il segnale ambiguo che arriva dagli scenari idrologici può avere anche motivazioni metodologiche: innanzitutto gli scenari climatici CH2018 tendono a sottostimare le precipitazioni estreme ed estese che danno luogo ai fenomeni di piena, nonché la loro variabilità naturale. Inoltre con i modelli climatici è stato possibile riprodurre solo in parte i cambiamenti della circolazione atmosferica osservati in passato e le conseguenti precipitazioni estreme ed estese (Brönnimann et al. 2019).

In secondo luogo, per la modellizzazione idrologica occorre applicare procedimenti statistici al fine di migliorare la risoluzione spaziale e temporale dei dati sulle precipitazioni. I modelli climatici regionali forniscono dati con una risoluzione spaziale di 12 × 12 km o 50 × 50 km e l'output dei modelli è generalmente disponibile soltanto con una risoluzione temporale giornaliera. Tali risoluzioni non sono sufficienti per riprodurre adeguatamente con modelli idrologici gli eventi di piena che interessano i bacini imbriferi montani e di dimensioni piuttosto piccole della Svizzera. Per questo motivo i risultati dei modelli climatici sono stati ulteriormente affinati per mezzo di procedimenti statistici (cap. 2). Non si può tuttavia escludere che tali procedimenti statistici risultino in una riduzione delle precipitazioni estreme.

Figura 6-12: Fattori d'influenza sui fenomeni di piena e relativa evoluzione a seguito dei cambiamenti climatici

Effetto spaziale sulle piene ■ Aumento atteso ■ Calo atteso ▨ Aumento o calo possibile ■ Nessuna variazione



Conseguenza climatica: più energia e umidità nell'atmosfera

- Sostanziale aumento del potenziale di precipitazioni, ma con reazioni diverse a seconda delle caratteristiche dell'area.
- Aumento della frequenza e intensità delle precipitazioni intense e quindi degli eventi di piena locali.



Conseguenza climatica: cambiamenti nella circolazione atmosferica

- Elevata variabilità atmosferica anche in futuro
- I modelli climatici possono stimare le conseguenze sulle precipitazioni estreme solo in misura limitata.
- La circolazione atmosferica influirà soprattutto sulle precipitazioni intense estese e persistenti e quindi sugli eventi di piena estesi.



Conseguenza climatica: innalzamento dell'isoterma di zero gradi

- Più precipitazioni sotto forma di pioggia che può riversarsi direttamente nel deflusso.
- Soprattutto nei bacini imbriferi alpini, superfici più estese interessate dalla pioggia.
- La stagione delle piene si prolungherà, con un conseguente potenziale aumento degli eventi di precipitazione che possono causare eventi di piena.



Conseguenza climatica: riduzione del manto nevoso, scioglimento della neve

- L'incidenza dello scioglimento della neve nel Giura e nelle Prealpi diminuirà.
- Nell'Altipiano l'incidenza del manto nevoso sugli eventi di piena è già oggi praticamente assente.
- Influsso eventualmente maggiore della neve sugli eventi di piena nei bacini alpini («eventi di pioggia su neve»).



Conseguenza climatica: cambiamento dell'umidità del suolo

- Il calo dell'umidità media del suolo nell'Altipiano potrebbe aumentare nel breve periodo la capacità di ritenzione delle acque in caso di precipitazioni. L'effetto sarà però ridotto nel caso di precipitazioni prolungate.
- Nei suoli prosciugati, in particolare quando sono impermeabilizzati, possono manifestarsi effetti idrorepellenti, con il risultato che in caso di eventi di forti precipitazioni durante fasi di siccità potrà infiltrarsi in parte meno acqua. → Calo della capacità di ritenzione delle acque e maggiore rischio di ruscellamento superficiale.



Conseguenza climatica: maggiore disponibilità di sedimenti

- Aumento del potenziale di danno a causa dei detriti che possono essere smossi sulle Alpi.
- Trasporto modificato di sostanze solide a causa del cambiamento delle portate.

Cambiamenti nella neve e nell'umidità del suolo

A causa dell'innalzamento del limite dell'innevamento e dell'isoterma di zero gradi, nelle Alpi le precipitazioni cadono più frequentemente sotto forma di pioggia invece che di neve anche fino a quote elevate. Ciò prolunga la stagione delle piene in primavera e autunno. Oggi, nel Giura, i fenomeni di piena si verificano soprattutto in inverno a causa di una concomitanza di forti precipitazioni e scioglimento della neve nell'intero bacino imbrifero (eventi di pioggia su neve). In seguito ai cambiamenti climatici ciò accadrà meno frequentemente, in quanto la durata e lo spessore del manto nevoso nel Giura caleranno in misura considerevole. Tali eventi diventeranno più rari anche nelle Prealpi. A ottobre 2011, nella Kanderthal e nella Lötschental si è verificato un grande evento di piena causato da pioggia su neve, in una forma che non si era mai osservata in precedenza (Badoux et al. 2013). Non è però ancora chiaro se simili eventi di pioggia su neve nelle Alpi aumenteranno a seguito dei cambiamenti climatici. A seconda della regione e della stagione considerata, i cambiamenti attesi nel manto nevoso possono infatti avere l'effetto di favorire o di prevenire le piene. Lo stesso vale per l'umidità del suolo: i suoli meno umidi possono assorbire e immagazzinare più pioggia, riducendo quindi le portate di piena. D'altro canto, i suoli molto asciutti possono anche sviluppare caratteristiche idrorepellenti e prevenire l'infiltrazione delle precipitazioni dando luogo a un ruscellamento superficiale. Tale fenomeno può condurre all'erosione del suolo e riguarda soprattutto i suoli a uso agricolo scarsamente ricoperti di vegetazione e fortemente impermeabilizzati.

Maggiore disponibilità di sedimenti

Per effetto dello scongelamento del permafrost e del ritiro dei ghiacciai, sulle montagne aumenterà la disponibilità di sedimenti che possono essere mobilizzati da grandi eventi di precipitazione. Durante gli eventi di piena i sedimenti sono trasportati soprattutto nei torrenti ripidi e altro materiale può essere eroso dall'alveo. Così, per esempio, da una piena in un torrente può scaturire una colata detritica in seguito all'ulteriore erosione di sedimenti. Nei tratti meno ripidi dei fiumi e dei ruscelli a valle dei torrenti, la velocità di deflusso dell'acqua diminuisce e i sedimenti si depositano. Ciò riduce la capacità di deflusso nell'alveo e può causare esondazioni e alluvionamenti con ingenti danni (Speerli et al. 2020).

I territori reagiscono diversamente alle forti precipitazioni

L'aumento atteso delle forti precipitazioni a causa dei cambiamenti climatici avrà effetti variabili sul deflusso. Questo perché il suolo, le rocce coerenti, la vegetazione, la topografia e la superficie d'insediamento influiscono sulla quantità di precipitazioni che può essere trattata in un bacino imbrifero o che va ad alimentare la portata di piena. Se il bacino imbrifero presenta un'elevata capacità di assorbimento, la portata aumenterà meno di quanto ci si aspetterebbe in considerazione delle precipitazioni. Se invece la capacità di assorbimento è esaurita, le precipitazioni complessive possono defluire e la portata aumenterà più del previsto. La complessa interazione di numerosi fattori d'influenza in parte contrastanti rende più difficile formulare affermazioni quantitative fondate in merito al futuro manifestarsi di grandi eventi di piena.

Maggiori informazioni e riferimenti sul tema «eventi di piena»

- Burlando P. et al. 2020: Evaluation of future hydrological scenarios using stochastic high-resolution climate data. Hydro-CH2018 report.
- Mülchi R. et al. 2020: Neue hydrologische Szenarien für die Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht.
- Ruiz-Villanueva V., Molnar P. 2020: Past, current and future changes in floods in Switzerland. Hydro-CH2018 report.
- Speerli J. et al. 2020: Auswirkungen des Klimawandels auf den Sedimenttransport. Hydro-CH2018 Bericht.

6.6 Eventi di magra

In futuro, nei mesi estivi e autunnali si verificheranno eventi di magra più frequenti e intensi nelle acque superficiali dell'Altipiano, del Giura e sul versante meridionale delle Alpi. Ciò avrà conseguenze negative per l'ecologia delle acque e la loro utilizzazione. Nelle Alpi aumenteranno invece le portate nei mesi invernali, ossia in quella che è stata finora una stagione caratterizzata da eventi di magra.

Le portate straordinariamente basse nelle acque superficiali vengono definite come eventi di magra. Tali eventi sono generalmente caratterizzati sulla base degli indicatori Q_{347} e NM7Q. Q_{347} è la portata di un corso d'acqua che viene almeno raggiunta o superata per il 95 per cento del tempo, ossia per 347 giorni di un anno medio (su una media di 10 anni). La portata Q_{347} è definita come deflusso minimo nella legge sulla protezione delle acque (art. 31 cpv. 1 LPAc) e svolge un ruolo centrale quale indicatore di magra in Svizzera. Quale secondo indicatore di magra si utilizza il parametro NM7Q, che si definisce come il valore medio più basso di sette valori di portata giornaliera consecutivi durante un periodo di osservazione. Questo è un indicatore affidabile e meno esposto a errori di misura o a influssi di breve durata.

Le portate di magra nelle Alpi aumenteranno

Nei bacini imbriferi alpini ad alta quota gli eventi di magra sono causati da fasi di freddo in cui tutte le precipitazioni cadono sotto forma di neve e non possono defluire direttamente. Qui le portate di magra annue più basse si registrano normalmente tra gennaio e marzo. Nella maggioranza dei bacini imbriferi glaciali e nivali le portate (e quindi l'indicatore NM7Q) sono sensibilmente aumentate tra il 1961 e il 2018. Anche le portate minime Q_{347} hanno registrato un incremento (fig. 6-13). Nel complesso le portate nelle Alpi sono quindi aumentate durante l'inverno, ossia durante la stagione solitamente caratterizzata da eventi di magra, principalmente perché a causa dei cambiamenti climatici le precipitazioni cadono più sotto forma di pioggia che di neve.

Anche nel Reno gli eventi di magra invernali di un certo rilievo sono divenuti più rari rispetto al XIX secolo (Pfister et al. 2006). Ciò però non è solo conseguenza dei cambiamenti climatici. Un ruolo importante è svolto anche dai serbatoi delle centrali idroelettriche e dalla regolazione dei laghi naturali. Una parte del deflusso estivo è infatti immagazzinata nei serbatoi alpini e utilizzata in inverno per generare energia elettrica, con un conseguente sensibile aumento delle portate invernali.

Figura 6-13: Evoluzione osservata delle portate di magra dal 1961
 Per diversi regimi di portata sono stati eseguiti calcoli delle tendenze degli indicatori di magra NM7Q (su base stagionale e annua) e Q_{347} (solo su base annua) per il periodo 1961 – 2018. Un aumento di tali indicatori significa che le portate di magra aumentano, mentre un loro calo significa che le portate di magra diminuiscono. Nei mesi estivi le portate di magra registrano una forte flessione praticamente in tutti i bacini imbriferi. I bacini ad alta quota mostrano un aumento in inverno e in primavera. Nei bacini caratterizzati da eventi di magra durante l'inverno, i valori annui per Q_{347} e NM7Q sono già aumentati.

Regime	NM7Q					Q_{347}
	Inverno (DGF)	Primavera (MAM)	Estate (GLA)	Autunno (SON)	Anno	Anno
Glaciale e glacio-nivale	↑	↑	↑	→	↑	↑
Nivo-glaciale	↑	→	↓	↑	↑	↑
Nivale	→	↑	↓	→	→	↑
Prealpino-Nivale	→	↑	↓	↑	→	→
Pluviale	→	→	↓	→	→	→
Giurassiano	→	↓	↓	→	→	→
Sudalpino	↑	→	↓	→	→	↑

- Aumento sensibile o significativo
- Calo sensibile o significativo
- Nessuna variazione
- Insorgenza media di NM7Q e scostamento standard dall'insorgenza media

Fonte iconografica: Weingartner e Schwanbeck (2020)

Le portate di magra sono già diminuite nei mesi estivi

Nelle regioni non alpine gli eventi di magra sono causati dalla mancanza di precipitazioni, spesso combinata con un'elevata evaporazione. Il periodo di magra tipico si estende dalla fine dell'estate alla fine dell'autunno, con una considerevole variabilità su base annua. Tranne che da marzo a maggio, possono infatti verificarsi giorni con portate inferiori a Q_{347} in tutti i mesi. Per la maggior parte dei bacini imbriferi non alpini non si rilevano variazioni significative dell'indicatore Q_{347} e dei valori annui di NM7Q nel periodo 1961 – 2018.

Il quadro cambia se si considerano le portate estive minime (NM7Q), che sono fortemente calate nella maggior parte dei bacini imbriferi nordalpini esaminati, anche in quelli senza o con poche aree ghiacciate in ambiente alpino (fig 6-13). Lo scioglimento sempre più anticipato della neve, l'aumento dell'evaporazione e l'assenza di precipitazioni sono considerati i principali responsabili di tale evoluzione.

Le serie temporali troppo brevi non consentono di eseguire analisi delle tendenze relative agli eventi di magra molto rari ed estremi che si verificano statisticamente ogni 50 o ogni 100 anni. Le analisi storiche mostrano però che in passato d'estate si verificavano fasi ricorrenti di canicola e di siccità estrema sia in Svizzera che nell'Europa centrale, per esempio negli anni Quaranta e Sessanta (Kohn et al. 2019). Gli ultimi 20 anni sono stati caratterizzati da un numero straordinariamente elevato di estati molto calde e secche con nuovi valori record in termini di portate di magra e di temperatura (p. es. 2003, 2015, 2018). Molto probabilmente, essendo la tendenza verso estati torride chiaramente attestata (Rapporto tecnico CH2018), questa concentrazione di eventi di magra estremi non può essere imputata soltanto alla variabilità naturale.

Per quanto riguarda i bassi livelli delle falde freatiche e delle portate delle sorgenti non è stata finora individuata alcuna tendenza a lungo termine. Gli anni 2003, 2011 e 2018 hanno mostrato tuttavia livelli di falda particolarmente bassi, e numerose piccole sorgenti, per esempio nel Giura, nelle regioni collinari e nelle Prealpi, si sono

prosciugate (indicatore dell'UFAM «livelli alti e bassi delle falde freatiche»³).

Continua la tendenza verso eventi di magra più intensi nei mesi estivi

Gli scenari climatici CH2018 mostrano che i quantitativi di precipitazione medi diminuiranno nei mesi estivi e i periodi di siccità dureranno tendenzialmente più a lungo (cap. 4.2). In conseguenza delle temperature più elevate aumenterà inoltre l'evaporazione, sempre che nel suolo e nella vegetazione sia presente una quantità d'acqua sufficiente. Gli scenari idrologici relativi agli eventi di magra indicano un calo delle portate di magra nell'Altipiano, nel Giura e nella Svizzera meridionale durante i mesi estivi e autunnali. Poiché in tali stagioni si registrano solitamente le portate di magra più basse nell'arco di un anno, questi cambiamenti sono confermati anche dagli indicatori annui NM7Q e Q_{347} (fig. 6-14 e fig. 6-15, esempio della Thur).

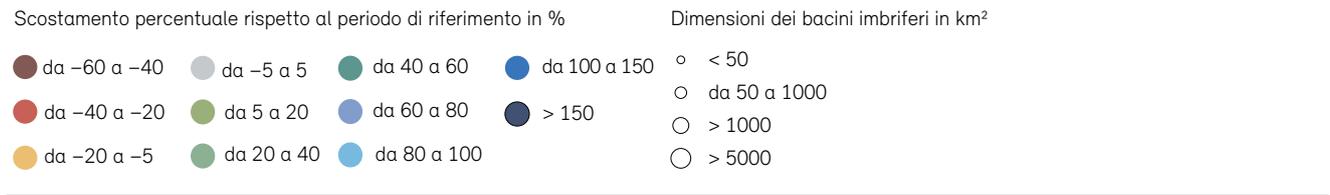
Spostamento della stagione delle magre nelle Alpi e Prealpi

Nelle Alpi e Prealpi gli scenari idrologici mostrano un quadro piuttosto differenziato. Alle quote comprese tra 1500 e 2000 m s.l.m. le portate di magra invernali aumenteranno nel prossimo futuro a causa delle condizioni climatiche più miti e umide. Senza misure di protezione del clima le portate estive caleranno però sensibilmente a causa della riduzione dell'acqua di fusione, con il risultato che in alcune regioni la stagione delle magre si sposterà dall'inverno all'autunno o all'estate. In queste regioni gli eventi di magra non saranno quindi più causati dalle basse temperature, bensì dall'assenza di precipitazioni. Mentre entro la fine del secolo, senza misure di protezione del clima, tutte le regioni al di sotto dei 1500 m s.l.m. mostreranno una chiara flessione dell'indicatore Q_{347} , i cambiamenti nelle regioni tra 1500 e 2000 m s.l.m. saranno solo limitati (fig. 6-15, p. es. Plessur e Verzasca) e qui l'indicatore Q_{347} potrebbe sia calare sia aumentare leggermente. Per le quote molto elevate al di sopra dei 2000 m s.l.m., tutti gli scenari mostrano anche per il lontano futuro un incremento delle portate di magra Q_{347} e quindi eventi di magra meno rilevanti nei mesi invernali (fig. 6-15, p. es. Rosegbach).

3 www.bafu.admin.ch > Tema Acque > Dati, indicatori e carte > Indicatori acque

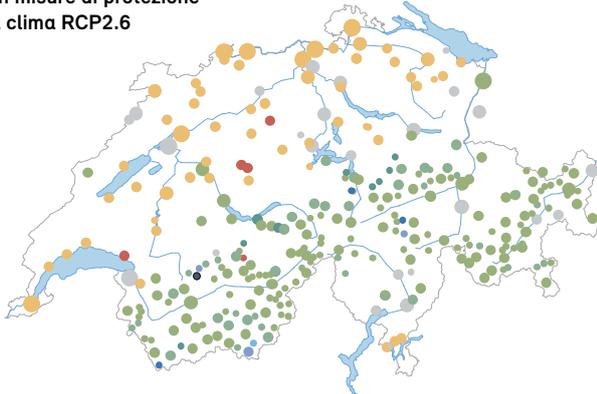
Figura 6-14: Scenari di magra

Cambiamenti a confronto con il periodo di riferimento (1981 – 2010) per l'indicatore di magra NM7Q con misure di protezione del clima RCP2.6 (a sinistra) e senza misure di protezione del clima RCP8.5 (a destra) per la metà e la fine del secolo. Un calo dei valori annui indica una riduzione delle portate di magra. A bassa quota le portate di magra si verificano nei mesi estivi e diminuiranno con i cambiamenti climatici. Nelle Alpi le portate di magra si verificano nei mesi invernali e sono destinate ad aumentare.

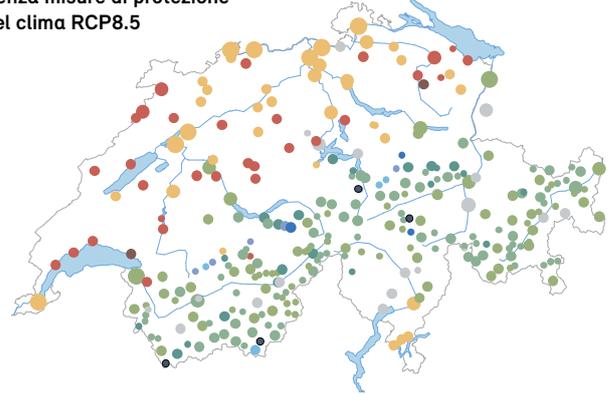


NM7Q

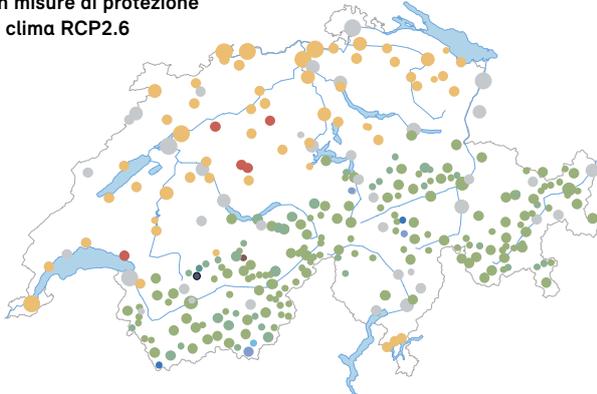
2060
Con misure di protezione
del clima RCP2.6



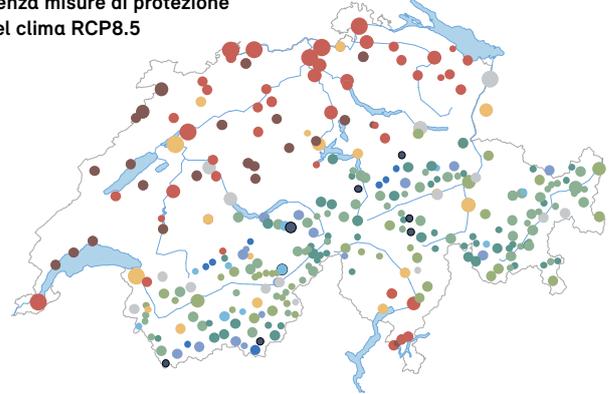
2060
Senza misure di protezione
del clima RCP8.5



2085
Con misure di protezione
del clima RCP2.6



2085
Senza misure di protezione
del clima RCP8.5

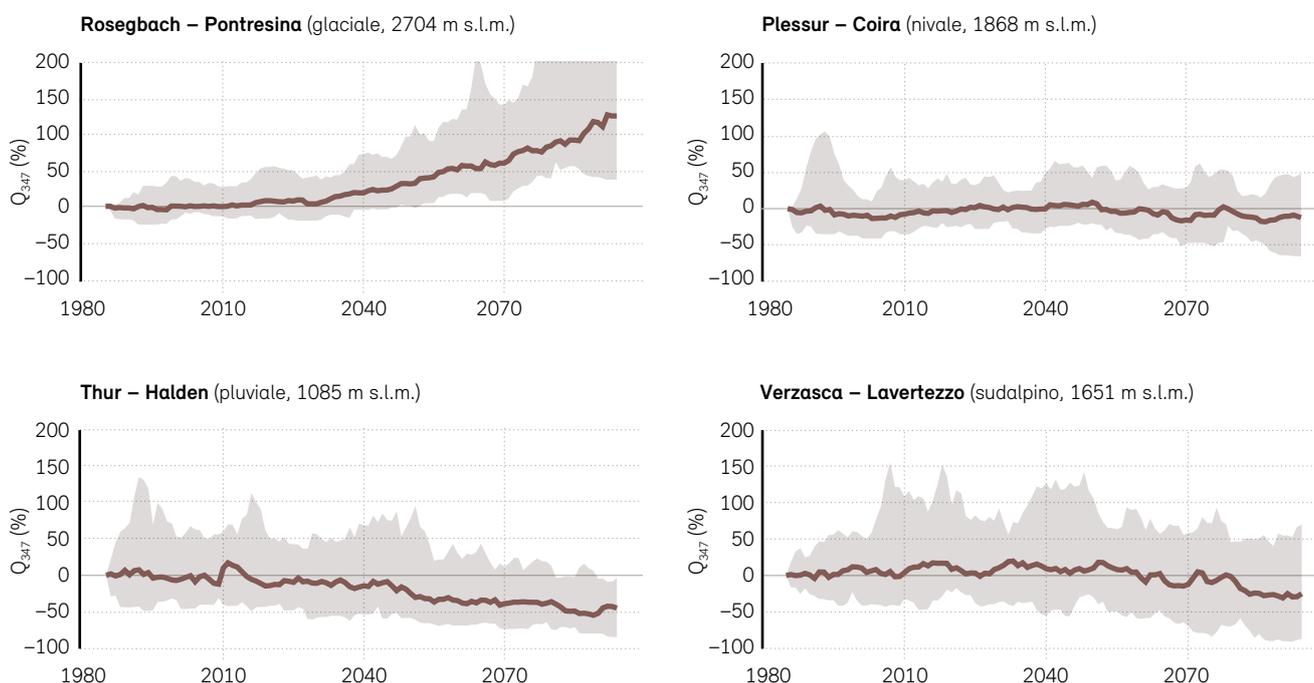


Fonte iconografica: dati da Mülchi et al. (2020 e 2021b), Freudiger et al. (2020), Brunner et al. (2019c)

Figura 6-15: Andamento del Q_{347} nel tempo

La variazione percentuale dell'indicatore di portata Q_{347} (mediana e intervallo di incertezza) rispetto al periodo di riferimento (1981–2010) è stata calcolata per periodi mobili di dieci anni dal 2010 al 2099 per lo scenario senza misure di protezione del clima (RCP8.5). Nel bacino glaciale del Rosegbach la portata Q_{347} aumenterà sensibilmente fino alla fine del secolo, mentre diminuirà nella Thur (bacino pluviale) e nella Verzasca (bacino subalpino). Nel Plessur l'indicatore Q_{347} non subirà praticamente variazioni.

Senza misure di protezione del clima RCP8.5 (2085)



Fonte iconografica: dati da Mülchi et al. (2021b)

La futura evoluzione degli eventi di magra estremi è incerta

Modelli di circolazione atmosferica estesi e specifici rivestono un ruolo decisivo nel manifestarsi di fenomeni meteorologici rari quali eventi estremi di siccità e di magra. Per esempio, aree di costante alta pressione che raggiungono altitudini elevate determinano un blocco atmosferico dei venti occidentali e di conseguenza una diminuzione delle precipitazioni. In climatologia sussistono ancora incertezze circa il modo in cui tali modelli atmosferici specifici si trasformeranno con l'avanzare dei cambiamenti climatici. Resta quindi ancora da chiarire in che misura aumenteranno la frequenza e l'intensità degli eventi estremi di siccità e di magra (Woollings et al. 2018).

Rischio di prosciugamento diversificato

Nei periodi di magra molti corsi d'acqua sono alimentati in gran parte dalle acque sotterranee. Oltre che dalle condizioni meteorologiche, dalla vegetazione e dalle caratteristiche del suolo, le portate di magra dipendono quindi in maniera decisiva dalle condizioni idrogeologiche nel rispettivo bacino imbrifero (Carlier et al. 2018). La presenza di acquiferi estesi nelle rocce coerenti e/o nei depositi di rocce incoerenti riduce quindi il rischio di secca. Tali processi idrogeologici continueranno a esistere anche con i cambiamenti climatici.

Condizioni idrogeologiche particolari possono far sì che un corso d'acqua infiltri completamente a livello locale. Perché l'intero deflusso possa infiltrarsi nel sottosuolo occorre che i depositi di rocce incoerenti siano abbastanza spessi da assorbire tutta la quantità d'acqua e con-

voglierla sotto terra. Inoltre il letto del fiume deve essere sufficientemente permeabile. Un prosciugamento completo per infiltrazione viene osservato soltanto in corsi d'acqua di medie e piccole dimensioni. Nei corsi d'acqua più grandi la portata di magra è tale per cui non può infiltrarsi e defluire completamente sotto terra. Nelle zone carsiche si osserva frequentemente un prosciugamento dei corsi d'acqua. Le situazioni di magra possono intensificarsi quando l'acqua viene prelevata direttamente dalle acque superficiali o dalle acque sotterranee adiacenti, mentre le immissioni d'acqua per esempio da impianti di depurazione delle acque aumentano le portate. Le portate di magra più basse nei mesi estivi, soprattutto in combinazione con le temperature elevate dell'acqua o con i fenomeni di prosciugamento, sono molto problematiche per l'ecologia delle acque (cap. 6.9) e possono causare limitazioni all'utilizzazione (cap. 7.1).

Maggiori informazioni e riferimenti sul tema «eventi di magra»

- Kohn I. et al. 2019: Low Flow Events – a Review in the Context of Climate Change in Switzerland. Hydro-CH2018 report.
- Mülchi R. et al. 2020: Neue hydrologische Szenarien für die Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht.
- Weingartner R., Schwanbeck J. 2020: Veränderung der Niedrigwasserabflüsse und der kleinsten saisonalen Abflüsse in der Schweiz im Zeitraum 1961–2018. Hydro-CH2018 Bericht.

6.7 Temperatura delle acque

I cambiamenti climatici fanno aumentare le temperature dell'acqua in corsi d'acqua, laghi e acque sotterranee. Mentre tale riscaldamento è chiaramente misurabile già oggi nelle acque superficiali, l'aumento delle temperature delle acque sotterranee è meno evidente. Le temperature più elevate dell'acqua soprattutto nei mesi estivi hanno conseguenze negative sulla qualità dell'acqua e sull'ecologia delle acque.

6.7.1 Corsi d'acqua

La temperatura media dei corsi d'acqua è già sensibilmente aumentata negli ultimi decenni. Gli scenari idrologici mostrano che tale aumento continuerà soprattutto nei mesi estivi e nelle regioni alpine.

Alla sorgente di un corso d'acqua la temperatura dell'acqua che sgorga dal sottosuolo è simile alla temperatura media annua dell'aria. Costituiscono un'eccezione i ruscelli alimentati dall'acqua di fusione dei ghiacciai con una temperatura attorno a 0°C. Nel decorso verso valle la temperatura del corso d'acqua è influenzata soprattutto dall'irraggiamento solare e dalla temperatura dell'aria. Nei mesi estivi hanno un effetto rinfrescante la vegetazione che crea zone d'ombra lungo i corsi d'acqua, gli apporti di acqua di fusione e l'affioramento delle acque sotterranee. I corsi e specchi d'acqua che presentano portate o profondità elevate si riscaldano inoltre più lentamente. La temperatura dei deflussi dai laghi segue nel corso dell'anno quella della superficie lacustre e può quindi essere elevata nei mesi estivi. In inverno l'affioramento delle acque sotterranee e le portate elevate contrastano il raffreddamento.

L'utilizzo termico delle acque per il raffreddamento delle centrali nucleari e degli impianti industriali fa aumentare la temperatura dell'acqua, mentre il prelievo di calore per fini di riscaldamento la fa abbassare. Anche lo sfruttamento idrico incide sulla temperatura. Nelle centrali ad accumulazione l'acqua fredda proveniente dai bacini di ritenuta ad alta quota raggiunge le acque a più bassa quota, raffreddandole durante i mesi estivi. Poiché la dotazione idrica varia in funzione della produzione di energia elettrica, non si verificano solo forti oscillazioni del deflusso (deflussi discontinui) ma anche importanti oscillazioni innaturali

di temperatura («thermopeaking»), con una conseguente possibile alterazione dell'andamento giornaliero o anche dell'andamento annuale della temperatura delle acque a valle dei bacini di ritenuta. Anche nelle tratte di deflusso residuale la temperatura è influenzata dalla minore portata. A seconda della stagione e della situazione locale, un corso d'acqua può essere più caldo o più freddo rispetto a un deflusso naturale (Schmid 2019).

La temperatura dell'acqua è notevolmente aumentata soprattutto in estate

Negli ultimi decenni sono state sistematicamente esaminate le temperature d'acqua misurate in 52 corsi d'acqua della Svizzera. Per 31 stazioni le misurazioni sono disponibili dal 1970. In media, nel periodo 1979–2018 i corsi d'acqua si sono riscaldati di 0,33 °C a decade (fig. 6-16) e negli ultimi 20 anni di 0,37 °C a decade. Ciò equivale all'incirca al 90 per cento dell'aumento della temperatura media dell'aria nel periodo corrispondente (Michel et al. 2019). L'innalzamento delle temperature dell'acqua è stato attenuato dall'effetto rinfrescante dell'acqua di fusione proveniente dalle Alpi.

I corsi d'acqua si sono riscaldati soprattutto nei mesi estivi (0,58 °C a decade), mentre il riscaldamento nei mesi invernali è stato nettamente inferiore (0,22 °C a decade). L'aumento più pronunciato in estate si spiega con il maggiore riscaldamento dell'atmosfera in questa stagione. Nel contempo sono però anche diminuite le portate estive nell'Altipiano (cap. 6.2) e si sono moltiplicate le ondate di calore.

Superamento più frequente dei valori soglia critici di temperatura

Nelle estati torride del 2003, 2015 e 2018, in molte stazioni sono stati registrati nuovi record di temperatura, con 25 stazioni di misura su 83 che hanno segnato nuovi valori massimi nell'estate del 2018 (UFAM 2019a). Valori di gran lunga superiori ai 25 °C sono stati osservati tra l'altro nell'Alto Reno, nella Limmat, nella Thur e nel Rodano a valle del Lago Lemano.

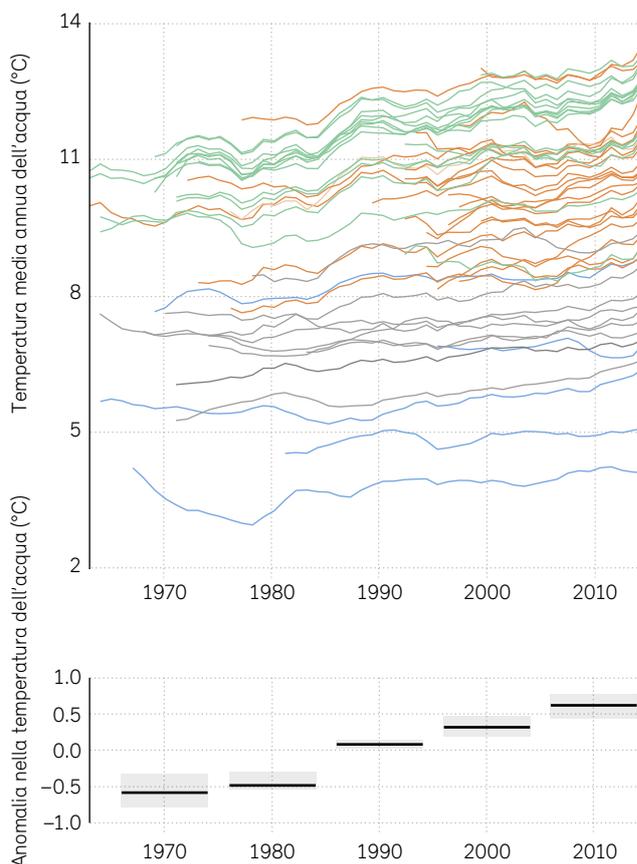
Temperature elevate delle acque possono mettere sotto stress numerosi organismi acquatici e, in casi estremi, causarne la morte. Anche la diffusione di determinate malattie è riconducibile all'aumento delle temperature dell'acqua (cap. 6.9.2). Come mostra la figura 6-17, dagli

anni Ottanta sempre più corsi e specchi d'acqua presentano temperature critiche, per esempio, per la diffusione della malattia renale proliferativa PKD nelle trote. Inoltre queste fasi calde durano sempre più a lungo. La somma dei giorni all'anno in cui le temperature superano i 15 °C è infatti aumentata mediamente di 20 giorni nell'arco di quattro decenni. In alcuni bacini il riscaldamento osservato è persino superiore (Michel et al. 2019).

Figura 6-16: Andamento osservato della temperatura dei corsi d'acqua

Le linee mostrano la media mobile su 5 anni della temperatura media annua dell'acqua, misurata in 52 stazioni. I colori rappresentano diversi tipi di corsi d'acqua: v. legenda. Sono rappresentate anche le anomalie della temperatura dell'acqua per decade a confronto con la media del periodo 1970–2018 (sotto). Nella maggior parte dei corsi d'acqua le temperature sono sensibilmente aumentate dagli anni Settanta.

- Fiumi a valle dei laghi dell'Altipiano e fiumi prealpini
- Fiumi e ruscelli nell'Altipiano e nel Giura
- Fiumi con bacino imbrifero alpino
- Fiumi con marcati deflussi discontinui



Fonte iconografica: Michel et al. (2019)

Figura 6-17: Superamento più frequente della temperatura dell'acqua di 15 °C

Il numero di giorni in cui vengono superati i 15°C in un corso d'acqua è un indicatore relativo all'insorgere della malattia renale proliferativa nelle trote.



Fonte iconografica: Michel et al. (2019), base di dati: UFAM, Cantone di Berna e Cantone di Zurigo

Figura 6-18: Variazione delle temperature dell'acqua nei corsi d'acqua dell'Altipiano, del Giura e delle Alpi

Variazioni medie delle temperature dell'acqua (mediana e intervallo di incertezza) per l'intero anno e per l'inverno e l'estate con (RCP2.6) e senza misure di protezione del clima (RCP8.5) per la metà del secolo (2055–2065) e verso la fine del secolo (2080–2090) a confronto con il periodo di riferimento (1990–2000). Sono stati esaminati i fiumi alpini Inn, Kander, Landwasser e Lonza e i fiumi dell'Altipiano e del Giura Birs, Broye, Eulach, Ergolz, Rietholzbach e Suze. In tutti i fiumi le temperature dell'acqua continueranno a salire.

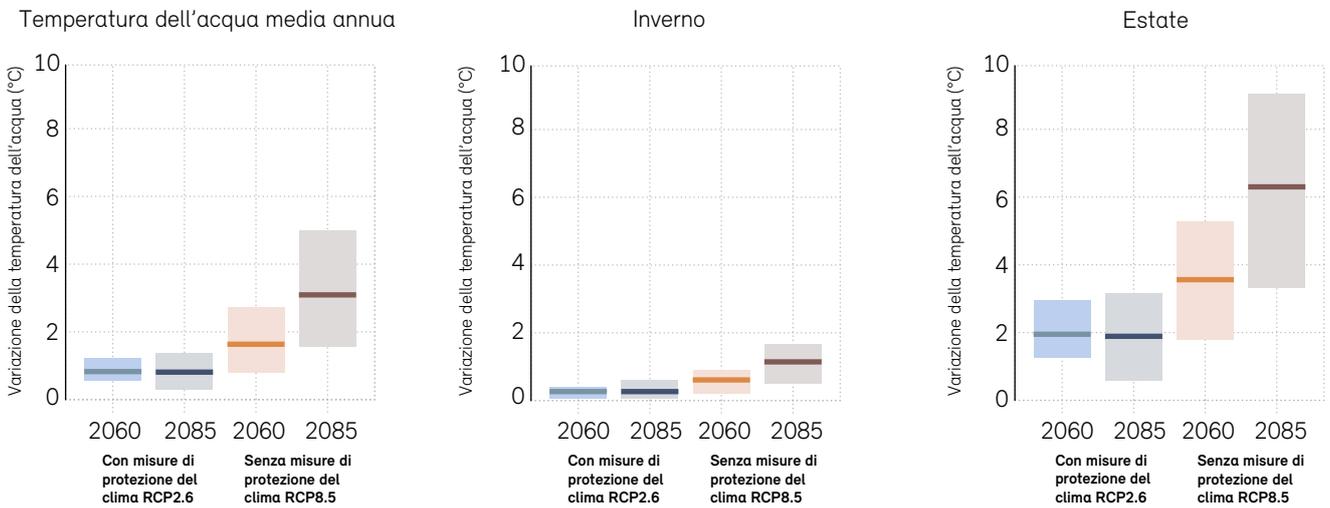
Con misure di protezione del clima RCP2.6

2060 2085

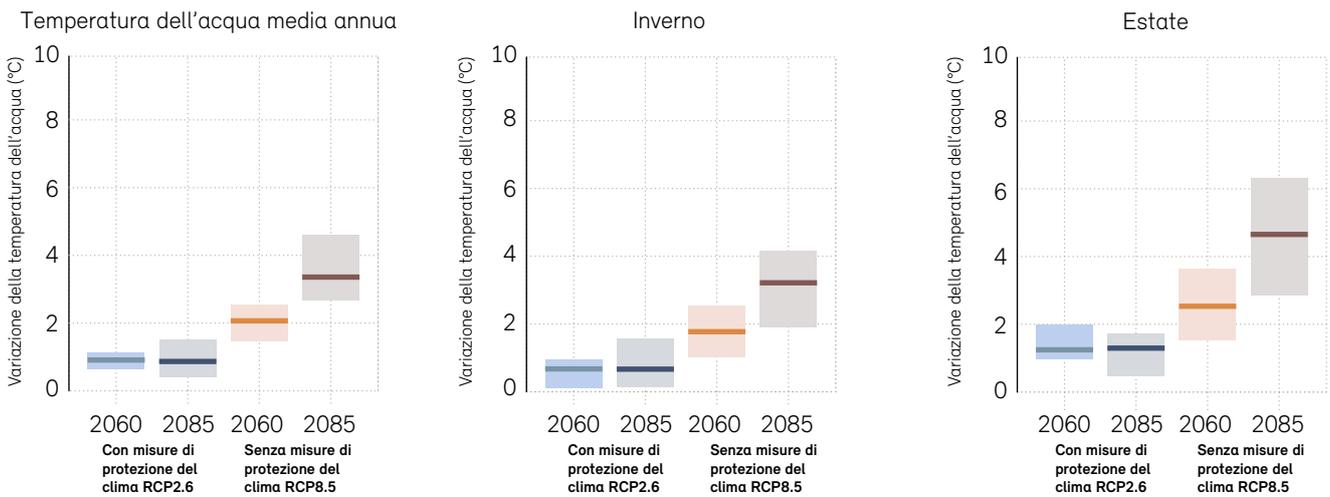
Senza misure di protezione del clima RCP8.5

2060 2085

Bacini imbriferi alpini



Bacini imbriferi dell'Altipiano e del Giura



Fonte iconografica: Michel et al. (i. E.)

Le temperature elevate dell'acqua complicano anche l'utilizzazione dell'acqua di raffreddamento: da un lato, con l'aumentare delle temperature la differenza utile si riduce e deve essere compensata con maggiori prelievi di acqua di raffreddamento. Dall'altro, la reimmissione di acqua di raffreddamento riscaldata nei corsi d'acqua non è più consentita al di sopra di una temperatura delle acque di 25 °C.⁴

Ulteriore forte aumento della temperatura dell'acqua in futuro

In futuro la temperatura annua media dei corsi d'acqua aumenterà nell'Altipiano e nelle Alpi. Per uno scenario con misure di protezione coerente del clima, i modelli calcolano un ulteriore riscaldamento di 0,85 °C entro la metà del secolo, escludendo ulteriori aumenti significativi dalla metà del secolo in poi (Michel et al. i. E.). Diverso il quadro in uno scenario senza misure di protezione del clima: entro la metà del secolo i modelli prevedono un riscaldamento di 2,1 °C nell'Altipiano e di 1,6 °C nei corsi d'acqua alpini, con valori che saliranno a 3,2 °C in tutti i corsi d'acqua entro la fine del secolo (fig. 6-18). Tale riscaldamento non è altro che il proseguimento delle tendenze osservate negli ultimi decenni (Michel et al. i. E.).

Per quanto riguarda le temperature stagionali dell'acqua, la differenza tra le Alpi e l'Altipiano/il Giura sarà più marcata rispetto alle temperature annue medie. In inverno i corsi d'acqua dell'Altipiano si riscaldano sensibilmente, senza misure di protezione del clima di oltre 3 °C entro la fine del secolo. Nelle Alpi le temperature dell'acqua in inverno si alzeranno solo di 1 °C circa, a fronte di un aumento di 4 °C della temperatura dell'aria senza misure di protezione del clima. Qui le portate nei mesi invernali provengono principalmente dalle acque sotterranee o dal crescente scioglimento della neve, che eserciteranno un effetto rinfrescante.

Nei mesi estivi i corsi d'acqua si riscaldano ulteriormente: senza misure di protezione del clima, entro la metà del secolo già di circa 2,5 °C nell'Altipiano e di 3,6 °C nelle Alpi ed entro la fine del secolo addirittura di 3,1 – 6,1 °C nell'Altipiano e di 4,1 – 8,1 °C nelle Alpi. Un fattore determinante, oltre all'aumento della temperatura dell'aria,

sarà il fatto che le precipitazioni e le portate estive diminuiranno, e soprattutto nelle regioni alpine, si ridurrà il contributo rinfrescante dell'acqua di fusione. Il suolo nelle Alpi si riscalderà inoltre maggiormente a causa dello scioglimento anticipato del manto nevoso. È per questo che nelle acque alpine le temperature aumenteranno in misura addirittura maggiore rispetto alla temperatura dell'aria.

Le dimensioni dei bacini imbriferi esaminati non hanno alcuna influenza sull'aumento calcolato delle temperature. Va comunque segnalato che per i corsi d'acqua di piccole dimensioni non sono disponibili né misurazioni della temperatura né scenari per il futuro. Per tale ragione non si può escludere che l'aumento delle temperature nei corsi d'acqua di piccole dimensioni avrà un andamento diverso ed eventualmente persino più marcato. Non sono stati considerati neppure i grandi fiumi dell'Altipiano direttamente a valle dei grandi laghi, dove la temperatura è influenzata in misura determinante dall'acqua effluente da questi ultimi. Poiché senza misure di protezione del clima l'acqua superficiale nei laghi si riscalderà nei mesi estivi di 3 – 4 °C entro la fine del secolo (cap. 6.7.2), gli effluenti si riscaldano in maniera analoga.

6.7.2 Laghi

Negli ultimi decenni le acque superficiali e profonde dei laghi sono diventate più calde, lo strato gelato invernale è diminuito e la stratificazione stabile dell'acqua nei mesi estivi dura più a lungo – tutte tendenze che continueranno con l'avanzare dei cambiamenti climatici e che in parte finiranno per modificare anche le condizioni di miscelazione dei laghi, importanti sotto il profilo ecologico.

La temperatura dell'acqua nei laghi dipende dall'irraggiamento solare, dalla temperatura dell'aria locale, dalla temperatura d'acqua degli affluenti e dalla frequenza di eventi estremi quali ondate di calore, tempeste e piene ed è inoltre influenzata dalla morfologia e dalla torbidità del lago. La distribuzione della temperatura all'interno di un lago non è omogenea. Nel semestre estivo i laghi presentano una stratificazione termica omogenea, con acqua più calda nello strato superficiale fino ad alcuni metri di profondità e acque profonde più fredde (stagione estiva).

⁴ Sono possibili eccezioni a determinate condizioni, cfr. allegato 3.3 numero 21 capoverso 4 lettera b OPAC.

Incidenza dei cambiamenti climatici sulle temperature dei corsi e specchi d'acqua: come evolveranno in futuro le temperature delle acque nei corsi d'acqua e nei laghi svizzeri?

Procedura

Con i modelli Snowpack/Alpine3D (Lehning et al. 2006) e StreamFlow (Gallice et al. 2016) sono stati calcolati scenari di temperatura a titolo esemplificativo per sei corsi d'acqua nell'Altipiano svizzero (Birs, Broye, Eulach Ergolz, Rietholzbach und Suze) e per quattro in territorio alpino (Inn, Kander, Landwasser, Lonza). I risultati sono riassunti nella figura 6-18. In ragione dei lunghi tempi di calcolo, sette proiezioni climatiche RCP8.5 e quattro proiezioni climatiche RCP2.6 hanno potuto essere considerate per un periodo di riferimento più breve (1990-2000) e per due periodi decennali futuri (2055-2065 e 2080-2090).

Le temperature e i processi di miscelazione in 29 laghi sono stati calcolati in maniera continuativa con il modello fisico unidimensionale Simstrat per gli anni dal 1981 al 2099 in relazione ai tre scenari con misure di protezione coerente del clima (RCP2.6), media protezione del clima (RCP4.5) e senza misure di protezione del clima (RCP8.5). I laghi selezionati sono situati a quote da 200 m s.l.m. a 1800 m s.l.m. e hanno un volume compreso tra 0,004 e 89 km³.

I capitoli 6.7.1 e 6.7.2 si basano principalmente sui risultati del progetto.

Progetto Hydro-CH2018 del laboratorio di criosfera del Politecnico Federale di Losanna (PFL), del gruppo di ricerca Analisi applicata dei sistemi dell'istituto di ricerca sull'acqua Eawag e dell'Istituto per la dinamica della superficie terrestre dell'Università di Losanna

Soltanto quando la temperatura e quindi la densità delle acque superficiali e sotterranee risultano omogenei, i due strati possono miscelarsi. Tale circolazione influisce sulla distribuzione del calore e delle sostanze all'interno di un lago. La frequenza e l'intensità di miscelazione del corpo idrico sono fondamentali per l'ecologia lacustre in quanto determinano il raggiungimento di un equilibrio nelle concentrazioni di sostanze (nutrienti, ossigeno e inquinanti) tra le acque profonde e quelle superficiali (cap. 6.9.1).

A causa della densità anomala delle acque si verificano stagnazioni di origine termica anche in inverno. Una stagnazione invernale ha luogo quando la temperatura delle acque superficiali scende al di sotto di 4 °C, la densità diminuisce e le acque superficiali fredde non riescono più a scendere in profondità. Nello strato profondo si troverà invece acqua calda fino a un massimo di 4 °C. Questa distribuzione inversa della temperatura è il presupposto per la formazione di ghiaccio.

Lo strato d'acqua superiore si è già riscaldato

Negli ultimi decenni lo strato d'acqua superiore dei laghi svizzeri ha registrato un riscaldamento medio nell'ordine di 0,4 °C per decennio e di circa 2 °C nel periodo 1960 – 2010 (Råman Vinnå et al. 2021); si sono inoltre osservati cambiamenti a livello di miscelazione. Per esempio, a causa di ondate di calore come quella dell'estate 2003 si è manifestata una più forte e prolungata stagnazione estiva. In alcuni laghi gli inverni miti del 2006 e 2007 hanno impedito che la miscelazione stagionale raggiungesse le acque profonde. Dagli anni Sessanta, il congelamento completo dei laghi svizzeri nell'Altipiano è drasticamente diminuito (Hendricks Franssen e Scherrer 2008).

Ulteriore sensibile riscaldamento

La futura evoluzione delle condizioni di temperatura e di stratificazione è stata modellata per 29 laghi (fig. 6-19). In tutti i laghi si prevede un ulteriore aumento della temperatura dello strato d'acqua superiore (fino a 1 m di profondità): in uno scenario senza misure di protezione del clima, di 3 – 4 °C entro la fine del secolo nella maggior parte dei laghi; con misure di protezione del clima, soltanto di 1 °C

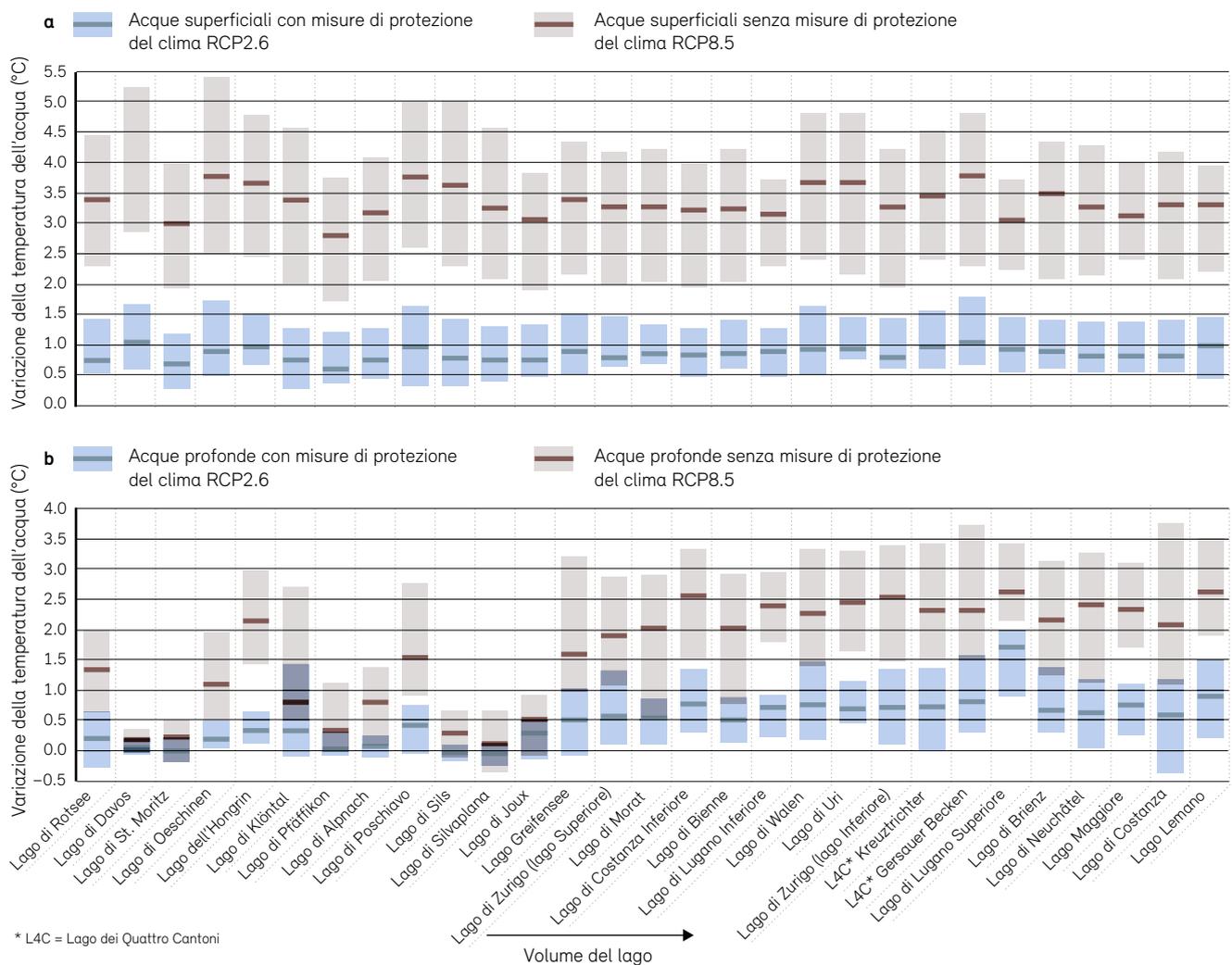
circa. Tra i laghi esaminati le differenze nella temperatura superficiale sono solo minime. L'evoluzione è molto simile a quella dei corsi d'acqua.

Per quanto riguarda il riscaldamento delle acque profonde si prevedono invece grandi differenze da un lago all'altro. Se in inverno a raffreddarsi in profondità fino a 4 °C saranno laghi di piccole dimensioni o ad alta quota, ciò

dovrebbe comportare solo un lieve aumento della temperatura delle acque profonde. Nel caso di laghi più grandi e senza misure di protezione del clima, i modelli mostrano entro la fine del secolo un riscaldamento delle acque profonde compreso tra 1,5 – 2,5 °C. Le differenze nel riscaldamento delle acque profonde si spiegano con i diversi effetti dei cambiamenti climatici sulla capacità di miscelazione (cfr. sotto).

Figura 6-19: Scenari di temperatura dell'acqua per 29 laghi svizzeri

Sono rappresentati i cambiamenti modellati delle temperature dell'acqua (mediana e intervallo di incertezza) alla fine del secolo (2071-2099) in superficie (fino a 1 m di profondità) (a) in corrispondenza del fondale (1 m sopra il fondale) (b) rispetto al periodo di riferimento (1981 – 2010). Sono stati considerati gli scenari con (RCP2.6) e senza misure di protezione del clima (RCP8.5). I laghi sono rappresentati in ordine di volume. Le temperature delle acque superficiali aumenteranno in tutti i laghi. Nelle acque profonde il riscaldamento dipende dalla capacità di miscelazione dei laghi.



Fonte iconografica: rappresentazione propria sulla base di Råman Vinnå et al. (2021)

Cambierà la capacità di miscelazione dei laghi

A causa dei cambiamenti nelle temperature dell'acqua, la capacità di miscelazione dei laghi cambierà sotto diversi aspetti: le condizioni di stratificazione stabile nei mesi estivi dureranno più a lungo; le stagnazioni invernali si verificheranno invece meno frequentemente e diminuiranno anche la formazione e la durata degli strati di ghiaccio (fig. 6-20).

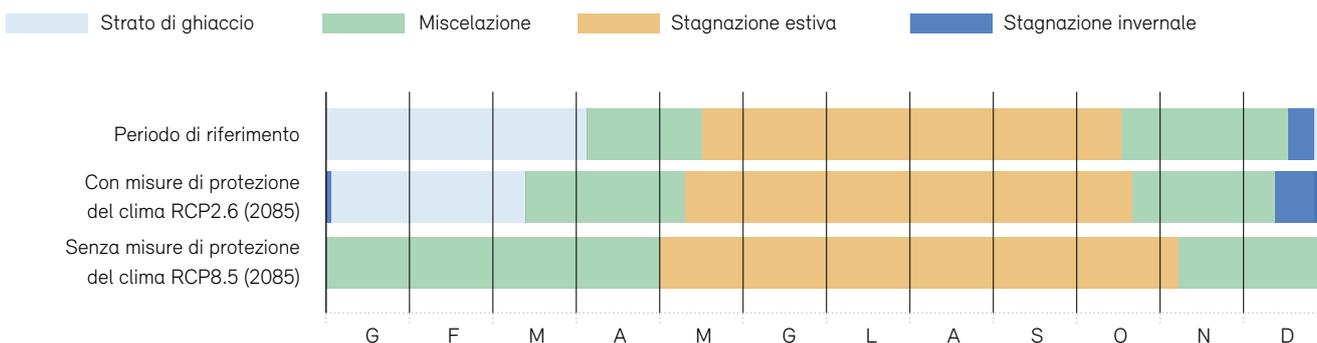
I laghi che si miscelano due volte all'anno (nelle stagioni intermedie) mentre in inverno e in estate presentano una stagnazione vengono classificati come regime dimittico. In tali laghi, che oggi ghiacciano nei mesi invernali, il primo effetto di un costante riscaldamento del clima sarà il venir meno dello strato gelato. In seguito scomparirà anche la stagnazione invernale e il lago si miscelerà una sola volta, divenendo quindi monomittico. In presenza di un ulteriore riscaldamento del lago – a seconda delle sue caratteristiche come per esempio la profondità o l'esposizione ai venti – la miscelazione completa potrebbe continuare a verificarsi una volta all'anno, solo ogni due anni (oligomittico) oppure in casi estremi, qualora le sostanze disciolte dovessero stabilizzare ulteriormente la colonna d'acqua, scomparire del tutto (meromittico).

L'evoluzione della capacità di miscelazione dei laghi dipende dall'altitudine, ma anche da ulteriori caratteristiche quali la loro morfologia o l'esposizione ai venti. I laghi ad alta quota (p. es. il lago di Silvaplana), come pure i laghi di piccole dimensioni a bassa quota (p. es. il lago di Alpnach), resteranno dimittici in tutti gli scenari climatici, ma con una stagnazione invernale molto più breve e una formazione assente o ridotta dello strato gelato. A causa del regime di miscelazione modificato, in tali laghi si verificheranno anche aumenti solo minimi della temperatura delle acque profonde. La perdita dello strato gelato in tali laghi potrebbe tuttavia far sì che il prolungamento della stratificazione estiva e il riscaldamento dello strato superficiale siano superiori a quanto avverrebbe in conseguenza del solo aumento della temperatura dell'aria.

A seconda dello scenario climatico, i laghi di medie dimensioni situati a media quota che oggi si ricoprono regolarmente di ghiaccio, come il lago di Joux (fig. 6-20) o il lago di Klöntal, diventeranno totalmente o parzialmente monomittici e, almeno nello scenario senza misure di protezione del clima, perderanno in ampia misura lo strato gelato. Lo stesso vale per i laghi di medie dimensioni situati a quote più basse, con il lago di Pfäffikon, che però già oggi

Figura 6-20: Cambiamento della stratificazione stagionale e dello strato gelato nel lago di Joux

Sono rappresentate le mediane modellate della formazione dello strato gelato, della miscelazione e della stagnazione estiva e invernale nel corso dell'anno per il periodo di riferimento (1981 – 2010) e fino alla fine del secolo (2071 – 2099) per gli scenari con (RCP2.6) e senza misure di protezione del clima (RCP8.5). Con la protezione del clima la durata dello strato gelato diminuisce, mentre senza misure di protezione del clima in inverno non si formerà più alcuno strato gelato sopra il lago. Soprattutto nello scenario senza misure di protezione del clima, la durata della stagnazione estiva si prolungherà di 40 giorni circa. Senza misure di protezione del clima il lago passerà da un regime dimittico con miscelazione in primavera e autunno a un regime monomittico con miscelazione nel semestre invernale.

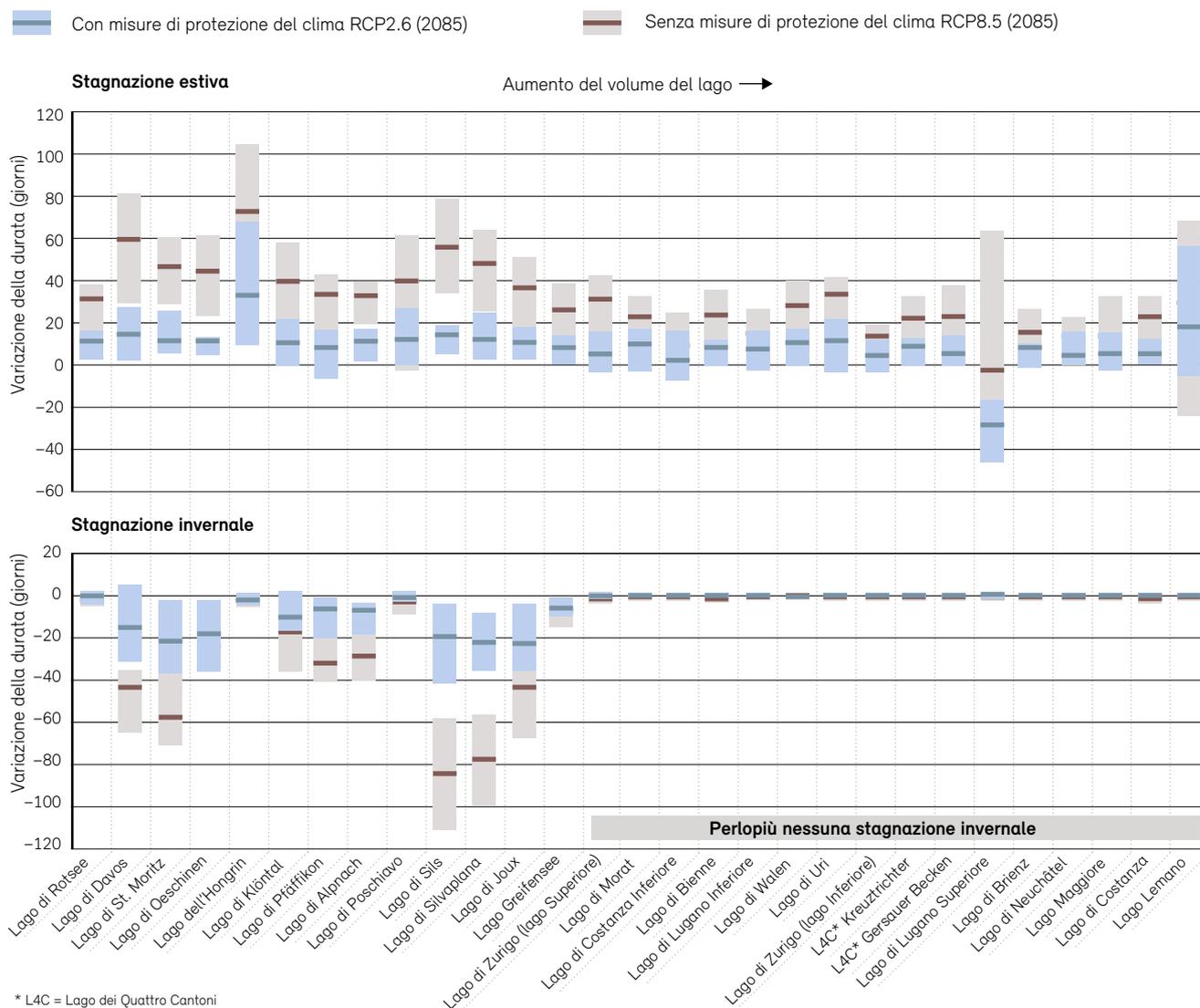


non ghiacciano affatto o solo raramente. In un lontano futuro, i calcoli dei modelli indicano il passaggio a un regime monomittico per sette laghi dimittici su otto nello scenario senza misure di protezione del clima (RCP8.5), a fronte di tre laghi su otto nello scenario con misure di protezione coerente del clima (RCP2.6).

I grandi laghi a bassa quota sono già oggi monomittici od oligomittici e manterranno ampiamente tale regime. La temperatura delle loro acque profonde aumenterà però in misura maggiore rispetto ai laghi dimittici. È interessante notare che i calcoli dei modelli non mostrano alcun cambiamento significativo della frequenza di miscela-

Figura 6-21: Cambiamento della durata della stagnazione estiva e invernale in 29 laghi svizzeri

Sono rappresentati la mediana e l'intervallo di incertezza per il cambiamento della durata della stagnazione estiva (sopra) e invernale (sotto) per i 29 laghi esaminati (ordinati per volume). Sono stati considerati gli scenari con (RCP2.6) e senza misure di protezione del clima (RCP8.5) per la fine del secolo (2071 – 2099) rispetto al periodo di riferimento (1981 – 2010). Mentre la durata della stagnazione estiva tende generalmente ad aumentare, quella della stagnazione invernale si riduce. I cambiamenti simulati sono maggiori nei laghi di dimensioni più piccole. Non si prevedono futuri cambiamenti per i laghi che nel modello mostrano già un'assenza di stagnazione invernale nel periodo di riferimento.



Fonte iconografica: rappresentazione propria sulla base di Michel et al. (i. E.).

zione per la maggior parte di questi laghi. L'incertezza di previsione riguardo alla profondità e frequenza della miscelazione è relativamente elevata per i laghi sulla linea di confine tra regime monomittico e oligomittico. Negli ultimi decenni in alcuni laghi si è già osservato un calo della miscelazione (p. es. lago di Zurigo; North et al. 2014), mentre altri non hanno subito variazioni (p. es. Lago Lemano, Schwefel et al. 2016). Nel lago di Costanza è stata osservata una minore miscelazione negli inverni particolarmente caldi (Straile et al. 2010), ma senza alcuna chiara tendenza nell'arco di 30 anni (Rhodes et al. 2017). Una miscelazione meno frequente riduce l'apporto di ossigeno nelle acque profonde, con gravi conse-

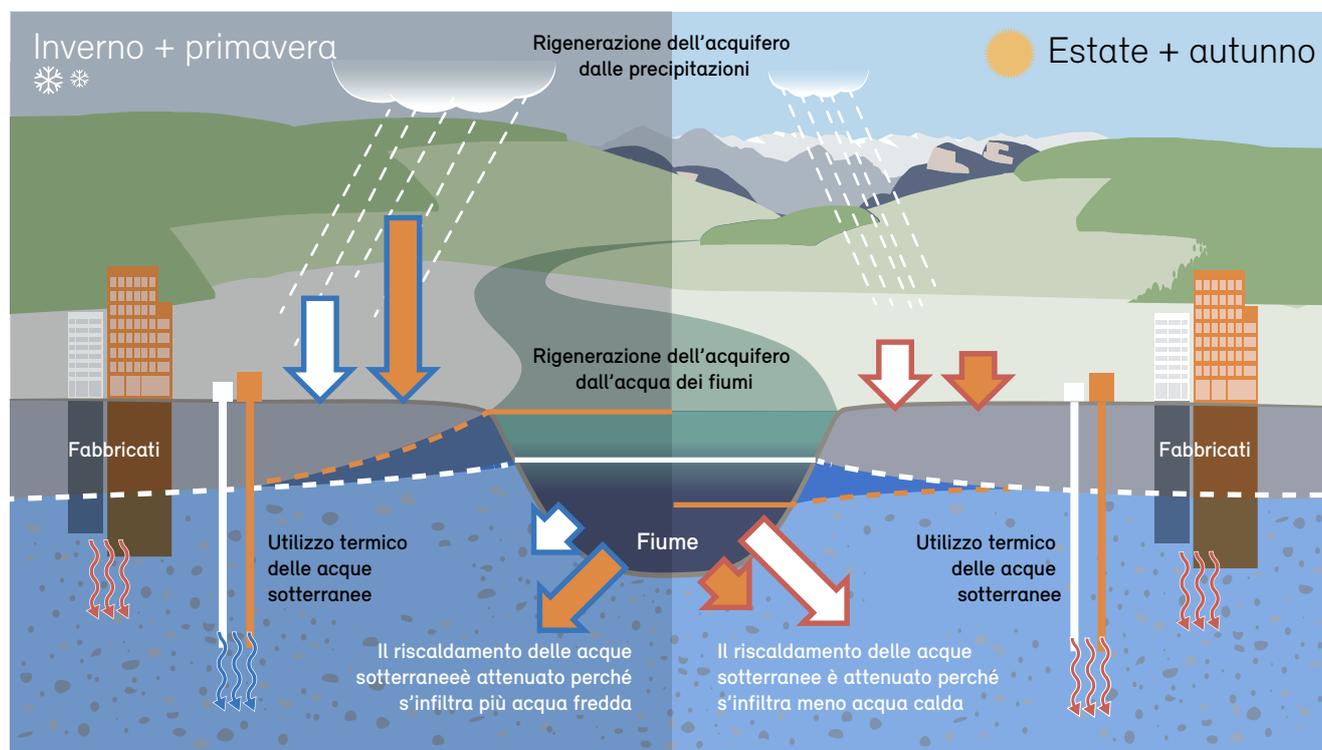
guenze sul piano ecologico (cap. 6.9.1). In questi laghi è dunque importante osservare attentamente l'andamento della profondità e della frequenza di miscelazione (Gaudard et al. 2019).

6.7.3 Acque sotterranee

In tutta la Svizzera non si osserva ancora una chiara tendenza al riscaldamento delle acque sotterranee, diversamente da quelle superficiali. La temperatura delle acque sotterranee nelle aree urbane è però già sensibilmente aumentata a causa dell'influenza antropica. Anche in futuro ci saranno grandi differenze locali nella temperatura delle acque sotterranee.

Figura 6-22: Flussi di calore e di freddo nelle acque sotterranee

La figura rappresenta i flussi di calore e di freddo nell'ambito della rigenerazione di acquiferi di medie e piccole dimensioni nelle valli a bassa quota della Svizzera, per esempio lungo la Birs, la Suze o l'Eulach. In inverno aumenterà la rigenerazione dell'acquifero con acqua fredda, mentre in estate diminuirà la rigenerazione dell'acquifero con acqua calda. Questi effetti a retroazione negativa ritarderanno l'aumento delle temperature delle acque sotterranee a causa dei cambiamenti climatici. Aumenterà invece l'apporto di calore antropico.



Fonte iconografica: rappresentazione propria secondo Epting et al. (2020)

La temperatura delle acque sotterranee reagisce ai cambiamenti climatici molto più lentamente di quella delle acque superficiali. Essa presenta differenze a livello spaziale e temporale e dipende dalla temperatura media annua dell'aria, dalle condizioni idrogeologiche, dai processi di rigenerazione dell'acquifero e dalle influenze antropiche. Se le acque sotterranee vicine alla superficie sono formate dalle precipitazioni, la loro temperatura è determinata da quella dell'aria, delle precipitazioni e del suolo. In caso di rigenerazione per infiltrazione dell'acqua dei fiumi, è determinante la temperatura di quest'ultima. Nelle regioni urbanizzate la temperatura delle acque sotterranee subisce una forte influenza antropica sotto for-

ma di utilizzo termico (prelievo di calore o di freddo) e radiazione termica delle costruzioni vicine alle acque sotterranee (Epting et al. 2017).

Aumento ritardato rispetto alla temperatura dell'aria

Nel periodo 2000 – 2016, poco meno della metà delle 65 stazioni di misura distribuite in tutta la Svizzera dell'Osservazione nazionale delle acque sotterranee NAQUA mostra un aumento delle temperature delle stesse. Solo in poche stazioni è stato registrato un raffreddamento (Schürch et al. 2018). Il periodo considerato (15 anni) è però breve. L'aumento previsto dagli scenari climatici della temperatura media annua dell'aria si

Evoluzione delle temperature negli acquiferi in rocce incoerenti in Svizzera: quali sono i principali fattori d'influenza sull'evoluzione delle temperature degli acquiferi e come evolveranno in futuro le temperature delle acque sotterranee?

Procedura

Per 35 acquiferi in cinque regioni della Svizzera (Basilea-Città, Basilea-Campagna, Bienne, Winterthur e Davos) sono stati esaminati in dettaglio gli effetti dei cambiamenti climatici sulla rigenerazione dell'acquifero e sulla temperatura e ne sono stati ricavati parametri chiave rappresentativi (p. es. geometrie degli acquiferi, caratteristiche di accumulo, tassi di rigenerazione dell'acquifero e relativi tempi di permanenza). Da un lato gli acquiferi in area urbana sono stati modellati per mezzo di modelli 3D di trasporto del calore ad alta risoluzione spaziale e temporale. Dall'altro, in cooperazione con il PFL e con il modello Alpine3D, sono stati valutati l'andamento delle precipitazioni e dei deflussi nonché l'evoluzione delle temperature nei tre scenari di emissione di protezione coerente del clima (RCP2.6), media protezione del clima (RCP4.5) e senza misure di protezione del clima (RCP8.5) per i 35 acquiferi. Le valutazioni hanno permesso di descrivere la sensibilità delle temperature delle acque sotterranee in relazione ai principali processi di rigenerazione dell'acquifero per diversi scenari di emissione del futuro.

Risultati principali

- Gli effetti sulle temperature delle acque sotterranee dipendono soprattutto dagli spostamenti stagionali della rigenerazione dell'acquifero. Uno spostamento degli eventi di precipitazione e di piena dai mesi estivi a quelli invernali va infatti di pari passo con un aumento della rigenerazione dell'acquifero in stagioni relativamente «fredde».
- Nel caso di acquiferi urbani e poco profondi con spessore ridotto, come per esempio a Davos, si può prevedere una maggiore influenza sulle temperature delle acque sotterranee. Per contro, i cambiamenti nelle temperature delle risorse idriche sotterranee più profonde, come per esempio a Bienne, o che presentano distanze in parte elevate tra la superficie del terreno e la falda freatica, come per esempio a Winterthur, dovrebbero verificarsi solo in misura molto attenuata e su lunghi periodi di osservazione.

Le affermazioni riguardo al futuro contenute nei capitoli 6.4 e 6.7.3 si basano sui risultati del progetto.

ripercuoterà con effetto ritardato anche sulle temperature delle acque sotterranee. Quanto più un acquifero è spesso e profondo, tanto più lenta sarà la sua reazione. La tendenza al riscaldamento è tuttavia attenuata dal fatto che la rigenerazione dell'acquifero avverrà sempre più nelle stagioni più fredde. Ciò vale anche per la rigenerazione dell'acquifero per infiltrazione dei corsi d'acqua, in quanto a causa del calo atteso delle portate nei mesi estivi gran parte dell'infiltrazione avverrà nella stagione invernale. A ciò si aggiungerà inoltre un contributo inizialmente più elevato di acqua di fusione (Epting et al. 2020). In che misura questi effetti a retroazione negativa saranno in grado di contrastare o attenuare il riscaldamento dipende soprattutto da condizioni locali quali l'altitudine, la tipologia di rigenerazione dell'acquifero ecc. (fig. 6-22).

Forte aumento delle temperature delle acque sotterranee nelle aree urbane

Nelle aree urbane la temperatura delle acque sotterranee continuerà anche in futuro a essere condizionata dalle influenze antropiche dirette (Epting e Huggenberger 2013). I dati di diverse stazioni di misura a Basilea mostrano infatti che la temperatura delle acque sotterranee è salita mediamente di $3,0 \pm 0,7$ °C nel periodo dal 1993 al 2016. Nelle aree maggiormente urbanizzate le acque sotterranee hanno raggiunto temperature fino a 18 °C (Epting et al. 2020 e 2021). A causa dei cambiamenti climatici, soprattutto nelle aree urbane aumenterà il fabbisogno di raffreddamento di economie domestiche, attività industriali e commerciali, con un conseguente maggiore utilizzo termico del sottosuolo soprattutto per il raffreddamento. Va inoltre considerato il calore residuo delle strutture sotterranee, che aumenterà anch'esso con l'espandersi della superficie di insediamento. Ciò causerà un ulteriore aumento delle temperature delle acque sotterranee nelle città.

Maggiori informazioni e riferimenti sul tema «temperatura delle acque»

- Epting J. et al. 2020: Ist-Zustand und Temperatur-Entwicklung Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen. Hydro-CH2018 Bericht.
- Michel A. et al. (i. E.): Water temperature in lakes and rivers. Hydro-CH2018 report.
- Michel A. et al. 2019: Stream temperature evolution in Switzerland over the last 50 years.
- Råman Vinnå L et al. 2021: The vulnerability of lakes along an altitudinal gradient to climate change.

6.8 Nutrienti e sostanze nocive nelle acque

I cambiamenti climatici modificano il trasporto di nutrienti e sostanze nocive e la loro concentrazione nelle acque. La disponibilità e il trasporto di sedimenti aumentano soprattutto in alta montagna.

6.8.1 Nutrienti e sostanze nocive

Il riscaldamento fa accelerare le reazioni biochimiche, con il risultato che anche le sostanze nocive si degradano più rapidamente. L'aumento delle forti precipitazioni e delle fasi di siccità potrebbe però anche condurre a maggiori immissioni di nutrienti e di sostanze nocive nelle acque, facendone salire la concentrazione.

Le acque superficiali e sotterranee contengono sostanze disciolte o sospese. Per quanto riguarda le sostanze nocive e i nutrienti problematici per la qualità dell'acqua, prevalgono oggi le immissioni puntuali dallo smaltimento delle acque urbane e le immissioni diffuse provenienti dall'agricoltura, dagli insediamenti e dai trasporti. I cambiamenti climatici influiscono sia sulle fonti antropiche sia sui processi biologici, chimici e fisici di trasporto e di trasformazione in atto nell'ambiente e nelle acque.

Cambiamento delle fonti di nutrienti e sostanze nocive

Si prevede che le fonti di nutrienti e di sostanze nocive saranno influenzate dai cambiamenti climatici soprattutto indirettamente attraverso l'adozione di misure di adattamento da parte dell'agricoltura. Il periodo vegetativo si allungherà, verranno coltivate colture e varietà diverse, l'irrigazione aumenterà e gli organismi nocivi e le malattie delle piante si modificheranno. Questa evoluzione comporterà anche effetti sui prodotti fitosanitari e sui concimi impiegati. Un effetto altrettanto importante sulle fonti di nutrienti e di sostanze nocive è esercitato dai provvedimenti normativi, per esempio per l'autorizzazione di sostanze, dalle condizioni quadro economiche e dalla politica agricola.

Accelerazione delle reazioni biochimiche

I nutrienti e le sostanze nocive si degradano e si trasformano sulle piante, nel suolo e nelle acque sotterranee. Tali processi avvengono dal punto di vista biologico per mezzo di microrganismi o tramite reazioni chimiche. Queste ultime sono influenzate dalla temperatura e dal-

la disponibilità di acqua e ossigeno. Un aumento di temperatura di 2–4 °C accelera solitamente le reazioni del 10–40 per cento (Davidson e Janssens 2006) fintantoché non viene superata la temperatura ottimale per i microrganismi coinvolti. Anche un aumento della temperatura del suolo favorisce reazioni più rapide nel suolo, a condizione che questo non sia troppo umido e contenga ancora ossigeno a sufficienza (Schlesinger et al. 2015). L'aumento di temperatura e il più elevato tenore di CO₂ nell'atmosfera accelerano inoltre la crescita delle piante, aumentano l'assorbimento di nutrienti e favoriscono l'attività dei batteri del suolo (Hagedorn et al. 2018).

Tendenzialmente, i cambiamenti climatici accelereranno quindi la degradazione e la trasformazione dei nutrienti e delle sostanze nocive nel suolo e nelle acque sotterranee. In generale, una più rapida degradazione delle sostanze nocive ha effetti positivi sull'ecologia delle acque, sempre che non ne risultino prodotti di degradazione problematici e altamente mobili, in grado di raggiungere rapidamente le acque. Mentre l'accelerazione dei processi di degradazione è evidente nella stagione fredda, in estate risulta frenata dal calo atteso dell'umidità del suolo e dai più frequenti periodi di siccità e di canicola (Schlesinger et al. 2015). Questo indebolimento varia notevolmente in funzione della regione, del suolo e della sua utilizzazione (Benateau et al. 2019).

I cambiamenti climatici fanno aumentare il trasporto di sostanze nelle acque

L'aumento atteso delle precipitazioni intense quale risultato dei cambiamenti climatici causerà un maggiore ruscellamento superficiale, un flusso d'acqua preferenziale nel suolo e l'erosione del suolo. L'immissione nelle acque di molti prodotti fitosanitari o del fosforo utilizzato in agricoltura, ma anche di particelle di suolo eroso, microplastiche emesse dall'usura degli pneumatici e altri inquinanti provenienti da strade e superfici impermeabilizzate aumenterà sempre più a causa di questi processi idrologici. I cambiamenti climatici faranno quindi aumentare il trasporto di particelle naturali così come quello di nutrienti e di sostanze nocive.

Un'altra sostanza problematica, soprattutto per l'acqua potabile, sono i nitrati. Soprattutto in inverno, quando avviene la rigenerazione dell'acquifero, l'eccesso di nitra-

ti non assorbiti dalle piante durante il periodo vegetativo viene immesso dal terreno nelle acque sotterranee. Con l'intensificarsi della rigenerazione dell'acquifero nei mesi invernali aumenta quindi anche la possibilità di trasporto dei nitrati. Nel bacino della Broye, in uno scenario senza misure di protezione del clima, si prevede per esempio un aumento del dilavamento dei nitrati del 44 per cento nei mesi invernali, mentre per i mesi estivi si prevede, secondo il presente studio, un calo del 25 per cento (Zarrineh et al. 2020). Se l'aumento del dilavamento dei nitrati nella stagione invernale è un dato di fatto, l'andamento nei mesi estivi risulta meno evidente. Fintantoché le colture agricole riescono ad assorbire tutti i nitrati, questi non vengono dilavati. A seconda dello sfruttamento agricolo, il dilavamento dei nitrati potrebbe però aumentare anche nella stagione estiva, per esempio se a causa della crescente siccità il periodo di coltivazione dovesse divenire più breve o se la produttività dovesse calare, nel qual caso le piante assorbirebbero meno nitrati. In un tale scenario, l'eccesso di nitrati nel suolo potrebbe essere dilavato ancora nei mesi estivi da eventuali forti precipitazioni oppure nella successiva stagione autunnale e invernale (Hunkeler et al. 2020).

Minore evaporazione durante le fasi di magra

Poiché sul finire dell'estate e nei mesi autunnali le portate calano sensibilmente, in queste stagioni avviene una minore evaporazione soprattutto delle acque di scarico provenienti dall'industria e dagli insediamenti. Ciò determina una maggiore concentrazione di inquinanti nei corsi d'acqua, per esempio microinquinanti contenuti in farmaci e cosmetici, che può rivelarsi problematica per molti organismi acquatici. Quanto più piccolo è un corso d'acqua, tanto più critica sarà dunque l'immissione di acque reflue comunali per la qualità chimica dell'acqua. Per quanto riguarda i microinquinanti, il potenziamento avviato di circa 140 impianti di depurazione contrasterà questo effetto per mezzo di un trattamento supplementare. Nel contempo queste immissioni aumenteranno la portata d'acqua, con possibili effetti positivi sull'ecologia delle acque durante i periodi di siccità.

6.8.2 Sedimenti

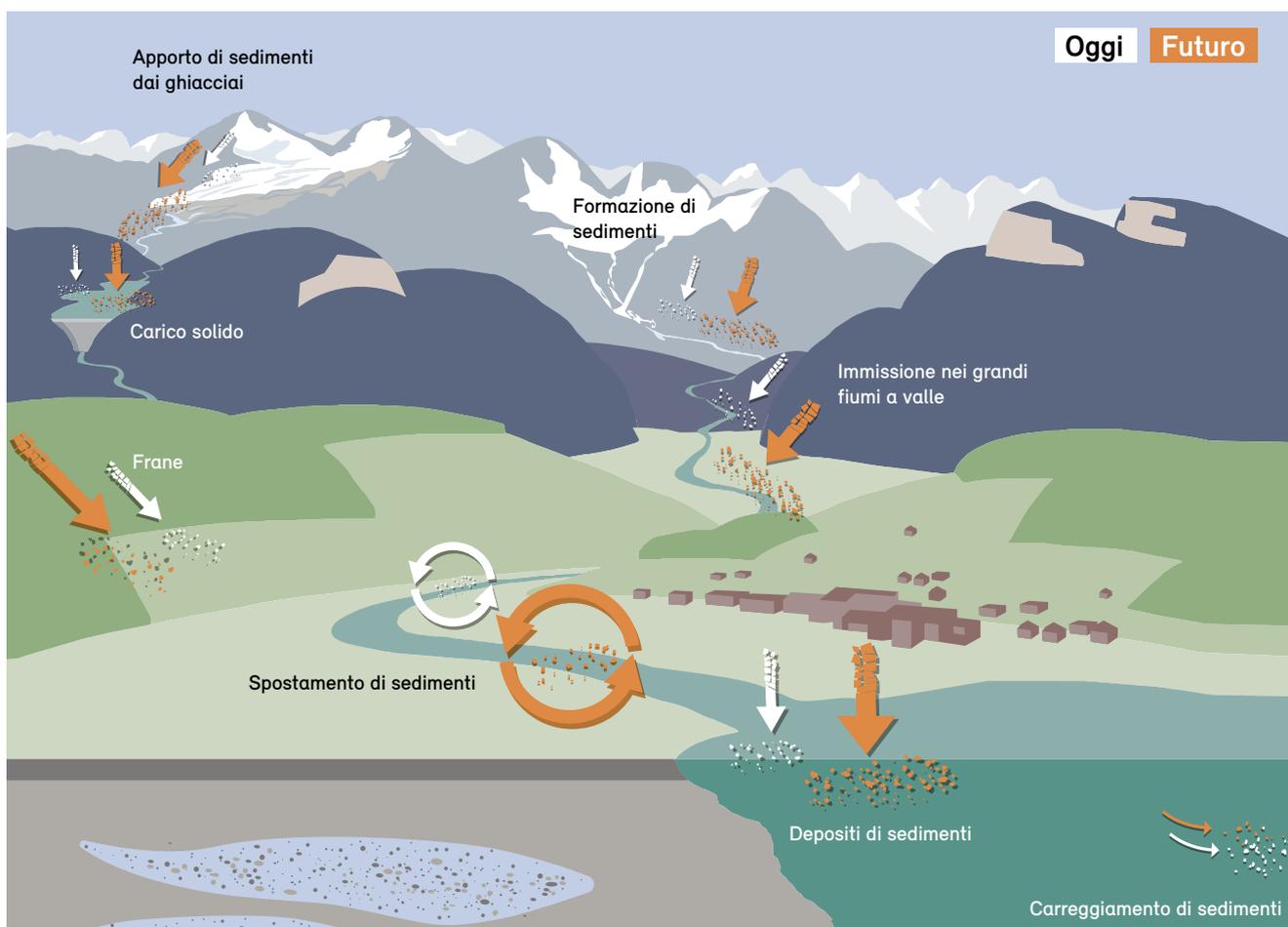
Con lo scongelamento del permafrost e l'aumento delle forti precipitazioni, aumentano i sedimenti mobilizzati nelle Alpi. In che modo l'aumento cambierà il trasporto di sedimenti nei grandi fiumi non è ancora del tutto chiaro, poiché dipenderà soprattutto dall'evoluzione delle portate di piena.

Con il termine sedimento si intendono pietre, ghiaia, sabbia, limo e argilla che vengono trasportati nelle acque superficiali in presenza di portate elevate. Per effetto dello scongelamento del permafrost e dello scioglimento dei ghiacciai, sulle montagne aumenterà la disponibilità di sedimenti che possono essere mobilitati da grandi eventi di precipitazione. L'incremento delle precipitazioni intense farà aumentare i movimenti di versante e le portate nei torrenti, causando così una maggiore erosione. I cambiamenti climatici comporteranno quindi l'aumento del trasporto di sedimenti dai torrenti verso i fiumi a valle, nonché un più ampio deposito di sedimenti nei fiumi a valle più pianeggianti, nei delta e nei laghi (fig. 6-23). Poiché i laghi trattengono i sedimenti, i cambiamenti climatici avranno scarse ripercussioni sulle quantità di sedimenti nei fiumi a valle dei laghi. Tuttavia, a causa dell'apporto di sedimenti è possibile che nei laghi si verifichino sempre più problemi di interrimento, un'eventualità che risulta problematico soprattutto per i laghi artificiali.

Affinché i sedimenti possano essere trasportati nell'alveo occorre una portata minima. Quanto più grandi e pesanti sono i sedimenti, tanto più elevata dovrà essere anche la portata minima. Poiché la distribuzione stagionale delle portate è destinata a cambiare, muteranno anche i periodi di trasporto dei sedimenti, che aumenteranno tendenzialmente nei mesi invernali. Ciò può avere ripercussioni sulle popolazioni ittiche (cap. 6.9.2). Aumenterà inoltre lo spostamento di sedimenti nelle acque (Speerli et al. 2020). Le grandi quantità di sedimenti saranno comunque trasportate durante gli eventi di piena, sulla cui evoluzione futura sussistono alcune incertezze, anche se gli elementi a disposizione puntano in direzione di un aumento (cap. 6.5).

Figura 6-23: Rappresentazione schematica dei cambiamenti nel trasporto di sedimenti sulla scorta dell'esempio di un sistema idrografico di montagna

Sia la formazione dei sedimenti sia il loro trasporto aumenteranno a causa dei cambiamenti climatici.



Fonte iconografica: Speerli et al. (2020)

La concentrazione di materiali in sospensione (p. es. limo e argilla) nelle acque aumenterà e crescerà dunque la frequenza del loro trasporto. Sostanze nocive come metalli pesanti o composti organici possono però legarsi ai materiali in sospensione e utilizzarli come vettori. Ad ogni modo, concentrazioni troppo elevate di materiali in sospensione possono avere effetti negativi sugli organismi acquatici anche in assenza di sostanze nocive. I cambiamenti nel trasporto di materiali in sospensione influiscono pertanto direttamente sulla qualità dell'acqua e sull'ecologia delle acque (Binderheim e Göggel 2007).

Il trasporto di sedimenti determina la formazione degli habitat nelle acque e nelle aree circostanti. I sedimenti

fini nelle zone golenali costituiscono per esempio un terreno fertile per le piante a legno duro. I banchi di ghiaia, spostandosi, diventano più permeabili all'acqua e all'aria, creando così nuovi habitat nelle acque (UFAM 2017b). Lo scambio d'acqua tra acque sotterranee e fluviali è anch'esso influenzato dal trasporto di sedimenti: può essere ridotto dal sovralluvionamento o dai depositi di sedimenti fini che causano un'impermeabilizzazione del fondo dell'alveo, oppure aumentato dall'erosione dell'alveo o da uno spostamento del fondo dell'alveo durante le fasi di piena. I cambiamenti climatici e le conseguenti alterazioni nel trasporto di sedimenti hanno effetti sia positivi sia negativi sulla qualità dell'acqua e sull'ecologia delle acque (UFAM 2017b).

Maggiori informazioni e riferimenti sul tema**«sedimenti»**

- Benateau S. et al. 2019: Climate change and freshwater ecosystems: Impacts on water quality and ecological status. Hydro-CH2018 report.
- Speerli J. et al. 2020: Auswirkungen des Klimawandels auf den Sedimenttransport. Hydro-CH2018 Bericht.

6.9 Ecologia delle acque

I cambiamenti climatici fanno aumentare lo stress a cui sono sottoposti già oggi gli ecosistemi acquatici. Molte specie non riescono ad adattarsi alle temperature delle acque o si adattano solo in misura limitata. L'equilibrio degli ecosistemi può inoltre essere alterato da altri cambiamenti, ad esempio da tratti di corsi d'acqua in secca o da variazioni nelle condizioni di stratificazione dei laghi. È inoltre agevolata la diffusione delle specie invasive.

6.9.1 Effetti sugli habitat e sull'ecosistema

Gli habitat e gli ecosistemi acquatici sono modificati sia dalle condizioni meteorologiche estreme di breve durata sia dagli sviluppi climatici a più lungo termine. Per esempio, l'interconnessione delle acque peggiora e la varietà degli habitat tende a diminuire.

Sorgenti, corsi d'acqua, laghi, zone umide e golenali ospitano una gran quantità di habitat e di specie (UFAM 2017a). Nei bacini d'acqua dolce di tutto il mondo si osserva un massiccio declino delle specie (IPBES 2019), le cui cause sono la distruzione delle acque, le correzioni di corsi d'acqua e le opere di contenimento, l'inquinamento delle acque, lo sfruttamento eccessivo, la pesca e la caccia di specie minacciate di estinzione, la diffusione di specie invasive e gli effetti dei cambiamenti climatici. La situazione in Svizzera è in linea con questi sviluppi.

Gli organismi acquatici si sono adattati a determinate condizioni degli habitat quali temperatura delle acque, velocità di deflusso, profondità dell'acqua, struttura delle acque, chimica delle acque ecc. Le specie specializzate tollerano solo piccole variazioni negli habitat e vivono in nicchie ecologiche, mentre quelle generaliste sono meno esigenti e possono sopravvivere in un ampio spettro di habitat. Gli organismi acquatici considerati in questa sede sono pesci, macroinvertebrati, ossia invertebrati di dimensioni superiori a 1 mm circa come i gamberi, insetti, molluschi, fitoplancton (p. es. diatomee, alghe o cianobatteri) e zooplancton (piccoli organismi animali liberamente sospesi nell'acqua).

Cambiamento degli habitat locali

I cambiamenti climatici influiscono in vario modo sugli habitat e sugli ecosistemi nelle acque svizzere, per esempio modificando direttamente gli habitat locali, in particolare attraverso l'aumento della temperatura delle acque, lo spostamento stagionale delle portate o la capacità di miscelazione modificata dei laghi. In tal modo privano gli organismi della possibilità di sopravvivere a livello locale, per esempio quando le nuove condizioni locali causano la scomparsa di nicchie ecologiche (Benateau et al. 2019).

Perturbazioni sempre maggiori

I cambiamenti climatici possono però alterare l'equilibrio dell'ecosistema acquatico anche attraverso l'aumento di fenomeni di breve durata, come per esempio ondate di calore e fasi di siccità. In alcuni casi il superamento di determinati valori di tolleranza può innescare drastici cambiamenti nel giro di breve tempo. Per esempio, durante le ondate di calore degli ultimi anni si sono prosciugati numerosi tratti di corsi d'acqua o le temperature

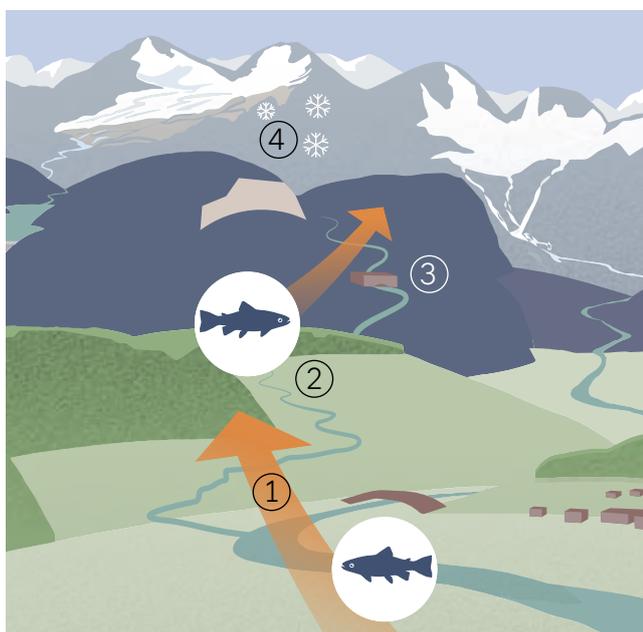
dell'acqua sono salite al di sopra della soglia di tolleranza di specie ittiche amanti del freddo (cfr. anche fig. 6-26). Nell'estate del 2003 nel Reno è stata superata per la prima volta, per lungo tempo, la soglia dei 25 °C, causando la morte di gran parte dei temoli. Anche nell'estate del 2018 molti Cantoni hanno denunciato una moria di pesci e gamberi. Come per i pesci, il prosciugamento di tratti di corsi d'acqua può rivelarsi fatale anche per i macroinvertebrati.

Riduzione dell'interconnessione

I cambiamenti climatici riducono l'interconnessione ecologica lungo i corsi e specchi d'acqua, soprattutto quando questi si prosciugano o diventano troppo caldi per la prima volta o con maggiore frequenza. Una buona interconnessione è però importante per garantire la sopravvivenza di molte specie nel contesto dei cambiamenti climatici (Altermatt et al. 2013). Per esempio, con l'aumentare delle temperature delle acque, alcune specie sposteranno la loro area di diffusione in acque più fresche, tendenzialmente più ad alta quota, a condizione che queste siano interconnesse. Uno spostamento è però pos-

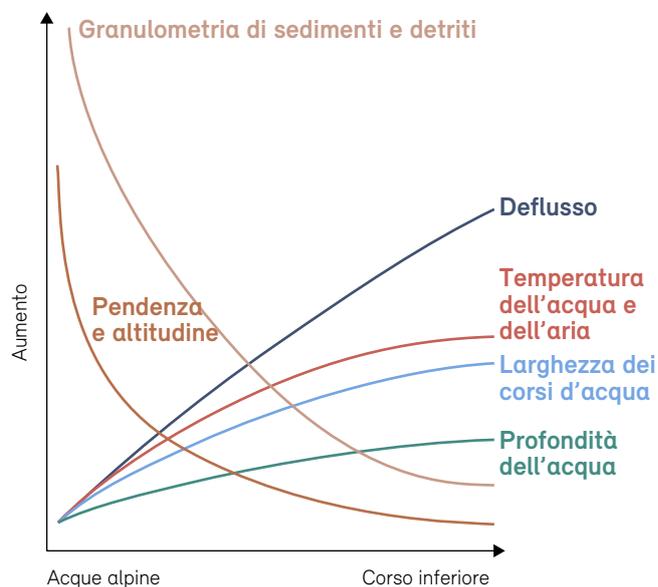
Figura 6-24: Interconnessione nel contesto delle mutate condizioni degli habitat

Per lo spostamento di specie e habitat è necessario che siano in grado di affrontare il tragitto (1) verso l'habitat a quote più elevate (2) e che questo sia privo di ostacoli alla migrazione (3). Lo spostamento è limitato in quanto man mano che si sale di quota le condizioni degli habitat cambiano notevolmente (4 e a destra).



Fonte iconografica: nach Benateau et al. (2019)

Effetti sulle condizioni degli habitat



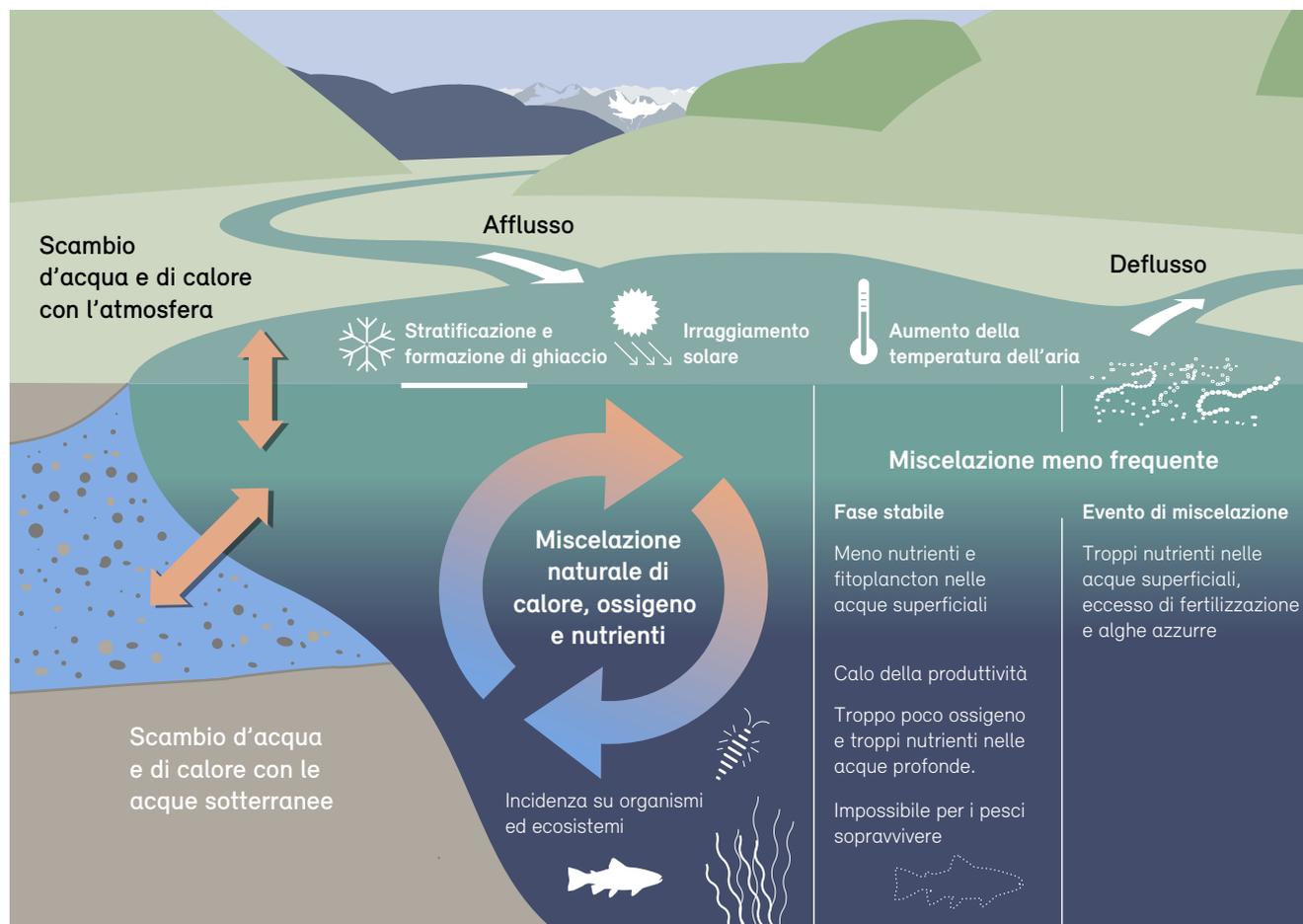
sibile soltanto se sono soddisfatti non solo i requisiti termici ma anche l'insieme di tutte le altre esigenze poste nei confronti degli habitat (fig. 6-24). Per esempio, i temoli, che sono amanti del freddo, non possono spostare il loro habitat in regioni ad alta quota a qualsiasi distanza, perché non sopportano le condizioni di corrente presenti nei torrenti impetuosi. Analogamente, i pesci che vivono nei laghi possono deviare in acque profonde più fredde solo in misura limitata, in quanto a quelle profondità trovano troppo poco cibo. Anche quando per una specie esiste un habitat alternativo adatto, non sempre questo è raggiungibile. È infatti possibile che sia troppo distante o che ostacoli naturali e artificiali alla migrazione impediscano di giungere a destinazione (cap. 7.3.3).

Modifica della fenologia

I cambiamenti climatici modificano sensibilmente anche la fenologia, ossia la manifestazione temporale di determinati processi di sviluppo nel corso dell'anno (Altermatt 2010). A causa dell'aumento della temperatura, già oggi si osserva uno schiudersi anticipato delle uova degli insetti acquatici e un inizio anticipato della fioritura primaverile del fitoplancton e dello zooplancton (p. es. Everall et al. 2015). Ciò può però disturbare le interazioni tra diverse specie all'interno di un ecosistema. Se gli animali che si trovano più in alto nella catena alimentare – per esempio pesci, uccelli o mammiferi – non riescono ad adattare i tempi dei loro processi di sviluppo alla nuova disponibilità di cibo, mancherà loro il nutrimento necessario, per

Figura 6-25: Processi importanti negli ecosistemi lacustri che possono essere modificati dai cambiamenti climatici

Particolarmente rilevanti per gli ecosistemi lacustri sono i cambiamenti nella capacità di miscelazione, ovvero quando un lago si miscela meno frequentemente, meno in profondità o smette del tutto di miscelarsi.



esempio, per allevare e far crescere la prole. Tali effetti dei cambiamenti climatici ai diversi livelli della piramide alimentare sono complessi e agiscono su scale temporali a lungo termine (p. es. Van Asch et al. 2013).

Conseguenze per gli ecosistemi dei corsi d'acqua

Nei corsi d'acqua alpini l'aumento della temperatura delle acque e il calo dell'acqua di fusione incide sulla varietà di habitat riducendola nel complesso. A livello locale, per esempio, dove prima c'era un ghiacciaio, la varietà può anche aumentare (Benateau et al. 2019). L'uniformazione degli habitat può consentire alle specie generaliste provenienti da quote più basse di insediarsi in tali acque e di soppiantare così le specie specializzate che le abitavano fino a quel momento. A livello locale può così verificarsi un aumento delle specie, ma in una prospettiva regionale si prevede un calo della biodiversità e un'omogeneizzazione degli habitat in conseguenza della scomparsa di molte nicchie ecologiche e specie specializzate (Brown et al. 2007). Se però con l'avanzare dei cambiamenti climatici i ghiacciai si scioglieranno e, di conseguenza, il prosciugamento di tratti di corsi d'acqua alpini diventerà un fenomeno sempre più frequente, ne risentiranno anche le specie generaliste (Rolls et al. 2017).

Alle quote più basse occorre distinguere tra corsi d'acqua di grandi e piccole dimensioni. Nei corsi d'acqua di piccole dimensioni si prevedono prosciugamenti più frequenti nei mesi estivi e quindi, nel complesso, un calo della biodiversità (Soria et al. 2017). Non è invece ancora chiaro in che modo evolverà la biodiversità nei corsi d'acqua più grandi, in quanto gli effetti sulle varie specie sono molto diversificati.

Conseguenze per l'ecosistema lacustre

L'ecosistema di un lago è fortemente caratterizzato dalla stratificazione stagionale dell'acqua dovuta alla temperatura. In alcuni laghi i cambiamenti climatici stanno stabilizzando questo fenomeno, con una conseguente minore miscelazione stagionale (cap. 6.7.2). Ciò riduce lo scambio di nutrienti e di ossigeno tra le acque profonde e quelle superficiali, con il risultato che la concentrazione di ossigeno potrebbe diminuire nelle acque profonde, come si sta già osservando nei grandi laghi (Lago Lemano, lago di Costanza, lago di Zurigo, lago di Lugano, Lago Maggiore). In casi estremi, sarà impossibile per gli organismi,

come per esempio i pesci di fondale, vivere negli habitat interessati. Venendo meno il trasporto verso le acque superficiali, l'assenza di miscelazione causerà un accumulo di nutrienti nelle acque profonde. Nei laghi poveri di nutrienti questo sviluppo potrebbe far diminuire la crescita di fitoplancton e zooplancton nelle acque superficiali.

Se poi dopo un lungo periodo di stagnazione ha luogo una miscelazione, nel giro di breve tempo le acque profonde ricche di nutrienti vengono trasportate in superficie, dando impulso alla crescita del fitoplancton e dello zooplancton. I cambiamenti causati dal clima nel bilancio dei nutrienti, nel tenore di ossigeno e nel plancton hanno effetti sull'intera catena alimentare e sull'ecologia lacustre. I cianobatteri, comunemente detti alghe azzurre, fanno parte del fitoplancton e proliferano in condizioni di alte temperature dell'acqua e acque ricche di nutrienti. Se nell'acqua è presente un eccesso di nutrienti, questi batteri possono moltiplicarsi a dismisura e sul finire dell'estate, com'è accaduto nel 2020 nel lago di Neuchâtel, sprigionare in parte cianotossine velenose che possono ripercuotersi a loro volta sulla rete alimentare dell'ecosistema.

6.9.2 Effetti su alcune specie e sulla biodiversità

Con l'avanzare dei cambiamenti climatici, la sopravvivenza per le specie specializzate e amanti del freddo diventa sempre più difficile. Ad avere la meglio sono le specie generaliste e quelle amanti del caldo. Nel complesso la biodiversità subirà ulteriori pressioni.

I cambiamenti climatici renderanno più omogenei gli habitat nei corsi d'acqua e nei laghi (Benateau et al. 2019), condurranno all'estinzione di specie e provocheranno un calo della varietà genetica all'interno delle specie (Bálint et al. 2011). Di seguito le conseguenze per le specie sono illustrate sulla scorta di alcuni esempi e in termini di effetti sulla biodiversità.

Esempio della trota fario

La trota fario è un chiaro esempio di come i cambiamenti climatici influiscono sui pesci che hanno bisogno di acque fredde e ricche di ossigeno (Hari et al. 2006). Negli ultimi anni i suoi effettivi sono fortemente diminuiti in Svizzera (Borsuk et al. 2006). Negli organismi acquatici eterotermi come la trota fario, la temperatura dell'ac-

qua determina non soltanto il metabolismo ma anche il comportamento migratorio, alimentare e riproduttivo. L'intervallo di temperatura ideale per il ciclo di vita completo della trota è compreso tra 8 e 19 °C; al di sopra dei 25 °C non è in grado di sopravvivere (Burkhardt-Holm et al. 2002). La figura 6-26 mostra le temperature ottimali e gli intervalli di tolleranza per attività e stadi di vita esemplificativi della trota fario. Se una popolazione vive già in acque con temperature vicine alla soglia di tolleranza, è sufficiente un ulteriore aumento minimo di temperatura per causarne l'estinzione a livello locale. Si creano inoltre nuovi rapporti di concorrenza dovuti alla comparsa di specie amanti del caldo come per esempio il cavedano. Con l'aumentare della temperatura dell'acqua si manifestano inoltre più frequentemente malattie parassitarie come la malattia renale proliferativa (PKD). La PKD può causare un'elevata mortalità delle trote se la temperatura delle acque si mantiene al di sopra dei 15 °C per un periodo prolungato. Come mostrato nel capitolo 6.7, negli ultimi decenni simili condizioni critiche di temperatura si sono verificate sempre più spesso e in un numero crescente di acque.

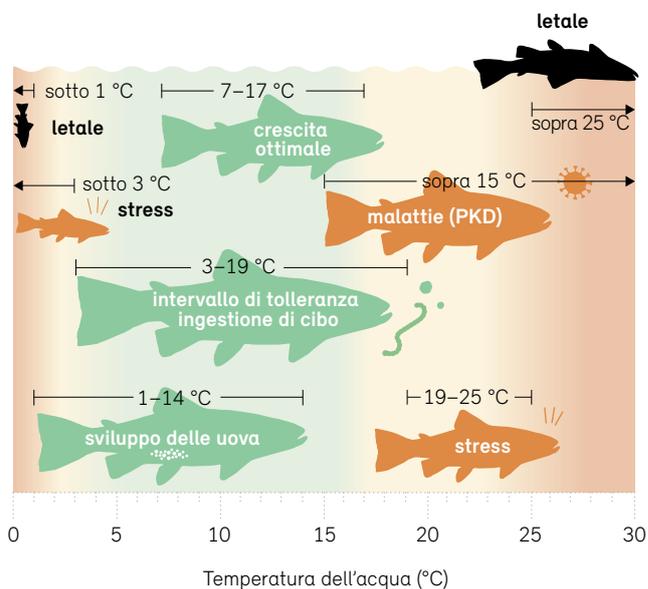
L'aumento di frequenza e intensità degli eventi di piena nei mesi invernali e primaverili peggiora le condizioni per la riproduzione della trota fario. Da fine ottobre a inizio gennaio questa specie depone le uova in fosse scavate nel letto fluviale, dove le uova e i pesci appena nati rimangono per circa sei mesi. Soprattutto nei corsi d'acqua arginati, le velocità di deflusso più elevate durante gli eventi di piena possono danneggiare questi siti di riproduzione e trascinare via le uova deposte o gli avannotti. Anche i più elevati carichi di materiali in sospensione causati dagli eventi di piena possono ripercuotersi sugli avannotti e sui giovani pesci (Burkhardt-Holm 2009). È dunque importante che i corsi d'acqua siano mantenuti allo stato più naturale possibile, in modo da creare aree con velocità di deflusso inferiori. Deve essere inoltre garantita l'interconnessione con i corsi d'acqua laterali affinché le trote fario possano utilizzarli come luogo di deposizione (Junker et al. 2015). In seguito ai cambiamenti climatici i tempi di sviluppo delle uova della trota coincidono sempre meno con le caratteristiche di scorrimento delle acque.

L'esempio della trota fario mostra con chiarezza quanto la popolazione ittica sia colpita dai cambiamenti cli-

matici. Questi, infatti, non solo causano il riscaldamento, ma influiscono anche su fattori quali le condizioni di corrente, la disponibilità di cibo, il trasporto di sedimenti, la struttura delle acque e le zone di riproduzione, oltre ad accrescere minacce come le specie concorrenti e le nuove malattie. L'insieme di questi effetti determina un carico enorme per gli organismi acquatici, che la futura protezione delle acque potrà contrastare al meglio attraverso la riduzione di ulteriori carichi e la conservazione o il ripristino delle acque naturali.

Figura 6-26: Esigenze termiche della trota fario

Sono rappresentati gli intervalli di temperatura in cui la trota fario è in grado di svilupparsi in modo ottimale (verde), è sottoposta a stress (arancione) o è minacciata nella sua sopravvivenza (nero). La trota fario è posta sempre più sotto pressione dall'aumento della temperatura dell'acqua. Le temperature più elevate dell'acqua sono causa di stress, attività ridotta e favoriscono il diffondersi di malattie.



Fonte iconografica: rappresentazione propria secondo Elliot (1994)

Esempio dei macroinvertebrati

I macroinvertebrati reagiscono molto rapidamente ai cambiamenti climatici e subiscono una forte influenza soprattutto dalle temperature dell'acqua (Rüegg e Robinson 2004). Per tale ragione, in questo gruppo si prevedono notevoli cambiamenti relativi a varietà e composizione delle specie (Jacobsen et al. 2014). A causa dell'aumento della temperatura, l'11 per cento delle specie di ade-

fagi acquatici e il 33 per cento delle libellule negli specchi d'acqua della Svizzera sono per esempio minacciati di estinzione, mentre il 63 per cento delle libellule ne trae invece beneficio (Rosset e Oertli 2011). Ma anche le specie che si adattano ai cambiamenti climatici avranno una varietà genetica decisamente inferiore: infatti, secondo uno studio condotto da Bálint et al. (2011), il 67 per cento delle specie esaminate di macroinvertebrati riuscirà a sopravvivere ma con solo il 16-35 per cento di variazioni genetiche all'interno delle specie. Le specie vincitrici sono soprattutto quelle che vivono a quote più basse e che potranno quindi spostare il loro habitat a più alta quota, mentre le specie alpine non hanno questa possibilità e sono pertanto particolarmente colpite. Ma anche altre specie amanti del freddo, come per esempio i plecoteri, sono minacciate dal riscaldamento. Per quanto riguarda il gammaro comune, ampiamente diffuso in Svizzera, si osserva una sensibilità accentuata ai pesticidi a causa

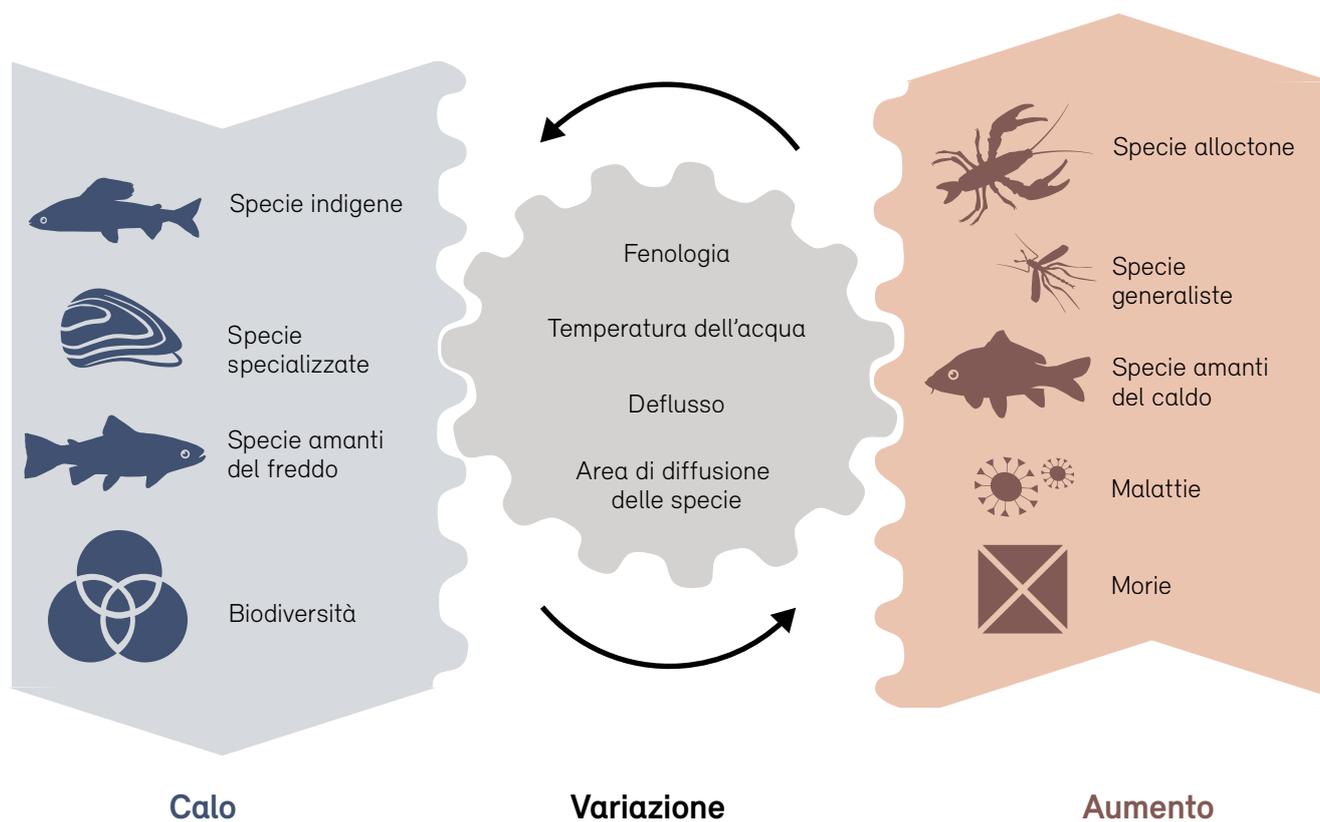
delle temperature più elevate dell'acqua (Russo et al. 2018).

Diminuzione della biodiversità

Anche se a livello locale si formano nuovi habitat preziosi, per esempio nei margini proglaciali per effetto del ritiro delle masse di ghiaccio, a causa della scomparsa di nicchie ecologiche gli habitat diventeranno nel complesso più simili. Avranno vita difficile soprattutto le specie fortemente specializzate e amanti del freddo, mentre ne approfitteranno le specie generaliste e amanti del caldo (fig. 6-27). I cambiamenti climatici provocheranno uno spostamento dell'habitat delle specie. Se alcune di esse riusciranno a insediarsi ad altitudini più elevate sui monti della Svizzera, mentre altre invece non ce la faranno. Avrà luogo un'immigrazione di specie non indigene o addirittura invasive. Queste specie alloctone faranno concorrenza alle specie indigene, mettendole ancora di più sotto pres-

Figura 6-27: Vincitori e sconfitti dei cambiamenti climatici

I cambiamenti climatici modificano gli ecosistemi acquatici e gli organismi acquatici in molteplici modi e porteranno a una nuova composizione delle specie.



Fonte iconografica: rappresentazione propria secondo Benateau et al. (2019)

sione. La varietà genetica all'interno delle specie diminuirà. Ciò avrà conseguenze critiche in quanto di pari passo potrebbe diminuire anche la capacità di adattamento a nuove condizioni (Bálint et al. 2011). Il cambiamento a lungo termine degli habitat, in combinazione con perturbazioni più frequenti causate da eventi estremi, determinerà un aumento delle patologie e delle morie. Se finora le popolazioni sono finora solitamente riuscite a riprendersi dagli eventi estremi, con l'avanzare dei cambiamenti climatici ciò diventerà sempre più difficile fino a quando, prima o poi, non verrà raggiunto un valore soglia oltre il quale i cambiamenti diverranno irreversibili e le specie si estingueranno (Harris et al. 2018). Il funzionamento di un ecosistema si basa su complesse interdipendenze tra le specie. Pertanto, i cambiamenti all'interno di una specie possono indebolire la stabilità e la capacità di resistenza di un intero ecosistema (Benateau et al. 2019). Tutti questi fattori condurranno a un'ulteriore perdita della varietà di specie (Urban et al. 2016).

Maggiori informazioni e riferimenti sul tema «ecologia delle acque»

- Benateau S. et al. 2019: Climate change and freshwater ecosystems: Impacts on water quality and ecological status. Hydro-CH2018 report.

7 Gestione delle acque

I risultati del progetto Hydro-CH2018 mostrano che i cambiamenti climatici stanno mettendo sempre più sotto pressione la gestione delle acque svizzere. I tre settori di gestione utilizzazione delle acque, protezione contro le piene e protezione delle acque sono tutti fortemente colpiti dai cambiamenti climatici. Le misure già adottate contribuiscono a indirizzare la gestione delle acque in funzione del clima futuro, ma dovranno seguire ulteriori adattamenti ai cambiamenti climatici.

7.1 Utilizzazione delle acque

L'acqua è una delle risorse più importanti per la vita e l'economia. Viene utilizzata sotto forma di acqua potabile, per l'irrigazione, per la produzione di energia o nell'industria. I cambiamenti climatici modificheranno sia l'offerta di acqua sia il relativo fabbisogno per diverse utilizzazioni.

7.1.1 Approvvigionamento di acqua potabile

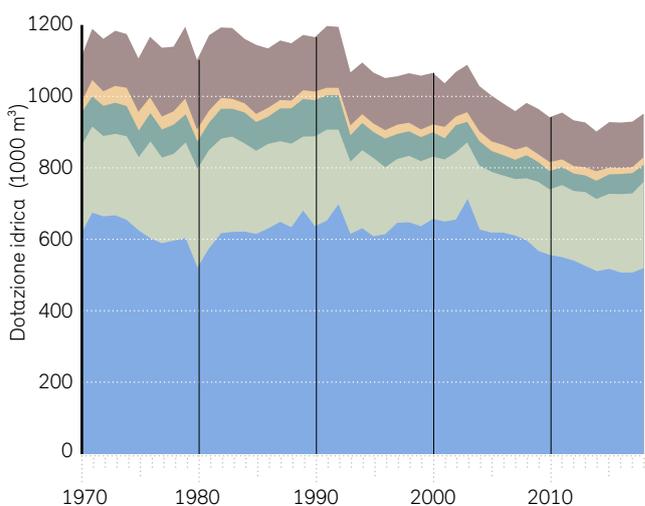
Le aziende di acqua potabile prelevano gran parte dell'acqua dagli acquiferi, che soprattutto nell'Altipiano e nelle grandi valli alpine sono messi sotto pressione dallo sviluppo degli insediamenti e dagli apporti diffusi di sostanze. Periodi di siccità più lunghi e frequenti pongono l'approvvigionamento idrico dinanzi a ulteriori sfide.

Con circa 953 milioni di metri cubi (stato 2018), l'approvvigionamento di acqua potabile fornisce la maggior parte dell'acqua per le economie domestiche nonché una parte dell'acqua per le attività industriali e commerciali. Dagli anni Novanta il consumo è lievemente calato, ma negli ultimi anni sta tornando ad aumentare (fig. 7-1). Circa l'80 per cento dell'acqua potabile è ottenuto dalle acque sotterranee (acqua sorgiva compresa). Il prelievo avviene da circa 18000 captazioni di acque sotterranee di interesse pubblico, ossia captazioni utilizzate dalle aziende di acqua potabile pubbliche o dalle attività industriali e commerciali nel settore alimentare. Gran parte di queste acque può essere immessa nella rete dell'acqua potabile senza alcun trattamento o dopo trattamento preventivo con semplici procedimenti. Un altro 20 per cento dell'ac-

qua potabile viene ricavato dall'acqua dei laghi e successivamente trattato (SSIGA 2020).

Figura 7-1: Evoluzione della dotazione idrica in Svizzera nel periodo 1970-2018

È rappresentata la dotazione idrica per utilizzazione nel corso del tempo. Dagli anni Novanta il consumo è lievemente calato, ma negli ultimi anni sta tornando ad aumentare.



Fonte iconografica: Società Svizzera dell'Industria del Gas e delle Acque SSIGA

Effetti della siccità

Con l'avanzare dei cambiamenti climatici, nei mesi estivi e autunnali diminuiranno fortemente le portate soprattutto nei fiumi dell'Altipiano e del Giura (cap. 6.2, fig. 6-3) e aumenteranno i periodi di siccità. Questi sviluppi influiranno anche sugli scambi tra gli acquiferi e i fiumi e potrebbero ridurre le quantità di acque sotterranee disponibili (cap. 6.4). Durante le fasi di siccità nel 2015 e 2018 il 60 per cento circa delle stazioni di misura dell'Osservazione nazionale delle acque sotterranee NAQUA ha fatto registrare per mesi livelli di falda inferiori alla media. Dopo la siccità del 2003, i livelli di falda, per esempio nella valle superiore dell'Emme e nella valle inferiore del Wigger, si sono ripresi solo lentamente, non da ultimo perché

anche il 2004 è stato un anno con poche precipitazioni (Hunkeler et al. 2014). Quanto appena illustrato mostra che anche l'approvvigionamento di acqua potabile deve predisporre per periodi limitati di offerta ridotta. Durante gli ultimi periodi di siccità, nelle regioni interessate si è registrata in alcuni casi una disponibilità ridotta di quantità d'acqua per l'approvvigionamento di acqua potabile. Poiché in Svizzera le risorse idriche sotterranee saranno comunque sufficienti anche con i cambiamenti climatici, le sfide risiedono soprattutto nella protezione delle acque sotterranee necessarie per l'approvvigionamento di acqua potabile e nella distribuzione della stessa.

Maggiori conflitti di utilizzazione

Quale reazione ai cambiamenti climatici potrebbero aumentare le esigenze di utilizzazione delle acque, come nel caso dell'acqua non potabile per l'irrigazione agricola. Prelevando acqua non potabile dalle acque sotterranee sussiste un rischio di utilizzazione eccessiva soprattutto delle risorse idriche sotterranee disponibili a livello locale. Per prevenire simili conflitti, è fondamentale identificare le risorse e le captazioni di acque sotterranee irrinunciabili ai fini dell'approvvigionamento di acqua potabile e la cui disponibilità deve essere garantita a lungo termine, quindi anche in periodi di siccità.

Quale effetto della svolta energetica aumenteranno inoltre altre forme di utilizzazione, per esempio l'utilizzazione dell'acqua di raffreddamento e l'utilizzazione del calore delle acque sotterranee per soluzioni di riscaldamento senza emissioni di CO₂ e neutrali dal punto di vista climatico. Le perforazioni necessarie per gli impianti che sfruttano il calore delle acque sotterranee possono costituire un pericolo per l'inquinamento delle falde freatiche. Tali perforazioni dovrebbero essere tendenzialmente limitate a pochi siti con esercizio e manutenzione professionale degli impianti.

Compromissione delle acque sotterranee a causa degli apporti diffusi di sostanze nocive

Una grande sfida per le aziende di acqua potabile è rappresentata dal trattamento per ottenere acqua potabile di adeguata qualità. Nel 15 per cento circa delle stazioni di misura dell'Osservazione nazionale delle acque sotterranee NAQUA e addirittura nel 40 per cento delle stazioni di misura nei bacini imbriferi in cui predomina la

campicoltura, i valori misurati dei nitrati superano il valore limite di 25 milligrammi al litro stabilito per le acque sotterranee nell'ordinanza sulla protezione delle acque (UFAM 2019a). Residui di prodotti fitosanitari o loro prodotti di degradazione (metaboliti) nelle acque sotterranee sono stati identificati in oltre la metà delle stazioni di misura. Il valore limite di 0,1 microgrammi al litro stabilito nell'ordinanza sulla protezione delle acque è superato dai principi attivi dei prodotti fitosanitari nel 2 per cento circa delle stazioni di misura delle acque sotterranee e dai metaboliti, per i quali tale valore limite si applica solo in parte, addirittura nel 20 per cento. Per quanto riguarda i metaboliti del fungicida Chlorothalonil, l'UFAM ritiene addirittura che nell'Altipiano oltre la metà delle stazioni di misura NAQUA si collochi al di sopra del valore limite.⁵ Gli inquinanti nelle acque sotterranee causano problemi alle aziende dell'acqua, quando non dispongono di acqua sostitutiva o mista sufficientemente incontaminata per poter fornire acqua potabile nella qualità richiesta dal diritto sulle derrate alimentari. Tale situazione si aggrava ulteriormente nei periodi di siccità, destinati ad aumentare con i cambiamenti climatici.

I cambiamenti climatici acquiscono i problemi di qualità nelle acque sotterranee

Nelle zone sottoposte a coltivazione intensiva si deve sempre più ricavare acqua potabile di buona qualità dalle captazioni vicine ai grandi corsi d'acqua. Qui le acque sotterranee potenzialmente contaminate vengono diluite per infiltrazione dell'acqua dei fiumi. Se però i fiumi trasportano meno acqua durante i periodi di siccità, diminuisce anche l'infiltrazione nelle acque sotterranee e quindi la diluizione. Può anche accadere che per ragioni di qualità tali captazioni di acqua potabile non siano più utilizzabili proprio nei periodi di maggiore fabbisogno idrico.

Nelle fasi di magra, aumenta nei corsi d'acqua la percentuale di acque reflue depurate in impianti di depurazione delle acque (IDA). Se tali acque superficiali s'infiltrano, è possibile che microinquinanti e germi in concentrazioni elevate raggiungano le acque sotterranee. Poiché con l'avanzare dei cambiamenti climatici aumenterà la frequenza dei periodi di siccità, i cambiamenti avranno un effetto negativo indiretto anche sulla qualità degli acqui-

⁵ www.bafu.admin.ch/chlorothalonil

feri vicini ai fiumi e quindi delle captazioni di acqua potabile in corrispondenza dei corsi d'acqua che presentano percentuali elevate di acque reflue depurate.

Possibili conseguenze per il prelievo di acqua potabile dalle acque superficiali

Per molti agglomerati i laghi sono fonti importanti di acqua non depurata, spesso di buona qualità e disponibile in quantità sufficiente, come nel caso del lago di Costanza e del lago di Zurigo. A causa dei cambiamenti climatici, nei laghi potrebbero comparire sempre più organismi ad oggi non indigeni o presenti solo sporadicamente e manifestarsi altri effetti quali la mancanza di ossigeno nelle acque profonde. Ne sono un esempio i cianobatteri velenosi e le sostanze in essi contenute (cap. 6.9.1) oppure la cozza quagga recentemente immigrata nel lago di Costanza, che si attacca agli impianti di filtraggio e alle condotte dell'acqua (fig. 7-2). I procedimenti esistenti di trattamento dell'acqua potabile garantiscono solitamente la ritenzione di questi organismi e la rimozione delle sostanze nocive. Occorre però monitorare attentamente gli sviluppi e all'occorrenza adeguare i sistemi di trattamento.

Con l'aumentare delle forti precipitazioni e se non si adotteranno contromisure, nei corsi d'acqua potrebbero riversarsi più frequentemente acque reflue non depurate dallo scarico di acque miste. Inoltre la concentrazione di parti-

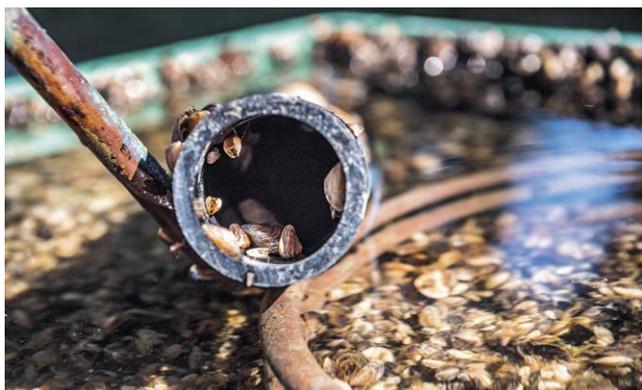
celle sospese nell'acqua potrebbe aumentare a causa di erosione, dilavamenti e processi di spostamento. In futuro gli oneri per l'utilizzazione indiretta dei fiumi (p. es. per l'alimentazione delle acque sotterranee con acqua fluviale o per l'utilizzazione di filtrati dalla riva) ai fini dell'ottenimento di acqua potabile potrebbero dunque aumentare, nel caso in cui gli impianti di depurazione dell'acqua debbano funzionare più spesso in condizioni difficoltose o essere adattati a nuove situazioni estreme. Va inoltre considerato che i procedimenti di disinfezione possono essere sicuri ed efficaci soltanto fino a una determinata concentrazione di particelle. Nella grande area di Basilea, che dipende in larga misura dalle acque del Reno, si stanno già esaminando e considerando strategie per la gestione di questi effetti.

Distribuzione dell'acqua

Altri effetti possono manifestarsi a livello di distribuzione dell'acqua: lungo il tragitto dall'acquedotto fino alle economie domestiche, l'acqua potabile può infatti riscaldarsi fortemente nei periodi di canicola, soprattutto nelle condotte esposte. Ciò tende a favorire i problemi microbiologici, con un conseguente possibile aumento degli oneri per la manutenzione preventiva delle condotte o per misure di trattamento e disinfezione. Tale effetto è ulteriormente aggravato dal fatto che anche la temperatura delle acque sotterranee e superficiali utilizzate aumenterà gradualmente a causa dei cambiamenti climatici.

Figura 7-2: Organismi problematici per la fornitura di acqua potabile

Le alghe azzurre velenose e la cozza quagga invasiva possono rappresentare un problema per l'approvvigionamento di acqua potabile dalle acque dei laghi e determinare costi più elevati per il trattamento dell'acqua e per la manutenzione dell'infrastruttura. Le cozze quagga, che arrivano a misurare fino 40 mm, si attaccano a qualsiasi superficie.



Possibilità di adattamento

In linea di principio, le aziende di acqua potabile erano ben preparate ai periodi di siccità degli ultimi anni. Finora sono riuscite a evitare grossi problemi di approvvigionamento grazie alle forniture da aziende vicine e all'approvvigionamento da risorse idrologicamente indipendenti (seconda fonte alternativa). Negli anni di siccità come il 2018, i bassi livelli di falda hanno però condotto a diffusi appelli per un uso parsimonioso dell'acqua, in parte a scopo precauzionale. Non sono mancati casi di aziende di acqua potabile in difficoltà e in sei Cantoni alcune hanno adottato misure di approvvigionamento d'emergenza (UFAM 2019b).

In futuro i problemi di approvvigionamento dovranno essere evitati se possibile con pianificazioni regionali dell'approvvigionamento idrico e una maggiore interconnessione

Indirizzi strategici per l'adattamento ai cambiamenti climatici

- Aumento della resilienza dell'approvvigionamento di acqua potabile rispetto alle situazioni di penuria dovute a siccità: pianificazioni regionali dell'approvvigionamento idrico, inventario delle captazioni d'acqua, identificazione delle captazioni d'acqua indispensabili per l'approvvigionamento idrico, interconnessione delle aziende di acqua potabile, ottenimento dell'acqua da fonti alternative idrologicamente indipendenti, aumento delle capacità di accumulo dell'acqua e assicuramento a lungo termine delle captazioni di acque sotterranee (misure pianificatorie di protezione delle acque sotterranee).
- Separazione dell'utilizzazione di acqua non potabile (p. es. acqua per l'irrigazione agricola) dall'approvvigionamento di acqua potabile. Identificazione delle esigenze di acqua non potabile e misure per un uso parsimonioso.
- Miglioramento delle basi idrogeologiche: modelli di calcolo e di previsione per gli acquiferi importanti, vulnerabilità delle risorse idriche sotterranee rispetto alla siccità e agli apporti di sostanze nocive, monitoraggio della dinamica di deflusso delle sorgenti.

tra aziende di acqua potabile vicine. In linea di principio, ogni azienda dovrebbe prelevare la propria acqua da almeno due aree di provenienza idrologiche indipendenti (UFAM 2014). È inoltre essenziale proteggere con coerenza le captazioni di acque sotterranee e assicurare così in modo permanente le risorse di acqua potabile rappresentate dagli acquiferi (cap. 7.3.4). In tal modo si potrà evitare una riduzione dell'offerta utilizzabile dovuta agli apporti di sostanze nocive, come pure un aumento degli oneri per il trattamento dell'acqua.

Maggiori informazioni e riferimenti sul tema «approvvigionamento di acqua potabile»

- Lanz K. 2020: Trinkwasserversorgung. In: Lanz K. (ed.): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht.

7.1.2 Irrigazione agricola e acqua non potabile per attività industriali e commerciali

I cambiamenti climatici influiscono fortemente sull'irrigazione in agricoltura. Finora in Svizzera il numero di superfici irrigate è relativamente esiguo. Ciò potrebbe però cambiare a causa dell'aumento delle temperature e dei periodi di siccità più frequenti nei mesi estivi, così come per effetto della maggiore coltivazione di verdura e di altre colture speciali. I cambiamenti climatici hanno invece un'influenza limitata sul fabbisogno idrico nelle attività industriali e commerciali.

Oltre che per l'approvvigionamento di acqua potabile, le nostre acque sono utilizzate dall'agricoltura per approvvigionamento proprio in concessione, ma anche dalle attività industriali e commerciali. Non sono praticamente disponibili cifre aggiornate sulle quantità utilizzate; l'ultima stima proviene dal rapporto settoriale della Società Svizzera dell'Industria del Gas e delle Acque (SSIGA 2015). Nel 2009 circa 1200 milioni di metri cubi sono stati prelevati da approvvigionamenti propri in concessione, di cui circa la metà da acque superficiali (Freiburghaus 2009). Nelle attività industriali e commerciali l'acqua non potabile serve soprattutto per il raffreddamento, la pulizia e per altri processi che non richiedono acqua potabile. In agricoltura gran parte dell'utilizzazione riguarda lo sfruttamento di acqua sorgiva per fontane e abbeveratoi. Per quanto riguarda l'utilizzo di acqua non potabile nelle attività industriali e commerciali, durante i

periodi di siccità non si registra solitamente un maggiore fabbisogno idrico, tuttavia possono verificarsi restrizioni nel trasporto dell'acqua a causa della minore offerta.

I cambiamenti climatici hanno un forte influsso sull'irrigazione agricola. In un anno normale, in Svizzera oltre il 95 per cento delle superfici utili agricole può rinunciare all'irrigazione artificiale. Secondo i dati delle aziende agricole del 2010, 2013 e 2016, in Svizzera soltanto 34 000 ettari circa vengono irrigati regolarmente. Ciò corrisponde a un buon 2 per cento della superficie agricola del Paese (UST 2016).

Gran parte delle aziende è priva di un'infrastruttura (fissa) che consentirebbe l'irrigazione di una vasta area. Vengono irrigate regolarmente soprattutto le colture speciali quali verdura, frutta e piccoli frutti, ma anche colture campicole quali patate, barbabietole da zucchero e mais. Un terzo delle superfici irrigate sono prati artificiali e terreni permanentemente inerbiti. La quota più importante è rappresentata dai prati irrigati ancora tradizionalmente nelle valli xeriche alpine interne (UST 2016). La necessità di irrigare e le modalità di irrigazione sono determinate da condizioni quadro bioclimatiche e soprattutto socioeconomiche. Infatti, non per tutte le colture l'irrigazione conviene, anche se è necessaria.⁶ La sostenibilità economica delle misure di irrigazione dipende non da ultimo anche dalla disponibilità delle risorse idriche. Laddove l'acqua può essere ottenuta in modo affidabile e a costi contenuti, l'irrigazione si configura come una misura di stabilizzazione della resa più che nelle regioni con disponibilità limitata. Tuttavia, è importante anche che i costi effettivamente sostenuti siano addebitati ai responsabili e che sia quindi garantita la verità dei costi.

⁶ L'irrigazione è considerata necessaria quando la quantità di precipitazioni naturali e la capacità del suolo di immagazzinare acqua non sono sufficienti per una buona crescita delle piante; è invece considerata conveniente quando il guadagno in termini di resa e/o qualità è superiore ai costi dell'irrigazione.

Figura 7-3: Sistemi di irrigazione

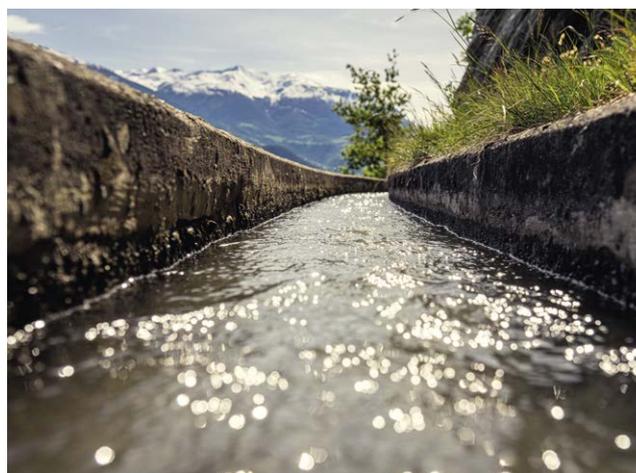
Diversi tipi di irrigazione: irrigazione a pioggia (in alto), irrigazione per gocciolamento (al centro) e irrigazione tradizionale dei prati (in basso)



Fonte iconografica: © lysala, stock.adobe.com



Fonte iconografica: © lavizzara, stock.adobe.com



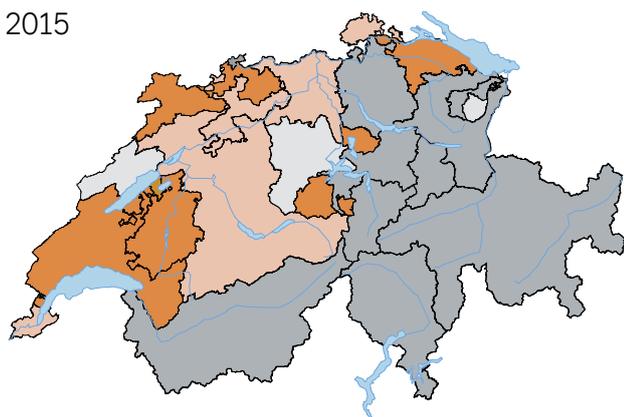
Fonte iconografica: © Rotscher, stock.adobe.com

Figura 7-4: Restrizioni al prelievo di acqua

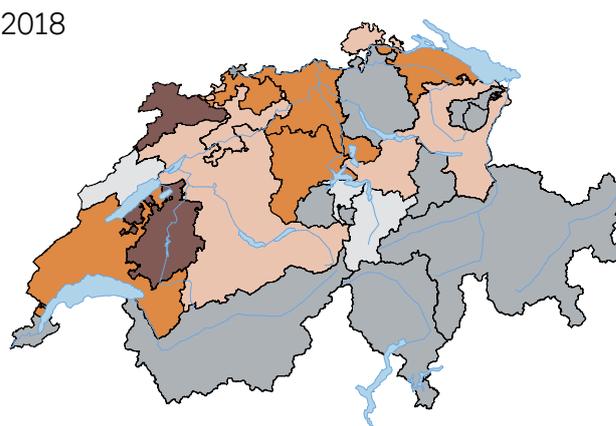
Divieti e restrizioni al prelievo dalle acque superficiali per l'irrigazione agricola nel secondo semestre del 2015 e del 2018.

- | | |
|-----------------------------------|----------------------------|
| ■ Divieto di prelievo generale | ■ Nessuna restrizione nota |
| ■ Singoli divieti di prelievo | ■ Nessuna indicazione |
| ■ Divieto di prelievo con deroghe | |

2015



2018



Fonte iconografica: UFAM (2016) e UFAM (2019b)

Restrizioni più frequenti ai prelievi d'acqua per l'irrigazione

Il consumo d'acqua dell'agricoltura dipende fortemente dalle condizioni meteorologiche (Hofer et al. 2017). In linea di principio, con l'aumentare delle temperature aumenta la potenziale evaporazione del suolo e delle piante e quindi anche il fabbisogno di irrigazione delle colture. Nel contempo, a causa dei cambiamenti climatici, la disponibilità di acqua in importanti zone di coltivazione nell'Altipiano diminuirà nei mesi estivi. Le precipitazioni e le portate estive caleranno e i periodi di siccità diventeranno più frequenti e marcati. Negli anni di siccità 2015 e 2018 si sono dovuti limitare i prelievi d'acqua in molti luoghi al fine di garantire i deflussi residui minimi per la protezione degli organismi acquatici (fig. 7-4). Ciò ha riguardato in particolare i corsi d'acqua di piccole e medie dimensioni che rappresentano all'incirca l'80 per cento di tutta la rete di corsi d'acqua (UFAM 2009). Già oggi, in situazioni estreme, gran parte della rete di corsi d'acqua non è dunque più una risorsa affidabile per l'irrigazione.

Se non si provvederà a un adeguamento dei sistemi di coltivazione, gli scenari per la fine del secolo mostrano un aumento della domanda di irrigazione nella misura del 10-20 per cento con misure di protezione del clima (RCP2.6) e addirittura del 40-50 per cento senza misure

di protezione del clima (RCP8.5) (Hirschi et al. 2020, Holzkämper 2020). Se in futuro si dovessero coltivare superfici più estese con colture che richiedono quantità ingenti d'acqua, tale aumento sarebbe sensibilmente maggiore.

Misure di adattamento complementari

Per garantire un'utilizzazione sostenibile delle risorse idriche occorre una loro pianificazione e gestione regionale. È fondamentale rilevare le diverse utilizzazioni ed evitare uno sfruttamento eccessivo delle risorse idriche. Per prevenire seri conflitti, occorre inoltre ordinare per priorità le diverse utilizzazioni affinché in caso di persistente penuria si possano adottare le restrizioni del caso.

Nelle regioni di coltivazione particolarmente colpite dalla siccità saranno necessarie misure precauzionali al fine di ridurre al minimo negli anni estremi i conflitti tra irrigazione ed ecologia delle acque nonché con altre utilizzazioni, tra cui in particolare l'approvvigionamento di acqua potabile. È importante che nell'attuazione delle misure sia garantito il principio della verità dei costi. Tra le possibili misure si annoverano gli adattamenti della gestione (tra cui selezione delle colture, delle varietà e dei siti, lavorazione del suolo) o dell'infrastruttura (tra cui condutture di mandata) ai fini di un'irrigazione supplementare con acqua dai grandi serbatoi (laghi, grandi fiumi). In molti

luoghi si stanno concependo sistemi di irrigazione regionali che apporteranno acqua supplementare dai laghi, dai grandi fiumi o dai bacini di ritenuta. Oltre ai grandi corsi d'acqua, si sta discutendo anche la possibilità di attingere per l'irrigazione alle acque sotterranee o all'approvvigionamento idrico pubblico. Ciò non dovrà però in nessun caso dare luogo a uno sfruttamento eccessivo delle risorse di acqua potabile né a limitazioni nell'approvvigionamento della stessa. Un'ulteriore opzione sarebbe la creazione di piccoli bacini idrici locali nelle aziende agricole. Poiché il trasporto d'acqua da laghi e fiumi molto distanti richiede onerose misure infrastrutturali ed elevati costi d'investimento, stanno nascendo cooperative d'irrigazione. A determinate condizioni, tali progetti sono anche sostenuti dalla Confederazione e dai Cantoni con contributi per i miglioramenti strutturali, come nel caso del progetto di irrigazione Furttal (Müller 2019).

L'apporto supplementare d'acqua non basta però a risolvere tutti i problemi. Da un lato, per la maggior parte delle colture l'irrigazione non è redditizia; dall'altro, l'adattamento dell'agricoltura deve tenere conto anche di altri rischi legati al clima, come per esempio lo stress da calore, la maggiore pressione dei parassiti o danni procurati dalle forti precipitazioni e dalla grandine. Lo sviluppo dell'agricoltura si orienta innanzitutto alle istanze politiche e sociali così come alle dinamiche del mercato. Negli ultimi anni, per esempio, la superficie di coltivazione delle verdure che necessitano di irrigazione continua è aumentata del 26 per cento (UST 2018). In una prospettiva di lungo termine, sono dunque centrali la selezione delle colture, delle forme di coltivazione e del tipo di lavorazione del suolo così come l'ulteriore sviluppo del sistema del mercato agrario in direzione di una maggiore sostenibilità.

AgriAdapt: come cambierà il fabbisogno di irrigazione con l'avanzare dei cambiamenti climatici e quali saranno gli effetti sul livello di falda?

Procedura

Presso un acquifero nel Seeland bernese sono stati esaminati gli effetti dei cambiamenti climatici sulle colture agricole, sulle esigenze di irrigazione e sui livelli di falda con l'ausilio di un sistema integrato, composto da un modello di simulazione dei sistemi colturali, un modello idrologico e un modello delle acque sotterranee.

Risultati principali

- Senza misure di protezione del clima (RCP8.5) il fabbisogno di irrigazione aumenterebbe entro la fine del secolo del 40 per cento circa, mentre con misure di protezione del clima (RCP2.6) l'aumento medio atteso sarebbe del 13 per cento circa.
- Senza misure di protezione del clima e in presenza di un'intensificazione dell'agricoltura (+20% di colture che richiedono un'intensa irrigazione), il fabbisogno idrico aumenterebbe in media di un ulteriore 35 per cento. Una possibilità di ridurre il consumo idrico è offerta dalla maggiore coltivazione di varietà a rapida maturazione e di colture invernali.
- Senza misure di protezione del clima (RCP8.5) il fabbisogno idrico stimato per l'irrigazione supererebbe l'attuale fabbisogno di acqua potabile.
- Senza misure di protezione del clima (RCP8.5) si prevede un abbassamento del livello di falda nei mesi estivi e autunnali. Tale effetto sarebbe intensificato da prelievi supplementari d'acqua per l'irrigazione. In ogni caso, l'effetto dei cambiamenti climatici sul livello di falda predomina rispetto agli effetti degli scenari di utilizzazione del suolo considerati (+/-20 % di colture che richiedono un'intensa irrigazione).

Progetto Hydro-CH2018 del gruppo di ricerca Clima e agricoltura di Agroscope

Indirizzi strategici per l'adattamento ai cambiamenti climatici

- Adattamento dei sistemi di coltivazione per ridurre il fabbisogno idrico, colture adeguate alle condizioni del sito e gestione del suolo.
- Assicurazione contro la perdita del raccolto quale copertura in caso di eccessiva siccità.
- Irrigazione professionale ottimizzata, sostenuta da sistemi di misura digitale dell'umidità del suolo, tecnologie di irrigazione efficienti, rafforzamento della formazione nel settore dell'irrigazione.
- Pianificazione e gestione delle risorse idriche al fine di garantire un'utilizzazione sostenibile delle acque ed evitare uno sfruttamento eccessivo. In tale contesto occorre ordinare le utilizzazioni delle acque per priorità, in modo da poter prevenire conflitti in caso di eventi di forte siccità. Adattamento della prassi in materia di rilascio di concessioni.
- Effettuare la pianificazione dell'acqua non potabile per l'irrigazione agricola e attuare un finanziamento conforme al principio di causalità. Adottare misure precauzionali contro i conflitti riguardanti l'utilizzazione delle acque. Introdurre l'applicazione del principio di causalità – verità dei costi – per l'acqua non potabile.

Maggiori informazioni e riferimenti sul tema «irrigazione agricola»

- Holzschläger A. et al. 2020: AgriAdapt – Modellgestützte Untersuchung der Einflüsse von Klima- und Landnutzungsänderungen auf Grundwasserressourcen im Berner Seeland. Hydro-CH2018 Bericht.
- Lanz K. 2020: Landwirtschaftliche Bewässerung. In: Lanz K. (ed.): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht.

7.1.3 Energia idroelettrica

In Svizzera oltre la metà dell'elettricità è di origine idraulica. Ad oggi l'energia idroelettrica approfitta ancora dello scioglimento dei ghiacciai nell'arco dell'intero anno, ma in una prospettiva di lungo termine gli apporti di acqua di fusione sono destinati a ridursi. Aumenterà invece il ruolo dell'energia idroelettrica come serbatoio per l'energia solare ed eolica e per la stabilizzazione delle reti elettriche.

L'acqua è utilizzata per la produzione di elettricità dalla fine del XIX secolo. Molte delle centrali idroelettriche sono state costruite tra il 1945 e il 1970 e dispongono di una concessione di circa 80 anni. Le grandi centrali ad accumulazione si trovano nelle Alpi, mentre i grandi impianti ad acqua fluente sono ubicati nell'Altipiano.

Ripercussioni diverse sulle centrali ad accumulazione e sugli impianti ad acqua fluente

Mentre la produzione di energia elettrica nelle centrali ad accumulazione può essere in certo qual modo allineata alla domanda e al prezzo, negli impianti ad acqua fluente dipende dall'offerta d'acqua momentanea. In futuro i corsi d'acqua trasporteranno più acqua nei mesi invernali, un aspetto che consentirà di aumentare complessivamente la produzione di energia elettrica in tale stagione. Il calo atteso delle portate estive determinerà invece una riduzione dell'offerta d'acqua per la produzione di energia elettrica durante l'estate. Le centrali ad accumulazione riusciranno in parte a compensare queste variazioni stagionali attraverso la ritenzione d'acqua.

Effetti positivi e negativi per gli impianti ad acqua fluente

Lo Swiss Competence Center for Energy Research (SCCER) ha esaminato per undici impianti svizzeri ad acqua fluente in che modo i cambiamenti climatici influiranno sulla produzione di energia elettrica (fig. 7-5). In quasi tutti si registrerà futuro aumento della produzione invernale rispetto al periodo di riferimento 1981-2010: entro la metà del secolo tale valore salirà mediamente del 5 per cento circa indipendentemente dal fatto che si consideri lo scenario con misure di protezione coerente del clima (RCP2.6) o senza misure di protezione del clima (RCP8.5) (SCCER-SoE 2019); entro la fine del seco-

lo raggiungerà il 10 per cento senza misure di protezione del clima, mantenendosi invece stabile in uno scenario con misure di protezione del clima. La produzione annua rimarrà invariata o calerà solo lievemente in uno scenario con misure di protezione del clima, mentre senza misure di protezione del clima si prevedono flessioni nell'ordine del 3 per cento entro la metà del secolo e del 7 per cento entro la fine del secolo. Costituiscono un'eccezione le centrali elettriche alpine ad alta quota, che anche in tale scenario registreranno un aumento della produzione. Ciò si spiega principalmente con lo scioglimento dei ghiacciai. Attualmente, tutta l'energia idroelettrica della Svizzera approfitta ancora di tale fenomeno. Nel periodo dal 1980 al 2010 il 3-4 per cento della produzione svizzera di energia idroelettrica proveniva dallo scioglimento dei ghiacciai, una quota che equivale a 1,0-1,4 TWh circa all'anno. Il contributo dello scioglimento dei ghiacciai calerà però entro la metà del secolo di 0,56 TWh all'anno ed entro la fine del secolo di 1 TWh all'anno (Schaefli et al. 2019).

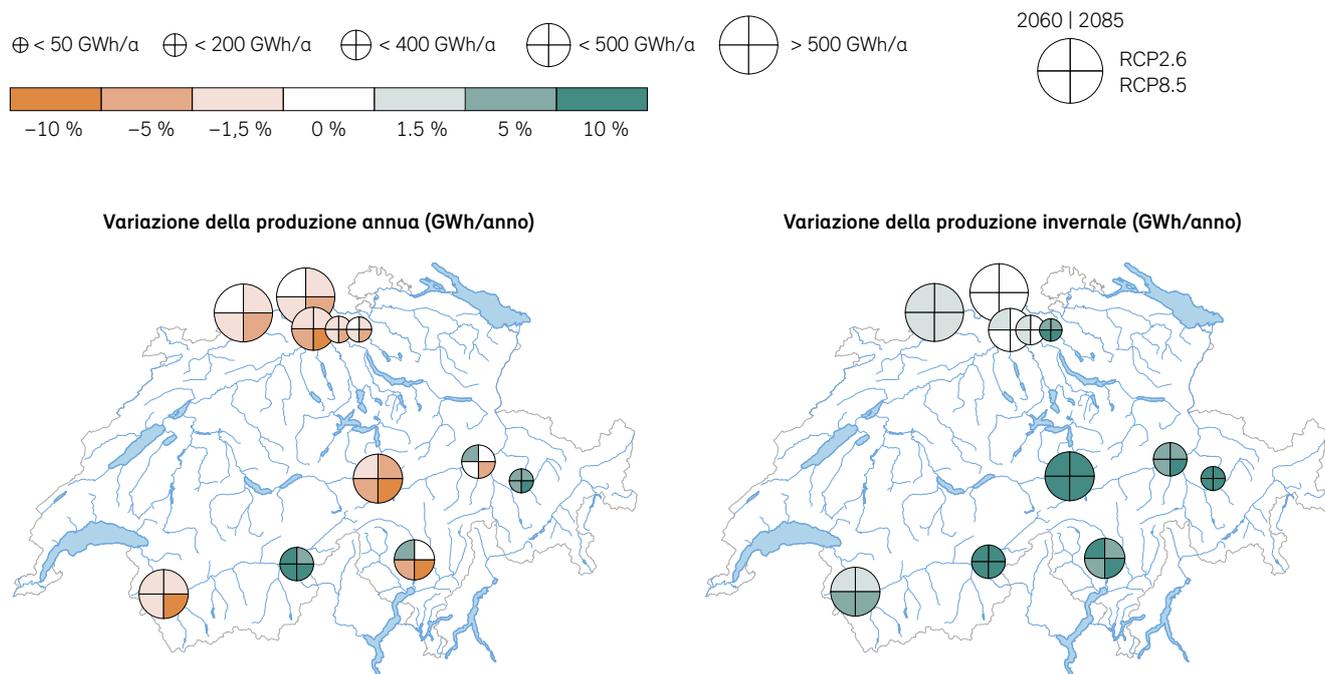
L'effettiva evoluzione della produzione di energia elettrica dipende però anche dal grado di dimensionamento delle centrali idroelettriche. Le portate ridotte non possono essere sfruttate a causa dei deflussi residuali minimi, mentre sulle portate più elevate la capacità delle centrali idroelettriche (portata di dimensionamento) ha un effetto limitante (SCCER-SoE 2019). Nel caso delle centrali che non hanno ancora raggiunto il dimensionamento massimo, si potrebbe per esempio generare più energia elettrica rispetto ad oggi aumentando la portata di dimensionamento o rendendo più efficiente la produzione di energia elettrica. Ciò consentirebbe di compensare le perdite dovute ai cambiamenti climatici, ma sempre tenendo conto dell'importanza ecologica delle tracimazioni in corrispondenza delle captazioni (deflussi residuali dinamici).

Sfide e opportunità per le centrali ad accumulazione

Le centrali ad accumulazione sono fortemente esposte ai pericoli naturali a causa della loro ubicazione in ambiente alpino. La situazione dei pericoli naturali per le centra-

Figura 7-5: Variazioni attese nella produzione degli impianti ad acqua fluente

Variazioni attese nella produzione annua e invernale di impianti ad acqua fluente svizzeri esemplificativi nei periodi 2060 (2045-2074) e 2085 (2070-2099) a confronto con il periodo di riferimento (1981-2010) per uno scenario con (RCP2.6) e senza misure di protezione del clima (RCP8.5). Le proiezioni presuppongono una resa invariata degli impianti e nessuna alterazione nei deflussi residuali.



Fonte iconografica: SCCER-SoE (2019)

li idroelettriche nelle Alpi è aggravata in particolare dallo scioglimento dei ghiacciai, dal riscaldamento del permafrost e dalla maggiore frequenza di forti precipitazioni. In caso di piena, a seconda del riempimento del bacino, queste centrali possono però anche trattenerne grandi quantità d'acqua, contribuendo così alla protezione contro le piene. In futuro potrebbero aumentare le richieste per un uso polivalente dei bacini di ritenuta, per esempio per la ritenzione delle piene o come risorsa idrica in caso di penuria d'acqua. Occorre inoltre considerare che i bacini di ritenuta s'interranno più velocemente a causa dell'apporto supplementare di sedimenti. Si sta dunque tentando di ovviare al problema dell'interramento con metodi tecnici e attraverso la manutenzione.

L'energia idroelettrica non è solo oggetto dei cambiamenti climatici, ma anche parte attiva della soluzione.

Per poter attuare l'Accordo di Parigi è necessario che l'approvvigionamento energetico si renda indipendente dai vettori energetici fossili. La Strategia energetica 2050 prevede, quale contributo dell'energia idroelettrica nel 2035, una produzione annua media di almeno 37 400 GWh, il 2,6 per cento in più rispetto 2018 (art. 2 LEne). A tal fine occorre aumentare l'efficienza o costruire nuovi impianti. Lo scioglimento dei ghiacciai libera nuove superfici che potrebbero essere utilizzate in parte per l'energia idroelettrica (Farinotti et al. 2019), come nel caso della prevista centrale ad accumulazione sul ghiacciaio del Trift nell'Oberland bernese.

Oltre che per la produzione di energia elettrica le centrali ad accumulazione con impianto di pompaggio sono importanti anche per l'accumulazione di tale energia e per la stabilizzazione delle reti elettriche. Tale funzione diventerà sempre più importante con l'aumento della produzione di energia elettrica da impianti solari ed eolici che producono a seconda delle condizioni meteorologiche e quindi in modo irregolare.

Indirizzi strategici per l'adattamento ai cambiamenti climatici

- Ripensamento della configurazione degli impianti sulla base dell'offerta d'acqua modificata.
- Verifica del rischio rappresentato dai pericoli naturali per gli impianti di accumulazione a causa del riscaldamento del permafrost e dello scioglimento dei ghiacciai.
- Verifica della multifunzionalità dei bacini di ritenuta quale nuovo servizio.
- Miglioramento delle previsioni di portata a lungo termine al fine di ottimizzare la produzione di energia elettrica.
- Considerazione dei cambiamenti climatici per l'imminente rinnovo delle concessioni.

Maggiori informazioni e riferimenti sul tema «energia idroelettrica»

- Lanz K., Wechsler T. 2020: Wasserkraft. In: Lanz K. (ed.): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht.
- SCCER-SoE (ed.) 2019: Climate change impact on Swiss hydropower production.

7.1.4 Utilizzo termico delle acque

Le acque in Svizzera sono utilizzate per la produzione di calore e per il raffreddamento di grandi impianti. Sull'utilizzo termico i cambiamenti climatici hanno un effetto positivo: poiché le acque diventano più calde, si può prelevare più energia. Diverso è il discorso per il raffreddamento: il crescente fabbisogno di raffreddamento nei mesi estivi si scontrerà infatti con temperature delle acque più elevate e portate ridotte.

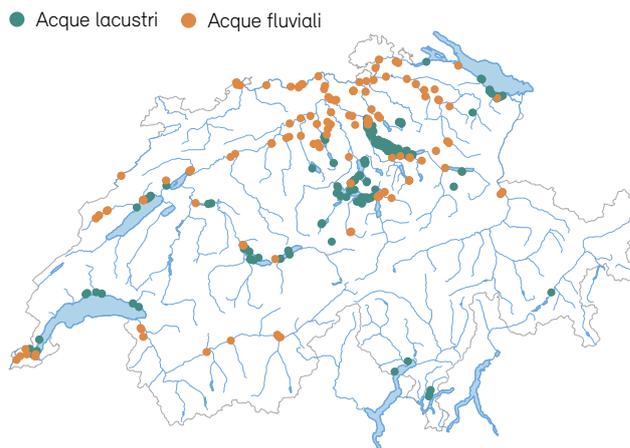
I corsi d'acqua rivestono da decenni un ruolo importante per il raffreddamento di grandi impianti. Dalla chiusura della centrale nucleare di Mühleberg nel dicembre 2019, la più grande quantità di calore rilasciata in un fiume svizzero proviene dalla centrale nucleare di Beznau, seguita dagli impianti di incenerimento dei rifiuti urbani e dalle imprese industriali. Per quanto riguarda l'utilizzo del calore, se è vero che laghi e corsi d'acqua offrono un grande potenziale, è altrettanto vero che il loro utilizzo a fini di riscaldamento è limitato nello spazio a causa degli oneri e dei costi per le necessarie reti di teleriscaldamento. I sistemi di riscaldamento con acqua lacustre o fluviale sono tutt'al più redditizi in combinazione con grandi applicazioni di raffreddamento, per esempio per impianti industriali o centri di calcolo (Rust 2017). L'utilizzo delle acque a fini di riscaldamento rappresenta una possibilità per ridurre le emissioni di gas serra della Svizzera e dovrebbe essere pertanto incentivato. Una panoramica dell'utilizzo termico di laghi e corsi d'acqua è illustrata alla figura 7-6.

Quasi esaurito il potenziale dei corsi d'acqua per gli impianti di raffreddamento

Il riscaldamento delle acque dovuto al clima ne ridurrà la capacità di raffreddamento. Soprattutto in estate, quando la domanda di raffreddamento è maggiore, i corsi d'acqua raggiungono già oggi sempre più spesso temperature critiche per gli organismi acquatici (cap. 6.9.1). Nelle estati torride del 2003, 2006, 2015, 2018 e 2019 alcuni grandi impianti hanno quindi dovuto limitare temporaneamente il loro utilizzo del raffreddamento. Per evitare che al carico causato dal clima si aggiunga un carico termico degli ecosistemi acquatici, occorre adottare un approccio critico ai nuovi utilizzi del raffreddamento nella maggior parte dei corsi d'acqua. Un possibile potenziale è offerto dai grandi corsi d'acqua nelle Prealpi, che anche in futuro registreranno ancora portate elevate nei mesi estivi.

Figura 7-6: Utilizzo termico delle acque lacustri e fluviali in Svizzera

I punti mostrano dove si impiega attualmente acqua di fiume (arancione) o di lago (turchese) per l'utilizzo termico.



Fonte iconografica: dati di Eawag, stato 2018 (thermdis.eawag.ch)

Potenziale dei laghi per l'utilizzo termico

Anche con l'avanzare dei cambiamenti climatici, i grandi laghi presentano un elevato potenziale in termini di utilizzi termici, sia per il prelievo di calore sia per finalità di raffreddamento, soprattutto in ragione del loro grande volume e delle basse temperature delle acque profonde anche nei mesi estivi. Per escludere effetti negativi sull'ecosistema lago, occorre tuttavia considerare gli effetti dei prelievi d'acqua e della reimmissione di acqua riscaldata o raffreddata sulle condizioni di stratificazione modificate dai cambiamenti climatici. Per il futuro si prevede, per esempio, che alcuni laghi saranno interessati dall'intensificazione e dal prolungamento della stagnazione estiva (cap. 6.7.2). Per non aggravare ulteriormente tale effetto con l'utilizzo dell'acqua di raffreddamento, è necessario reimmettere nelle acque profonde l'acqua di raffreddamento riscaldata. Questa procedura causa un riscaldamento delle acque profonde che, a sua volta, ha conseguenze negative e deve essere pertanto il più possibile limitato. Nei laghi di piccole dimensioni con un volume ridotto di acque profonde il potenziale per gli utilizzi di raffreddamento è quindi pressoché inesistente, mentre nei grandi laghi si dovrebbe poter sfruttare anche nei mesi estivi il potenziale di raffreddamento delle acque fredde profonde senza conseguenze ecologiche negative (Gaudard et al. 2019). Per gli utilizzi in prossimità dei

deflussi dai laghi sussiste inoltre la possibilità di reimmettere nel deflusso l'acqua prelevata dalle acque profonde e riscaldata tramite utilizzo. A seconda del gradiente di temperatura questo intervento può persino determinare un raffreddamento del deflusso laddove l'acqua reimpressa è comunque più fredda delle acque superficiali del lago. In tali casi, il prelievo d'acqua ha però l'effetto di abbassare il limite tra le acque fredde profonde e le acque calde superficiali del lago.

Utilizzo del calore delle acque sotterranee

L'utilizzo del calore geotermico e quindi anche del calore delle acque sotterranee è ampiamente diffuso in Svizzera. Per il momento l'eventuale incidenza dell'utilizzo termico sulla temperatura delle acque sotterranee non è al centro dell'attenzione. La priorità è piuttosto evitare conflitti con la protezione delle acque sotterranee: poiché per ogni utilizzo occorre attraversare lo strato superficiale di protezione delle falde freatiche, l'utilizzo del calore è vietato nelle zone di protezione delle acque sotterranee e negli acquiferi che possono essere utilizzati per l'ottenimento di acqua potabile.

Indirizzi strategici per l'adattamento ai cambiamenti climatici

- Prevenire e ridurre il fabbisogno di raffreddamento e di calore mediante una migliore impiantistica e l'ottimizzazione dei processi.
- Nessun ulteriore impianto di raffreddamento in corrispondenza dei corsi d'acqua e risanamento degli impianti esistenti che non soddisfano (più) i requisiti dell'ordinanza sulla protezione delle acque.
- Utilizzo del potenziale dell'acqua dei laghi tenendo conto delle conseguenze per gli ecosistemi.
- Promozione dell'utilizzo delle acque a fini di riscaldamento.

Maggiori informazioni e riferimenti sul tema «utilizzo termico»

- Lanz K. 2020: Thermische Nutzung. In Lanz K. (ed.): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht.

7.1.5 Tempo libero, svago e turismo

L'attrattiva del turismo svizzero e delle aree di svago è il risultato di un connubio di paesaggio, acqua, neve e ghiaccio. I cambiamenti climatici modificheranno l'offerta turistica soprattutto per effetto del ritiro dei ghiacciai e dell'innalzamento dell'isoterma di zero gradi, ma faranno aumentare anche l'esigenza di cercare refrigerio nelle regioni e nelle acque di montagna.

Con 53,3 milioni di pernottamenti all'anno, il turismo rappresenta un importante ramo economico della Svizzera. Esso genera un fatturato annuo di 18,7 miliardi di franchi, pari al 2,4 per cento del prodotto interno lordo, ed è un'importante fonte di occupazione con 175 489 equivalenti a tempo pieno (2018) (FST 2019, UST 2019). In tempi di cambiamenti climatici il ruolo delle acque per lo svago e il turismo dovrebbe assumere ancora più importanza, non solo come base di attività turistiche ma anche come risorsa per il fabbisogno quotidiano dei turisti (fig. 7-7).

Sfide per il turismo invernale

Le temperature invernali più elevate causeranno un sensibile calo del numero di giorni di neve fresca nelle Alpi (NCCS 2018). Le località di sport invernali a più bassa quota hanno già risentito dell'innalzamento dell'isoterma di zero gradi verificatosi negli ultimi anni; alcune hanno addirittura dovuto cessare l'attività. Per compensare il calo della neve, la maggior parte delle destinazioni si è attrezzata con impianti di innevamento. A titolo esemplificativo, nel 2016 il 49 per cento dei circa 22 500 chilometri di piste della Svizzera è stato innevato artificialmente (Funivie Svizzere 2017).

L'acqua necessaria per l'innnevamento deve essere disponibile ad alta quota nei mesi autunnali e invernali nei quali le portate sono solitamente ridotte, senza considerare che le prescrizioni in materia di deflusso residuale si applicano anche alle acque di alta montagna. In molti luoghi l'acqua di fusione e le precipitazioni vengono pertanto raccolte in appositi serbatoi durante la stagione estiva. Quando questo provvedimento è insufficiente, l'acqua deve essere trasportata dalle quote più basse per mezzo di pompe. Per l'innnevamento si impiega in parte anche acqua proveniente dall'approvvigionamento di acqua potabile locale, una misura che può essere causa di conflitti (Lanz 2016). In alcune località l'acqua può essere prelevata dai baci-

ni di ritenuta delle centrali idroelettriche, per esempio a Saas-Fee, Nendaz-Veysonnaz o Crans-Montana (Reynard et al. 2014).

Utilizzazione delle acque nelle destinazioni di vacanza alpine

Le oscillazioni stagionali estreme nelle cifre dei pernottamenti nonché la posizione decentrata delle destinazioni di vacanza in montagna ne rendono particolarmente difficile l'adattamento ai cambiamenti climatici. Il consumo d'acqua dall'approvvigionamento pubblico di acqua potabile aumenta repentinamente nei giorni di punta. Nel contempo si producono più acque reflue, una situazione che comporta requisiti particolari in termini di infrastruttura e costi più elevati. Nei luoghi in cui in futuro si registrerà una crescente concomitanza di giorni di punta e scarsa offer-

ta d'acqua aumenterà la probabilità che possano manifestarsi problemi di approvvigionamento.

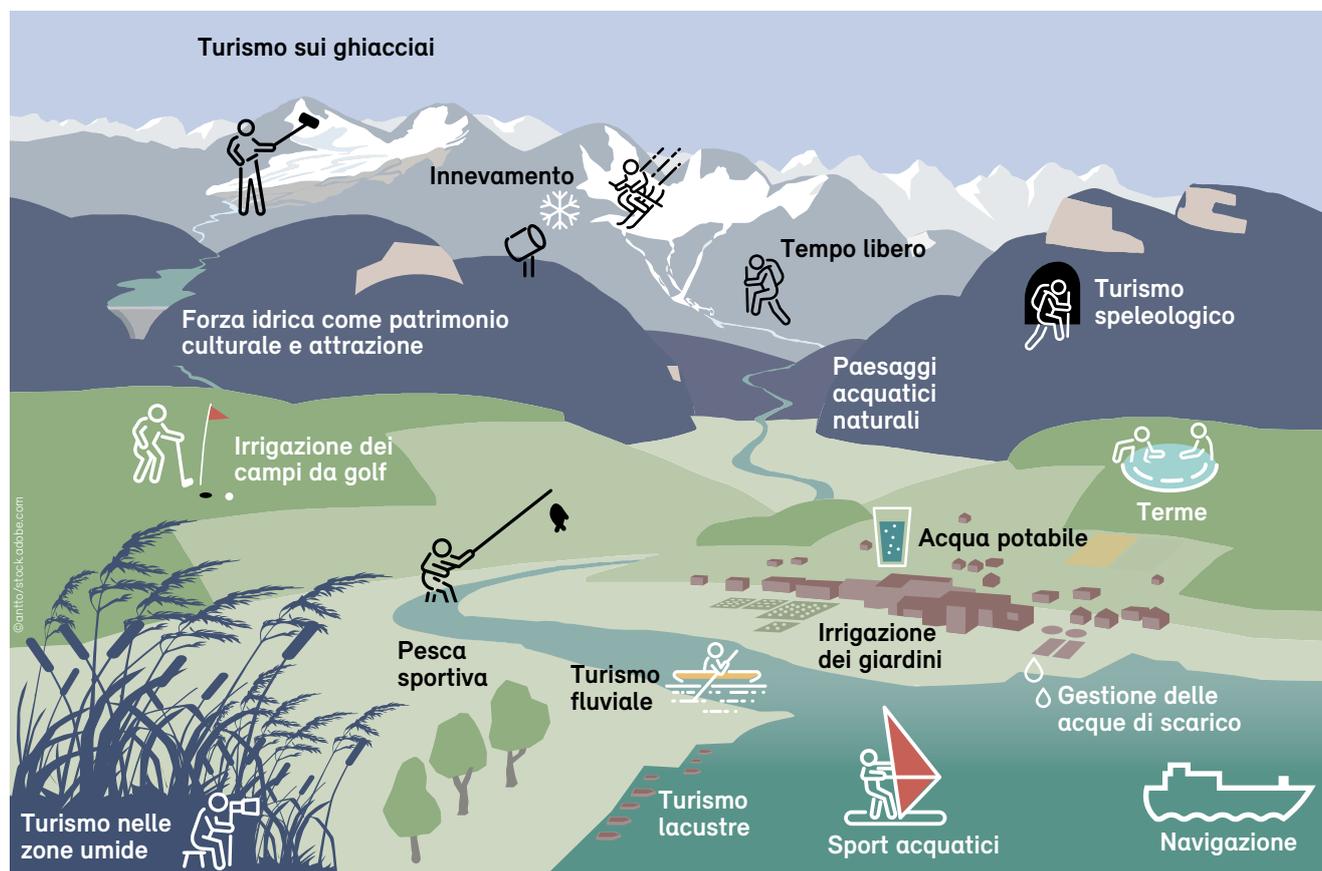
Nei mesi estivi l'immagine del paesaggio cambierà a causa dello scioglimento dei ghiacciai, con una conseguente perdita di attrattiva soprattutto delle destinazioni oggi frequentate anche per i loro ghiacciai o per le attrazioni ad essi legate.

Opportunità per il turismo estivo

I cambiamenti climatici offrono anche opportunità alle regioni di montagna a vocazione turistica. Occorre considerare che nelle calde giornate estive sempre più persone si recheranno in montagna in cerca di svago e di un clima più fresco. Già negli ultimi anni è stata infatti attestata l'esistenza di una correlazione tra il numero di per-

Figura 7-7: Dipendenza dall'acqua del turismo e dello svago in Svizzera

L'acqua è una risorsa centrale per l'approvvigionamento dell'infrastruttura turistica nonché come base di numerose attività del turismo invernale ed estivo.



nottamenti di turisti svizzeri nelle regioni di montagna e l'aumento delle temperature a più bassa quota (Serquet e Rebetez 2011). Inoltre, l'inizio ritardato delle nevicate nei mesi autunnali consente di prolungare la stagione delle escursioni. Resta ancora da vedere in che misura i nuo-

vi paesaggi e laghi di alta montagna formati dallo scioglimento dei ghiacciai potranno divenire destinazioni invitanti per i vacanzieri. In tempi di cambiamenti climatici acquisiscono importanza per le attività ricreative anche i corsi e specchi d'acqua attrattivi e variegati. La popolazione può infatti trovare svago e rinfresco negli stabilimenti balneari locali e lungo le rive invitanti di laghi e fiumi.

Tabella 7-1: Restrizioni alla navigazione sui laghi e sui fiumi svizzeri nell'estate e autunno 2018

Corpo idrico	Effetti, restrizioni
Lago di Costanza	Approdi di Bad Schachen e di Langenargen fuori servizio rispettivamente dal 23 luglio e dal 24 settembre; da luglio nessun accesso in sedia a rotelle in diverse stazioni
Lago di Costanza (lago Inferiore)	Nessun battello in servizio regolare tra Diessenhofen e Stein am Rhein dal 23 luglio fino a ottobre
Lago di Costanza (Altenrhein)	Nessun battello in servizio regolare tra Rorschach e Rheineck dal 30 luglio fino a fine settembre
Lago di Walen	Spostamento dell'approdo di Quinten, rampe più ripide in tutti gli approdi
Lago di Zugo, lago di Ägeri	Nonostante il livello estivo straordinariamente basso, tutti gli approdi sono rimasti raggiungibili ma con rampe molto ripide
Greifensee	Approdo di Mönchaltorf fuori servizio dal 16 luglio, livello del lago un metro più basso del normale
Lago di Hallwil	Livello del lago oltre 60 cm più basso del normale, grossi problemi di accesso (necessità di rampe), ma tutti gli approdi raggiungibili
Lago Maggiore	Approdo dell'Isola Madre (Italia) non raggiungibile dal mese di agosto a causa del basso livello altimetrico
Lago di Zurigo	Nessuna restrizione nonostante il livello altimetrico estivo straordinariamente basso
Limmat	Navigazione temporaneamente sospesa a causa delle elevate temperature a bordo (battelli a vetrate)
Lago dei Quattro Cantoni	Nessuna restrizione nonostante il livello altimetrico estivo straordinariamente basso

Fonte: Reynard et al. (2020b)

Restrizioni alla navigazione turistica

L'estate del 2018 ha mostrato che siccità e canicola possono nuocere anche alla navigazione su laghi e fiumi. I più colpiti sono stati il lago non regolato di Costanza e i laghi di dimensioni più piccole che a causa della mancanza di apporti d'acqua non sono riusciti a mantenere il livello idrometrico, come per esempio il lago di Zugo, il lago di Hallwil e il Greifensee.

Indirizzi strategici per l'adattamento ai cambiamenti climatici

- Innovazione e diversificazione, in particolare promozione del turismo estivo e su tutto l'anno.
- Ridurre il fabbisogno idrico al fine di non sottoporre le risorse idriche a uno sfruttamento eccessivo. Migliore risoluzione delle basi di dati concernenti il consumo idrico per diversi utilizzi nelle destinazioni turistiche: pernottamenti, innevamento, campi da golf, terme, depurazione delle acque reflue. Effettuare una pianificazione regionale delle risorse idriche.
- Interconnessione delle infrastrutture per l'approvvigionamento idrico e per le acque reflue con i Comuni vicini e ampliamento delle capacità di accumulo, seconda fonte alternativa idrologicamente indipendente.

Maggiori informazioni e riferimenti sul tema «turismo»

- Reynard E. et al. 2020a: Eau et tourisme. Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft in der Schweiz. Rapport Hydro-CH2018.
- Reynard E. et al. 2020b: Wasser und Tourismus. In: Lanz K. (ed.): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht.

7.2 Protezione contro le acque

Le forti precipitazioni sempre più frequenti e intense, l'aumento del trasporto di sedimenti causato dal clima e il progressivo sviluppo degli insediamenti in zone di pericolo fanno aumentare i rischi derivanti da piene e ruscellamento superficiale. La protezione contro le piene e lo smaltimento delle acque urbane ne tengono conto già oggi.

7.2.1 Protezione contro le piene

Per la futura protezione contro le piene è fondamentale considerare i cambiamenti legati al clima. Le basi in tal senso sono state gettate negli ultimi decenni con la gestione integrale dei rischi.

In passato si sono ripetute più volte fasi caratterizzate da eventi di piena estesi e numerosi (Schmocker-Fackel e Naef 2010). Piene violente e dalle conseguenze catastrofiche possono verificarsi anche nel clima attuale, come mostrano per esempio i grandi eventi del 1987, 1999 e 2005, e non mancheranno neppure in futuro. La probabilità di accadimento di determinate portate di piena non è costante nel tempo e muta insieme ai cambiamenti climatici. Essa rappresenta un parametro importante per la pianificazione e il dimensionamento delle misure di protezione contro le piene e i segnali indicano che è destinata ad aumentare (cap. 6.5). Le incertezze che esistono già oggi riguardo agli eventi estremi aumenteranno ulteriormente alla luce dei cambiamenti climatici e la protezione contro le piene deve tenerne conto in modo coerente. Inoltre è possibile che per effetto dei cambiamenti climatici vengano smossi più sedimenti e che questi siano trasportati e depositati durante gli eventi di piena, con eventuali danni ingenti.

Sviluppo continuo della protezione contro le piene

La protezione contro le piene ha acquisito importanza nel corso del XIX secolo quando in conseguenza dell'industrializzazione e della crescita demografica si sono iniziate a sfruttare sempre più superfici vicine alle acque. In seguito i tracciati dei fiumi sono stati corretti e sono stati costruiti argini per aumentare la capacità di deflusso in caso di piena e per proteggere le superfici vicine. L'arginatura dei corsi d'acqua e la ritenzione dei detriti provenienti dagli affluenti laterali hanno determinato tra l'altro

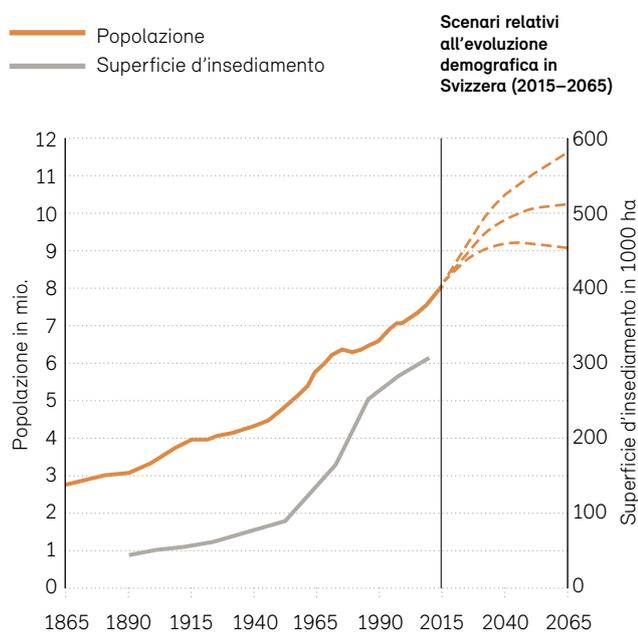
una forte erosione dei letti e delle rive dei fiumi, a cui si è cercato di porre rimedio con ulteriori canalizzazioni. Tale strategia si è rivelata a lungo andare inadatta a proteggere in modo durevole gli insediamenti e i beni materiali dalle esondazioni. Dopo eventi di piena in parte devastanti e con danni enormi, da circa 25 anni in Svizzera è in atto un cambiamento di paradigma nella protezione contro le piene che segna il passaggio dalla difesa contro i pericoli basata soltanto su misure costruttive a una gestione integrale dei rischi. Oggi prevenzione, riduzione del rischio, gestione e ripristino dopo gli eventi causati dai pericoli naturali sono considerati in maniera complessiva e come un processo ciclico. Tutti gli attori importanti partecipano alla pianificazione e all'attuazione delle misure, combinando al meglio misure tecniche, di pianificazione (del territorio), biologiche e organizzative. Da alcuni anni vengono considerati anche gli effetti e i fattori d'influenza legati al clima. Nel rapporto sulla gestione dei pericoli naturali in Svizzera «Umgang mit Naturgefahren in der Schweiz» (UFAM 2016) è stata riconosciuta la necessità d'intervento e la protezione contro le piene ne tiene in parte già conto.

Lo sviluppo socioeconomico come fattore scatenante del potenziale di danni

Il modo in cui evolveranno i rischi di piena nei prossimi decenni dipende non solo dai cambiamenti nei picchi di portata ma anche dalla possibilità che il potenziale di danno aumenti ulteriormente. Dalla fine della Seconda guerra mondiale al 2009, la superficie di insediamento in Svizzera è più che triplicata (fig. 7-8). A causa dell'estensione della superficie di insediamento, del maggior numero di beni materiali all'interno degli edifici e dell'utilizzazione più intensiva del territorio, il potenziale di danno degli eventi di piena è continuamente aumentato, a fronte di una disponibilità di spazio sempre minore per possibili misure di protezione. Per prevenire un ulteriore aumento dei rischi, è fondamentale riflettere sui rischi già in fase di elaborazione dei piani direttori, dei piani di utilizzazione o dei regolamenti edilizi. A tal fine sono state realizzate carte dei pericoli su scala nazionale che mostrano dove in Svizzera gli insediamenti e le vie di comunicazione sono minacciati da piene e da altri pericoli naturali (ARE e UFAM 2005).

Figura 7-8: Evoluzione demografica e della superficie di insediamento in Svizzera

La popolazione in Svizzera è cresciuta di circa 5,5 milioni di abitanti dal 1865 al 2015 (linea arancione) e continuerà ad aumentare fino al 2065 in tutti gli scenari (linee arancioni tratteggiate). Più forte della crescita demografica sarà l'aumento della superficie edificata in Svizzera (linea grigia). Se attorno al 1890, per poco meno di 3 milioni di abitanti, gli insediamenti occupavano ancora meno di 50 000 ha, nel 2009 la superficie di insediamento è arrivata a superare i 300 000 ha per circa 7,5 milioni di abitanti.



Fonti di dati: dati in parte corretti delle statistiche di superficie e delle stime federali. Popolazione residente permanente secondo ESPOP, STATPOP e gli scenari demografici dell'Ufficio federale di statistica UST.

Indirizzi strategici per l'adattamento ai cambiamenti climatici

- Sensibilizzazione e considerazione di pericoli nuovi o accentuati a causa dei cambiamenti climatici, come per esempio il concatenamento di processi o il superamento di valori soglia dei processi.
- Aumentare l'accettazione di misure decisive e impopolari come per esempio il ritiro dalle zone di pericolo.
- Prevenire nuovi rischi inaccettabili mediante una pianificazione del territorio basata sul rischio.
- Gestione dei depositi di sedimenti nei torrenti e nel delta lacustri.

7.2.2 Protezione contro il ruscellamento superficiale

L'aumento delle forti precipitazioni causerà fenomeni di ruscellamento superficiale sempre più frequenti e intensi, e quindi maggiori danni, anche in zone non minacciate dalle piene di fiumi e laghi. È dunque importante adottare misure di protezione degli oggetti, attuare una pianificazione del territorio basata sul rischio e adattare lo smaltimento delle acque urbane ai cambiamenti climatici.

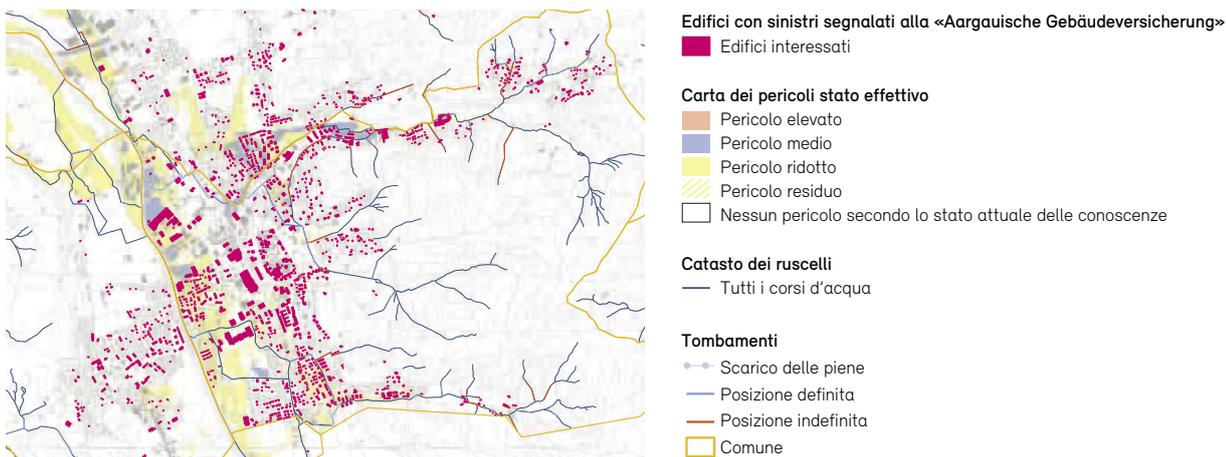
Gli scenari climatici CH2018 prevedono, senza misure di protezione del clima, un aumento delle forti precipitazioni fino al 20 per cento entro la fine del secolo. Quando le precipitazioni sono troppo forti, l'acqua viene assorbita solo in parte dal suolo e defluisce in superficie (cosiddetto ruscellamento superficiale). Ciò può causare estese alluvioni anche a grande distanza dai corsi e specchi d'acqua. Il ruscellamento superficiale può procurare danni per milioni di franchi agli edifici, all'infrastruttura e al paesaggio. Per esempio, in occasione di un lungo temporale abbattutosi su Zofingen nel luglio del 2017 sono rimasti danneggiati numerosi edifici al di fuori delle zone di pericolo note (fig. 7-9). Quale primo passo importante, negli ultimi anni la Confederazione ha elaborato una carta dei pericoli della Svizzera in collaborazione con l'Associazione degli istituti cantonali di assicurazione e con l'Associazione Svizzera d'Assicurazioni: essa mostra dove defluiscono le acque superficiali, quali superfici sono interessate e a quale livello può arrivare l'acqua. Nel contesto dei cambiamenti climatici è opportuno sensibilizzare maggiormente in merito ai pericoli causati dal ruscellamento superficiale. La penetrazione dell'acqua in cantine o garage sotterranei può essere evitata già con misure di protezione spesso semplici e a basso costo oppure con sbarramenti e barriere basse.

Adattamento dello smaltimento delle acque urbane

Le forti precipitazioni sono particolarmente problematiche soprattutto negli insediamenti in cui gran parte della superficie è impermeabilizzata e l'acqua non ha la possibilità d'infiltrarsi. Con l'avanzare dei cambiamenti climatici, lo smaltimento delle acque urbane dovrà affrontare questa sfida. Una possibilità consiste nell'aumentare la capacità di deflusso dalla zona dell'insediamento, da un lato mediante l'ampliamento della rete fognaria e dall'altro attraverso la creazione di corridoi d'emergenza per il

Figura 7-9: Nuovi pericoli anche al di fuori delle zone minacciate dalle piene secondo la carta dei pericoli

A Zofingen (AG) molti edifici (colorati di rosso) che hanno subito danni causati dall'acqua durante un lungo temporale a luglio 2017 si trovano al di fuori delle zone di pericolo finora note. I motivi sono il ruscellamento superficiale e i rigurgiti dalla rete fognaria sovraccarica.



Fonte iconografica: divisione Paesaggio e acque del Cantone di Argovia (2017)

deflusso superficiale. Le forti piogge possono anche causare un sovraccarico della rete fognaria con deviazione delle acque reflue non depurate (cap. 7.3.2).

A causa del deflusso accelerato delle forti piogge dagli insediamenti è però anche possibile che scendendo lungo il corso del fiume le portate di piena aumentino. Per tale ragione occorrono idee nuove nonché una collaborazione rafforzata tra smaltimento delle acque urbane, pianificazione urbana e protezione contro le piene. Si tratta di un approccio complessivo che è rispecchiato nel concetto della cosiddetta «città spugna»: l'acqua piovana viene accumulata in cisterne, stagni di acqua piovana o tetti verdi invece di confluire direttamente nella rete fognaria. Ciò non solo alleggerisce la rete fognaria estivi può anche ridurre le conseguenze delle ondate di calore in città e agglomerati nei mesi estivi. Le carte di analisi climatica mostrano che nelle giornate di canicola, per esempio nei quartieri cittadini di Zurigo, possono esserci 6-7 °C in più rispetto alle campagne circostanti. Nello sviluppo urbano adattato al clima si punta pertanto su un maggior numero di spazi liberi, aree verdi, piazzette ombreggiate e acque aperte.

Indirizzi strategici per l'adattamento ai cambiamenti climatici

- Creazione di corridoi d'emergenza per il deflusso superficiale nel caso di eventi di pioggia in insediamenti la cui rete fognaria e i cui bacini di scarico delle acque piovane hanno una capacità di captazione insufficiente, affinché le precipitazioni in eccesso possano raggiungere i corsi e specchi d'acqua senza procurare danni.
- Sviluppo urbano adattato al clima: creazione di superfici non impermeabilizzate, aree verdi, facciate e tetti verdi, realizzazione di serbatoi e depressioni locali per l'accumulo temporaneo delle acque piovane, nonché grandi bacini di scarico delle acque piovane nella rete fognaria. In parte, queste misure contrastano anche l'effetto delle isole di calore nelle città.

Maggiori informazioni e riferimenti sul tema «protezione contro le piene»

- Lanz K. 2020: Hochwasserschutz. In: Lanz K. (ed.): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht.

7.3 Protezione delle acque

Compito della protezione delle acque è proteggere le acque dagli effetti nocivi. Ciò al fine di consentire un'utilizzazione prolungata delle acque da parte dell'uomo e preservare gli ecosistemi acquatici. Negli ultimi anni sono stati introdotti diversi programmi di risanamento volti a ridurre le sostanze inquinanti nelle acque, rinaturalizzarle e proteggerle dallo sfruttamento eccessivo. Tali misure per la protezione delle acque acquisiranno ulteriore importanza nel contesto dei cambiamenti climatici.

7.3.1 I cambiamenti climatici e la protezione delle acque in mutamento

In Svizzera i corsi e specchi d'acqua e le loro sponde sono fortemente sfruttati dall'uomo. Ampi tratti sono già compromessi in termini di trasporto dell'acqua, qualità dell'acqua e struttura delle acque. Con i cambiamenti climatici quale ulteriore fattore di stress diventano ancora più importanti una rapida attuazione della legge sulla protezione delle acque e un'utilizzazione ancora più parsimoniosa. Occorre inoltre considerare che conseguenze climatiche impreviste potrebbero rendere necessaria una verifica puntuale dei concetti e delle misure di protezione delle acque.

I corsi e specchi d'acqua svolgono una funzione chiave per la società, l'economia e la natura. Essi plasmano il paesaggio e sono la nostra risorsa d'acqua. La protezione delle acque fa sì che i corsi e specchi d'acqua possano espletare in modo possibilmente durevole le loro funzioni di habitat per piante e animali, risorsa di acqua potabile e luogo di svago per gli esseri umani. Essi devono inoltre essere disponibili come base per le attività economiche (p. es. utilizzo del calore, produzione di energia elettrica, turismo).

Molti corsi e specchi d'acqua e le loro sponde (spazio riservato alle acque) sono oggi compromessi a causa di fattori di stress antropici quali opere di contenimento, inquinanti chimici o modifiche della dinamica di deflusso. Gli effetti negativi di questi cambiamenti delle acque indotti dall'uomo sono affiancati o aggravati dalle conseguenze dei cambiamenti climatici. Un'attuazione coerente della legge sulla protezione delle acque è dunque

fondamentale per rafforzare nel minor tempo possibile la capacità di resistenza e di adattamento delle acque ai cambiamenti climatici. Ciò richiede la riduzione delle sostanze inquinanti, la rapida attuazione di rivitalizzazioni e risanamenti della forza idrica, una definizione, configurazione e gestione conforme alla legge dello spazio riservato alle acque e l'assicurazione di quantità d'acqua sufficienti nei corsi e specchi d'acqua.

Poiché i cambiamenti climatici faranno aumentare anche l'utilizzo delle acque da parte della società (p. es. prelievi supplementari per l'irrigazione e l'innevamento, minore diluizione delle sostanze nocive in caso di magra), a diversi ambiti di competenza della protezione delle acque è riconosciuta una maggiore importanza. Nel complesso diventa più importante l'allineamento con altri settori (p. es. protezione contro le piene, utilizzazione delle acque). Occorre inoltre verificare regolarmente se le attuali strategie e prassi della protezione delle acque possano o debbano essere ottimizzate alla luce dei cambiamenti climatici. Per esempio, le misure per la protezione delle acque a livello federale sono attualmente in corso di verifica da parte di esperti esterni su mandato dell'UFAM nell'ambito del progetto «Verifica della protezione delle acque in relazione ai cambiamenti climatici» (Ecoplan i. E.). Gli scambi di esperienze possono contribuire a rafforzare l'esecuzione nei Cantoni.

Confederazione e Cantoni osservano e documentano lo stato e i cambiamenti delle acque svizzere attraverso diverse reti di misurazione:

- per la qualità dell'acqua attraverso l'Osservazione nazionale delle acque NAWA, l'Osservazione nazionale delle acque sotterranee NAQUA e le reti di misurazione della temperatura e delle sostanze solide;
- per le quantità d'acqua attraverso le reti di misurazione del livello idrometrico e del deflusso e NAQUA;
- per l'ecologia delle acque attraverso NAWA e il monitoraggio della biodiversità.

Con i metodi secondo il sistema modulare graduale (SMG) è possibile determinare lo stato delle acque sulla base dei valori osservati. Affinché l'osservazione e la valutazione delle acque funzionino come strumenti di gestione centrali della politica delle acque, è necessario che mostrino

sia gli effetti dei cambiamenti climatici sia, in modo sempre prioritario, gli effetti di altre influenze antropiche sui corsi e specchi d'acqua. I programmi di monitoraggio e i metodi di valutazione devono pertanto essere verificati a cadenza regolare per stabilire se bisogna svilupparli ulteriormente alla luce dei cambiamenti climatici.

Indirizzi strategici per l'adattamento ai cambiamenti climatici

- Continuazione dell'osservazione dello stato delle acque al fine di riconoscere e documentare i cambiamenti. Verifica regolare dell'esigenza di sviluppare ulteriormente i programmi di monitoraggio in conseguenza dei cambiamenti climatici.
- Confederazione e Cantoni verificano a cadenza regolare le loro strategie e prassi esistenti in materia di protezione delle acque affinché i corsi e specchi d'acqua possano espletare le loro funzioni anche con l'avanzare dei cambiamenti climatici.

7.3.2 Riduzione delle sostanze inquinanti

La qualità dell'acqua è fortemente compromessa dalle immissioni di nutrienti, prodotti fitosanitari e altri microinquinanti. Per mezzo di diverse misure occorre da un lato diminuire il carico attuale e dall'altro ridurre al minimo il rischio di nuove contaminazioni. In tal modo lo stress sugli ecosistemi acquatici verrà ridotto, la capacità di resistenza aumenterà e la qualità dell'acqua ne risulterà migliorata, con benefici anche per le utilizzazioni da parte dell'uomo.

In Svizzera oltre il 97 per cento delle acque reflue comunali viene raccolto a livello centrale e trattato in impianti di depurazione delle acque (IDA). A tal fine occorrono circa 1 300 000 km di rete fognaria e circa 800 IDA. Ogni giorno confluiscono negli IDA circa 650 litri di acque reflue pro capite, di cui il 22 per cento circa dalle economie domestiche e una percentuale più o meno uguale dalle attività industriali e commerciali. Il 55 per cento dei volumi trasportati dalla rete fognaria è costituito da acqua piovana proveniente dai tetti o dalle strade o da acque di scari-

co non inquinate con afflusso permanente⁷ (Maurer et al. 2012). Dopo il trattamento negli IDA, l'88,3 per cento delle acque reflue depurate è convogliato nei corsi d'acqua e l'11,7 per cento nei laghi (banca dati IDA UFAM 2018). Poiché questi corsi e specchi d'acqua offrono habitat per animali e piante ma vengono utilizzati anche direttamente o indirettamente come risorse di acqua potabile, gli IDA devono assicurare un'elevata efficacia depurativa.

Migliorare l'efficacia degli impianti di depurazione delle acque

I cambiamenti climatici causeranno temporanee riduzioni della portata dei corsi d'acqua, con il risultato che il deflusso degli IDA sarà meno diluito e aumenteranno le sostanze inquinanti al suo interno. Gli IDA funzionano però in modo più efficiente quando la temperatura dell'acqua è più elevata e le precipitazioni sono scarse due aspetti che contribuiscono a contrastare la minore diluizione (UFAM 2019b). In conformità con la revisione, nel 2014, della legge sulla protezione delle acque, il potenziamento degli impianti di depurazione con un trattamento quaternario intende ridurre l'immissione nelle acque di microinquinanti, come per esempio principi attivi farmaceutici o biocidi, ma anche la diffusione critica di batteri resistenti agli antibiotici attraverso i corsi e specchi d'acqua. A tal fine, sulla base di criteri mirati e fondati su base giuridiche, sono stati selezionati circa 140 IDA che entro il 2040 dovranno essere equipaggiati con trattamenti supplementari.

Adattare lo smaltimento delle acque urbane ai cambiamenti climatici

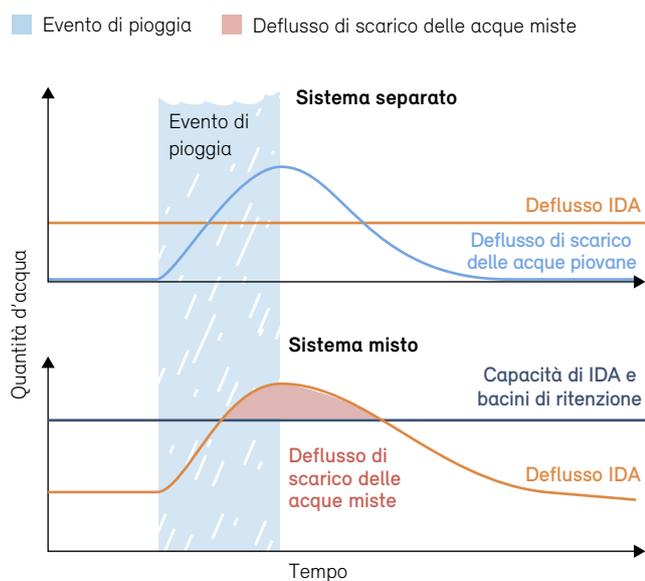
Storicamente, in Svizzera si sono affermati due sistemi per la gestione delle precipitazioni urbane. Sul 70 per cento della superficie degli insediamenti viene applicato un cosiddetto sistema misto in base al quale la pioggia dai tetti e dalle strade viene convogliata nell'IDA insieme alle acque reflue e qui trattata. Quando a causa delle forti precipitazioni la rete fognaria mista e i bacini di ritenzione della pioggia non riescono ad assorbire tutta l'acqua, una miscela di acque reflue e piovane raggiunge i corsi e specchi d'acqua senza essere stata sottoposta a previo trattamento, un fenomeno questo designato come scarico di acque miste (fig. 7-10). Sul restante 30 per cento della

⁷ Acque provenienti da scarichi di fontane, torrenti, drenaggi, infiltrazione di acque sotterranee

superficie degli insediamenti si impiega il sistema separato per cui le precipitazioni sono raccolte in una seconda rete fognaria e convogliate direttamente nelle acque superficiali. Quando l'acqua piovana è molto inquinata, per esempio sulle strade di grande transito, deve essere trattata prima di essere immessa in un corpo idrico.

Figura 7-10: Reazione dei sistemi separati e misti in caso di forti piogge

Nei sistemi misti che smaltiscono il 70 per cento delle acque urbane, in caso di forti piogge è possibile che una miscela di acque reflue e piovane raggiunga i corsi e specchi d'acqua senza depurazione.



Fonte iconografica: Braun et al. (2015)

Con l'aumento delle forti precipitazioni, se non si provvederà ad adattare lo smaltimento delle acque urbane, in futuro accadrà più frequentemente che acque reflue non trattate raggiungano direttamente i corsi e specchi d'acqua attraverso lo scarico di acque miste. Per alleggerire la rete fognaria, dovrebbe quindi esserci una maggiore infiltrazione delle acque piovane anche nella zona dell'insediamento. Laddove l'infiltrazione è insufficiente, bisognerà realizzare dei serbatoi intermedi (bacini di scarico delle acque piovane, impianti per il trattamento delle acque miste scaricate) o convertire la rete fognaria da mista a separata (con evacuazione separata delle acque piovane). Poiché gli impianti di smaltimento delle acque urbane hanno una durata di diversi decenni, è importante

che gli interventi di costruzione tengano conto già oggi dei cambiamenti climatici. Occorre inoltre verificare e aggiornare regolarmente strumenti quali la pianificazione generale e regionale dell'evacuazione delle acque nonché le relative norme e basi di dati.

Portare avanti le misure per la riduzione delle sostanze inquinanti

Gran parte dei microinquinanti, come per esempio gli insetticidi, gli erbicidi e i fungicidi, è rappresentata da immissioni diffuse dell'agricoltura sulle quali il potenziamento degli impianti di depurazione non ha alcun effetto. Anche il fosforo e l'azoto contenuti nei concimi e nel liquame finiscono nelle acque. Tutte queste sostanze hanno effetti negativi sull'ecologia delle acque e la protezione delle acque persegue pertanto l'obiettivo di ridurre l'apporto. I cambiamenti climatici modificheranno anche l'agricoltura, per esempio con lo spostamento geografico delle superfici di coltura agricola intensiva, l'introduzione di colture e varietà diverse e la comparsa di nuovi organismi nocivi e malattie. Tutto ciò inciderà anche sull'impiego dei prodotti fitosanitari. Queste influenze indirette saranno probabilmente più rilevanti per l'inquinamento delle acque con prodotti fitosanitari che non le influenze dirette dei cambiamenti climatici stessi. L'aumento atteso del ruscellamento superficiale indotto dai cambiamenti climatici e i mutamenti nella rigenerazione dell'acquifero possono aumentare a loro volta il trasporto di tali sostanze nei corsi e specchi d'acqua. L'apporto di sostanze critiche deve dunque essere ridotto costantemente, cosa che avviene tra l'altro nell'ambito del Piano d'azione dei prodotti fitosanitari (Consiglio federale 2017). Questo persegue l'obiettivo primario di ridurre l'utilizzo di prodotti fitosanitari, per esempio mediante la lotta meccanica contro le erbe infestanti, l'agricoltura biologica, il divieto di alcuni prodotti fitosanitari o la promozione degli organismi utili. Ulteriori approcci sono la prevenzione del dilavamento dei campi, la creazione di zone tampone a coltura estensiva lungo i corsi e specchi d'acqua o la pulizia degli irroratori in modo rispettoso dell'ambiente. Le misure e gli obiettivi di riduzione dell'inquinamento delle acque con prodotti fitosanitari e nutrienti devono essere attuati anche indipendentemente dai cambiamenti climatici.

Indirizzi strategici per l'adattamento ai cambiamenti climatici

- Verifica regolare ed eventuale adattamento del piano di evacuazione delle acque di una regione. Limitazione dei volumi e della frequenza degli scarichi di acque miste.
- Prosecuzione del potenziamento degli IDA per migliorare l'efficacia depurativa.
- Definizione nell'ambito della pianificazione del territorio, configurazione estensiva e gestione dello spazio riservato alle acque.
- Attuazione coerente del piano d'azione dei prodotti fitosanitari.

Maggiori informazioni e riferimenti sul tema «riduzione delle sostanze inquinanti»

- Consiglio federale (ed.) 2017: Piano d'azione per la riduzione del rischio e l'utilizzo sostenibile di prodotti fitosanitari.
- Lanz K. 2020: Siedlungsentwässerung. In: Lanz K. (ed.): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht.

7.3.3 Rinaturazione delle acque

Le acque prossime allo stato naturale offrono habitat variegati per le specie animali e vegetali indigene. Gli ecosistemi acquatici cambieranno a causa del clima. Le acque naturali riusciranno a gestire tali cambiamenti meglio dei corsi e specchi d'acqua inquinati da sostanze chimiche, arginati o influenzati dalla forza idrica.

Gran parte delle acque naturali della Svizzera è andata persa a cominciare dal XIX secolo. Conseguenze di ampia portata sono state causate per esempio da vaste correzioni dei corsi d'acqua e opere di contenimento di fiumi e ruscelli di piccole dimensioni, interventi questi motivati dal miglioramento della protezione contro le piene, dalla produzione di energia, dall'utilizzazione industriale e dalla realizzazione di corridoi di transito, come anche dalle superfici a uso agricolo e dalle zone d'insediamento. Soprattutto le acque nell'Altipiano intensamente sfruttato mostrano una varietà strutturale insufficiente e sono ben lontane dal loro stato originario. Complessivamente, circa un quarto di tutti i corsi d'ac-

qua in Svizzera è fortemente compromesso o coperto in maniera artificiale.

Per riavvicinare le acque allo stato naturale ed eliminare le principali fonti di compromissione, nel 2011 si è proceduto a una revisione della legge sulla protezione delle acque. Pur essendo stata intrapresa in modo indipendente dai cambiamenti climatici, la rinaturazione delle acque fornisce comunque un contributo diretto alla capacità di resistenza e di adattamento dei corsi d'acqua. I Cantoni hanno esaminato in maniera sistematica in quali acque le specie animali e vegetali sono sostanzialmente compromesse, pianificando interventi di risanamento delle centrali idroelettriche o di rivitalizzazione dei corsi d'acqua.

Conservare e creare habitat variegati

I cambiamenti climatici causeranno un aumento delle temperature dell'acqua e alterazioni nei deflussi e nel trasporto di sedimenti. Molte specie, non riuscendo ad adattarsi alle mutate condizioni, dovranno avere la possibilità di trasferirsi in habitat alternativi o in situazioni estreme, come nel caso di ondate di calore o di eventi di magra, di ritirarsi in altre aree meno colpite del sistema idrografico. A tal fine è necessaria una rete idrografica intatta e con habitat variegati. Le acque vicine allo stato naturale sono dunque essenziali per la conservazione della varietà di specie.

Fondamentale per l'interconnessione è che gli organismi abbiano la possibilità di migrare lungo i corsi d'acqua e al loro interno (fig. 7-12). In Svizzera, la risalita e la discesa di pesci e di altre specie migratorie (p. es. gamberi) è però intralciata da circa 1000 ostacoli creati dalle centrali idroelettriche. Entro il 2030 le centrali bisognose di risanamento saranno quindi dotate di aiuti alla risalita e discesa dei pesci. L'interconnessione è inoltre interrotta da più di 100 000 soglie interrante e cadute di oltre 0,5 m di altezza che dovranno essere progressivamente eliminate nell'ambito di progetti di sistemazione dei corsi d'acqua e interventi di manutenzione delle acque.

Le acque offrono habitat variegati soltanto se sono garantiti anche un fondo dell'alveo vario e ben strutturato, zone con diverse velocità di deflusso, possibilità di ritiro per le situazioni estreme (p. es. canaletti di scolo) e zone di rifugio per gli organismi acquatici. È oggi più importante che

mai impostare i progetti di sistemazione dei corsi d'acqua in modo da preservare e creare habitat variegati. Poiché i progetti di rivitalizzazione sono destinati a durare decenni, è opportuno che anticipino le condizioni climatiche future e che tengano conto fin da subito dei cambiamenti attesi nel trasporto dell'acqua, nella temperatura e nell'ecologia delle acque. Soprattutto nel caso dei corsi d'acqua di piccole dimensioni, l'aumento delle temperature può essere frenato con la creazione di zone d'ombra sufficienti realizzate tramite piantumazione delle rive. Si verificherà inoltre, in certa misura, uno spostamento degli habitat delle specie che vedrà l'immigrazione di nuove specie e la scomparsa di altre. Per quanto riguarda le acque, queste nuove specie potrebbero però avere esigenze diverse da quelle attuali, per esempio in merito alla struttura o alla velocità di deflusso. Entro il 2090 bisognerà rivitalizzare

circa 4000 km di sezioni di corsi d'acqua, ripristinandone le funzioni naturali (Göggel 2012).

Più spazio per le acque

I corsi e specchi d'acqua e le loro rive assolvono un'ampia varietà di funzioni naturali. Per potersi sviluppare, le acque allo stato seminaturale hanno bisogno di uno spazio sufficiente. Nella zona di passaggio tra l'acqua e la terra, ovvero in un'area ristretta, si creano habitat molto vari; per questo lo spazio riservato alle acque è così importante per la biodiversità. Inoltre le rive fungono anche da tampone per l'immissione di sostanze nocive e nutrienti. In caso di piena, lo spazio complessivo riservato alle acque può trattenere acqua e detriti, riducendo così i picchi di portata e i danni conseguenti. Molti corsi d'acqua alimentano inoltre le acque sotterranee.

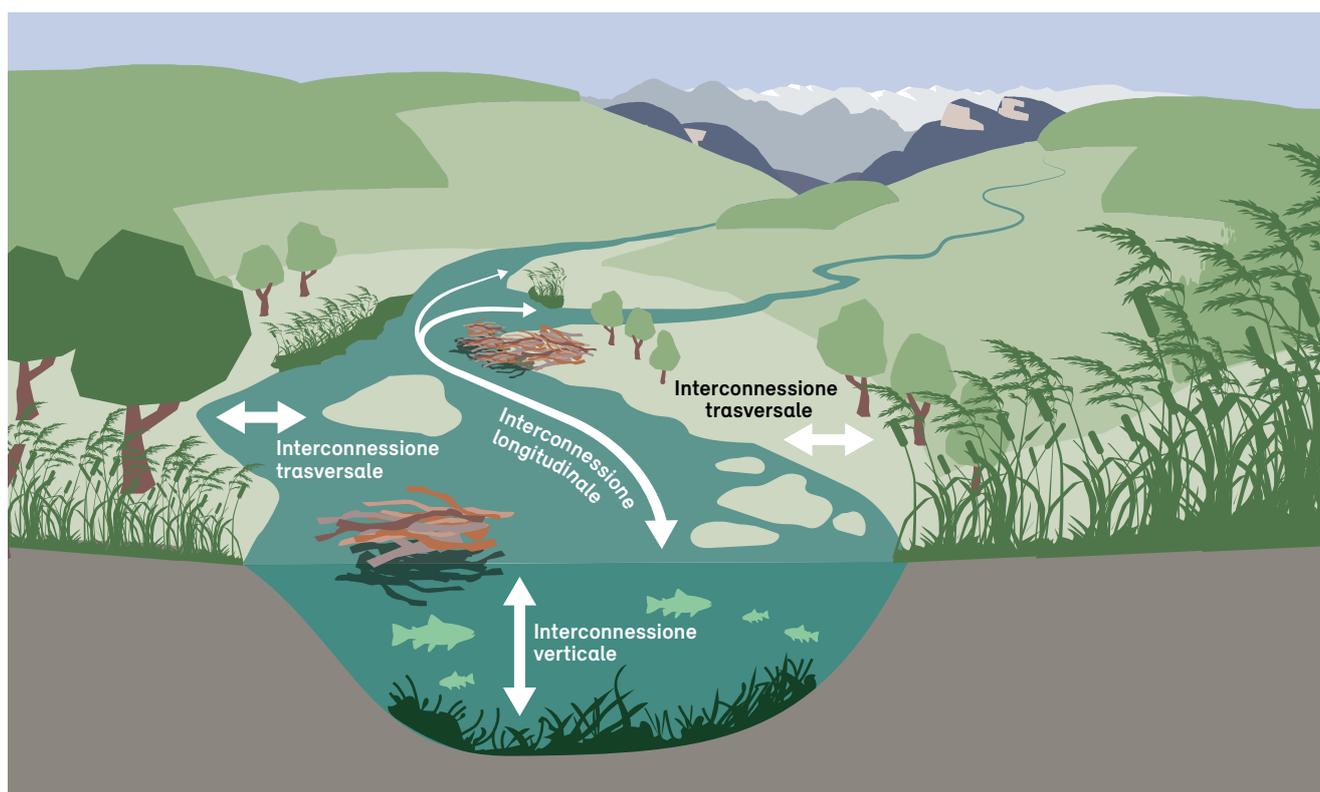
Figura 7-11: Habitat preziosi dopo gli interventi di rivitalizzazione

Presso Rietheim nel Cantone di Argovia, il Chli Rhi, un ramo secondario interrato del Reno, è stato riportato allo scoperto e in caso di piena può esondare allagando le rive. È così sorto un paesaggio golenale dinamico. Nell'immagine la situazione al 22 agosto 2016.



Figura 7-12: Dimensioni di interconnessione di un sistema idrografico intatto

Affinché gli organismi acquatici possano diffondersi lungo i corsi d'acqua, è necessaria una buona interconnessione longitudinale. Molte specie, per riprodursi, migrano per lunghi tratti, ma durante i periodi di siccità, di magra o di piena percorrono anche tratti più brevi alla ricerca di cibo o di un luogo in cui ritirarsi. Sono dunque importanti anche una buona interconnessione trasversale (zone golenali che si allagano periodicamente) e l'interconnessione verticale sotto forma di scambio tra le acque superficiali e sotterranee.



Fonte iconografica: secondo UFAM (2011)

Le funzioni naturali di un corso d'acqua possono essere ripristinate soltanto se lo spazio e la disposizione è sufficiente. Soprattutto in fiumi e ruscelli di piccole dimensioni, un popolamento di alberi e cespugli adeguati al luogo e in prossimità delle acque può contribuire a ridurre in particolare le temperature massime dell'acqua a creare luoghi di ritiro termico. Le zone di acqua fredda possono però servire da luogo di ritiro soltanto se gli organismi sono anche in grado di raggiungerle (continuità per il transito). Inoltre un popolamento adeguato alle acque non ha soltanto un effetto rinfrescante, ma aumenta anche la varietà strutturale di un corso o specchio d'acqua valorizzando l'habitat.

I requisiti ecologici dei deflussi residuali diventano sempre più importanti

In Svizzera sono circa 1500 i punti in cui viene prelevata acqua per produrre energia elettrica, purché sia prelevato solo un quantitativo d'acqua tale da lasciare un deflusso residuale adeguato. Con la legge sulla protezione delle acque del 1992 sono state stabilite le modalità per determinare i deflussi residuali minimi adeguati. Essa si applica però soltanto ai prelievi autorizzati dopo il 1992. Le disposizioni in materia di deflussi residuali sono applicabili alle concessioni di prelievo antecedenti soltanto a partire dal rinnovo della concessione. Per quanto economicamente sostenibile, occorre però risanare anche le tratte di deflusso residuale esistenti (artt. 80 e 81 LPAC). I deflussi residuali sono stabiliti sulla base dell'indicatore idrologico Q_{347} nonché dei requisiti ecologici specifici

nel tratto di corso d'acqua interessato. A tal fine occorre considerare il fabbisogno idrico per gli habitat che dipendono dalle acque, per la migrazione dei pesci o per l'alimentazione delle acque sotterranee. In tale contesto, il previsto aumento della temperatura dell'acqua risultante dai cambiamenti climatici, il calo delle portate estive e di magra e i più frequenti episodi di siccità accresceranno l'importanza dei requisiti ecologici specifici.

Portare avanti con coerenza il risanamento della forza idrica

Quasi tutti i pesci intraprendono nel corso della loro esistenza migrazioni più o meno lunghe. A causa dello sfruttamento idrico, molti sistemi di fiumi e ruscelli non sono percorribili dai pesci o lo sono solo in parte. Con i cambiamenti climatici diventa ancora più importante risanare i circa 1000 ostacoli alla migrazione creati dalle centrali idroelettriche, affinché nei periodi di siccità e di canicola i pesci possano rifugiarsi in tratti di corsi d'acqua nei quali subiscono meno stress.

Nelle centrali ad accumulazione l'acqua viene raccolta in bacini di ritenuta e quindi rilasciata per la produzione di energia elettrica. La produzione irregolare dell'energia elettrica, in funzione della domanda e del prezzo, determina rapide oscillazioni del deflusso e del livello idrometrico nei tratti di corsi d'acqua a valle delle centrali idroelettriche (deflussi discontinui). Sono circa 100 le centrali svizzere che causano simili oscillazioni artificiali del deflusso. Le oscillazioni un problema per l'ecologia delle acque in quanto gli animali vengono trascinati via dalla corrente del fiume o si arenano nei punti in secca in caso di repentino calo della portata. Le centrali idroelettriche possono modificare anche il trasporto di detriti, in particolare quando le aree di ristagno intrappolano i sedimenti causando un deficit di apporto solido nel corso inferiore. Per tale ragione si stanno risanando anche centrali idroelettriche che provocano oscillazioni di portata artificiali, nonché 150 impianti che causano deficit di apporto solido (UFAM 2015).

Le misure di rinaturazione e di risanamento descritte consentono di valorizzare gli ecosistemi acquatici, rendendoli così anche più resistenti ai fattori di stress causati dal clima. In caso di evento queste misure a lungo termine devono essere spesso affiancate anche da misure effica-

ci nel breve periodo, come piani d'emergenza per la pesca. Nell'estate del 2018, per esempio, lungo l'Alto Reno nei Cantoni di Sciaffusa, Turgovia e Zurigo sono stati dragati numerosi sbocchi di ruscelli al fine di creare luoghi di ritiro più freschi per i pesci (UFAM 2019b).

Indirizzi strategici per l'adattamento ai cambiamenti climatici

- Attuazione coerente dei piani di rinaturazione dei Cantoni: risanamento della libera circolazione dei pesci, risanamento dei deflussi discontinui, risanamento dei detriti e rivitalizzazione in considerazione dei cambiamenti climatici.
- Regolare valutazione dell'efficacia delle strategie e delle misure di protezione delle acque per la conservazione e la creazione di habitat acquatici adattati al clima e verifica delle misure di protezione delle acque in relazione ai cambiamenti climatici.

Maggiori informazioni e riferimenti sul tema «rinaturazione»

- UFAM 2015: Renaturierung der Schweizer Gewässer. Die Sanierungspläne der Kantone ab 2015.

7.3.4 Protezione delle risorse idriche e delle acque sotterranee

Le situazioni di penuria nell'approvvigionamento di acqua potabile causate dai periodi di siccità possono essere evitate mediante una buona pianificazione e azione preventiva. Durante i periodi di siccità sussiste però un fabbisogno elevato di acqua non potabile per l'irrigazione. Per proteggere le aziende di acqua potabile da richieste più incalzanti e le acque sotterranee e superficiali da uno sfruttamento eccessivo, occorre pianificare e gestire le risorse idriche a livello regionale.

I cambiamenti climatici stanno causando praticamente in tutta la Svizzera un aumento delle fasi di siccità nei mesi estivi e autunnali. Nel contempo aumenta in estate il fabbisogno di acqua non potabile soprattutto per l'irrigazione agricola. La figura 7-13 mostra in che modo i cambiamenti climatici modificheranno la penuria d'acqua nei mesi estivi (come rapporto tra il fabbisogno idrico e l'offerta

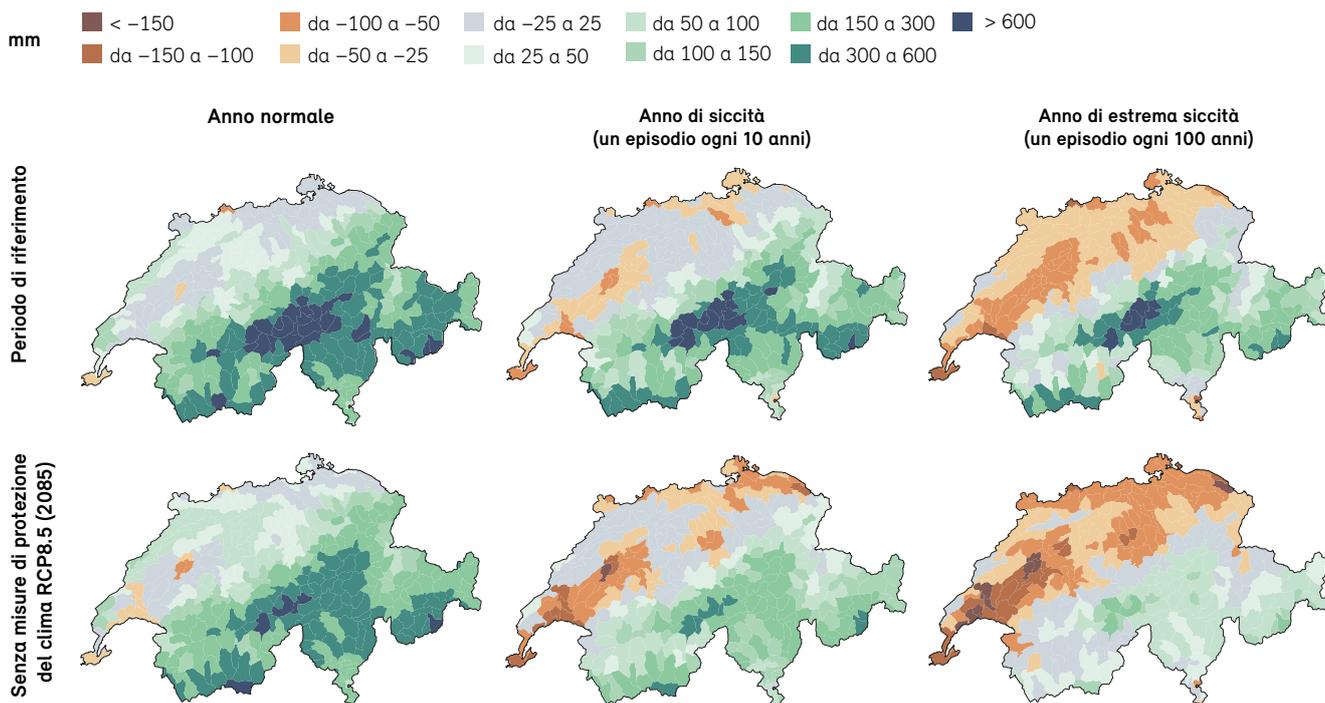
d'acqua nelle acque superficiali) a livello dei bacini imbriferi. Già nel periodo di riferimento alcuni bacini imbriferi evidenziano nella stagione estiva un deficit idrico dalle acque superficiali (Brunner et al. 2019a). Negli anni normali la domanda di acqua non potabile può comunque essere coperta con prelievi dalle acque sotterranee. Già oggi, nel caso di eventi di siccità che si verificano ogni 10-100 anni, ampie zone dell'Altipiano e del Giura sono interessate da una penuria d'acqua estiva. La conferma si è avuta negli anni di siccità 2003, 2015 e 2018, quando sono stati emanati divieti di prelievo dalle acque superficiali, ma anche da quelle sotterranee (UFAM 2019b). Soprattutto negli acquiferi di dimensioni più piccole non era infatti più possibile alcuna forma di prelievo. Poiché durante i periodi di siccità si riduce anche l'offerta di acque sotterranee, si può ritenere che in futuro anche i prelievi da tale fonte saranno sottoposti a maggiori restrizioni a livello regionale.

Garantire l'approvvigionamento di acqua potabile

L'approvvigionamento di acqua potabile può essere garantito mediante un'interconnessione delle aziende di acqua potabile e una migliore distribuzione. La base per tali misure è rappresentata da una pianificazione regionale dell'approvvigionamento idrico, la quale definisce le misure concrete per assicurare l'approvvigionamento di acqua potabile poi realizzate nell'ambito della rigenerazione naturale e dell'adattamento delle infrastrutture di approvvigionamento idrico. È inoltre importante che gli acquiferi utilizzati per l'approvvigionamento di acqua potabile non siano sfruttati eccessivamente per altre esigenze, in particolare quelle agricole. Occorre inoltre proteggere l'approvvigionamento idrico dalla domanda, avanzata da altri utenti, di usufruire di grandi quantità d'acqua a prezzi possibilmente convenienti. Ove necessario, bisogna organizzare o potenziare l'approvvigionamento di acqua non potabile. Ciò prestando particolare

Figura 7-13: Rischio di penuria d'acqua nei mesi estivi (giugno, luglio, agosto)

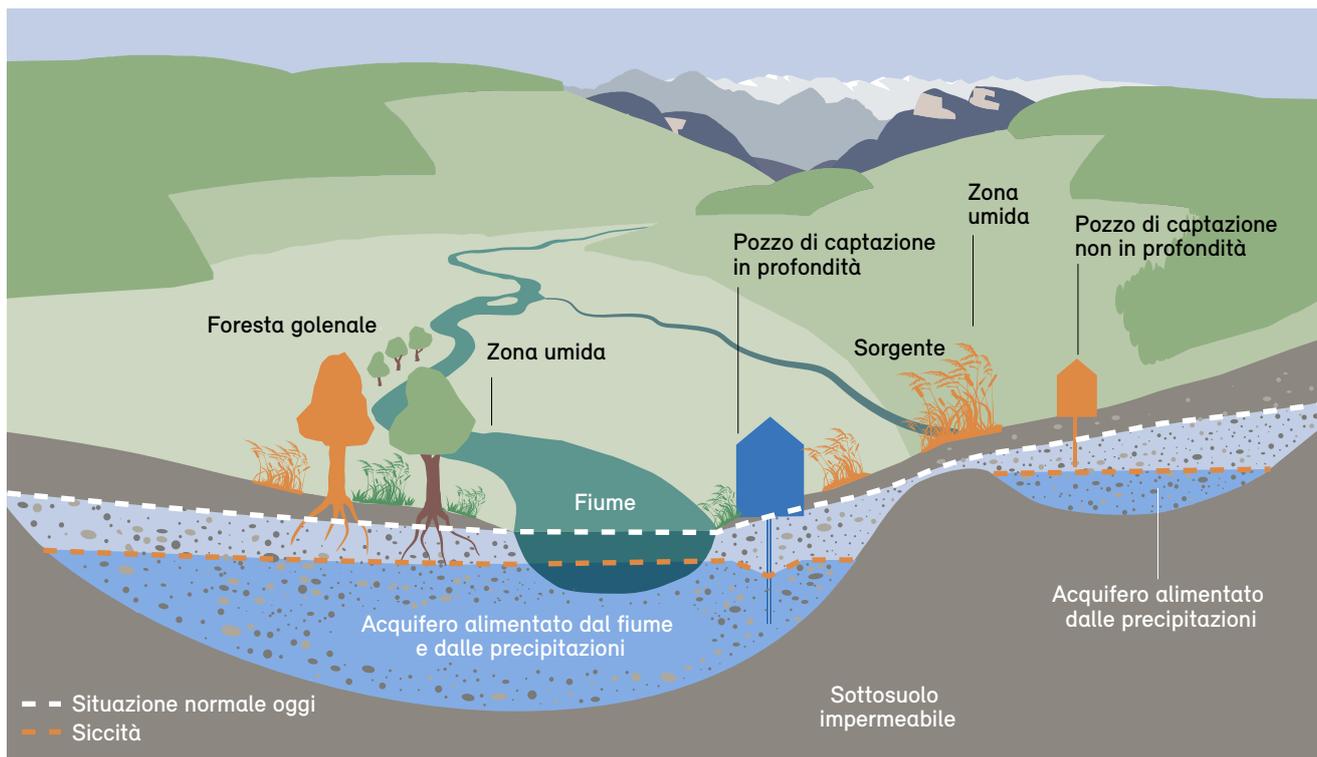
È riprodotto il bilancio idrico per un anno normale, un anno di siccità e un anno di estrema siccità, calcolato sulla base dell'offerta delle acque superficiali per bacino imbrifero meno il fabbisogno idrico in tale bacino secondo le condizioni attuali e future senza misure di protezione del clima (RCP8.5). Le tonalità marroni indicano una penuria d'acqua, quelle verdi e blu un eccesso d'acqua.



Fonte iconografica: Brunner et al. (2019a)

Figura 7-14: Livelli di falda e funzioni delle acque sotterranee

Effetto delle condizioni di siccità su diverse funzioni delle acque sotterranee: durante i periodi prolungati di siccità con bassi livelli di falda, le zone umide e i boschi golenali si prosciugano temporaneamente. Le fontane a pompa non riescono più a raggiungere le risorse idriche situate più in profondità e le sorgenti possono esaurirsi.



Fonte iconografica: rappresentazione propria secondo Hunkeler et al. (2020)

attenzione alla verità dei costi. L'adozione di misure adeguate in ambito agricolo, quali tecniche di irrigazione innovative, drenaggi adattati e l'introduzione di piante coltivabili resistenti alla siccità, permette di evitare uno sfruttamento eccessivo delle acque e/o situazioni di penuria nella disponibilità di acqua non potabile. In generale, al fine di evitare conflitti di interesse tra le utilizzazioni delle acque acquisisce maggiore importanza la gestione delle risorse idriche da parte dei Cantoni.

Garantire le funzioni delle acque sotterranee in caso di siccità

Le acque sotterranee devono essere utilizzate in modo da preservare le loro importanti funzioni naturali. Soprattutto nelle fasi di magra, esse contribuiscono infatti in misura determinante all'alimentazione di numerosi corsi d'acqua, impedendo così il prosciugamento totale o par-

ziale degli habitat acquatici. Anche i boschi dipendono dalle acque sotterranee durante i periodi di siccità (Seibert et al. 2018b). La sensibilità degli habitat e la vulnerabilità delle captazioni sotterranee alle fasi di magra e al calo dei livelli di falda variano notevolmente da luogo a luogo (fig. 7-14). Per preservare nel miglior modo possibile le funzioni delle acque sotterranee per l'uomo e per la natura anche in caso di siccità, occorre una considerazione regionale globale di tali risorse e del loro utilizzo.

Protezione coerente delle captazioni di acque sotterranee per l'approvvigionamento di acqua potabile

Durante i periodi di siccità diminuisce la disponibilità di acque sotterranee a livello locale e regionale, con il risultato che l'approvvigionamento idrico dipende da poche captazioni non interessate dalla siccità. La protezione preventiva di queste captazioni indispensabili per l'ap-

provvisionamento di acqua potabile deve essere rafforzata e accelerata. Inoltre, per tutte le captazioni di acque sotterranee di interesse pubblico (approvvigionamento di acqua potabile) occorre designare dei settori di alimentazione per la protezione della qualità dell'acqua e risanare le captazioni inquinate mediante l'adozione di misure. Ciò comprende soprattutto l'adattamento della gestione agricola al fine di eliminare le contaminazioni diffuse con nitrati e metaboliti dei prodotti fitosanitari. Per le captazioni di acqua potabile nelle quali sussiste un rischio di contaminazione a causa dell'utilizzo nel settore di alimentazione, occorre inoltre adottare misure adeguate per impedire una possibile contaminazione.

La pressione straordinariamente elevata causata dagli utilizzi nell'Altipiano e nelle valli alpine (cfr. fig. 7-15) è frequentemente causa di conflitti tra la protezione delle acque sotterranee e il fabbisogno di superfici per gli inse-

diamenti, le vie di comunicazione e l'agricoltura. Per tale ragione, oggi molte captazioni non sono più protette in modo globale secondo i requisiti del diritto federale. Secondo le disposizioni della legislazione in materia di protezione delle acque, sussiste qui una chiara necessità d'intervento. Le zone di protezione nuove ed esistenti devono essere protette in modo coerente affinché non siano minacciate da contaminazioni improvvise causate da eventi in prossimità della captazione (p.es. cisterne bucate, canalizzazioni di scarico difettose).

Numerose captazioni hanno persino dovuto essere dismesse perché non si poteva più garantire una sufficiente qualità dell'acqua o il rischio di contaminazione era troppo elevato. Per continuare a garantire la sicurezza dell'approvvigionamento, occorre risolvere simili conflitti tra superfici e contrastare le contaminazioni diffuse delle acque sotterranee.

Figura 7-15: Compromissione dell'ambiente circostante le captazioni di acque sotterranee a causa dell'ampliamento di insediamenti e vie di comunicazione

Le stazioni di pompaggio delle acque sotterranee originariamente realizzate nel 1962 su un prato verde a Niedergösgen (marrone) e Schönenwerd (blu) si trovano oggi nella zona dell'insediamento.

1962



2020



Indirizzi strategici per l'adattamento ai cambiamenti climatici

- Attuazione della gestione regionale delle risorse idriche da parte dei Cantoni.
- Sfruttamento del potenziale per un'utilizzazione delle acque più efficiente.
- Esecuzione coerente delle misure pianificatorie di protezione delle acque sotterranee e della pianificazione per l'utilizzazione parsimoniosa delle acque sotterranee (art. 43 LPAC in combinato disposto con l'art. 46 cpv. 2 OPAC), definizione e protezione dei settori di alimentazione.

Maggiori informazioni e riferimenti sul tema «protezione delle acque»

- Pagina web dell'UFAM dedicata ai deflussi residuali: www.bafu.admin.ch/deflussi-residuali
- Brunner M. et al. 2019a: Wasserspeicher. Welchen Beitrag leisten Mehrzweckspeicher zur Verminderung zukünftiger Wasserknappheit? Hydro-CH2018 Bericht.
- Basi pratiche per una gestione delle risorse idriche a livello regionale in tre moduli: www.bafu.admin.ch/gestione-delle-risorse-idriche
- Seibert J. et al. 2018b: BAFU-Projekt Niedrigwasser und Grundwasser.

7.4 Importanza internazionale delle acque svizzere

Reno, Rodano, Ticino, Inn e Doubs trasportano grandi quantità d'acqua dalla Svizzera nei Paesi confinanti e poi fino al mare. Poiché i Paesi confinanti o più valle dipendono da tali acque, la Svizzera ha una grande responsabilità nel garantire una gestione oculata di tale risorsa.

I Paesi confinanti con la Svizzera o più a valle utilizzano la risorsa acqua in molteplici modi, che sia come acqua potabile, per l'irrigazione, per il raffreddamento o per la produzione di energia elettrica. Inoltre le basi per un'ecologia delle acque intatta e la protezione contro le piene devono essere garantite anche lungo i corsi dei fiumi. I diversi interessi sono disciplinati da convenzioni internazionali, trattati di Stato o da organismi specifici (cfr. esempio concreto del Ticino, pag. 113). Anche la navigazione senza ostacoli sul Reno fino al mare è garantita da un atto ufficiale (Convenzione riveduta per la navigazione sul Reno o Convenzione di Mannheimer del 1868). Una panoramica degli interessi concordati a livello internazionale è mostrata nella figura 7-16.

Conseguenze per i Paesi attraversati dal Reno e per la navigazione sul Reno

Gli effetti dei cambiamenti climatici sulle acque di confine toccano in parte ben più i Paesi attraversati dal Reno che la Svizzera stessa. Per esempio, nel Reno a valle di Basilea si verificano eventi di piena soprattutto nei mesi invernali, quando invece a monte della città le portate sono ridotte. Con l'aumento delle portate invernali e delle precipitazioni invernali, il contributo della Svizzera alle piene nella stagione fredda è destinato ad aumentare. Diminuirà invece il contributo di neve e ghiaccio, una situazione che potrebbe intensificare ulteriormente i futuri eventi di magra in estate e in autunno lungo il corso del Reno. Per esempio, durante la fase di magra del settembre 2003, più del 75 per cento della portata del Reno all'altezza di Lobith al confine con i Paesi Bassi proveniva ancora dal bacino imbrifero a monte di Basilea, di cui il 16 per cento dallo scioglimento dei ghiacciai (Stahl et al. 2016). Durante questo periodo di forte magra persistente, la navigazione delle grandi imbarcazioni ha dovuto essere sensibilmente ridotta o, in parte, del tutto sospesa. Di

conseguenza, le importazioni per via fluviale per esempio di greggio o di mangimi sono calate del 20 per cento circa rispetto all'anno precedente (Schweizerische Rheinhäfen 2019). L'importanza economica e strategica della navigazione sul Reno è enorme: in termini di quantità, oltre il 10 per cento del commercio estero della Svizzera (pari a circa 7 milioni di tonnellate di merci e circa 100 000 container all'anno) passa attraverso il Reno. A causa della sua elevata dipendenza dalle importazioni attraverso il Reno, la Svizzera è fortemente interessata a una gestione del fiume concordata a livello internazionale. Se in futu-

ro, come previsto dagli scenari idrologici, il Reno dovesse essere interessato da eventi di magra più gravi e frequenti, ne scaturirebbero notevoli rischi economici.

Conflitti di obiettivi nell'utilizzazione delle acque

La gestione internazionale delle acque e le relative misure di adattamento sono però toccate in varia misura a seconda della regione. Le reazioni dei diversi utenti delle acque potrebbero intensificare i conflitti di obiettivi tra Paesi a monte e a valle, ma anche tra diversi settori, come mostra l'esempio concreto del Ticino.

Esempio concreto del Ticino, Lago Maggiore

Il bacino imbrifero del Lago Maggiore è condiviso più o meno a metà tra la Svizzera e l'Italia, mentre il lago si trova per la maggior parte in suolo italiano. L'interfaccia tra la Svizzera e l'Italia in termini di gestione delle acque è la diga di Sesto Calende, dove il deflusso del Lago Maggiore nel Ticino è regolato dal 1943. La Svizzera non ha alcuna influenza sulla gestione del deflusso, anche se già nel 1938 Italia e Svizzera avevano concordato una zona di regolazione per il livello del lago. Entro queste quote, il Consorzio del Ticino italiano può decidere liberamente in merito al deflusso del lago.

Nei mesi estivi, per le province lombarde e piemontesi a valle del fiume è fondamentale l'irrigazione: i canali Villoresi e Naviglio Grande alimentati dal Ticino convogliano fino a 120 m³/s verso le superfici coltivate lombarde (Gandolfi 2003). Ulteriori prelievi servono alle province piemontesi di Vercelli e Novara, nelle quali si concentra circa la metà della produzione di riso italiana. Dal punto di vista dei consorzi per l'irrigazione, il lago dovrebbe essere gestito come un bacino di ritenuta con un elevato livello idrometrico, in modo da poter irrigare senza restrizioni anche a luglio e agosto. D'altro canto, il fabbisogno idrico dell'agricoltura potrebbe essere enormemente ridotto per mezzo di tecniche applicative più efficienti, in quanto nel 2010 la percentuale di superfici con sistemi di microirrigazione in Lombardia ammontava appena all'1,4 per cento (Regione Lombardia 2015).

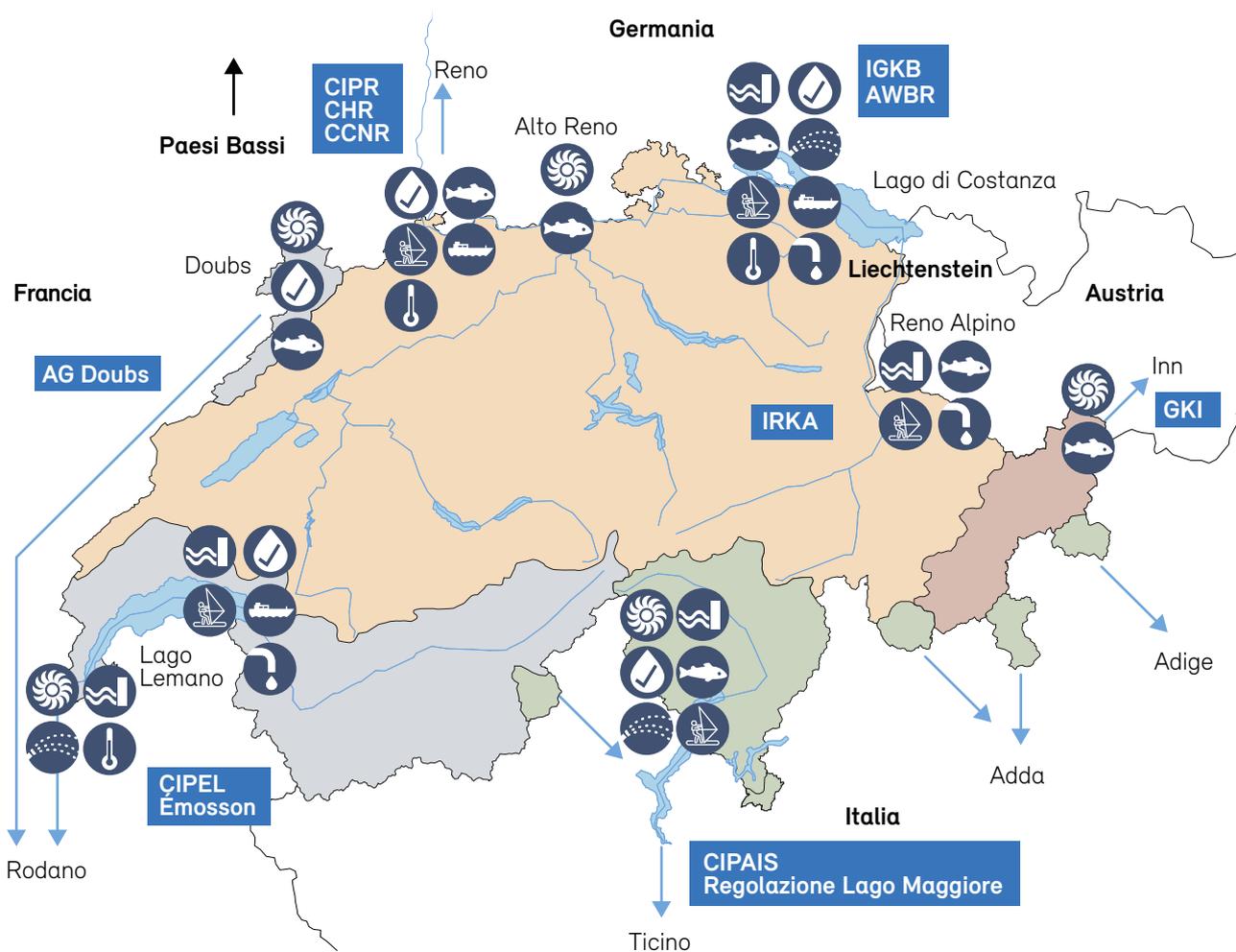
Il corso inferiore del Ticino con la zona di protezione della natura del Parco del Ticino deve fare i conti tutto l'anno con portate ridotte, in quanto fino al 90 per cento dell'acqua del fiume è deviato in canali. Le associazioni locali per la protezione della natura, come del resto l'agricoltura, si dicono pertanto favorevoli a un livello idrometrico possibilmente elevato nel Lago Maggiore, così da garantire deflussi residuali sufficienti anche in caso di siccità persistente.

A un innalzamento del livello idrometrico massimo nei mesi estivi si oppongono però i Comuni su ambo i lati del Confine che si affacciano sul Lago Maggiore. Un livello idrometrico elevato ridurrebbe infatti la capacità tampone per l'assorbimento delle precipitazioni intense che si verificano frequentemente nel bacino imbrifero del Lago Maggiore, facendo aumentare il pericolo di inondazioni lungo le rive del lago nonché lungo il corso del fiume, dove il Ticino si congiunge con il Po in prossimità di Pavia. Un livello più elevato avrebbe inoltre conseguenze negative sull'utilizzabilità delle spiagge e soprattutto in primavera sulla zona di protezione della natura delle Bolle di Magadino.

Da un'osservazione più attenta risulta che la regolazione del deflusso e del livello idrometrico del Lago Maggiore non costituisce tanto un conflitto tra l'Italia e la Svizzera, quanto piuttosto tra gli attori lungo il corso inferiore e gli interessi di chi vive in prossimità del lago.

Figura 7-16: Aspetti di gestione concordati a livello internazionale

La gestione delle acque transfrontaliere richiede una pianificazione concordata sotto molteplici punti di vista. A tal fine sono stati istituiti gruppi di lavoro e commissioni.



Ci sono diversi aspetti da considerare:

- | | | | |
|--|--|--|---|
|  Forza idrica |  Ecologia delle acque |  Navigazione |  Aare/Reno |
|  Protezione contro le piene |  Irrigazione |  Utilizzo termico |  Rodano |
|  Qualità dell'acqua |  Turismo |  Approvvigionamento di acqua potabile |  Inn/Danubio |
| | | |  Ticino/Po |

Organismi internazionali

- AG Doubs** Gruppi di lavoro binazionali Doubs
- AWBR** Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Bodensee-Rhein
- Regolazione Lago Maggiore** – Organismo di consultazione bilaterale italo-elvetico sulla regolazione del lago Maggiore
- CIPAIS** Commissione Internazionale per la protezione delle acque italo-svizzere
- CIPEL** Commission Internationale pour la protection des eaux du Léman

- Emosson** Groupe de travail franco-suisse sur les accords sur les eaux d'Emosson
- GKI** Gemeinschaftskraftwerk Inn
- IGKB** Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee
- CIPR** Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
- IRKA** Internationale Regierungskommission Alpenrhein
- CHR** Hydrologische Kommission des Rheins
- CCNR** Zentralkommission für die Rheinschifffahrt

Indirizzi strategici per l'adattamento ai cambiamenti climatici

- Gestione sostenibile dei bacini imbriferi fluviali internazionali con preziose arterie vitali per la natura e per l'uomo, affinché diventino più resistenti agli effetti dei cambiamenti climatici. Garantire o migliorare la qualità delle acque, essendo queste utilizzate per l'ottenimento di acqua potabile dai Paesi confinanti e a valle.
- Ottimizzazione dell'impiego d'acqua (Demand Management): creare stimoli per sfruttare i potenziali esistenti per un uso parsimonioso dell'acqua, per esempio nell'irrigazione e nel raffreddamento. Ciò ridurrà la pressione sulle risorse idriche e semplificherà la collaborazione transfrontaliera.
- Garanzia dell'affidabilità e sicurezza della navigazione sul Reno, per esempio mediante l'abbassamento del canale navigabile (già avviato nell'area urbana di Basilea).

Maggiori informazioni e riferimenti sul tema «gestione delle acque confinarie»

- Lanz K. 2020: Bewirtschaftung der Grenzgewässer. In: Lanz K. (ed.): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht.

8 Miglioramento delle basi conoscitive

L'adattamento ai cambiamenti climatici nella gestione delle acque è già iniziato. Per poter reagire in modo più efficace alle conseguenze dei cambiamenti climatici e perfezionare e ottimizzare le strategie di adattamento, occorrono ulteriori basi di dati e conoscitive di elevata qualità. Le lacune evidenziate nella ricerca devono essere colmate e il monitoraggio migliorato. Occorre inoltre intavolare un dialogo con gli utenti di queste informazioni.

Per l'adattamento ai cambiamenti climatici sono necessarie vaste basi conoscitive, da un lato riguardo ai processi naturali che si stanno trasformando a causa del clima e dall'altro in merito agli effetti già osservati e futuri sull'ambiente, sulla società e sull'economia. Queste basi conoscitive e decisionali sono solitamente elaborate da specialisti della ricerca e del monitoraggio ambientale in stretta collaborazione con esperti e utenti della pratica. Su tale base, gli specialisti dei diversi settori della gestione delle acque definiscono quindi le misure di adat-

tamento. Per poter utilizzare le basi conoscitive per l'elaborazione di misure di adattamento, è necessario che queste siano riunite, interpretate e in parte perfezionate e preparate in modo adeguato agli utenti.

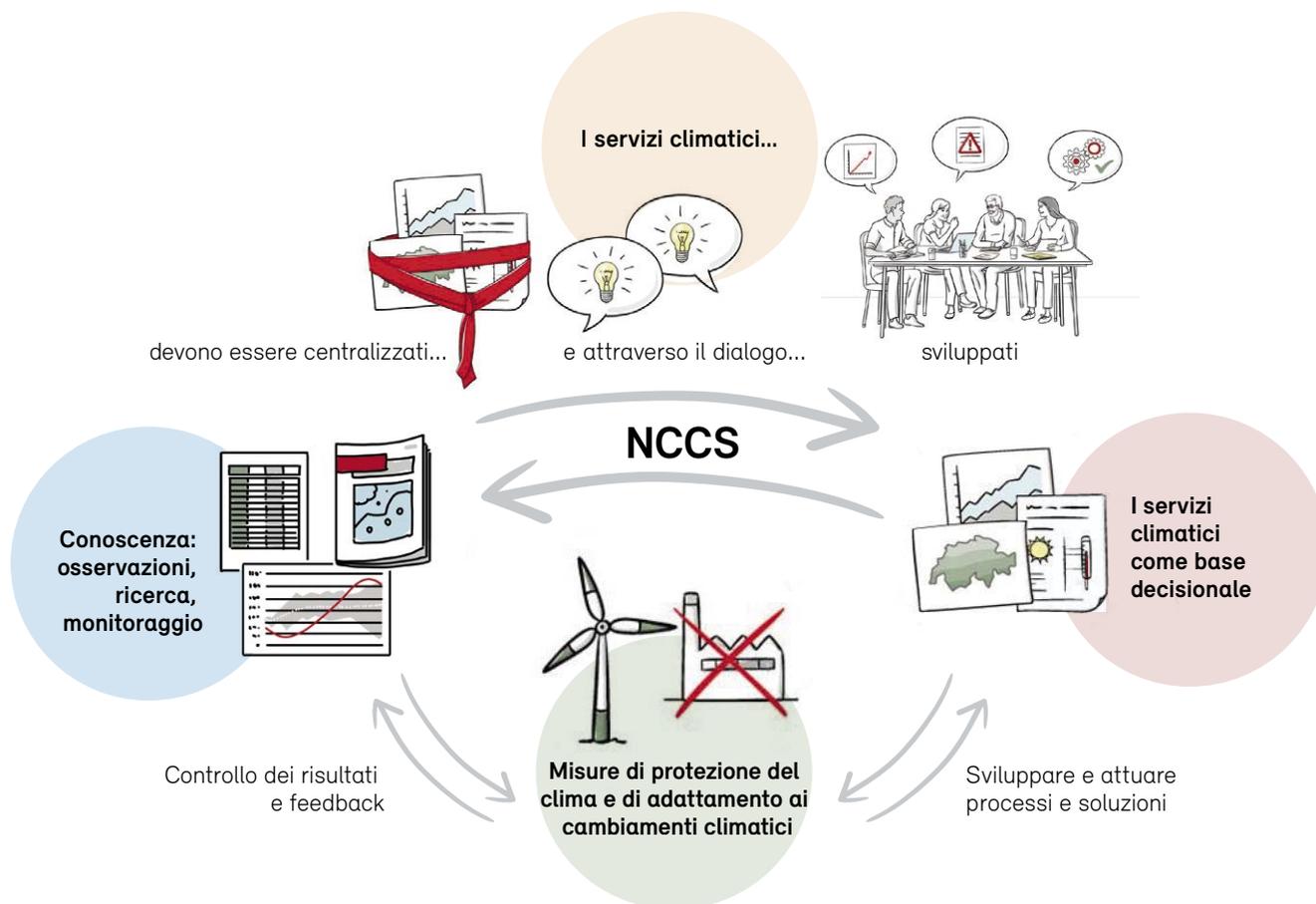
Hydro-CH2018 è una tematica prioritaria del National Centre for Climate Services (NCCS). Obiettivo del NCCS è mettere a disposizione le necessarie basi conoscitive preparate – denominate anche servizi climatici – per la Svizzera (cfr. riquadro). Un ulteriore compito del NCCS consiste nel trasmettere il fabbisogno di conoscenze della pratica alla ricerca e al monitoraggio ambientale. Viceversa, le misure di protezione del clima e di adattamento attuate con successo forniscono stimoli preziosi per ottimizzare le basi conoscitive e in particolare gli scenari futuri. La correlazione tra le conoscenze, i servizi climatici e le misure così come il ruolo del NCCS in questo contesto sono illustrati nella figura 8-1. Le attività in questione sono svolte nell'ambito delle tematiche prioritarie.

Servizi ambientali e NCCS

I servizi ambientali sono informazioni e dati basati su conoscenze scientifiche in merito al clima passato, presente e futuro e alle sue conseguenze per l'ambiente, l'economia e la società. Essi costituiscono la base per decisioni compatibili con il clima. Per tale ragione la World Meteorological Organization (WMO) ha istituito nel 2009 il Global Framework for Climate Services GFCS (<https://gfcs.wmo.int/>), che esorta a stabilire meccanismi di coordinamento nazionali per lo sviluppo e la diffusione dei servizi climatici. Per la Svizzera tali compiti sono coordinati dal National Centre for Climate Services (NCCS) fondato nel 2015 quale rete della Confederazione. Il NCCS è organizzato come un centro virtuale ed è il risultato dell'accorpamento di unità amministrative centrali e decentrate⁸ della Confederazione. Il suo obiettivo è quello di integrare i servizi climatici trasversalmente a diversi settori e metterli a disposizione per l'utilizzo, promuovere il dialogo con gli attori e, in tal modo, creare e comunicare servizi climatici coordinati su misura. Ciò consente agli utenti di sviluppare processi e soluzioni per la protezione del clima e per l'adattamento ai cambiamenti climatici.

⁸ Membri del NCCS: Ufficio federale di meteorologia e climatologia MeteoSvizzera, Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Ufficio federale dell'agricoltura (UFAG), Ufficio federale della sanità pubblica (UFSP), Ufficio federale della protezione della popolazione (UFPP), Ufficio federale della sicurezza alimentare e di veterinaria (USAV), Ufficio federale dell'energia (UFE), PF Zurigo, Istituto federale di ricerca per la foresta, la neve e il paesaggio WSL. Partner NCCS: Agroscope, Centro Oeschger per la ricerca sui cambiamenti climatici, Istituto di ricerca dell'agricoltura biologica FiBL, ProClim, Präventionsstiftung der Kantonalen Gebäudeversicherungen (KGV), Schweizer Hagel-Versicherung, Associazione Svizzera d'Assicurazioni ASA

Figura 8-1: Correlazione tra conoscenze, servizi climatici quale base decisionale e misure di protezione del clima e di adattamento, nonché il ruolo del NCCS in tale sistema



Fonte iconografica: secondo il NCCS

Molti servizi climatici esistono già

Le tematiche prioritarie del NCCS apprestano servizi climatici come gli scenari climatici CH2018 quale base per tutte le altre tematiche prioritarie e gli scenari idrologici Hydro-CH2018. Servizi climatici sono creati anche con altri progetti della Confederazione come il programma pilota «Adattamento ai cambiamenti climatici». I servizi climatici si configurano nelle forme più disparate:

- i prodotti di sintesi consentono agli interessati di accedere in modo rapido e semplice alle conoscenze attuali sotto forma, per esempio, di rapporti conclusivi e informativi, opuscoli del NCCS, informazioni sulla piattaforma web del (www.nccs.admin.ch) e video;
- gli eventi come per esempio i workshop con attori interessati e il simposio conclusivo del progetto Hydro-CH2018, il forum NCCS che si tiene a cadenza annuale

o il simposio «Adattamento ai cambiamenti climatici» offrono una piattaforma per la trasmissione di conoscenze e per il dialogo tra scienza e pratica, ma anche per la formulazione delle esigenze da parte degli attori coinvolti;

- i portali di dati come l'Atlante interattivo del NCCS, i dati HADES o il portale delle mappe www.map.geo.admin.ch mettono a disposizione scenari climatici e idrologici, dati e grafici;
- consulenza, comunicazione e relazioni con i media sul tema dei cambiamenti e dei servizi climatici.

Sussiste l'esigenza di ulteriori servizi climatici

Le seguenti esigenze in termini di servizi climatici nei settori degli scenari climatici, dell'idrologia e della gestione delle acque sono state identificate nell'ambito di un workshop del 2018 con attori interessati:

- informazioni sui periodi di siccità e durante gli stessi: da un lato vengono auspiccate informazioni attuali e previsioni in caso di evento e dall'altro sussiste anche una necessità di proiezioni a lungo termine e ad alta risoluzione sulle fasi di magra e sugli indicatori di siccità (p. es. Q_{347} e NM7Q);
- informazioni capillari e su scala nazionale relative alle temperature attuali e future delle acque per la protezione delle acque e per l'utilizzo termico;
- informazioni capillari e su scala nazionale in merito alle forti precipitazioni locali ed estese, nel presente e nel futuro, per lo smaltimento delle acque urbane e il drenaggio stradale e per la protezione contro le piene;
- basi idrologiche per l'agricoltura a scopo di sensibilizzazione nonché come basi decisionali per la politica agricola, per la consulenza agricola e per assicurazioni, uffici cantonali e aziende agricole;
- informazioni nell'ambito delle acque sotterranee sul trasporto di calore, in particolare per le regioni urbane con un elevato utilizzo, per mezzo di sonde geotermiche, nonché riguardo ai processi di accumulazione negli acquiferi e all'importanza delle regioni carsiche durante i periodi di magra;
- attività e materiali relativi a formazione, comunicazione, sensibilizzazione e consulenza.
- considerazione sistematica dell'intero ciclo dell'acqua: atmosfera, superficie terrestre, idro(geo)logia, ecosistemi ed effetti delle diverse utilizzazioni. I singoli sottosistemi sono indipendenti gli uni dagli altri e si influenzano fortemente a vicenda. La maggior parte dei modelli ambientali si limita però a un unico sottosistema, semplificando notevolmente gli altri sottosistemi o considerandoli soltanto come condizione marginale costante. Ciò rende difficile riconoscere e quantificare gli effetti a retroazione tra i sottosistemi;
- analisi approfondita degli effetti dei cambiamenti climatici sulla qualità dell'acqua e sugli ecosistemi acquatici. Per esempio si sa ancora poco riguardo alle conseguenze di un aumento dell'irrigazione sul carico di pesticidi e nitrati nelle acque oppure relative agli effetti dei cambiamenti climatici sull'erosione e sul trasporto di sedimenti. Mancano inoltre conoscenze sufficienti sull'effetto combinato delle sostanze inquinanti e dello stress causato dal clima (fattori di stress multipli) sugli ecosistemi acquatici;
- gestione delle incertezze contenute nelle previsioni. Particolarmente rilevanti sono le incertezze riguardo agli sviluppi che possono alterare un sistema in modo rapido e irreversibile, modificandone infine lo stato (punti di non ritorno). Le conoscenze su tali punti di non ritorno sono ad oggi insufficienti per una modellizzazione. Poiché però un sistema di allerta precoce è indispensabile per poter evitare cambiamenti irreversibili, occorre condurre e approfondire la ricerca nell'ambito dei punti di non ritorno;
- ricerca socioeconomica e politica: servono scenari socioeconomici quale input per la modellizzazione ambientale, considerazioni sui costi/benefici della protezione del clima e delle misure di adattamento, accettazione e valori (legittimazione delle decisioni operative) nonché obiettivi per il futuro sviluppo perseguito delle acque.

Portare avanti la ricerca in modo mirato

Per soddisfare la domanda sopra descritta di servizi climatici, occorre tra l'altro portare avanti le attività di ricerca. Oltre alla prosecuzione della ricerca fondamentale con l'obiettivo di migliorare la conoscenza dei processi e i modelli che ne derivano, sono stati identificati come particolarmente importanti anche gli ambiti seguenti:

- ulteriore sviluppo della modellizzazione del clima e del downscaling statistico, in particolare in considerazione dei processi e delle strutture su piccola scala come per esempio la formazione delle precipitazioni convettive (p. es. temporali), allo scopo di migliorare la risoluzione spaziale e temporale e la coerenza tra le singole variabili climatiche. Sulla base di tale ulteriore sviluppo ci si attendono affermazioni più precise riguardo alla futura evoluzione degli eventi di piena;
- affermazioni sull'evoluzione/cambiamento degli eventi di piena estesi per quanto riguarda probabilità, portata ed estensione spaziale;

Oltre all'approntamento di tali basi scientifiche, si dovrebbe anche intensificare ulteriormente l'interconnessione di ricerca e pratica, per esempio mediante la creazione di interfacce sistematiche (come la piattaforma VSA per la qualità dell'acqua).

Aggiornare regolarmente gli scenari idrologici

Le misure per l'adattamento ai cambiamenti climatici sono orientate agli scenari idrologici e adottano in parte una prospettiva a molto lungo termine. Un aggiornamento frequente degli scenari idrologici potrebbe di conseguenza complicare l'adattamento. Gli scenari dovrebbero quindi essere aggiornati soltanto in caso di cambiamenti rilevanti nel bilancio idrico. Quali cambiamenti sono rilevanti deve essere stabilito attraverso il dialogo con gli utenti. Modifiche significative degli scenari idrologici potrebbero derivare per esempio da nuove nozioni ottenute sulla base di scenari climatici di nuova generazione, da nuove conoscenze sui processi o da una migliore disponibilità delle basi di dati. A tal fine è necessario creare degli scenari idrologici operazionalizzati (analogamente agli scenari climatici) e monitorare gli sviluppi scientifici nell'ambito del NCCS.

Orientare meglio il monitoraggio esistente alle questioni climatiche

Tanto per la ricerca quanto per la creazione di scenari o per l'attuazione di misure di adattamento nel settore delle acque è fondamentale disporre di basi di dati sul clima, sul bilancio idrico, sulla gestione delle acque e sulle caratteristiche dei bacini. Per poter osservare e documentare i cambiamenti nelle acque causati dal clima servono serie di misurazioni prolungate e omogenee, possibilmente non influenzate dalla gestione delle acque (ossia dalle utilizzazioni umane). È dunque molto importante portare avanti le serie di misurazioni che soddisfano tali criteri. Ciò è tutt'altro che ovvio, in quanto accade continuamente di dover abbandonare o spostare le stazioni di misura esistenti, per esempio a causa di misure di sistemazione idraulica dei corsi d'acqua per migliorare la protezione contro le piene, in conseguenza dell'ampliamento o trasformazione di sistemi di sfruttamento idrico, o anche per rendere il monitoraggio maggiormente praticabile.

Il monitoraggio dei parametri idrologici (p. es. deflusso, livello di falda) è servito in passato principalmente per l'utilizzazione delle acque, per la protezione contro le piene o per la protezione delle acque, ma non per l'osservazione degli effetti dei cambiamenti climatici. Alcuni parametri rilevanti per il clima e bacini imbriferi sono pertanto sottorappresentati nelle reti di misurazione. È questo il caso delle aree ghiacciate alpine per quanto riguarda le misu-

razioni di portata e soprattutto dei corsi d'acqua di piccole dimensioni dell'Altipiano per quanto riguarda la rete di misurazione della temperatura delle acque. Nei grandi laghi occorre rafforzare la registrazione continua dei profili di profondità delle temperature. In particolare per i laghi nelle regioni alpine, che si stanno formando solo ora in conseguenza del ritiro dei ghiacciai, si rileva una mancanza di dati o persino una totale assenza di monitoraggio. La base di dati è insufficiente anche riguardo al trasporto di sedimenti e all'umidità del suolo.

A livello internazionale sono stati raccolti e messi a disposizione dati relativi a numerose serie di misurazioni rilevanti per il clima, tra l'altro da parte del Global Climate Observing System GCOS⁹. In Svizzera diversi istituti gestiscono reti di misurazione che consentono di avere nel complesso un buon quadro generale degli effetti dei cambiamenti climatici. GCOS Svizzera persegue l'obiettivo di ottenere queste serie di misurazioni rilevanti per il clima e, all'occorrenza, organizzarle e coordinarle.

Le basi di dati importanti sono assenti o insufficienti

La modellizzazione idrologica, ma anche le modellizzazioni degli sviluppi negli ambiti agricoltura, economia forestale o ecologia costituiscono la base per diverse misure di adattamento. Tutti questi modelli necessitano di dati di base che attualmente non sono disponibili o lo sono solo con una qualità e risoluzione insufficiente. Al centro si collocano soprattutto informazioni sistematiche e capillari su suolo, geologia e utilizzazione del suolo, con particolare riguardo per il rilevamento delle informazioni sul suolo a livello dell'intera Svizzera.

Per il momento la maggior parte dei Cantoni non rileva in modo sistematico le cifre relative all'attuale utilizzazione delle acque da parte di agricoltura, turismo, attività industriali e commerciali. Anche gli scenari socioeconomici futuri, dai quali si dovrebbe desumere il futuro sviluppo del consumo idrico, sono disponibili solo in parte. Sarebbe tuttavia utile conoscere l'impiego d'acqua da parte sia di utenti individuali sia di interi rami quale base per un adattamento a lungo termine della gestione delle acque ai cambiamenti climatici. Questo perché solo la conoscenza esatta dei modelli di consumo consente

⁹ <https://gcos.wmo.int>

di dimensionare adeguatamente le reti di approvvigionamento e di allineare l'impiego d'acqua all'offerta disponibile nel lungo periodo.

In Svizzera non vengono raccolti sistematicamente neppure i dati relativi agli effetti già osservati dei cambiamenti climatici sulla gestione delle acque, per esempio dove e quando devono essere emanati divieti di prelievo durante le fasi di magra. È vero che alcuni dati sono disponibili a livello cantonale, regionale e locale nonché presso attori privati, ma le attività di rilevamento e raccolta non sono svolte in maniera sistematica e uniforme. Poiché le informazioni sulla gestione delle acque sono però particolarmente importanti per l'adattamento ai cambiamenti climatici, è necessario rilevare in maniera coordinata i dati sulle conseguenze climatiche e metterli a disposizione a livello centrale.

9 Conclusione: la protezione del clima e l'adattamento ai cambiamenti climatici sono imprescindibili

Gli effetti dei cambiamenti climatici sulle risorse idriche, già oggi percettibili, saranno sempre maggiori in futuro. Se non verrà posto un freno ai cambiamenti climatici, si verificheranno grandi cambiamenti nelle acque, con gravi ripercussioni sulla loro ecologia e gestione. Se invece si riuscirà a raggiungere gli obiettivi dell'Accordo di Parigi e mantenere il riscaldamento globale nettamente al di sotto dei 2°C, molti di questi cambiamenti potranno essere evitati e l'adattamento sarà più facile e meno oneroso.

I risultati di Hydro-CH2018 mostrano che le portate continueranno ad aumentare nei mesi invernali e a diminuire in quelli estivi. Proseguirà anche lo scioglimento dei ghiacciai e cadrà sempre meno neve. I periodi di siccità e di canicola straordinaria nella stagione estiva si intensificheranno, causando situazioni di penuria d'acqua. Le temperature delle acque aumenteranno, con conseguenze in parte gravi per gli organismi acquatici. Sussistono però anche incertezze in merito all'evoluzione futura, per esempio per quanto riguarda la frequenza degli eventi estremi idrologici o il raggiungimento di punti di non ritorno ecologici, a partire dai quali si verificheranno cambiamenti radicali e irreversibili. Per poter stimare meglio gli sviluppi futuri, è indispensabile monitorare i cambiamenti e migliorare le basi conoscitive, nonché disporre di scenari idrologici affidabili. Quale base a tal fine occorre approntare e sviluppare una solida infrastruttura di misurazione idrologica con serie di misurazioni affidabili. Servono inoltre previsioni sulle fasi di siccità e di magra che si avvalgano dei nuovi metodi messi a disposizione dalla digitalizzazione e dal telerilevamento.

La protezione delle acque, l'utilizzazione delle acque, la protezione contro le piene, ma anche l'agricoltura devono adeguarsi alle nuove condizioni idrologiche caratterizzate da una modificata disponibilità delle acque. Esistono però grandi differenze nell'entità dei cambiamenti a

seconda che il clima futuro evolva secondo uno scenario con o senza misure globali per la protezione del clima, come emblematicamente dimostrato da un confronto degli scenari per i corsi d'acqua nei mesi estivi. Con una protezione coerente del clima, l'aumento della temperatura dei corsi d'acqua nell'Altipiano potrebbe essere limitato a meno di 2°C, e il calo delle portate estiva al 20 per cento, entro la fine del secolo. Senza misure di protezione del clima il riscaldamento dei fiumi dell'Altipiano sarebbe invece di circa 4,5°C e il trasporto d'acqua nei mesi estivi diminuirebbe fino al 50 per cento, anche nella media su più anni. Questo sviluppo causerebbe anche un più frequente prosciugamento dei corsi d'acqua di piccole dimensioni. Un riscaldamento e un calo della portata di tale entità modificherebbero quindi le acque, almeno nei mesi estivi, in un modo mai visto prima. Gli attuali ecosistemi acquatici e la composizione e diffusione delle specie cambierebbe in modo radicale e inarrestabile.

La limitazione dei cambiamenti climatici è dunque importante anche dal punto di vista delle acque. Affinché gli ecosistemi possano assolvere le loro funzioni ecosistemiche essenziali anche nel lontano futuro è inoltre decisivo uno sviluppo previdente delle acque. L'avvio del programma di rinaturazione per la rivitalizzazione delle acque e per il risanamento ecologico dell'energia idroelettrica, l'assicurazione di adeguati deflussi residuali, il potenziamento degli impianti di depurazione e la riduzione degli apporti di sostanze dall'agricoltura sono tutti fattori centrali per ridurre la pressione sulle acque. Poiché tale pressione aumenterà ulteriormente con i cambiamenti climatici, occorre attribuire ancora maggiore importanza alla protezione e alla promozione di acque il più possibile naturali.

La domanda d'acqua non potabile, in particolare da parte dell'agricoltura, aumenterà sensibilmente a fronte di una contemporanea diminuzione dell'offerta. Il manteni-

mento di gran parte degli attuali sistemi e utilizzazioni non sarà più possibile e occorrerà adattarli. L'agricoltura, per esempio, potrebbe adattarsi mediante l'introduzione di colture o varietà resistenti al calore e alla siccità, un impiego più efficiente dell'acqua o la creazione di infrastrutture per l'accumulo e il trasporto di acqua. Anche nelle attività industriali e commerciali è importante sviluppare e promuovere tecniche e procedimenti per un uso parsimonioso dell'acqua. Per prevenire problemi a livello locale occorrono inoltre pianificazioni regionali dell'approvvigionamento idrico estese a tutti i settori di utilizzazione.

I cambiamenti saranno particolarmente marcati in alta montagna. L'innalzamento dell'isoterma di zero gradi avrà ripercussioni sul turismo invernale, con conseguenze negative potenzialmente elevate per l'industria turistica. In compenso si delineeranno anche opportunità per il turismo estivo nelle Alpi e lungo i corsi e specchi d'acqua. I pericoli naturali aumenteranno a causa dello scioglimento dei ghiacciai e del riscaldamento del permafrost, ma anche per effetto dell'intensificarsi delle forti precipitazioni. Di tali pericoli si tiene già conto con la gestione integrale dei rischi.

In alta montagna nasceranno nuovi laghi, corsi d'acqua e paesaggi golenali. Questi rivestono grande importanza sotto il profilo ecologico, ma potrebbero essere sfruttati anche per la produzione di energia elettrica. È dunque importante avviare un processo di accertamento su scala nazionale e trasversale ai settori in merito alla futura gestione di tali paesaggio modificati. La trasformazione idrologica in alta montagna avrà ripercussioni anche sui Paesi confinanti, dove molte utilizzazioni dipendono dalle acque provenienti dalla Svizzera.

La natura, così come l'utilizzazione delle acque, la protezione contro le piene e la protezione delle acque hanno già iniziato ad adattarsi alle mutate condizioni. Con la strategia «Adattamento ai cambiamenti climatici in Svizzera» (Confederazione Svizzera 2012), il Consiglio federale ha creato il quadro di riferimento per un modo di procedere coordinato. Essa definisce gli obiettivi di adattamento e descrive le principali sfide, così come i campi d'intervento per l'adattamento a livello federale. La strategia di adattamento è stata attuata con un primo piano d'azione

per gli anni 2014-2019 (Confederazione Svizzera 2014). Un secondo piano d'azione, approvato nel 2020, disciplina l'attuazione negli anni 2020-2025 (Confederazione Svizzera 2020).

I risultati di Hydro-CH2018, laddove già disponibili, sono confluiti nell'elaborazione del piano d'azione 2020-2025 (tab. A-3). Per un adattamento riuscito è però necessario che i cambiamenti nel regime idrico causati dal clima non evolvano troppo rapidamente. Dal punto di vista delle acque non ci sono dubbi: la protezione del clima non è un'opzione ma una necessità! Soltanto con la protezione del clima si potranno evitare cambiamenti di ampia portata e limitare i costi per l'adattamento.

I cambiamenti climatici sono un fenomeno globale. Con l'Accordo di Parigi siglato il 12 dicembre 2015 in occasione della Conferenza sul clima, le Parti contraenti s'impegnano a mantenere il riscaldamento globale al di sotto dei 2 °C e a perseguire un riscaldamento massimo di 1,5 °C. La Svizzera ha ratificato l'accordo il 6 ottobre 2017, impegnandosi a ridurre le emissioni entro il 2030 del 50 per cento rispetto ai livelli del 1990. Entro il 2050 le emissioni di gas serra dovranno essere abbassate allo «zero netto». Nel contempo, però, anche l'adattamento ai cambiamenti climatici dovrà essere portato avanti con tutte le forze.

10 Bibliografia

Rapporti Hydro-CH2018

Arnoux M., Hunkeler D., Cochand F., Brunner P., Schaefli B. 2020a: Dynamiques du stockage en eau souterraine et du régime hydrologique des bassins versants alpins face aux changements climatiques. Rapport Hydro-CH2018. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 23.

Ayala A., Farinotti D., Stoffel M., Huss M. 2020: Glaciers. Hydro-CH2018 report. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 44. DOI 10.3929/ethz-b-000398099.

Benateau S., Gaudard A., Stamm C., Altermatt F. 2019: Climate change and freshwater ecosystems: Impacts on water quality and ecological status. Hydro-CH2018 report. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 110. DOI: 10.5167/uzh-169641.

Brunner M., Björnsen Gurung A., Speerli J., Kytzia S., Bieler S., Schwere D., Stähli M. 2019a: Wasserspeicher. Welchen Beitrag leisten Mehrzweckspeicher zur Verminderung zukünftiger Wasserknappheit? Hydro-CH2018 Bericht. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 66.

Burlando P., Peleg N., Moraga-Navarrete S., Molnar P., Fatichi S. 2020: Evaluation of future hydrological scenarios using stochastic high-resolution climate data. Hydro-CH2018 report. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 50.

Epting J., Huggenberger P., Affolter A., Michel A. 2020: Ist-Zustand und Temperatur-Entwicklung Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen. Hydro-CH2018 Bericht. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 119.

Freudiger D., Vis M., Seibert J. 2020: Quantifying the contributions to discharge of snow and glacier melt. Hydro-CH2018 report. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 50.

Hirschi M., Davin E.L., Schwingshackl C., Wartenburger R., Meier R., Gudmundsson L., Seneviratne S.I. 2020: Soil moisture and evapotranspiration. Hydro-CH2018 report. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 48. DOI: 10.3929/ethz-b-000389455.

Holzkämper A., Cochand F., Rössler O., Brunner P., Hunkeler D. 2020: AgriAdapt – Modellgestützte Untersuchung der Einflüsse von Klima- und Landnutzungsänderungen auf Grundwasserressourcen im Berner Seeland. Hydro-CH2018 Bericht. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 38.

Hunkeler D., Malard A., Arnoux M., Jeannin P.Y., Brunner P. 2020: Effect of Climate Change on Groundwater Quantity and Quality in Switzerland. Hydro-CH2018 report. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 79.

Kohn I., Stahl K., Stoelzle M. 2019: Low Flow Events – a Review in the Context of Climate Change in Switzerland. Hydro-CH2018 report. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 75. DOI: 10.6094/UNIFR/150448.

Lanz K. (ed.) 2020: Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 400.

Marty C., Bavay M., Farinotti A., Huss M. 2020: Snow. Hydro-CH2018 report. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 25. DOI: 10.16904/slf.2.

Matti B., Andres N., Zappa M., Bogner K., Liechti K., Seibert J., van Meerveld I., Viviroli D., Seneviratne S.I., Hirschi M., Schaefli B. (in elaborazione): Uncertainty and further methodological topics. Hydro-CH2018 report. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna.

Michel A., Bouffard D., Huwald H., Råman Vinnå C., Schmid M. (in elaborazione): Water temperature in lakes and rivers. Hydro-CH2018 report. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna.

Mülchi R., Rössler O., Schwanbeck J., Weingartner R., Martius O. 2020: Neue hydrologische Szenarien für die Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 51.

Nötzli J. e Phillips M. 2019: Mountain permafrost hydrology. Hydro-CH2018 report. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 18. DOI: 10.16904/slf.1.

Reynard E., Calianno M., Milano M. 2020a: Eau et tourisme. Rapport dans le cadre de Hydro-CH2018. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 40.

Reynard E., Calianno M., Milano M. 2020b: Wasser und Tourismus. In: Lanz K. (ed.): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 45.

Ruiz-Villanueva V. e Molnar P. 2020: Past, current and future changes in floods in Switzerland. Hydro-CH2018 report. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 79.

Speerli J., Gysin S., Bieler S., Bachmann A.-K. 2020: Auswirkungen des Klimawandels auf den Sedimenttransport. Hydro-CH2018 Bericht. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 49.

Speich M., Lischke H., Zekollari H., Huss M., Farinotti D., Zappa M. (in elaborazione): Einfluss der Walddynamik auf den zukünftigen Wasserhaushalt von Schweizer Einzugsgebieten. Hydro-CH2018 Bericht. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna.

Weingartner R. e Schwanbeck J. 2020: Veränderung der Niedrigwasserabflüsse und der kleinsten saisonalen Abflüsse in der Schweiz im Zeitraum 1961 – 2018. Hydro-CH2018 Bericht. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 42.

Weingartner R. 2018: Veränderung der Abflussregimes der Schweiz in den letzten 150 Jahren. Hydro-CH2018 Bericht. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 67.

Publicazioni scientifiche da Hydro-CH2018

Arnoux M., Halloran L.J.S., Berdat E., Hunkeler D. 2020b: Characterising seasonal groundwater storage in alpine catchments using timelapse gravimetry, water stable isotopes, and water balance methods. *Hydrological Processes*, 34(22): 4319–4333. DOI: 10.1002/hyp.13884.

Arnoux M., Brunner P., Schäferli B., Mott R., Cochand F., Hunkeler D. 2021: Low-flow behavior of alpine catchments with varying quaternary cover under current and future climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 592: 125591. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125591.

Arnoux M., Cochand F., Schäferli B., Jonas T., Brunner P., Hunkeler D.: Storage in quaternary deposits buffers the discharge response to climate change of a small alpine catchment. In preparazione per *Groundwater*.

Brunner M., Björnsen Gurung A., Speerli J., Kytzia S., Bieler S., Schwere D., Stähli M. 2019b: Beitrag von Wasserspeicher zur Verminderung zukünftiger Wasserknappheit? *Wasser Energie Luft*, 111(3), Baden: 145–152.

Brunner M., Björnsen Gurung A., Zappa M., Zekollari H., Farinotti D., Stähli M. 2019c: Present and Future Water Scarcity in Switzerland: Potential for Alleviation through Reservoirs and Lakes. *Science of The Total Environment*, 666: 1033–1047. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.169.

- Brunner M., Farinotti D., Zekollari H., Huss M., Zappa M. 2019d: Future shifts in extreme flow regimes in Alpine regions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(11): 4471–4489. DOI: 10.5194/hess-23-4471-2019.
- Cochand F., Brunner P., Hunkeler D., Rössler O., Holzkämper A.: Cross-sphere modelling to evaluate impacts of climate and land management changes on groundwater dynamics. In preparazione per *Sciences of the Total Environment*.
- Epting J., Michel A., Affolter A., Huggenberger H. 2021: Climate change effects on groundwater recharge and temperatures in Swiss alluvial aquifers. *Journal of Hydrology*, 11, 100071. DOI: 10.1016/j.hydroa.2020.100071.
- Gaudard A., Råman Vinnå L., Bärenbold F., Schmid M., Bouffard D. 2019: Toward an open access to high-frequency lake modeling and statistics data for scientists and practitioners – the case of Swiss lakes using Simstrat v2.1. *Geoscientific Model Development*, 12(9): 3955–3974. DOI: 10.5194/gmd-12-3955-2019.
- Holzkämper A. 2020: Varietal adaptations matter for agricultural water use – a simulation study on grain maize in Western Switzerland. *Agricultural Water Management*, 237(106202). DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106202.
- Kellner E. e Brunner M. 2020: Reservoir governance in world's water towers needs to anticipate multi-purpose use. *Earth's Future*. DOI: 10.1029/2020EF001643.
- Michel A., Brauchli T., Lehning M., Schaefli B., Huwald H. 2019: Stream temperature evolution in Switzerland over the last 50 years. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(1): 115–142. DOI: 10.5194/hess-24-115-2020.
- Michel A., Carletti F., Sharma V., Huwald H., Lehning M.: Snow cover changes in Switzerland using an enhanced temporal downscaling method for climate change scenarios in Switzerland. In preparazione.
- Michel A., Lehning M., Huwald H.: Future trends in river temperature in Switzerland using physical models. In preparazione.
- Moraga S., Peleg N., Fatichi S., Molnar P., Burlando P.: High-resolution investigation of climate change in mountain catchments reveals diverse impacts on streamflow and its uncertainties. In preparazione per *Journal of Hydrology*.
- Mülchi R., Rössler O., Schwanbeck J., Weingartner R., Martius O. 2021a: Future runoff regime changes and their time of emergence for 93 catchments in Switzerland. Inviato a *Hydrology and Earth System Sciences*.
- Mülchi R., Rössler O., Schwanbeck J., Weingartner R., Martius O. 2021b: Changes in high and low flow indicators in mesoscale Swiss catchments under climate change. In preparazione per *Hydrology and Earth System Sciences*.
- Mülchi R., Rössler O., Schwanbeck J., Weingartner R., Martius O. 2021c: Hydro-CH2018-Runoff: An ensemble of daily simulated discharge data (1981–2099) under climate change conditions for 105 catchments in Switzerland. In preparazione per *Earth System Science Data*.
- Råman Vinnå L., Medhaug I., Schmid M., Bouffard D. 2021: The vulnerability of lakes to climate change along an altitudinal gradient. *Nature Communications Earth & Environment* 2, 35. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00106-w>.
- Schwingshackl C., Davin E.L., Hirschi M., Sørland S.L., Wartenburger R., Seneviratne S.I. 2019: Regional climate model projections underestimate future warming due to missing plant physiological CO₂ response. *Environmental Research Letters*, 14(11): 114019. DOI: 10.1088/1748-9326/ab4949.
- Speich M., Zappa M., Scherstjanoi M., Lischke H. 2020: FORests and HYdrology under Climate Change in Switzerland v1.0: a spatially distributed model combining hydrology and forest dynamics. *Geoscientific Model Development*, 13(2): 537–564. DOI: 10.3929/ethz-b-000402828.

Bibliografia supplementare

- Accademie svizzere delle scienze 2016: Coup de projecteur sur le climat suisse. Etat des lieux et perspectives. *Swiss Academies Reports*, 11(5): 218.
- Alcaraz M., García-Gil A., Vázquez-Suñé E., Velasco V. 2016: Advection and dispersion heat transport mechanisms in the quantification of shallow geothermal resources and associated environmental impacts. *Science of The Total Environment*, 543: 536–546. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.11.022.
- ALG (Abteilung Landschaft und Gewässer) 2017: Ereignisanalyse Hochwasser Juli 2017: Gefahrenkarte mit betroffenen Gebäuden, Region Zofingen, Stand 25. Juli 2017. Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Kanton Aargau, Sektion Wasserbau, Aarau.
- Altermatt F. 2010: Tell me what you eat and I'll tell you when you fly: diet can predict phenological changes in response to climate change. *Ecology Letters*, 13(12): 1475–1484. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2010.01534.x.
- Altermatt F., Seymour M., Martinez N. 2013: River network properties shape α -diversity and community similarity patterns of aquatic insect communities across major drainage basins. *Journal of Biogeography*, 40(12): 2249–2260. DOI: 10.1111/jbi.12178.
- ARE (Ufficio federale dello sviluppo territoriale) e UFAM (Ufficio federale dell'ambiente) (ed.) 2005 La pianificazione del territorio e i pericoli naturali. *Pratica ambientale*, 7516, Berna: 50.
- Badoux A., Hofer M., Jonas T. 2013: Hydrometeorologische Analyse des Hochwasserereignisses vom 10. Oktober 2011. Istituto federale di ricerca per la foresta, la neve e il paesaggio WSL, WSL Istituto per lo studio della neve e delle valanghe SLF, Ufficio federale di meteorologia e climatologia MeteoSvizzera, geo7 geowissenschaftliches Büro, Ufficio federale dell'ambiente (UFAM): 92.
- Bálint M., Domisch S., Engelhardt C.H.M., Haase P., Lehrian S., Sauer J., Theissinger K., Pauls S.U., Nowak C. 2011: Cryptic biodiversity loss linked to global climate change. *Nature Climate Change*, 1(6): 313–318. DOI: 10.1038/nclimate1191.
- Begert M, Stöckli R, Croci-Maspoli M. 2018: Klimaentwicklung in der Schweiz – Vorindustrielle Referenzperiode und Veränderung seit 1864 auf Basis der Temperaturmessung. *Rapporti tecnici MeteoSvizzera*, 274, Zurigo: 23.
- Bernacchi C.J. e van Loocke A. 2015: Terrestrial Ecosystems in a Changing Environment: A Dominant Role for Water. *Annual Review of Plant Biology*, 66(1): 599–622. DOI: 10.1146/annurev-arplant-043014-114834.
- Binderheim E. e Göggel W. 2007: Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau: Aspect général. *Pratica ambientale*, 0701. Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 43.
- Blöschl, G., Kiss, A., Viglione, A. et al. 2020: Current European flood-rich period exceptional compared with past 500 years. *Nature*, 583(7817): 560–566. DOI: 10.1038/s41586-020-2478-3.
- Borsuk M.E., Reichert P., Peter A., Schager E., Burkhardt-Holm P. 2006: Assessing the decline of brown trout (*Salmo trutta*) in Swiss rivers using a Bayesian probability network. *Ecological Modelling*, 192(1): 224–244. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2005.07.006.
- Braun C., Gälli R., Leu C., Munz N., Schindler Wildhaber Y., Strahm I., Wittmer I. 2015: Micropolluants dans les cours d'eau provenant d'apports diffus. *Stato dell'ambiente*, 1514. Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 78.

- Brönnimann S., Rohr C., Stucki P., Summermatter S., Bandhauer M., Barton Y., Fischer A., Froidevaux P., Germann U., Grosjean M., Hupfer F., Ingold K., Isotta F., Keiler M., Martius O., Messmer M., Mülchi R., Panziera L., Pfister L., Raible C.C., Reist T., Rössler O., Röthlisberger V., Scherrer S., Weingartner R., Zappa M., Zimmermann M., Zischg A.P. 2018: 1868 – das Hochwasser, das die Schweiz veränderte. Ursachen, Folgen und Lehren für die Zukunft. *Geographica Bernensia* G94: 52. DOI:10.4480/GB2018.G94.01.
- Brönnimann S., Frigerio L., Schwander M., Rohrer M., Stucki P., Franke J. 2019: Causes of Increased Flood Frequency in Central Europe in the 19th Century. *Climate of the Past*, 15(4): 1395–1409. DOI: 10.5194/cp-15-1395-2019.
- Brown L.E., Hannah D.M., Milner A.M. 2007: Vulnerability of alpine stream biodiversity to shrinking glaciers and snowpacks. *Global Change Biology*, 13(5): 958–966. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2007.01341.x.
- Brunner P. e Simmons C.T. 2012: HydroGeoSphere: A fully integrated, physically based hydrological model. *Ground Water*, 50(2): 170-176. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2011.00882.x.
- Burkhardt-Holm 2009: Klimawandel und Bachforellentrückgang – gibt es einen Zusammenhang? Resultate aus der Schweiz. *Environmental Sciences Europe*, 21(2): 177–185. DOI: 10.1007/s12302-009-0043-7.
- Burkhardt-Holm P., Peter A., Segner H. 2002: Decline of fish catch in Switzerland. *Aquatic Sciences*, 64(1): 36–54. DOI: 10.1007/s00027-002-8053-1.
- Carlier C., Wirth S.B., Cochand F., Hunkeler D., Brunner P. 2018: Geology controls streamflow dynamics, *Journal of Hydrology*, 566: 756–769. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.08.069.
- CH2014-Impacts 2014: Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland. Published by OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, ProClim, Berna: 136. ISBN: 978-3-033-04406-7.
- Comola F., Schaepli B., Rinaldo A., Lehning M. 2015: Thermodynamics in the hydrologic response: Travel time formulation and application to Alpine catchments. *Water Resources Research*, 51(3): 1671–1687. DOI: 10.1002/2014WR016228.
- Consiglio federale (ed.) 2017: Piano d'azione per la riduzione del rischio e l'utilizzo sostenibile dei prodotti fitosanitari. Rapporto del Consiglio federale, Berna: 78.
- Davidson E.A. e Janssens I.A. 2006: Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440(7081): 165–173. DOI: 10.1038/nature04514.
- Davin E.L., Stöckli R., Jaeger E.B., Levis S., Seneviratne S.I. 2011: COSMO-CLM2: a new version of the COSMO-CLM model coupled to the Community Land Model. *Climate Dynamics*, 37(9–10): 1889–1907. DOI: 10.1007/s00382-011-1019-z.
- Diersch H.-J. 2014: FEFLOW Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, XXXV: 996. DOI: 10.1007/978-3-642-38739-5.
- Ecoplan (in elaborazione): Überprüfung der GSchG-Massnahmen hinsichtlich Klimawandel. Projektbericht. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna.
- Elliott J.M. 1994: Quantitative Ecology and the Brown Trout. Oxford series in ecology and evolution, Band 7. Oxford University Press: 286. ISSN: 1746-3130.
- Epting J. e Huggenberger P. 2013: Unraveling the Heat Island Effect Observed in Urban Groundwater Bodies – Definition of a Potential Natural State. *Journal of Hydrology*. 501: 193–204. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.08.002.
- Epting J., Scheidler S., Egli L., Affolter A., Mueller M.H., García-Gil A., Borer P., Huggenberger P. 2017: Thermal impact of subsurface building structures on urban groundwater resources. *Science of the Total Environment*, 596–597: 87–96. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.296.

- Everall N.C., Johnson M.F., Wilby R.L., Bennett C.J. 2015: Detecting phenology change in the mayfly *Ephemera danica*: responses to spatial and temporal water temperature variations: Mayfly phenology in relation to river temperature. *Ecological Entomology*, 40(2): 95–105. DOI: 10.1111/een.12164.
- Farinotti D., Pistocchi A., Huss M. 2016: From dwindling ice to headwater lakes: could dams replace glaciers in the European Alps? *Environmental Research Letters*, 11(5): 054022. DOI: 10.1088/1748-9326/11/5/054022.
- Farinotti D., Round V., Huss M., Compagno L., Zekollari H. 2019: Large hydropower and water-storage potential in future glacier-free basins. *Nature*, 575(7782): 341–344. DOI: 10.1038/s41586-019-1740-z.
- Fatichi S., Rimkus S., Burlando P., Bordoy R., Molnar P. 2015: High-resolution distributed analysis of climate and anthropogenic changes on the hydrology of an Alpine catchment. *Journal of Hydrology*, 525: 362–382. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.03.036.
- Fischer M., Huss M., Hoelzle M. 2015: Surface elevation and mass changes of all Swiss glaciers 1980–2010. *The Cryosphere*, 2(2): 525–540. DOI: 10.5194/tc-9-525-2015.
- Freiburghaus M. 2009: Wasserbedarf der Schweizer Wirtschaft. *gwa*, 12, Zurigo: 1001–1009.
- FST (Federazione svizzera del turismo) 2019: Le tourisme suisse en chiffres 2018. Federazione svizzera del turismo, Berna: 60.
- Funivie Svizzere 2017: Faits et chiffres de la branche de remontées, Berna: 36.
- Gallice A., Bavay M., Brauchli T.J., Comola F., Lehning M., Huwald H. 2016: StreamFlow 1.0: an extension to the spatially distributed snow model Alpine3D for hydrological modelling and deterministic stream temperature prediction. *Geoscientific Model Development*, 9(12): 4491–4519. DOI: 10.5194/gmd-9-4491-2016.
- Gandolfi C. 2003: Ricerca sui consumi irrigui e le tecniche di irrigazione in Lombardia. Università degli Studi di Milano, Istituto di Idraulica Agraria: 225.
- Gaudard A., Schmid M., Wüst A. 2017: Thermische Nutzung von Oberflächengewässern. *Aqua & Gas*, 97(5), Zurigo: 40–45.
- Göggel W. 2012 Revitalisation des cours d'eau. Planification stratégique. Un module de l'aide à l'exécution Renaturation des eaux. *Pratica ambientale*, 1208. Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 43.
- Goudsmit G.-H., Burchard H., Peeters F., Wüest A. 2002: Application of k-ε turbulence models to enclosed basins: the role of internal seiches. *Journal of Geophysical Research*, 107: 3230. DOI: 10.1029/2001JC000954.
- Haeberli W., Schleiss A., Linsbauer A., Künzler M., Bütler M. 2012: Gletscherschwund und neue Seen in den Schweizer Alpen: Perspektiven und Optionen im Bereich Naturgefahren und Wasserkraft. *Wasser Energie Luft*, 104(2): 94–102. DOI: 10.5167/uzh-140414.
- Hagedorn F., Krause H.-M., Studer M., Schellenberger A., Gättinger A. 2018: Sol et environnement. Matière organique du sol, émissions de gaz à effet de serre et atteintes physiques aux sols suisses. Synthèse thématique ST2 du Programme national de recherche «Utilisation durable de la ressource sol» (PNR 68), Berna: 93. ISBN: 978-3-907087-31-2.
- Hari R.E., Livingstone D.M., Siber R., Burkhardt-Holm P., Güttinger H. 2006: Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. *Global Change Biology*, 12(1): 10–26. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.001051.x.

- Harris R.M.B., Beaumont L.J., Vance T.R., Tozer C.R., Remenyi T.A., Perkins-Kirkpatrick S.E., Mitchell P.J., Nicotra A.B., McGregor S., Andrew N.R., Letnic M., Kearney M.R., Wernberg T., Hutley L.B., Chambers L.E., Fletcher M.-S., Keatley M.R., Woodward C.A., Williams G., Duke, N.C., Bowman D.M.J.S.: 2018: Biological responses to the press and pulse of climate trends and extreme events. *Nature Climate Change*, 8(7): 579–587. DOI: 10.1038/s41558-018-0187-9.
- Hendricks Franssen H.-J. e Scherrer S.C. 2008: Freezing of lakes on the Swiss Plateau in the period 1901–2006. *International Journal of Climatology*, 28(4): 421–433. DOI: 10.1002/joc.1553.
- Hirschi M., Michel D., Lehner I., Seneviratne S.I. 2017: A site-level comparison of lysimeter and eddy covariance flux measurements of evapotranspiration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(3): 1809. DOI: 10.5194/hess-21-1809-2017.
- Hock R. 1999: A distributed temperature-index ice- and snowmelt model including potential direct solar radiation. *Journal of Glaciology*, 45(149): 101–111. DOI: 10.3189/S0022143000003087.
- Hofer S., Egli T., Steingruber N., Lehner M. 2017: Entwicklung von Instrumenten zur Früherkennung und von Lösungsansätzen für die Thurgauer Land- und Ernährungswirtschaft beim Umgang mit Wasserknappheit. Pilotprojekt zur Anpassung an den Klimawandel. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Frauenfeld: 74.
- Hug R., Schöni T., Schibli M., Lanz K. 2017: Gutes Wasser für morgen – regionale Wasserversorgungsplanung im Kanton Solothurn am Beispiel Olten Gösigen. *Aqua & Gas*, 97(6), Zurigo: 44–51.
- Huguenin M.F., Fischer E.M., Kotlarski S., Scherrer S.C., Schwierz C., Knutti R. 2020: Lack of change in the projected frequency and persistence of atmospheric circulation types over Central Europe. *Geophysical Research Letters*, 47(9): e2019GL086132. DOI: 10.1029/2019GL086132.
- Hunkeler D., Moeck C., Käser D., Brunner P. 2014: Klimaeinflüsse auf Grundwassermengen. *Aqua & Gas*, 94(11), Zurigo: 42–49.
- IPBES 2019: Résumé à l'intention des décideurs du rapport sur l'évaluation mondiale de la biodiversité et des services écosystémiques de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques: 53.
- IPCC 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press: 1535.
- Jacobsen D., Cauvy-Fraunie S., Andino P., Espinosa R., Cueva D., Dangles O. 2014: Runoff and the longitudinal distribution of macroinvertebrates in a glacier-fed stream: implications for the effects of global warming. *Freshwater Biology*, 59(10): 2038–2050. DOI: 10.1111/fwb.12405.
- Junker J., Heimann F.U.M., Hauer C., Turowski J.M., Rickenmann D., Zappa M., Peter A. 2015: Assessing the impact of climate change on brown trout (*Salmo trutta fario*) recruitment. *Hydrobiologia*, 751(1): 1–21. DOI: 10.1007/s10750-014-2073-4.
- Langhammer L., Grab M., Bauder A., Maurer H. 2019: Glacier thickness estimation of alpine glaciers using data and modeling constraints. *The Cryosphere*, 13(8): 2189–2202. DOI: 10.5194/tc-13-2189-2019.
- Lanz K. 2016: Wasser im Engadin – Nutzung, Ökologie, Konflikte. Su mandato dell'Ufficio federale del WWF Svizzera, Evilard: 101.
- Lanz K. e Wechsler T. 2020: Wasserkraft. In: Lanz K. (ed.): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 30.

- Lehning M., Völksch I., Gustafsson D., Nguyen T.A., Stähli M., Zappa M. 2006: ALPINE3D: a detailed model of mountain surface processes and its application to snow hydrology. *Hydrological Processes*, 20(10): 2111–2128. DOI: 10.1002/hyp.6204.
- Lorenz R., Jaeger E.B., Seneviratne S.I. 2010: Persistence of heat waves and its link to soil moisture memory. *Geophysical Research Letters*. 37(9). DOI: 10.1029/2010GL042764.
- Marty C., Tilg A.-M., Jonas T. 2017: Recent Evidence of Large-Scale Receding Snow Water Equivalents in the European Alps. *Journal of Hydrometeorology*, 18(4): 1021–1031. DOI: 10.1175/JHM-D-16-0188.1.
- Maurer M., Chawla F., von Horn J., Staufer P. 2012: Abwasserentsorgung 2025 in der Schweiz. *Schriftenreihe der Eawag*, (21): 232. ISBN: 978-3-906484-54-9.
- Merrifield A.L., Simpson I.R., McKinnon K.A., Sippel S., Xie S.-P., Deser C. 2019: Local and nonlocal land surface influence in european heatwave initial condition ensembles. *Geophysical Research Letters*, 46(23): 14082–14092. DOI: 10.1029/2019GL083945.
- Mueller M.H., Huggenberger P., Epting J. 2018: Combining monitoring and modelling tools as a basis for city-scale concepts for a sustainable thermal management of urban groundwater resources. *Science of the Total Environment*, 627: 1121–1136. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.250.
- Müller U. 2019: Progetto d'irrigazione del Furttal. *Rapporto agricolo 2019*. Müller Ingenieure AG, Dielsdorf. Internet: <https://www.agrarbericht.ch/it/politica/miglioramenti-strutturali-e-misure-sociali-collaterali/progetto-dirrigazione-del-furttal>. Consultato il 04.09.2020.
- NCCS (National Centre for Climate Services) (ed.) 2018: CH2018 – Scenari climatici per la Svizzera, Zurigo: 24. ISBN: 978-3-9525031-2-6.
- North R.P., North R.L., Livingstone D.M., Köster O., Kipfer, R. 2014: Long-term changes in hypoxia and soluble reactive phosphorus in the hypolimnion of a large temperate lake: consequences of a climate regime shift. *Global Change Biology*, 20(3): 811–823. DOI: 10.1111/gcb.12371.
- Peleg N., Fatichi S., Paschalis A., Molnar P., Burlando P. 2017: An advanced stochastic weather generator for simulating 2-D high resolution climate variables. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 9(3): 1595–1627. DOI: 10.1002/2016MS000854.
- Peleg N., Molnar P., Burlando P., Fatichi S. 2019: Exploring stochastic climate uncertainty in space and time using a gridded hourly weather generator. *Journal of Hydrology*, 571: 627–641. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.02.010.
- Pellicciotti F., Brock B., Strasser U., Burlando P., Funk M., Corripio J. 2005: An enhanced temperature-index glacier melt model including the shortwave radiation balance: Development and testing for Haut Glacier d'Arolla, Switzerland. *Journal of Glaciology*, 51(175): 573–587. DOI: 10.3189/172756505781829124.
- PERMOS 2019: Permafrost in Switzerland 2014/2015 to 2017/2018. Nötzli J., Pellet C., Staub B. (ed.), Glaciological Report (Permafrost) No. 16–19 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences: 104. DOI:10.13093/permos-rep-2019-16-19.
- Pfister C., Weingartner R., Luterbacher J. 2006: Hydrological winter droughts over the last 450 years in the Upper Rhine basin: A methodological approach. *Hydrological Sciences Journal*, 51(5): 966–985. DOI: 10.1623/hysj.51.5.966.
- Regione Lombardia 2015: Lombardy Agriculture in Figures 2015. Milano: 188.

- Reynard E., Bonriposi M., Graefe O., Homewood C., Huss M., Kauzlaric M., Liniger H., Rey E., Rist S., Schädler B., Schneider F., Weingartner R. 2014: Interdisciplinary Assessment of Complex Regional Water Systems and their Future Evolution: How Socioeconomic Drivers Can Matter more than Climate. *WIREs Water*, 1(4): 413–426. DOI: 10.1002/wat2.1032.
- Rhodes, J., Hetzenauer, H., Frassl, M.A., Rothhaupt, K.O., Rinke, K. 2017: Long-term development of hypolimnetic oxygen depletion rates in the large Lake Constance. *Ambio*, 46(5): 554–565. DOI: 10.1007/s13280-017-0896-8.
- Rolls R.J., Heino J., Ryder D.S., Chessman B.C., Grouns I.O., Thompson R.M., Gido K.B. 2017: Scaling biodiversity responses to hydrological regimes. *Biological Reviews*, 93(2): 971–995. DOI: 10.1111/brv.12381.
- Rosset V. e Oertli B. 2011: Freshwater biodiversity under climate warming pressure: Identifying the winners and losers in temperate standing waterbodies. *Biological Conservation*, 144(9): 2311–2319. DOI: 10.1016/j.biocon.2011.06.009.
- Rüegg J. e Robinson C.T. 2004: Comparison of macroinvertebrate assemblages of permanent and temporary streams in an Alpine flood plain, Switzerland. *Archiv für Hydrobiologie*, 161(4): 489–510. DOI: 10.1127/0003-9136/2004/0161-0489.
- Russo R., Becher J.M., Liess M. 2018: Sequential exposure to low levels of pesticides and temperature stress increase toxicological sensitivity of crustaceans. *Science of the Total Environment*, 610–611: 563–569. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.073.
- Rust P. 2017: See-Energie Projektübersicht ewl (Energie Wasser Luzern). Presentazione in occasione di corso Eawag-PEAK «Heizen und Kühlen mit Seen und Flüssen» del 08.11.2017.
- SCCER-SoE (ed.) 2019: Climate change impact on Swiss hydropower production: synthesis report. Swiss Competence Center for Energy Research – Supply of Electricity, Zurigo: 28.
- Schaepli B., Manso T., Fischer M., Huss M., Farinotti D. 2019: The Role of Glacier retreat for Swiss Hydropower Production. *Renewable Energy*, 132: 615–627. DOI: 10.1016/j.renene.2018.07.104.
- Scherrer S.C., Fischer E.M., Posselt R., Liniger M.A., Croci-Maspoli M., Knutti R. 2016: Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(6): 2626–2637. DOI: 10.1002/2015JD024634.
- Schlesinger W.H., Dietze M.C., Jackson R.B., Phillips R.P., Rhoades C.C., Rustad L.E., Vose J.M. 2015: Forest biogeochemistry in response to drought. *Global Change Biology*, 22(7): 2318–2328. DOI: 10.1111/gcb.13105.
- Schmid M. 2019: verwundBAR: Wie verändert die Energienutzung die Gewässertemperaturen? *Forum für Wissen. Schweiz erneuerbar! Rapports du WSL*, 84, Birmensdorf: 31–36.
- Schmocker-Fackel P. e Naef F. 2010: Changes in Flood Frequencies in Switzerland since 1500. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(8): 1581–1594. DOI: 10.5194/hess-14-1581-2010.
- Schürch M., Bulgheroni M., Sinreich M. 2018: Température des Eaux Souterraines. Un Aperçu de l'Etat et de l'Evolution en Suisse. *Aqua & Gas*, 98(7), Zurigo: 40–48.
- Schwefel R., Gaudard A., Wüest A., Bouffard D. 2016: Effects of climate change on deepwater oxygen and winter mixing in a deep lake (Lake Geneva): Comparing observational findings and modeling. *Water Resources Research*, 52(11): 8811–8826. DOI: 10.1002/2016WR019194.
- Schweizerische Rheinhäfen 2019: Niedrigwasser prägt Güterumschlag 2018 – Container bleiben auf Rekordniveau. Medienmitteilung vom 07.02.2019, Basel. Internet: <https://port-of-switzerland.ch/niedrigwasser-praegt-gueterumschlag-2018-container-bleiben-auf-rekordniveau/>. Consultato il 04.09.2020.

- Seibert J. e Vis M. 2012: Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9): 3315–3325. DOI: 10.5194/hess-16-3315-2012.
- Seibert J., Vis M., Kohn I., Weiler M., Stahl K. 2018a: Technical note: Representing glacier geometry changes in a semi-distributed hydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(4): 2211–2224. DOI: 10.5194/hess-22-2211-2018.
- Seibert J., Weiler M., Stahl K., Brunner P., Hunkeler D. 2018b: BAFU-Projekt Niedrigwasser und Grundwasser. Synthesebericht. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Berna: 54.
- Serquet G. e Rebetez M. 2011: Relationship between tourism demand in the Swiss Alps and hot summer air temperatures associated with climate change. *Climatic Change*, 108(1): 291–300. DOI: 10.1007/s10584-010-0012-6.
- Sinreich M., Kozel R., Lützenkirchen V., Matousek F., Jeannin P.-Y., Loew S., Stauffer F. 2012: Grundwasserressourcen der Schweiz – Abschätzung von Kennwerten. *Aqua & Gas*, 92(9), Zurigo:16–28.
- Soria M., Leigh C., Datry T., Bini L.M., Bonada N. 2017: Biodiversity in perennial and intermittent rivers: a meta-analysis. *Oikos*, 126(8): 1078–1089. DOI: 10.1111/oik.04118.
- Speich M.J.R., Bernhard L., Teuling A.J., Zappa M. 2015: Application of bivariate mapping for hydrological classification and analysis of temporal change and scale effects in Switzerland. *Journal of Hydrology*, 523: 804–821. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.086.
- SSIGA (La Società Svizzera dell'Industria del Gas e delle Acque) 2015: Rapporto settoriale dell'approvvigionamento idrico in Svizzera. Per un approvvigionamento idrico sicuro e sostenibile, Zurigo: 40.
- SSIGA (La Società Svizzera dell'Industria del Gas e delle Acque) 2020: Résultats statistiques des distributeurs d'eau en Suisse. Année de l'exercice 2018, Information W 15 001, Zurigo: 91.
- Stahl K., Weiler M., Freudiger D., Kohn I., Seibert J., Vis M., Gerlinger K., Böhm M. 2016: Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels. Abschlussbericht an die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR), Friburgo i. B.: 151.
- Stöckle C.O., Donatelli M., Nelson R. 2003: CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18: 289–307. DOI: 10.1016/S1161-0301(02)00109-0.
- Straile D., Kerimoglu O., Peeters F., Jochimsen M.C., Kümmerlin R., Rinke K., Rothhaupt K.-O. 2010: Effects of a half a millennium winter on a deep lake – a shape of things to come? *Global Change Biology*, 16(10), 2844–2856. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02158.x.
- Stucki P., Rickli R., Brönnimann S., Martius O., Wanner H., Grebner D., Luterbacher J. 2012: Weather Patterns and Hydro-climatological Precursors of Extreme Floods in Switzerland since 1968. *Meteorologische Zeitschrift*, 21(6): 53–550. DOI: 10.1127/0941-2948/2012/368.
- Rapporto tecnico CH2018 2018: CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report. National Centre for Climate Services (NCCS), Zurigo: 271. ISBN: 978-3-9525031-4-0.
- UFAM (Ufficio federale dell'ambiente) (ed.) 2009: Ecomorphologie des cours d'eau suisses; Etat du lit, des berges et des rives Résultats des relevés écomorphologiques (avril 2009). *Stato dell'ambiente*, 0926, Berna: 100.
- UFAM (Ufficio federale dell'ambiente) (ed.) 2011: Les veines du paysage. *Magazine «l'ambiente»*, 3: 8–15.

UFAM (Ufficio federale dell'ambiente) (ed.) 2012a: Effetti dei cambiamenti climatici sulle risorse idriche e i corsi d'acqua (Riassunto). *Studi sull'ambiente*, 1217, Berna: 2.

UFAM (Ufficio federale dell'ambiente) (ed.) 2012b: Adattamento ai cambiamenti climatici in Svizzera - Prima parte della strategia del Consiglio federale del 2 marzo 2012. *Pubblicazioni varie sull'ambiente*, 1055, Berna: 64.

UFAM (Ufficio federale dell'ambiente) (ed.) 2014a: Grundlagen für die Wasserversorgung 2025. Risiken, Herausforderungen und Empfehlungen. *Studi sull'ambiente*, 1404, Berna: 116.

UFAM (Ufficio federale dell'ambiente) (ed.) 2014b: Adattamento ai cambiamenti climatici in Svizzera - Piano d'azione 2014-2019. *Pubblicazioni varie sull'ambiente*, 1081, Berna: 100.

UFAM (Ufficio federale dell'ambiente) (ed.) 2015: Rinaturazione delle acque svizzere: piani di risanamento cantonali dal 2015. Berna: 13.

UFAM (Ufficio federale dell'ambiente) (ed.) 2016a: La canicule et la sécheresse de l'été 2015. *Stato dell'ambiente*, 1629, Berna: 110.

UFAM (Ufficio federale dell'ambiente) (ed.) 2016b: Gestion des dangers naturels en Suisse. Rapport du Conseil fédéral en réponse au postulat 12.4271 déposé par Christophe Darbellay le 14.12.2012, Berna: 125.

UFAM (Ufficio federale dell'ambiente) (ed.) 2017a: Biodiversità in Svizzera: stato ed evoluzione. *Stato dell'ambiente*, 1630, Berna: 60.

UFAM (Ufficio federale dell'ambiente) (ed.) 2017b: Dinamica dei sedimenti e degli habitat. *Studi sull'ambiente*, 1708, Berna: 85.

UFAM (Ufficio federale dell'ambiente) (ed.) 2019a: État et évolution des eaux souterraines en Suisse. *Stato dell'ambiente*, 1901, Berna: 138.

UFAM (Ufficio federale dell'ambiente) (ed.) 2019b: Canicola e siccità dell'estate 2018. *Stato dell'ambiente*, 1909, Berna: 92.

UFAM (Ufficio federale dell'ambiente) 2020: Adattamento ai cambiamenti climatici in Svizzera: Piano d'azione 2020-2025. *Ambiente Info*, 2022, Berna: 155.

Urban M.C., Bocedi G., Hendry A.P., Mihoub J.B., Pe'er G., Singer A., Bridle J.R., Crozier L.G., Meester L.D., Godsoe W., Gonzalez A., Hellmann J.J., Holt R.D., Huth A., Johst K., Krug C.B., Leadley P.W., Palmer S.C.F., Pantel J.H., Schmitz A., Zollner P.A., Travis J.M.J. 2016: Improving the forecast for biodiversity under climate change. *Science*, 353(6304). DOI: 10.1126/science.aad8466.

UST (Ufficio federale di statistica) 2016: Censimento delle aziende agricole - Rilevazione complementare. Neuchâtel.

UST (Ufficio federale di statistica) 2018: Meno aziende agricole, sempre più agricoltura biologica. Comunicato stampa, 8.5.2018, Neuchâtel: 6. Internet: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/it/home/attualita/novita-sul-portale.assetdetail.5127816.html>. Consultato il 04.09.2020.

UST (Ufficio federale di statistica) 2019: La statistique suisse du tourisme 2017, Neuchâtel: 81.

Van Asch M., Salis L., Holleman L.J.M., van Lith B., Visser M.E. 2013: Evolutionary response of the egg hatching date of a herbivorous insect under climate change. *Nature Climate Change*, 3(3): 244-248. DOI: 10.1038/nclimate1717.

Viviroli D., Gurtz J., Zappa M., Weingartner R. 2009: An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing tools. *Environmental Modelling & Software*, 24(10): 1209-1222. DOI: 10.1016/j.envsoft.2009.04.001.

Vogel M.M., Orth R., Cheruy F., Hagemann S., Lorenz R., van den Hurk B.J.J.M., Seneviratne S.I. 2017: Regional amplification of projected changes in extreme temperatures strongly controlled by soil moisture-temperature feedbacks, *Geophysical Research Letters*, 44(3): 1511–1519. DOI: 10.1002/2016GL071235.

Weingartner R. e Aschwanden H. 1992: Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel 5.2, Berna.

Wernli H., Naef F., Piaget N., Smoorenburg M. 2016: Heavy Precipitation and Flood, Final Report. Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Zurigo: 51.

Weusthoff T. 2011: Weather type classification at MeteoSwiss: Introduction of new automatic classification schemes, *Rapporti di lavoro di MeteoSvizzera*, 235: 46.

Woollings T., Barriopedro D., Methven J. Son S., Martius O., Harvey B., Sillmann J., Lupo A., Seneviratne S.I. 2018: Blocking and its Response to Climate Change. *Current Climate Change Reports*, 4(3): 287–300. DOI: 10.1007/s40641-018-0108-z.

Zarrineh N., Abbaspour K.C., Holzkämper A. 2020: Integrated assessment of climate change impacts on multiple ecosystem services in Western Switzerland. *Science of The Total Environment*, 708: 135212. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135212.

Zekollari H., Huss M., Farinotti D. 2019: Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. *The Cryosphere*, 13(4): 1125–1146. DOI: 10.5194/tc-13-1125-2019.

11 Glossario

Biodiversità

La biodiversità comprende le diverse forme di vita (specie di animali, piante, funghi, batteri), i vari habitat in cui vivono le specie (ecosistemi come le acque) e la varietà genetica all'interno delle specie (p. es. sottospecie, varietà e razze).

Deflussi discontinui

Oscillazioni repentine e frequenti della portata generate dal turbinaggio dell'acqua accumulata nelle centrali idroelettriche per la produzione di energia elettrica. Sono tratti con deflussi discontinui i tratti di corsi d'acqua influenzati da tali oscillazioni.

Effetti a retroazione

Reazione di un sistema a un cambiamento: una retroazione positiva è un processo che si autorafforza, mentre una retroazione negativa significa che un cambiamento è compensato da una reazione opposta.

Forti precipitazioni

Le forti precipitazioni presentano un'elevata intensità in rapporto alla loro durata. Gli eventi di forti precipitazioni possono essere sia precipitazioni di breve durata ed elevata intensità sia precipitazioni che durano diverse ore o giorni con grosse quantità di pioggia. Oltre alla durata e alla frequenza, è essenziale anche l'estensione della superficie interessata dalla precipitazione.

Gestione delle acque

La gestione delle acque comprende tutte le attività dell'uomo finalizzate all'utilizzazione delle acque, alla protezione delle acque e alla protezione dai pericoli causati dalle acque.

NM7Q

La media su 7 giorni dei deflussi minimi annui. Il calcolo della media su più giorni rende questo indicatore di magra meno esposto di altri indicatori a errori di misura o a influenze antropiche di breve durata.

PKD

PKD è la sigla inglese (Proliferative Kidney Disease) per una patologia renale che si manifesta in determinate specie ittiche. La malattia può avere decorso letale se la temperatura delle acque si mantiene al di sopra dei 15 °C per un periodo prolungato.

Q₃₄₇

Secondo l'articolo 4 della legge federale sulla protezione delle acque, la portata Q₃₄₇ è la portata, determinata su un periodo di dieci anni, che è raggiunta o superata in media durante 347 giorni (95° percentile) all'anno e non è sensibilmente influenzata né da sbarramenti, né da prelievi, né da apporti d'acqua.

Regime di deflusso: glaciale, nivale, pluviale

Successione caratteristica delle portate stagionali di un corso d'acqua dipendenti dalle condizioni climatiche e dalle particolarità del bacino imbrifero. I regimi glaciali sono caratterizzati dallo scioglimento dei ghiacciai nei mesi estivi, i regimi nivali dallo scioglimento della neve in primavera e i regimi pluviali dall'interazione tra pioggia ed evaporazione.

Ruscellamento superficiale

Il ruscellamento superficiale è l'acqua piovana che soprattutto in caso di forti precipitazioni non s'infiltra, scorre sul terreno e può quindi causare danni.

Scenari di emissione, RCP2.6, RCP8.5

Possibili futuri percorsi di sviluppo delle emissioni umane di gas serra e di aerosol. I più recenti scenari di emissione (Representative Concentration Pathways, RCP) indicano in che modo devono svilupparsi le concentrazioni di gas serra e di aerosol per raggiungere un determinato obiettivo climatico. 2,6 e 8,5 è il forzante radiativo atteso nel 2100 in W/m²

RCP2.6: percorso di emissione in caso di protezione coerente del clima secondo quanto previsto dall'Accordo di Parigi

RCP8.5: percorso di emissione senza misure di protezione del clima

12 Allegato

Tabella A1: Modelli utilizzati nel progetto Hydro-CH2018

Modello	Metodi utilizzati	Calibrazione	Risoluzione spaziale	Risoluzione temporale	Bibliografia
PREVAH-WSL	Evaporazione: Penman-Monteith Formazione del deflusso: PREVAH HBV-type Scioglimento della neve: Degree-day-extended (Hock 1999) Scioglimento dei ghiacciai: Degree-day extended (Hock 1999). Viene considerata soltanto l'estensione dei ghiacciai, che viene aggiornata ogni 5 anni con i dati tratti da Zekollari et al. (2019)	Calibrazione sui deflussi misurati. Regionalizzazione per le aree senza misurazione di portata con metodo Kriging.	Griglia della Svizzera politica 500 × 500 m Griglia della Svizzera idrologica 200 × 200 m	1 giorno	Brunner et al. 2019c Speich et al. 2015
PREVAH-UniBE	Evaporazione: Hamon Formazione del deflusso: PREVAH HBV-type Scioglimento della neve: Degree-day (Hock 1999) Scioglimento dei ghiacciai: Degree-day extended (Hock 1999). Viene considerata soltanto l'estensione dei ghiacciai, che viene aggiornata ogni 5 anni con i dati tratti da Zekollari et al. (2019)	Calibrazione sul deflusso. Nessuna regionalizzazione.	Su base HRU; 93 bacini imbriferi	1 giorno	Viviroli et al. 2009
HBV Light-UniZH	Evaporazione: Hamon Parametro dei gradi giorno come indicatore dello scioglimento della neve e dei ghiacciai Cambiamenti dei ghiacciai simulati con il metodo dH di Huss (Seibert et al. 2018a)	Calibrazione sui deflussi misurati, linea della neve da MODIS, volume dei ghiacciai. Regionalizzazione dei parametri di formazione del deflusso per le aree senza misurazione di portata.	Semi-distribuita, su base HRU; 190 bacini imbriferi ghiacciati	1 giorno	Seibert e Vis 2012 Seibert et al. 2018a
Modello climatico regionale combinato COSMO-CLM ² PF di Zurigo			Europa nella griglia 0,44 × 0,44° (50 km).	1 giorno	Davin et al. 2011
Simstrat (v. 2.1.2) Eawag	Modello idrodinamico unidimensionale (a risoluzione verticale)	Calibrazione con le temperature misurate per 27 di 29 laghi simulati	0,5 m (verticale)	10 minuti	Goudsmit et al. 2002 Gaudard et al. 2019
Snowpack/Alpine3D, StreamFlow EPFL	Metodi su base fisica. Il tempo di permanenza dell'acqua nel suolo è parametrizzato secondo Comola (2015) e la concentrazione dell'acqua secondo Gallice et al. 2016.	Snowpack/Alpine3D: nessuna calibrazione Streamflow: calibrazione del tempo di permanenza dell'acqua nel suolo e del flusso di calore nel suolo	Snowpack/Alpine3D: 100 o 500 m Streamflow: 100 o 500 m	1 ora	Lehning et al. 2006 Gallice et al. 2016

Modello	Metodi utilizzati	Calibrazione	Risoluzione spaziale	Risoluzione temporale	Bibliografia
Hydrogeosphere Università di Neuchâtel	Evaporazione: evapotraspirazione attuale Combinazione integrale di acqua nel suolo-acque sotterranee-formazione del deflusso Acque sotterranee: campo di flussi a distribuzione spaziale secondo l'equazione di Darcy Deflusso: deflusso nella rete idrografica di scioglimento della neve: degree-day	Calibrazione sugli spessori misurati del manto nevoso, sul deflusso e sui livelli di falda	Elementi finiti (2 – 100 m)	Da 1 ora a 1 giorno	Brunner e Simmons 2012
Feflow®, ArcMap® Università di Basilea	«Raster analysis», «Hydrology Tool» (ArcMap®), tempo di scorrimento desunto dalle lunghezze di scorrimento calcolate e dalle velocità di scorrimento secondo Darcy «GeoTher» tool (Alcaraz et al. 2016)	Basilea-Città: calibrazione e validazione sull'idraulica e sui dati di temperatura di >100 stazioni di misurazione delle acque sotterranee	5 – 25 m	1 giorno	Diersch 2014 Alcaraz et al. 2016 Epting et al. 2013 Mueller et al. 2018
PREVAH-WSL in combinazione con il modello di sviluppo del bosco	Evaporazione: Penman-Montheith Formazione del deflusso: PREVAH HBV-type Scioglimento della neve: Degree-day-extended (Hock 1999) Scioglimento dei ghiacciai: Degree-day extended (Hock 1999). Cambiamenti dei ghiacciai simulati con il metodo dH di Huss	Calibrazione sui deflussi misurati. Regionalizzazione per le aree senza misurazione di portata con metodo Kriging.	200 x 200m 6 grandi regioni in diverse regioni climatiche della Svizzera e alternanza tra pendii esposti a sud e a nord.	1 giorno	Speich et al. 2015 Speich et al. 2020
Topkapi-ETH PFZ alimentato con generatore meteo AWE-GEN-2d	Modello fisico esplicito a distribuzione spaziale Evaporazione: Priestley-Taylor Andamento dell'onda nell'alveo: Kinematic wave (Fatichi et al. 2015) Scioglimento della neve e dei ghiacciai: metodo dell'indice di temperatura (Pellicciotti et al. 2005)	Calibrazione sui deflussi misurati	Griglia di 100 m per Thur, Kleine Emme e Maggia	1 ora, down-scaling con generatore meteo	Fatichi et al. 2015 Peleg et al. 2017 Peleg et al. 2019 Peleg et al. 2020
Modello di simulazione dei sistemi colturali CropSyst	Evaporazione: Penman-Montheith Tenore d'acqua nel suolo: modello a cascata (giornaliero)	Calibrazione su dati di resa statistica	Scala di campo	1 giorno	Stöckle et al. 2003

Tabella A-3: Misure di adattamento al cambiamento climatico a livello federale

Misure di adattamento a livello federale nel primo e secondo piano d'azione PA1 e PA2 e stato di attuazione (Confederazione Svizzera 2014 e 2020). Sono rappresentate le misure in riferimento alle acque e alla loro gestione.

	Numero	Titolo	Stato 2020
Acque	PA2-ga1	Rilevamento dei dati sul fabbisogno idrico in Svizzera	Nuove misure
	PA2-ga2	Verifica delle misure di protezione delle acque nell'ottica dei cambiamenti climatici	
	PA1-ga1	Strumenti di pianificazione per la gestione delle risorse idriche	Misure in corso
	PA1-ga3	Interconnessione e garanzia dell'approvvigionamento idrico	
	PA1-ga4	Potenziale di ritenuta e accumulo dell'acqua	
	PA1-ga5	Regolazione dei livelli lacustri	
	PA1-ga6	Gestione dei laghi e dei bacini svizzeri nel contesto internazionale	
	PA1-ga7	Considerazione del mutato regime di deflusso e delle temperature nello smaltimento delle acque urbane	
	PA1-ga10	Diagnosi precoce della siccità	
	PA1-ga2	Condizioni quadro per la gestione a scala di bacino – promozione attraverso la comunicazione, lo scambio di conoscenze e la formazione	Misure concluse
	PA1-ga8	Immissione di calore nelle acque	
PA1-ga9	Qualità dell'acqua – prevenire un ulteriore deterioramento delle acque come conseguenza di forti precipitazioni o dell'irrigazione delle colture		
PA1-ga11	Correzione del canale navigabile Basilea-Birsfelden		
Pericoli naturali	PA1-pn1	Monitoraggio dei processi pericolosi	Misure in corso
	PA1-pn2	Conoscere i pericoli e i rischi	
	PA1-pn3	Predisporre misure di protezione solide e adattabili	
	PA1-pn4	Applicare misure di pianificazione del territorio: riduzione del potenziale di danno grazie alla pianificazione del territorio basata sulla valutazione dei rischi	
	PA1-pn5	Gestire con successo gli eventi naturali	
	PA1-pn6	Rafforzare la consapevolezza dei pericoli naturali e l'attività di formazione e ricerca nel campo dei pericoli naturali	
Suolo	PA2-s1	Piano di attuazione di una cartografia nazionale del suolo	Nuove misura
Agricoltura	PA1-a1	Impiego ottimizzato di piante coltivate e razze animali adattate compresa la gestione di organismi nocivi	Misure in corso
	PA1-a2	Utilizzazione rispettosa del suolo e dell'acqua	
	PA1-a3	Elaborazione di basi per un'attività agricola conforme alle esigenze locali	
Energia	PA1-e4	Studi sugli effetti dei cambiamenti climatici sullo sfruttamento idrico e sensibilizzazione delle parti interessate	Misure in corso
	PA1-e5	Presa in considerazione degli effetti dei cambiamenti climatici nella vigilanza delle dighe	Misure concluse
	PA1-e6	Verifica delle disposizioni sulla reimmissione dell'acqua di raffreddamento	
Bio-diversità	PA2-b7	Creazione di zone d'ombra mediante popolamento	Nuove misura
	PA1-b3	Garanzia dei requisiti ecologici minimi e misure di valorizzazione per gli habitat che hanno particolare bisogno di un apporto idrico sufficiente	Misure concluse
Basi	PA2-bc4	Analisi degli effetti dei cambiamenti climatici sulla Svizzera – CH-Impacts	Nuove misura
	PA1-bc1	Elaborazione periodica di scenari climatici regionali in Svizzera	Misure in corso
	PA1-bc2	Basi idrologiche e scenari di adattamento ai cambiamenti climatici	
	PA1-bc3	Piano per la raccolta d'informazioni sul suolo	Misura conclusa