

Giorgio ROTH

*Cambiamento climatico, idrologia
e gestione delle risorse idriche*

*A migliaia sono vissuti senza amore,
non uno senz'acqua
(W.H. Auden)*

Abstract. Water is essential for life. Concern for its availability has led humanity to seek ever new balances, establishing civil, agricultural and industrial settlements in relation to the availability of water and adapting the environment to society's needs. Today, climate change calls into question the balances achieved and forces us to undertake mitigation and adaptation actions. This note examines the link between climate change and hydrology, trying to highlight how alterations in the availability of water and its distribution in space and time can impact the management and use of water resources.

Sommario. L'acqua è essenziale per la vita. La preoccupazione per la sua disponibilità ha portato l'umanità a ricercare sempre nuovi equilibri, stabilendo insediamenti civili, agricoli e industriali in relazione alla disponibilità di acqua e adattando l'ambiente alle esigenze della società. Oggi, il cambiamento climatico mette in discussione gli equilibri raggiunti e obbliga a intraprendere azioni di mitigazione e adattamento. Questa nota esamina il legame fra cambiamento climatico e idrologia cercando di evidenziare come alterazioni nella disponibilità di acqua e nella sua distribuzione nello spazio e nel tempo possano impattare sulla gestione e sull'uso delle risorse idriche.

Cambiamento climatico, idrologia e gestione delle risorse idriche sono tre aspetti dello stesso tema, diversi ma fra loro intimamente collegati. Il primo aspetto, legato al cambiamento climatico, non è approfondito in questa sede, nella quale si intende piuttosto indagare gli impatti del cambiamento climatico *in atto* – a sottolineare la futilità di argomentazioni che tendano a porre in discussione la realtà e la rilevanza di questo fenomeno – sulla distribuzione dell'acqua sul pianeta Terra e, infine, il suo utilizzo come risorsa, giungendo in

questo modo ad influenzare la vita quotidiana di ognuno di noi ed a sollevare apprensione sui potenziali effetti futuri.

La trattazione potrebbe trovare utile avvio da numerosi differenti punti di partenza. Ho scelto di partire da una immagine pittorica del ciclo dell'acqua, Figura 1, che descrive il movimento continuo dell'acqua sulla, sopra e sotto la superficie della Terra e che, forse, ci riconnette alle lezioni della Scuola Primaria. L'immagine consente l'agevole individuazione sia dei principali serbatoi – nei quali l'acqua è accumulata in forma liquida (laghi, mari e oceani), solida (ghiacciai, calotte polari) e vapore (atmosfera) – sia dei principali processi (flussi) che determinano il suo spostamento da un accumulo all'altro: evaporazione, traspirazione, condensazione, sublimazione, precipitazione, deflusso superficiale, infiltrazione e flusso sotterraneo.



Figura 1. Il ciclo naturale dell'acqua (fonte: usgs.gov).

Al ciclo dell'acqua è associato un ciclo dell'energia: quando l'acqua evapora assorbe energia dall'ambiente circostante raffreddandolo, quando condensa rilascia energia e riscalda l'ambiente. Complessivamente, il ciclo dell'acqua sul pianeta

costituisce una sorta di immenso condizionatore che provvede, attraverso processi evaporativi, a raffreddare le zone tropicali riscaldando, attraverso processi di condensazione e precipitazione, le medie e le alte latitudini.

Da questa immagine manca però un elemento essenziale. Manca l'umanità e manca quanto essa è stata in grado di realizzare, trasformando l'ambiente naturale al fine di renderlo maggiormente adatto alle sue esigenze. Un lavoro durato millenni che ha determinato il panorama che oggi in molti casi ammiriamo ed apprezziamo e che purtroppo, in altri casi, temiamo e dal quale rifuggiamo. In sostanza, il passaggio da un uomo raccoglitore e cacciatore, che poco impatto ha avuto sul panorama naturale, all'uomo agricoltore, stanziale ed infine abitante di città sempre più grandi.

La regione Liguria è certamente un buon esempio di come l'uomo sia intervenuto: selezionando le essenze arboree che costituiscono i nostri boschi a favorire, ad esempio, lo sviluppo dell'ulivo e del castagno; modificando la superficie del terreno attraverso terrazzamenti atti a sostenere lo sviluppo agricolo e l'infiltrazione delle acque di pioggia; ma anche promuovendo lo sviluppo urbano nelle poche zone pianeggianti, sottraendo via via spazio vitale al libero deflusso delle acque di piena, con le conseguenze a volte catastrofiche che oggi troppo frequentemente registriamo.

L'attività dell'uomo ha complessivamente raggiunto un impatto tale da essere in grado di influenzare le componenti del ciclo dell'acqua, siano esse accumuli o flussi che connettono diversi accumuli. Il cambiamento climatico, anch'esso effetto dell'uomo, interviene a modificare ulteriormente il quadro determinando cambiamenti nella quantità e qualità della risorsa idrica disponibile e nella sua distribuzione nello spazio e nel tempo, con conseguenze negative potenzialmente rilevanti ai fini di un uso della risorsa conforme a quello attuale, che cioè prosegua con le infrastrutture disponibili senza chiedere cambiamenti radicali.

La connessione clima – idrologia – gestione delle risorse idriche e degli eventi estremi è riassunta in Figura 2. Le caratteristiche climatiche definiscono comportamenti medi su periodi temporali

sufficientemente lunghi che successivamente, a scale spaziali e temporali minori, si traducono in componenti che danno origine ai diversi elementi costitutivi del ciclo idrologico descritto in precedenza: acqua in atmosfera, sulla superficie del suolo, nel sottosuolo, nei mari e negli oceani.



Figura 2. *La connessione Clima – Idrologia – Gestione delle risorse idriche.*

Il motore principale del ciclo dell'acqua è il flusso di precipitazione che, nella sua componente liquida, dà immediatamente origine al deflusso superficiale e, attraverso il processo di infiltrazione, allo scorrimento sub-superficiale. La componente superficiale è anch'essa distinta in liquida e solida, ovvero le acque che sono catturate e trattenute in forma solida sulla superficie del terreno, a formare ghiacciai e calotte polari, che tanta importanza rivestono ai fini del cambiamento climatico e del suo impatto sulle risorse idriche. Abbiamo poi le acque sotterranee, che potremmo dividere fra vicine alla superficie del terreno, quindi potenzialmente utilizzabili, e profonde. Infine, le acque salate che costituiscono i mari e gli oceani.

I flussi e gli accumuli di acqua, essendo limitati in quantità e qualità, diventano poi risorsa quando sono utilizzati dall'uomo per molteplici scopi, fra loro frequentemente in competizione: approvvigionamento a scopi civili, industriali ed agricoli, produzione

di energia, controllo delle piene e delle siccità, allontanamento dei reflui, navigazione e usi ricreativi.

Nello schema semplificato di questa nota, cambiamento climatico significa sostanzialmente aumento della temperatura media. In Figura 3 è presentato l'ormai famoso hockey stick, ovvero la storia temporale dell'andamento della temperatura media della superficie terrestre, che assume appunto un aspetto assai simile a quello delle mazze da hockey. Come mostra il grafico, negli ultimi millenni, nell'Olocene, la temperatura si è mantenuta pressoché costante per poi assumere, a partire dal 1950 circa, una tendenza alla crescita che non si è ancora arrestata. La rapidità del cambiamento in un periodo temporale così ridotto, accelerazione mai verificatasi nella storia del nostro pianeta, è tale da suggerire l'ingresso in una nuova Era: l'Antropocene, a ricordare come il cambiamento derivi dall'opera dell'uomo¹.

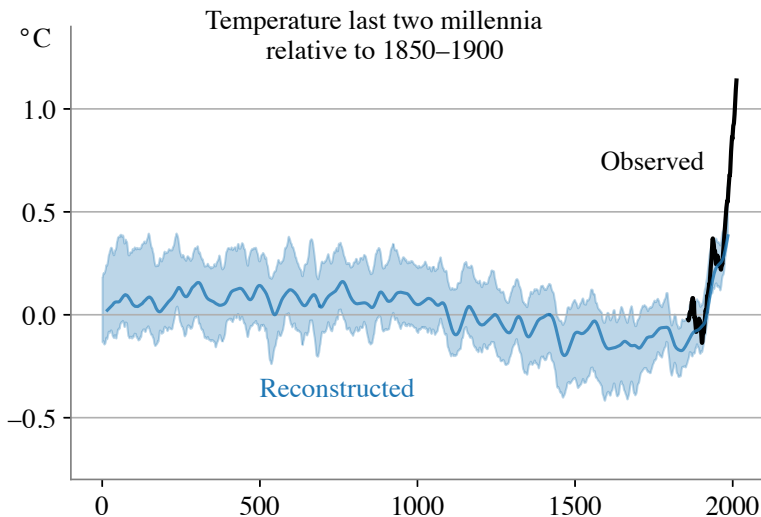


Figura 3. *Temperatura media sul pianeta Terra negli ultimi 2000 anni (Wikimedia Commons).*

Storie temporali di molte altre caratteristiche della vita sulla Terra potrebbero essere presentate per confermare l'azione

dell'uomo: produzione di energia, emissione di CO₂, metano e altri gas clima-alteranti in atmosfera ma anche crescita del prodotto interno lordo. Tutte le storie temporali e gli indicatori presentano un andamento temporale concorde a rinforzare l'idea che sia effettivamente l'attività umana a provocare l'aumento della temperatura media sul nostro pianeta.

Si modifica quindi il primo dei blocchi rappresentati in Figura 2, quello relativo al clima. A cascata, si modificano conseguentemente le diverse componenti del ciclo dell'acqua. A titolo di esempio, in Figura 4 è riportata la previsione al 2050², ottenuta tramite modello di cambiamento climatico, di come potrebbe cambiare il deflusso superficiale medio annuo, ovvero la portata idrica che defluisce nelle reti fluviali. Si deve sottolineare come il cambiamento sia ben lontano dall'essere uniforme nello spazio: in rosso sono rappresentate le zone che subiranno una diminuzione dei deflussi, in blu quelle che al contrario vedranno un loro aumento.

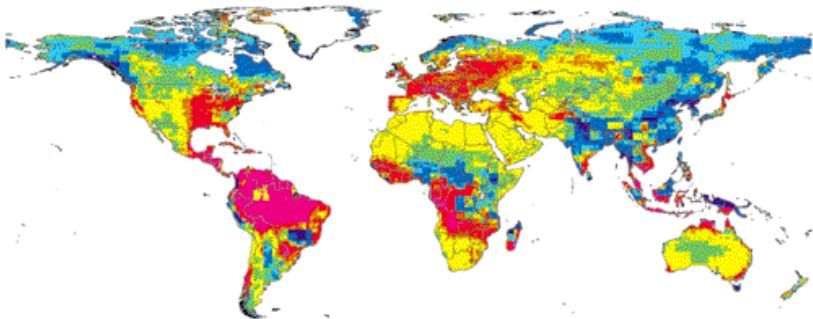


Figura 4. *Cambiamento del deflusso medio superficiale annuo al 2050 (da: Arnell, 1999).*

I modelli di cambiamento climatico, essendo appunto climatici, descrivono un comportamento medio futuro atteso. Non sono in grado di descrivere la dinamica del sistema, ovvero il reale andamento temporale a scala fine delle variabili che complessivamente definiscono il tempo atmosferico e le grandezze di rilievo nell'idrologia. Esiste invece una grande differenza fra un comportamento medio e quello che invece si realizza nei diversi mesi, giorni ed ore. Se, per esempio, fossimo interessati agli eventi

estremi di piena, avrebbe rilievo quello che accade alla scala oraria o, al più, per sistemi di rilevante dimensione areale, alla scala giornaliera mentre nessuna informazione potrebbe essere dedotta dalla conoscenza della precipitazione media annua.

Anche se un modello di cambiamento climatico non è in grado di scendere al livello di dettaglio spazio-temporale necessario per descrivere i processi idrologici, alcune importanti informazioni medie possono essere ottenute: principalmente temperatura e umidità in atmosfera e nel suolo, mentre la precipitazione, ovvero l'informazione regina per gli studi idrologici, è ottenuta in forma parametrica a partire dalle variabili modellate.

Se cambia il clima – se cambia la temperatura media – cambiano le componenti del ciclo idrologico sia per quanto riguarda gli accumuli sia per quanto riguarda i flussi che li connettono spostando acqua da un accumulo all'altro: evaporazione, traspirazione, condensazione, sublimazione, precipitazione, deflusso superficiale, infiltrazione e flusso sotterraneo. Cambia quindi la disponibilità di acqua nello spazio e nel tempo, ovvero cambia l'acqua come risorsa che deve essere gestita a garanzia del nostro benessere e della crescita economica³.

La questione diventa quindi: che impatto ha il cambiamento climatico sui processi idrologici e quindi sulla distribuzione spazio-temporale della risorsa idrica e infine sulla gestione delle risorse a garanzia del benessere della società? Può tutto proseguire nello schema *business as usual*?

L'incertezza nella previsione futura del cambiamento climatico è molto elevata. Non solo per quanto riguarda i limiti nella conoscenza dei processi fisici coinvolti e nella loro modellazione matematica e numerica ma anche perché il cambiamento dipenderà dalle strategie di mitigazione che verranno messe in atto. L'incertezza nelle scelte politiche future si aggiunge all'incertezza modellistica e non può che aumentare quando pretendo, come sto facendo, di prevedere cambiamenti e conseguenze alle scale spazio-temporali proprie dei processi idrologici e della gestione dei sistemi idrici: non più medie annue su scale delle decine di km² ma giornaliere od orarie su dimensioni spaziali dell'ordine di un km².

Il tema qui trattato è quindi permeato da grande incertezza. Ciononostante, non possiamo permetterci di attendere per poi agire quando le conseguenze si manifestassero nella loro completezza: sarebbe certamente troppo tardi. Già oggi molti segnali osservati confermano le previsioni modellistiche: basti ricordare come anno dopo anno venga puntualmente superato il record di temperatura media annua sulla superficie terrestre. Il 2024 ha superato il record del 2023 che a sua volta ha superato quello del 2022!

L'immagine del ciclo dell'acqua di Figura 1 consente di entrare un poco più in dettaglio a descrivere i possibili cambiamenti nelle componenti idrologiche⁴. Per fare questo partiamo dai flussi e specificatamente dall'evaporazione, che rappresenta il ritorno in atmosfera dell'acqua disponibile nei mari, negli oceani, sulla superficie delle terre emerse e nello strato più superficiale del suolo.

Un aumento nella temperatura determina immediatamente sia un aumento dei flussi evaporativi verso l'atmosfera – in presenza di elevata disponibilità idrica, e.g., da mari e oceani – sia una maggiore capacità di quest'ultima a trattenere in forma vapore maggiori quantità di acqua. Questa capacità è descritta dall'equazione di Clausius Clapeyron (Emile Clapeyron, 1834, e Rudolf Clausius, 1850), forse una delle più citate nelle conferenze sul cambiamento climatico ed i suoi impatti: per ogni incremento di temperatura di un °C l'atmosfera è in grado di trattenere il 7% in più di acqua in forma vapore.

Una quantità certamente rilevante se immaginiamo le conseguenze, in termini di volumi idrici accumulati in atmosfera, per esempio alla fine di un'estate particolarmente calda. L'arrivo di fronti freddi autunnali forzerà il successivo ritorno sulla superficie della Terra, sotto forma di precipitazione, dei volumi idrici accumulati in atmosfera. Complessivamente, si determina un maggior numero di eventi intensi di precipitazione che provocano un aumento di frequenza ed intensità delle piene fluviali e torrentizie con gli associati fenomeni d'inondazione, che colpiscono territori fragili, sempre più esposti al rischio.

Non altrettanto può essere detto per i volumi medi annui di precipitazione o per quelle aree per le quali il contenuto di umidità in atmosfera dipenda dalle condizioni di umidità del suolo. Un

incremento nella temperatura facilita i meccanismi di evaporazione e traspirazione da parte della vegetazione ma trova un limite nella disponibilità di acqua nel suolo le cui condizioni si spostano maggiormente verso situazioni siccitose, non più in grado di sostenere la vegetazione.

Emerge quindi un quadro in cui la precipitazione media annua tende a diminuire in alcune porzioni del pianeta e ad aumentare in altre, con una diversa ripartizione spaziale e temporale. La componente solida della precipitazione è quella che desta maggiore apprensione per una potenziale riduzione dell'immagazzinamento di acqua in forma solida nel periodo invernale. Quella che successivamente, in primavera ed estate, è in grado di contribuire significativamente al deflusso superficiale. Il mancato apporto della fusione di nevi e ghiacci corrisponde così, anche a parità di apporto medio annuo, ad un trasferimento della risorsa dalle stagioni irrigue, primavera ed estate, alla stagione invernale, con conseguenze rilevanti per i deflussi nei corsi d'acqua pedemontani, sull'uso della risorsa e sull'instaurarsi di condizioni di siccità nei mesi estivi.

La progressiva riduzione della superficie coperta da neve e ghiaccio, conseguenza diretta di un aumento della temperatura, diminuisce inoltre la capacità della superficie terrestre a riflettere nello spazio una parte dell'energia solare incidente. Una diminuzione dell'albedo che implica il maggior assorbimento di energia incidente, sia in corrispondenza delle terre emerse sia dei mari, con ulteriore aumento della temperatura. Una retroazione positiva che si temeva potesse essere verificata anche per il vapore in atmosfera: l'incremento di temperatura provoca il maggiore assorbimento di acqua in forma vapore e la maggiore probabilità di formazione di sistemi nuvolosi che, a loro volta, aumentano l'effetto serra impedendo alla radiazione emessa dalla superficie terrestre di uscire dall'atmosfera. Almeno in questo caso si è invece verificato che è prevalente l'effetto schermo dovuto alle nuvole, che riduce anche la quota di energia entrante dallo spazio.

Per quanto invece è relativo alle acque sotterranee, gli acquiferi più profondi risentono in misura minore di quello che avviene sulla superficie terrestre e nel suolo mentre gli strati più superficiali

risentono maggiormente di una maggiore precipitazione così come di un minore apporto.

Molti altri aspetti potrebbero essere sottolineati, fra i quali corre forse l'obbligo di ricordare l'incremento di livello del medio mare, destinato a salire per effetto congiunto della fusione di nevi perenni, ghiacciai e calotte polari e per l'aumento di volume conseguente ad un aumento delle temperature delle acque di mari ed oceani. Le conseguenze sono potenzialmente disastrose per le comunità costiere.

Una domanda che, a questo punto, dovrebbe sorgere spontanea è: ma dove si trova l'acqua presente sul pianeta Terra? E quanta di questa può essere impiegata per gli usi fin qui delineati? Dopo aver ricordato che la quantità complessiva è invariante e pari ad $1,4 \cdot 10^{12}$ m³, l'acqua si trova per il 96% nei mari e negli oceani ed è quindi salata, non direttamente utilizzabile per la maggior parte degli usi. Trascurati anche i laghi salati e le acque sotterranee salate, le acque dolci costituiscono il 2,5% dell'acqua disponibile sulla terra: 1,7% sotto forma solida, 0,7% acque sotterranee dolci, 0,01% in laghi dolci, 0,001% in atmosfera e solo lo 0,0002% del totale scorre nei fiumi.

I cambiamenti climatici, siano essi naturali o antropici, non possono modificare l'acqua totale disponibile sulla Terra ma possono cambiare la ripartizione fra i diversi accumuli appena quantificati. Servirebbero trasferimenti quantitativamente difficilmente ipotizzabili per modificare significativamente la percentuale di acque salate, ma trasferimenti forse ipotizzabili potrebbero giungere a modificare le percentuali di acqua in atmosfera – con conseguente potenziale modifica della circolazione atmosferica e dei trasferimenti di energia ad essa associati – e le percentuali di acqua che defluisce sulla superficie terrestre e nei corsi d'acqua, frequentemente la risorsa primaria per la captazione di acque destinate al consumo umano, all'approvvigionamento industriale e irriguo. Nella nostra Regione quasi il 100% delle acque captate dagli acquedotti ha origine superficiale.

Il ragionamento appena svolto ha carattere globale. Un unico numero rappresenta la risorsa globalmente disponibile sul pianeta. Questa però non è uniformemente distribuita e certe aree sono

nettamente privilegiate rispetto ad altre. Scendendo dalla scala globale a quella dei continenti si nota come la precipitazione non sia uniformemente ripartita, così come varia fra un continente l'altro la porzione di precipitazione che ritorna all'atmosfera per evapotraspirazione. La differenza fra queste due quantità, precipitazione meno evapotraspirazione, potrebbe essere assunta a rappresentare lo scorrimento superficiale, ovvero la quota parte che è disponibile per essere utilizzata. La stima ulteriore, anche se di larga massima, della quantità disponibile per ogni persona deve ora tenere conto della popolazione presente nei diversi continenti.

Scopriremmo così che la precipitazione passa da 1650 mm/anno nel Sud America a 730 mm/anno in Europa a 670 mm/anno in Nord America; l'evapotraspirazione è di 1070 mm/anno in Sud America, 410 mm/anno in Europa e 380 mm/anno in Nord America. La disponibilità idrica pro-capite è assai variabile: un sudamericano ha a disposizione 20745 m³/anno, un europeo 2100 m³/anno, un nordamericano 7125 m³/anno, un africano 5500 m³/anno e un asiatico 1960 m³/anno. Un'ulteriore diminuzione di scala mostrerebbe le rilevanti differenze presenti all'interno dei continenti, dove troviamo zone desertiche e zone nelle quali la precipitazione media annua presenta valori di rilievo.

La disponibilità di acqua per i diversi fini dipende da come la risorsa si rende disponibile. Per valutare meglio quest'aspetto possiamo fare riferimento alla seguente classificazione^{5,6,7}:

- *acqua verde*: la precipitazione sulla terraferma che non scorre né ricarica le falde acquifere, ma viene immagazzinata nel suolo o rimane temporaneamente sulla superficie del suolo o sulla vegetazione;
- *acqua blu*: acqua dolce superficiale e sotterranea; l'acqua contenuta in laghi, fiumi e falde acquifere;
- *acqua grigia*: un indicatore dell'inquinamento delle acque dolci, associato alla produzione di un prodotto lungo tutta la sua filiera.

Non potendo essere prelevata e convogliata tramite un acquedotto, l'acqua verde è disponibile unicamente per fini agricoli. Un'agricoltura non irrigua fa riferimento esclusivo a questa

componente e, conseguentemente, non entra in competizione con gli altri usi della risorsa. La competizione è invece rilevante per l'acqua blu, che può essere captata, accumulata e trasportata anche a grandi distanze, il che la rende adatta a molteplici fini: agricoli, civili e industriali.

L'intensità nell'uso della risorsa può essere ottenuta sommando, per ogni fine, le tre componenti: verde, blu e grigia. Nel fare questo si deve ricordare che i concetti di acqua verde e acqua blu fanno riferimento ad aspetti quantitativi mentre l'acqua grigia si riferisce ad aspetti qualitativi e che la componente verde è, per le sue caratteristiche, utilizzabile unicamente in agricoltura. Globalmente, il 70% circa della risorsa idrica è destinato a fini agricoli, il 20% a fini industriali ed il 10% a fini civili. Scendendo maggiormente in dettaglio, potremmo giungere a misurare l'impronta idrica [in $\text{m}^3/\text{anno}/\text{pro-capite}$] di ogni categoria di prodotto scoprendo così che la produzione industriale assorbe 65 m^3 all'anno per ogni persona, la produzione di cereali richiede $372 \text{ m}^3/\text{anno}/\text{pc}$ mentre la quota di consumo domestico è pari a $53 \text{ m}^3/\text{anno}/\text{pc}$.

Sommando le impronte idriche associate ai consumi che avvengono all'interno delle nazioni, otteniamo l'impronta idrica media dei loro cittadini. I valori possono essere anche molto differenti fra loro: a fronte di una media globale pari a $1240 \text{ m}^3/\text{anno}/\text{pc}$, i cittadini USA hanno un'impronta pari a 2842, i cinesi 1071 e gli italiani $2330 \text{ m}^3/\text{anno}/\text{pc}$. L'impronta idrica italiana è elevata: a fronte di un contributo alla popolazione mondiale inferiore all'1%, l'Italia ha una impronta idrica che si avvicina al 2%. Questo valore è influenzato dall'elevato tenore di vita, misurabile anche attraverso il prodotto interno lordo, e dalla collocazione geografica, che favorisce un tasso di evapotraspirazione elevato dell'acqua usata in agricoltura.

Non tutta l'impronta idrica associata ad una nazione impatta sulle risorse idriche di quella nazione. In parte, attraverso la globalizzazione dei commerci, l'acqua "viaggia" da una nazione all'altra, virtualmente associata ai prodotti, agricoli o industriali, che ha contribuito a crescere o realizzare. L'acqua necessaria a produrre una mela (70 litri) o un hamburger di manzo (2500 litri) viaggia così virtualmente insieme al prodotto. Varcando le frontiere separa il

paese produttore, quello che ha fornito la risorsa idrica, da quello consumatore, nel quale si registra l'impronta idrica.

Solo una parte dell'impronta idrica di una nazione ha quindi impatto su risorse che si trovano all'interno dei suoi confini (e.g., beni prodotti e consumati all'interno dei confini nazionali). Altre componenti, associate a beni importati, impattano su risorse estere, così come i beni esportati impattano sulle risorse idriche della nazione che li produce ma contribuiscono all'impronta idrica della nazione che li consuma. Ne segue una sostanziale dipendenza idrica internazionale: si stima che il 20% dell'uso globale di acqua non sia destinato alla produzione di prodotti per il consumo interno, bensì a prodotti destinati all'esportazione.

La globalizzazione dei commerci è complessivamente in grado di generare risparmio nell'uso delle risorse, ciò avviene quando la produzione tenda ad essere localizzata nelle aree più opportune sotto il profilo della disponibilità delle risorse. I dati confermano che questo, almeno in parte, avviene: il risparmio globale di acqua derivante dal commercio di prodotti agricoli è stimato in $369 \cdot 10^9$ m³/anno, equivalente al 4% dell'impronta idrica globale.

Diversi Paesi riducono l'uso delle proprie risorse idriche nazionali tramite l'importazione di prodotti agricoli e industriali. L'Italia importa circa $101 \cdot 10^9$ m³/anno di acqua virtuale, una quantità pari a circa il 30% dell'impronta totale. Con riferimento alla sola componente agricola, l'Italia risparmia $54 \cdot 10^9$ m³/anno, ponendosi al terzo posto dopo Giappone e Messico.

Gli aspetti appena introdotti mostrano come i nostri consumi hanno impatto su risorse idriche che solo parzialmente si trovano geograficamente vicine, consentendo un risparmio in termini globali e soprattutto in termini locali, ma suggerendo anche la nostra dipendenza da quanto avviene a risorse idriche che si trovano al di fuori dei nostri confini. In quest'ottica, il commercio globale diventa il legame lungo il quale cambiamenti climatici in aree da noi remote sono in grado di produrre effetti rilevanti sulla nostra vita quotidiana.

Le conseguenze del cambiamento climatico sono contrastate da azioni comunemente classificate in due categorie: mitigazione e adattamento. La prima, che assume una denominazione finalizzata a

ricordare come siano a questo punto possibili solo azioni di contenimento dell'aumento delle temperature e non una completa invarianza climatica, contiene le azioni che tendono a contrastare il fenomeno alla radice attraverso una diminuzione della concentrazione di CO₂ in atmosfera. Si tratta di azioni che riguardano effetti planetari e che, conseguentemente, non possono essere assunte a scala locale ma devono necessariamente interessare almeno la scala continentale.

Il contrasto agli effetti del cambiamento climatico alla scala locale è demandato alle azioni di adattamento: non cercano di contenere l'aumento delle temperature ma ne limitano gli effetti negativi attraverso modifiche nell'uso della risorsa idrica, la creazione di riserve ulteriori e la riprogettazione dei sistemi idrici.

È di seguito presentato un elenco⁸, non esaustivo né particolarmente rigoroso, delle soluzioni di adattamento disponibili e più opportune a contrastare gli effetti del cambiamento climatico in corrispondenza dei principali usi della risorsa idrica: approvvigionamento idrico alla scala comunale, irrigazione, approvvigionamento industriale e raffreddamento delle centrali elettriche, generazione di energia idroelettrica, controllo dell'inquinamento e gestione degli eventi intensi e delle inondazioni. Per alcune azioni sono presentati commenti sintetici. Le soluzioni non sono elencate in ordine di priorità o efficacia, l'ordinamento è possibile solo con riferimento a casi specifici.

Approvvigionamento idrico a scala comunale

- Aumentare il numero e la capacità degli invasi (è costoso e presenta potenziali impatti ambientali e sociali);
- Prelevare di più dai fiumi e dalle falde acquifere (presenta potenziali impatti ambientali);
- Favorire il trasferimento inter-bacino (è costoso e presenta potenziali impatti ambientali);
- Installare impianti di desalinizzazione (è costoso per l'elevato consumo di energia);
- Modificare le regole operative del sistema (probabilmente è un'opportunità limitata);

- Usare previsioni stagionali (sono sempre più affidabili);
- Introdurre disincentivi al consumo, ad esempio attraverso la tariffazione (è un'opportunità probabilmente limitata e necessita di un quadro istituzionale);
- Introdurre nuovi standard di utilizzo dell'acqua legalmente applicabili, ad esempio per gli elettrodomestici (presenta potenziali impatti politici ed è solitamente inefficiente in termini di costi);
- Aumentare l'uso di acqua grigia (è potenzialmente costoso);
- Ridurre le perdite delle reti (è potenzialmente costoso se sono chiesti livelli molto bassi, specialmente nei sistemi più datati);
- Sviluppare sistemi igienico-sanitari non basati sull'acqua (è forse troppo avanzato tecnicamente).

Irrigazione

- Aumentare la capacità della fonte (è costoso e presenta potenziali impatti ambientali);
- Aumentare l'efficienza nell'uso (con la tecnologia o attraverso l'aumento dei prezzi);
- Aumentare la tolleranza della coltura alla siccità (l'ingegneria genetica è controversa);
- Cambiare i modelli di coltivazione (passare a colture che necessitano di meno o nessuna irrigazione).

Approvvigionamento industriale e raffreddamento delle centrali elettriche

- Aumentare la capacità delle fonti (è costoso);
- Usare acqua di bassa qualità (è sempre più diffuso);
- Aumentare l'efficienza nell'uso dell'acqua e il riciclaggio dell'acqua (l'aggiornamento degli impianti è costoso).

Generazione di energia idroelettrica

- Aumentare la capacità degli invasi (è costoso e presenta potenziali impatti ambientali);
- Utilizzare previsioni meteo/stagionali (sono sempre più affidabili);

- Aumentare l'efficienza delle turbine e incoraggiare l'efficienza energetica (l'aggiornamento degli impianti è costoso).

Controllo dell'inquinamento

- Migliorare i sistemi di trattamento (è potenzialmente costoso);
- Ridurre il volume degli effluenti da trattare (ad esempio, addebitando gli scarichi);
- Gestire il bacino idrografico per ridurre il deflusso inquinante (richiede la gestione delle fonti diffuse di inquinamento).

Gestione degli eventi intensi e delle inondazioni

- Aumentare la protezione dalle inondazioni con nuove opere: argini, invasi, scolmatori ... (è costoso e presenta potenziali impatti ambientali);
- Gestire il bacino idrografico per ridurre gli apporti di piena (può essere efficace per contrastare eventi di modesta intensità e alta frequenza);
- Migliorare l'allerta e la diffusione/efficacia delle informazioni (presenta limiti nell'applicazione a corsi d'acqua minori);
- Frenare lo sviluppo nelle pianure alluvionali e nelle aree inondabili (presenta potenziali gravi problemi politici).

Nonostante la grande incertezza alla quale ho fatto riferimento più volte in questa nota, possono forse essere tentate alcune indicazioni di larga massima in merito all'intensità attesa dell'impatto del cambiamento climatico nei settori sopra identificati.

L'impatto sui sistemi di approvvigionamento idrico sarà prevedibilmente modesto. Questi sistemi sono posti frequentemente di fronte a cambiamenti rilevanti in tempi brevi: variazione nella popolazione servita, insediamento o dismissione di distretti industriali. La città di Genova ne è esempio: la crisi idrica dei primi anni '80 è superata sia per l'interconnessione dei sistemi idrici sia, purtroppo, per la dismissione di industrie idrovore e per la diminuzione della popolazione residente. Fattori che per la nostra città sono stati molto più impattanti del cambiamento climatico. Diverso è il caso del ponente ligure, qui l'impatto del cambiamento

climatico sulla risorsa idrica disponibile potrebbe sommarsi alla crisi idrica che da decenni affligge quei territori in termini di frequenza degli episodi siccitosi, aggravati dalla crescita della pressione turistica e dall'insufficienza degli interventi strutturali sui sistemi acquedottistici.

L'impatto sul settore dell'agricoltura è purtroppo previsto rilevante. Abbiamo visto come questo settore sia quello che assorbe la maggior parte delle risorse idriche, anche se una quota rilevante è sotto forma di acqua verde, non disponibile per altri usi. Il cambiamento climatico sembra purtroppo destinato ad avere un impatto su questa componente, forzando la necessità per l'agricoltura a rivolgersi verso un maggior uso di acqua blu, con problemi di competizione diretta con usi civili ed industriali. Se in alcune aree rimane aperto il problema nell'efficienza dell'irrigazione, i temi maggiormente sensibili sembrano quelli di un aumento della tolleranza della coltura alla siccità, ottenuto con riferimento ad interventi di ingegneria genetica, ovvero di un cambiamento nei modelli di coltivazione, potenzialmente rinunciando anche a colture ritenute caratteristiche.

L'impatto sull'approvvigionamento industriale e sul raffreddamento delle centrali elettriche sembra destinato ad unirsi alle molte sollecitazioni che questo settore riceve, tendendo a mischiarsi ed a confondersi con queste, lasciando probabilmente la preoccupazione maggiore all'approvvigionamento energetico.

Valutazioni simili possono essere svolte per il settore della produzione di energia da fonte idroelettrica, per il quale appaiono problematiche le misure di adattamento che prevedono interventi sulle strutture (invasi e macchinario) ma possibili miglioramenti nella gestione della risorsa in impianti a serbatoio, ottenuti attraverso l'uso delle previsioni meteorologiche stagionali, sempre più affidabili.

Il controllo dell'inquinamento, e quindi il rispetto di concentrazioni massime di sostanze indesiderate nei corpi idrici superficiali, si presenta come tema sensibile per la maggiore incidenza di periodi siccitosi che, attraverso una diminuzione nella quantità di acqua disponibile nei corpi idrici, produce un aumento delle concentrazioni a parità di scarichi immessi. Il contemporaneo

aumento della temperatura favorisce il consumo di ossigeno ed i fenomeni di eutrofizzazione.

La gestione degli eventi intensi e delle inondazioni vede due componenti principali: la gestione del territorio e la gestione dell'evento. La prima componente comprende azioni di mitigazione del rischio che possono essere classificate come strutturali o non-strutturali. Gli interventi strutturali consistono in opere – arginature, serbatoi, vasche di laminazione, deviatori, scolmatori, manutenzione degli alvei e delle superfici e simili – in grado di ridurre frequenza ed intensità degli eventi. Le azioni non strutturali perseguono la riduzione del danno senza modificare le caratteristiche del fenomeno fisico: redazioni di piani e procedure di Protezione Civile, assicurazione per la copertura del rischio da catastrofi naturali e sviluppo di una normativa che limiti la realizzazione di nuovi insediamenti in aree esposte al rischio.

Il cambiamento climatico interviene a modificare la frequenza attesa degli eventi estremi e la loro intensità conducendo ad un aumento in entrambi gli aspetti. Le azioni di contrasto chiedono particolare attenzione allo sviluppo di una conoscenza dei fenomeni che possieda caratteristiche di uniformità e completezza territoriale, all'accorta ripartizione degli investimenti in interventi strutturali e non-strutturali, alla misura dell'efficacia degli interventi ottenuta dalla stima puntuale dei benefici attesi e del loro rapporto con i costi dell'intervento.

Conclusioni

Il cambiamento climatico in atto è potenzialmente in grado di forzare una diversa ripartizione a scala globale della risorsa acqua sia in termini di sua distribuzione spazio-temporale sia per intensità e frequenza delle precipitazioni. Nonostante le evidenti limitazioni nella capacità di prevedere il clima futuro, insieme alle conseguenze di presenti e future politiche di mitigazione, una puntuale attenzione all'adattamento agli effetti del cambiamento climatico dovrebbe sottendere ogni decisione in tema di acqua e di gestione della risorsa idrica e del rischio d'inondazione e di siccità. I principali usi della risorsa idrica – siano essi civili, industriali, agricoli, energetici, di controllo dell'inquinamento o di gestione degli eventi intensi –

presentano criticità anche fortemente differenziate che andrebbero meglio conosciute e contrastate, anche al fine di limitare una dipendenza dall'estero già oggi particolarmente significativa.

Bibliografia

- [1] Provenzale A.: Coccodrilli al Polo Nord e ghiacci all'Equatore, Rizzoli, 393 pp., 2021.
- [2] Arnell, N.W.: The Effect of Climate Change on Hydrological Regimes in Europe: A Continental Perspective, *Global Environmental Change*, 9, 5-23, 1999.
- [3] Hagemann S., Chen C., Clark D.B., Folwell S., Gosling S.N., Haddeland I., Hanasaki N., Heinke J., Ludwig F., Voss F. e Wiltshire A.J.: Climate change impact on available water resources obtained using multiple global climate and hydrology models, *Earth System Dynamic*, 4, 129–144, 2013.
- [4] Gleick P.H.: Climate Change, Hydrology and Water Resources, *Reviews of Geophysics*, 27, 3, 329-344, 1989.
- [5] Hoekstra A.Y., Chapagain A.K., Aldaya M.M. e Mekonnen M.M.: The Water Footprint Assessment Manual - Setting the Global Standard, Earthscan, 228 pp., 2001.
- [6] Chapagain A.K. e Hoekstra A.Y.: Water footprints of nations, Volume 1: Main Report, Value of Water Research Report Series No. 16, UNESCO-IHE, Delft, 80 pp., 2004.
- [7] Chapagain A.K. e Hoekstra A.Y.: Water footprints of nations, Volume 2: Appendices, Value of Water Research Report Series No. 16, UNESCO-IHE, Delft, 240 pp., 2004.
- [8] Arnell N. e Liu C.: Hydrology and Water Resources, In: McCarthy J., ed., Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Vol. 2, Cambridge University Press, 2001.