

Cambiamenti climatici e pianificazione della risorsa idrica: WIZ, uno strumento operativo

Climate changes and water resource planning: WIZ, an operational tool

Bernardo Mazzanti, Isabella Bonamini, Gaia Checcucci

Riassunto: L'attività istituzionale dell'Autorità di Bacino si è concentrata in questi ultimi anni su due pianificazioni strategiche: il Piano di Gestione delle Acque e il Piano di Gestione delle Alluvioni. Si tratta di due piani, previsti dalle Direttive europee 2000/60/CE e 2007/60/CE, che includono gran parte dei contenuti del Piano di Bacino ex legge 183/89, e che affrontano in modo globale i problemi degli eventi idrologici estremi e della gestione della risorsa idrica. In questo contesto è assolutamente rilevante la valutazione dell'impatto dei cambiamenti climatici. Per questo l'Autorità di Bacino del Fiume Arno è impegnata ad analizzare l'impatto che i mutamenti climatici potranno avere sullo stato delle acque, prendendo a riferimento il rapporto IPCC AR4 e i relativi scenari previsionali. La partecipazione ad un progetto LIFE (WIZ – WaterIze Spatial planning) è stato lo spunto per una serie di valutazioni preliminari, utili a capire in quale direzione sarebbe stato necessario muoversi, nelle successive revisioni della pianificazione di Bacino, per introdurre adeguate misure di adattamento (più che di mitigazione) che contrastino gli effetti negativi che i cambiamenti climatici possono avere sulla capacità di raggiungimento degli obiettivi di qualità imposti dalla Direttiva Quadro Acque.

Parole chiave: acquifero, bilancio idrico, cambiamenti climatici, bacino del fiume Arno.

Keywords: Groundwater, water budget, climate changes, Arno river basin.

Bernardo MAZZANTI ✉

Autorità di Bacino del Fiume Arno,
via dei Servi 15, Firenze
tel. +39 055 26743246 - fax +39 055 26743250
b.mazzanti@adbarno.it

Isabella BONAMINI

Autorità di Bacino del Fiume Arno,
via dei Servi 15, Firenze
tel. +39 055 26743222, fax +39 055 26743250
i.bonamini@adbarno.it

Gaia CHECCUCCI

Autorità di Bacino del Fiume Arno,
via dei Servi 15, Firenze
tel. +39 055 267431, fax +39 055 26743250
segretario@adbarno.it

Ricevuto: 13 giugno 2013 / Accettato: 2 settembre 2013
Pubblicato online: 30 settembre 2013

© Associazione Acque Sotterranee 2013

Concentrandosi sull'area di interesse del progetto (Valdarno Inferiore) e considerando come ipotesi semplificativa una correlazione lineare tra ricarica degli acquiferi e variazione della piovosità, sono state valutate, in termini quantitativi, gli effetti del cambiamento in atto e futuro. Si è così potuto fornire, per ogni fonte di approvvigionamento, la potenziale variazione delle quantità prelevabili, espresse in mc/anno, con diminuzioni variabili da zona a zona dell'ordine del 5-10% sull'orizzonte temporale considerato.

Considerando l'incremento dei consumi e le perdite delle rete idrica, anche una variazione di tale entità deve essere valutata attentamente e può portare nel futuro, in assenza di misure risparmio idrico e contenimento dei prelievi e di interconnessione dei sistemi acquedottistici, ad un acuirsi delle criticità tipiche dei periodi estivi.

Abstract: *The institutional activity of the Arno River Basin Authority is focused on two strategical planning processes: the River Basin Management Plan, according to 2000/60/CE European Directive, and the Flood Management Plan, according to 2007/60/CE European Directive. Both plans contain most of the contents of Arno River Basin Plan, developed after the Italian law L. 183/89, and are tackling with a global approach the management of extreme flood events and water budget problems. In this context, the evaluation of climate change impact on the water cycle is extremely relevant. Therefore the Arno River Basin Authority is engaged to analyze the impact of climate changes on water status, regarding as main reference the IPCC AR4 report and their connected forecasting scenarios. The involvement in a LIFE+ project (WIZ – WaterIze Spatial Planning) is the framework for a sample of preliminary evaluations, with the aim to include in the next updated edition of River Basin Management Plan new adapting measures (more than mitigation actions), in order to fight the negative impact of climate change on the possibility to achieve the Water Framework Directive's quality objectives.*

Focusing the attention on the Lower Arno valley (Valdarno Inferiore) and taking into account as simplifying hypothesis a linear correlation between groundwater recharge and total rainfall fluctuations, the effects of actual and projected climate changes are evaluated. For each water abstraction area, the potential variation of available groundwater for anthropic use (in cubic meter per year) is estimated, showing a decreasing trend ranging, with a high spatial variability, in a 5-10% interval. Due to the increase of water demand and the distribution network losses, even such a percentage of decreasing potential recharge should be carefully evaluated; without water savings measures and investments on the renovation of distribution networks, an increase of the typical summer water scarcity crisis is high probable.

Introduzione

Il tema dei cambiamenti climatici tocca in modo diretto ogni valutazione inerente il ciclo idrologico, e di conseguenza influenza in maniera sostanziale tutta la relativa attività di pianificazione – sia che essa riguardi la predisposizione di strumenti ed interventi per la difesa dai fenomeni alluvionali estremi, che il contrasto dei fenomeni siccitosi, che la gestione delle risorse idriche. Fin dalle prime pubblicazioni dei report dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), risalenti al 1990, la sensibilità del mondo scientifico, anche nel nostro paese, ha fatto sì che studi specifici si orientassero nel cercare di comprendere l'impatto di tale cambiamento sulle varie tematiche che riguardano l'idrologia. In tale contesto, la stagione delle conferenze nazionali sui cambiamenti climatici, organizzate dal Ministero dell'Ambiente nel corso del periodo 2006-2007 (APAT 2007), dimostrò il vivo interesse di ricercatori e amministratori per il tema, senza però riuscire a pervenire ad una visione condivisa e a strumenti operativi che potessero impattare in maniera concreta le pianificazioni riguardanti difesa del suolo e bilancio idrico.

Il più recente report del gruppo intergovernativo delle Nazioni Unite (IPCC 2007a; IPCC 2007b) ha rivisto ed aggiornato le prospettive globali e regionali degli effetti del cambiamento climatico, confermando o accentuando le tendenze globali già precedentemente evidenziate, e puntando in particolare a evidenziare la necessità di misure di mitigazione e di adattamento ai fenomeni già in atto (Betts 2011; IPCC 2012a). Con queste premesse, nell'ambito della pianificazione che investe direttamente la responsabilità dell'Autorità di Bacino ed in particolare nei procedimenti di attuazione delle Direttive 2000/60/CE (Direttiva Acque) e 2007/60/CE (Direttiva Alluvioni), l'interpretazione dei fenomeni in atto e la quantificazione dell'impatto futuro dei cambiamenti climatici sul ciclo idrologico riveste un'importanza strategica, come in particolare è stato messo in evidenza nelle più recenti linee guida prodotte dalla Commissione Europea (Commissione delle Comunità Europee 2009).

La produzione scientifica più recente sul tema cambiamenti climatici e idrologia sembra essersi concentrata in particolare su due filoni: la valutazione della contrazione delle risorse idriche disponibili, legate ad una generale diminuzione delle precipitazioni (Brunetti et al. 2004; Feyen e Dankers 2009; Fischer e Matthey 2012); e l'incremento della frequenza e dell'intensità degli eventi estremi, in particolare quelli di breve durata, ovvero i cosiddetti flash flood (Fowler et al. 2007; Schultz 2011).

Concentrandosi sulle variazioni delle quantità annuali e mensili dei volumi affluiti da eventi meteorici, con un livello di confidenza definito come "medio" (IPCC 2012a), è opinione diffusa che si vada incontro ad un incremento dei periodi secchi in tutta l'area del Mediterraneo (Beniston et al. 2007; Sillman e Roecker 2008; Giannakopoulos et al. 2009), e ad un'estensione delle aree soggette a siccità (Vautard et al. 2007; Burke e Brown 2008). Riguardo alla distribuzione temporale delle precipitazioni, le indicazioni risultano discordanti, con alcuni contributi (Zveryaev 2004; Moberg et al. 2006; Philipp

et al. 2006; Hirschi et al. 2007; Zolina et al. 2010; Zveryaev e Allan 2010; Ashfaq et al. 2011) che evidenziano una più o meno marcata alterazione della stagionalità e una variazione del peso relativo dei diversi mesi agli afflussi totali, mentre altri sottolineano una sostanziale stabilità della distribuzione stagionale delle precipitazioni, soprattutto in molti bacini del Mediterraneo (López-Moreno et al. 2009; Kelley et al. 2012), indipendentemente dai trend di diminuzione dei quantitativi totali di afflusso. Emerge in ogni caso chiaramente come la complessità della circolazione atmosferica nell'area del Mediterraneo richieda un'analisi di dettaglio a scala regionale (Tapiador et al. 2007; Tanarhte et al. 2012).

Nel nostro paese, i più recenti contributi scientifici hanno evidenziato una generale diminuzione delle precipitazioni annue totali, una diminuzione significativa del numero di giorni piovosi, ed un prevalente incremento dell'intensità delle precipitazioni, tendenzialmente in modo più accentuato al nord e al centro Italia (Lionello et al. 2009; Cislighi et al. 2005; Gorni et al. 2008), ma con una variazione delle modalità di manifestarsi degli eventi meteorici (intensità, intermittenza) che mostra sensibili differenze da zona a zona (ISPRA 2013).

Facendo riferimento invece ad un livello di confidenza più basso (IPCC 2012a), si presume che si possa registrare un incremento di intensità delle precipitazioni in tutte le stagioni tranne che nell'estate, per gran parte dell'Europa meridionale (Pal et al. 2004), con invece una tendenza ad una loro diminuzione in alcune zone, come per esempio la penisola iberica (Giorgi et al. 2008; Giannakopoulos et al. 2009). Inoltre, alcuni autori (Alpert et al. 2002; Alpert et al. 2008; Jin et al. 2011) evidenziano come nell'area mediterranea si evidenzia una sostanziale redistribuzione della frequenza dei fenomeni meteorici, che tende ad un incremento dei fenomeni temporaleschi più violenti ed una diminuzione dei casi di precipitazioni di intensità medio-bassa.

In questo contesto, l'Autorità di Bacino si è impegnata quindi a cercare una metodologia per includere tali tendenze ed indicazioni nei processi pianificatori in capo all'ente, quantificando il cambiamento in atto sulle varie componenti del ciclo idrologico, e valutando la sostenibilità di strumenti e misure di tale pianificazione alla luce degli scenari previsionali di medio-lungo periodo.

In particolare, lo spunto per alcune analisi di dettaglio è stato il coinvolgimento diretto nel progetto LIFE 09 ENV/IT/000056 denominato "WIZ - WaterIZe spatial planning: encompass future drinkwater management conditions to adapt to climate change", a cui l'Autorità di Bacino ha partecipato insieme a Acque SpA, Ingegnerie Toscane e all'Istituto Tecnologico di Galizia. L'obiettivo del progetto è quello di includere le condizioni future di gestione idrica nelle attuali scelte di pianificazione territoriale (e di vita), predisponendo strumenti per la valutazione interattiva della sostenibilità delle scelte di pianificazione urbanistiche, come nuove urbanizzazioni o delocalizzazioni di attività. Tali strumenti si concretizzano nella messa in opera di una piattaforma web che consenta ad amministratori e professionisti un confronto diretto con i

tecnici dell'ente gestore del servizio idrico; il tutto, inserito in una evoluzione dei procedimenti amministrativi che includa tali valutazioni nell'iter di predisposizione degli strumenti urbanistici. Un contributo dell'Autorità di bacino al progetto è consistito proprio nella stima degli effetti del cambiamento climatico sulla disponibilità della risorsa, che influenza la possibilità futura di sviluppi urbanistici compatibili con un costo sostenibile dell'approvvigionamento idrico. Con questo obiettivo, il lavoro è stato mirato ad analizzare prima le serie storiche dei dati pluviometrici aggiornate ai più recenti riscontri, per capire l'entità dei cambiamenti in atto; ed estraendo poi da alcuni modelli meteo previsionali a lungo termine le informazioni utili per una stima della potenziale evoluzione della disponibilità di risorse idriche nel bacino dell'Arno.

Zona di indagine

La zona di interesse per l'analisi ricade nel bacino idrografico del Fiume Arno, caratterizzato da un clima prevalentemente mediterraneo, con una accentuata componente stagionale, in cui i periodi siccitosi si verificano prevalentemente in estate e talvolta anche nel periodo invernale, mentre autunno e primavera sono caratterizzate dalle più significative precipitazioni, sia dal punto di vista del numero di giorni piovosi che dei quantitativi totali (Autorità di Bacino del fiume Arno 2008). Da un punto di vista geologico, il litotipo dominante è quello delle rocce arenacee, che affiorano estesamente su tutta la dorsale appenninica, caratterizzate da permeabilità relativa media e ricoperti quasi il 50% del

bacino, con conseguente infiltrazione efficace non elevata. Solo nelle formazioni in cui prevalgono le rocce carbonatiche carsificate l'infiltrazione efficace raggiunge valori elevati, anche se queste formazioni sono poco diffuse nel bacino. Nei sedimenti pliocenici l'infiltrazione efficace è da considerarsi trascurabile salvo nei litotipi a carattere prevalentemente sabbioso. I terreni più permeabili sono quelli delle pianure alluvionali anche se, in molte aree, le ghiaie e le sabbie acquifere sono coperte da alcuni metri di limo argilloso a bassa permeabilità. Tali zone sono quelle caratterizzate dai più estesi e capienti acquiferi, che costituiscono la principale fonte di approvvigionamento per molti sistemi acquedottistici della zona.

Dato che l'analisi si concentra soprattutto sull'impatto che il cambiamento del regime pluviometrico può avere sulle acque sotterranee del territorio in cui fornisce il servizio idrico il gestore coinvolto nel progetto LIFE sopra citato, facendo riferimento alle schematizzazioni introdotte nel Piano di Bacino, stralcio "Bilancio Idrico" (Autorità di Bacino del Fiume Arno, 2008), sono stati presi in considerazione i seguenti acquiferi (i codici sono riferiti all'elenco dei corpi idrici riportati nel Piano):

- A15 – Lucca (estensione areale 79 kmq);
- A16 – Bientina (estensione areale 44 kmq);
- A17 – Pianura di Pisa (estensione areale 408 kmq).

La figura 1 e la figura 2 illustrano la posizione degli acquiferi considerati e il dettaglio della loro estensione areale nei confronti dei pluviometri disponibili.

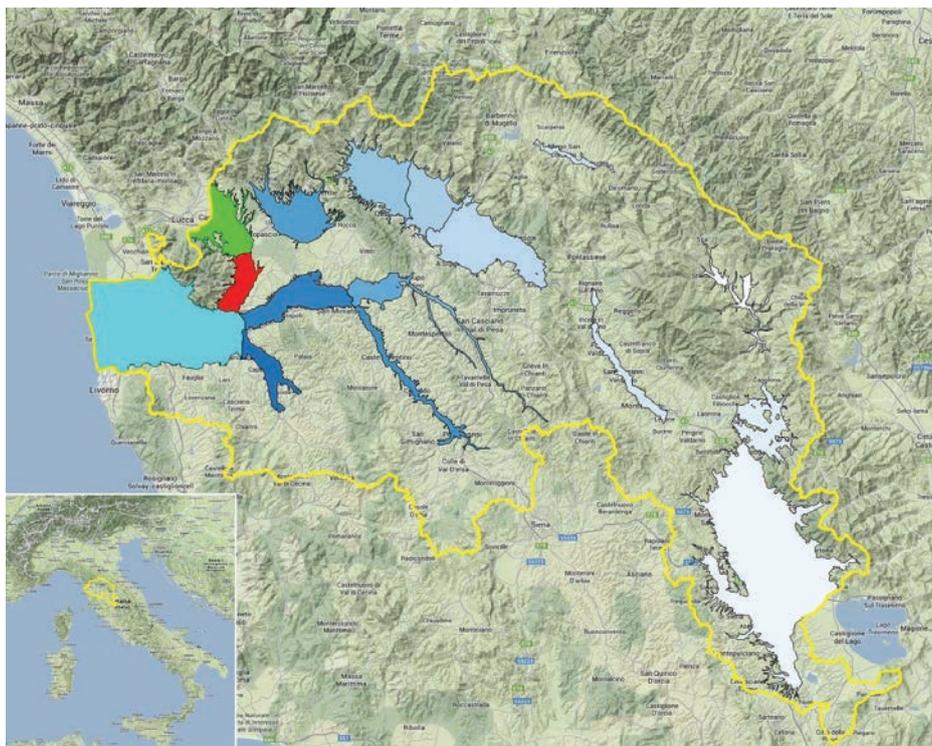


Fig. 1 - Inquadramento dell'area di studio, con evidenziati gli acquiferi analizzati nel Piano di Bacino del Fiume Acquiferi, stralcio "Bilancio Idrico".

Fig. 1 - Geographical settings of the investigated area and groundwaters analyzed in the Arno River Basin Plan, "Water budget".

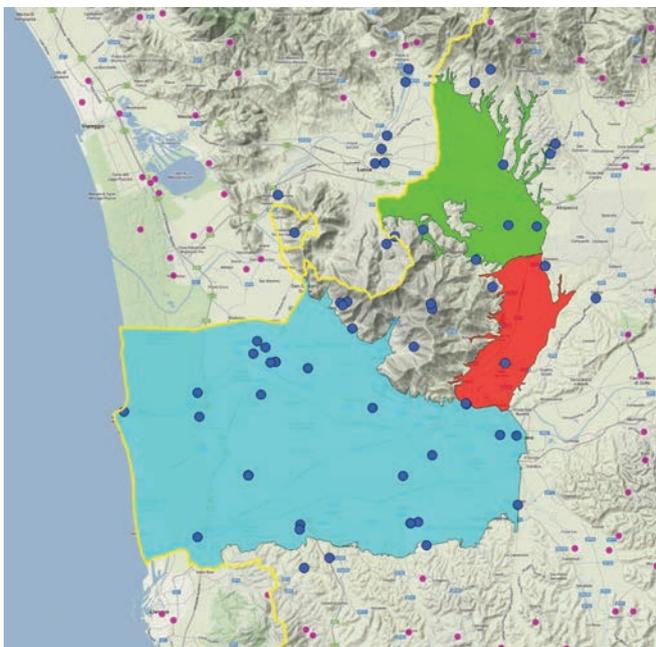


Fig. 2 - Gli acquiferi analizzati e la posizione delle stazioni pluviometriche prese in considerazione.

Fig. 2 - The selected groundwaters and the sample of analyzed raingauges.

Dati disponibili e metodi

La prima fase del lavoro si è concentrata sull'analisi delle serie storiche delle precipitazioni aggiornate ai dati più recenti disponibili (2012), considerando non tanto i valori puntuali, quanto piuttosto gli afflussi areali. Come già citato, dato l'obiettivo generale, considerando che le fonti di approvvigionamento dei sistemi acquedottistici di Acque SpA si basano prevalentemente sulle acque sotterranee, si è focalizzata l'attenzione sugli afflussi calcolati sulle aree di potenziale ricarica dei principali acquiferi del Basso Valdarno. Le serie storiche degli afflussi sono state calcolate per la massima estensione temporale possibile, proprio per valutare, sul più ampio intervallo temporale, tendenze o ciclicità che caratterizzano quanto avvenuto fino ad oggi. Da lì, si è poi proceduto a valutare un'applicazione delle risultanze modellistiche di larga scala riguardanti i modelli previsionali, per capire come le tendenze individuate nell'analisi delle serie storiche possano essere confermate, accentuate o attenuate, negli anni a venire.

I dati di base per l'analisi delle serie storiche provengono dall'ampio archivio del Servizio Idrologico Regionale, già Ufficio Idrografico e Mareografico di Pisa. Per valutare gli afflussi che possono contribuire alla ricarica degli acquiferi in esame è stata individuata un'area di potenziale riferimento, sono state selezionate le stazioni pluviometriche che ricadono nell'area e nelle sue prossimità, e quindi, applicando il metodo dei topoi o poligoni di Thiessen, sono state calcolate le piogge ragguagliate all'area, lavorando sulla base dei dati di precipitazione giornaliera. Per garantire la massima estensione della serie storica da analizzare, si è scelto di prendere in

considerazione ogni stazione pluviometrica di cui fossero stati pubblicati i dati negli Annali Idrologici del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale. Questa scelta comporta che il set di stazioni utilizzate può variare di anno in anno, e quindi i dati di afflusso calcolati non sono valutati in modo del tutto omogeneo da periodo in periodo. Tuttavia, l'alternativa di selezionare le sole stazioni pluviometriche che hanno una durata continua per un sufficiente numero di anni si rivela svantaggiosa perché limita di molto o la durata della serie storica che è possibile produrre, o il numero di stazioni utili per il calcolo degli afflussi. E visto che l'estensione areale delle zone analizzate è tale da comportare significative variazioni tra valori puntuali e stime areali, si è ritenuta migliore la scelta effettuata di massimizzazione della densità di dati a scapito dell'omogeneità delle singole serie pluviometriche utilizzate.

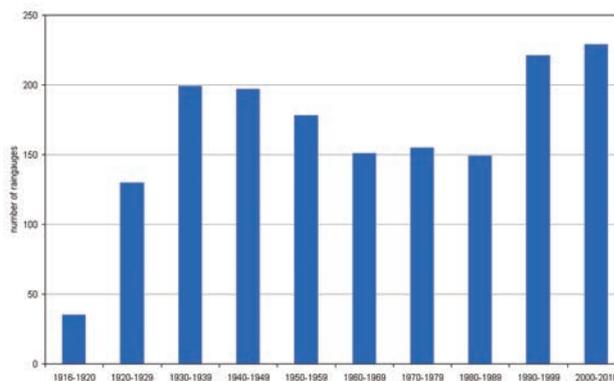


Fig. 3 - Numerosità delle stazioni pluviometriche nel bacino dell'Arno, per decennio.

Fig. 3 - Number of active raingauges, decade distribution.

La significatività dell'analisi degli afflussi è testimoniata dal confronto con alcune serie storiche dei livelli freaticometrici nell'area analizzata. In particolare, si sono presi in considerazione i dati di alcuni freaticometri relativi agli acquiferi analizzati, scegliendo in particolare quelli le cui osservazioni sono estese per un più ampio numero di anni; e a partire dalle relative serie storiche sono stati valutati i valori medi annui. L'indicazione, evidenziata nella figura 4, di una generale diminuzione dei livelli freaticometrici non può essere direttamente correlata con l'andamento degli afflussi, vista la complessità delle dinamiche di ricarica della falda e la necessità di conoscere nel dettaglio l'entità e l'andamento temporale dei prelievi per i diversi usi antropici. Tuttavia, risulta interessante evidenziare come le indicazioni dei livelli freaticometrici non contrastino i risultati che di seguito verranno evidenziati relativamente alle tendenze temporali (più estese ed omogenee) delle serie storiche degli afflussi; si ritiene quindi che la valutazione degli scenari futuri possa ragionevolmente imperniarsi proprio sulla previsione di tale parametro.

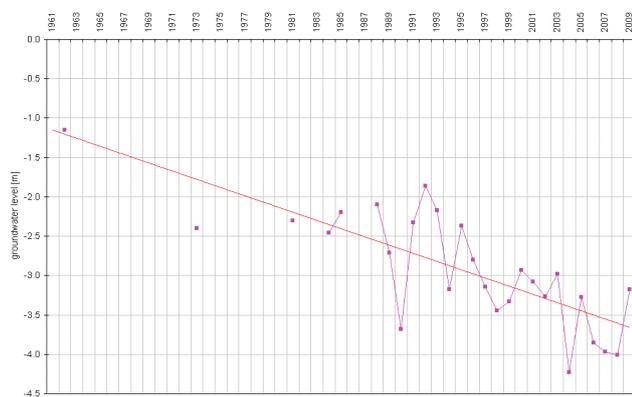


Fig. 4 - Andamento dei livelli freaticometrici nella stazione di Paganico – Centrale Acquedotti (Bientina). Dati del Servizio Idrologico della Regione Toscana e di Autorità di Bacino del Fiume Arno.

Fig. 4 - Groundwater level, gauge "Paganico - Centrale Acquedotti". Data collected from Servizio Idrologico della Regione Toscana and Autorità di Bacino del Fiume Arno.

Una volta quantificate le tendenze fino ad oggi registrabili relativamente agli afflussi sulle aree di ricarica degli acquiferi, la seconda fase del lavoro è stata invece dedicata alla previsione della disponibilità idrica sul medio lungo termine nelle stesse aree. Acque SpA ha fornito il quadro delle informazioni sui prelievi attuali dalle diverse fonti di approvvigionamento idrico (pozzi, sorgenti, derivazioni da corsi d'acqua) riferite al Valdarno Inferiore (territorio dell'Ambito Territoriale Ottimale ATO 2). L'Autorità di Bacino ha quindi effettuato le analisi necessarie basandosi sui dati del quadro conoscitivo e delle valutazioni del Piano di Bacino dell'Arno, stralcio "Bilancio Idrico". In accordo con i più recenti risultati delle esperienze sul tema, sono stati derivati da alcuni modelli meteorologici a scala globale le anomalie di precipitazione mensile su diversi orizzonti temporali: 30, 60 e 90 anni nel futuro. Per le informazioni relative agli scenari previsionali si è fatto riferimento alle modellazioni effettuate da alcuni centri di ricerca internazionale, raccolte e distribuite dall'IPCC Data Distribution Centre (IPCC 2012b).

Facendo riferimento in particolare ai mesi di ricarica (ovvero, gli otto mesi da ottobre a maggio) e considerando come ipotesi semplificativa una correlazione lineare tra ricarica degli acquiferi e variazione della piovosità dall'altro, sono state valutate i probabili decrementi. Si è così potuto fornire, per ogni fonte di approvvigionamento, la potenziale variazione delle quantità prelevabili, espresse in mc/anno, con diminuzioni variabili da zona a zona.

Scelta delle aggregazioni temporali e dei parametri di riferimento

Per analizzare adeguatamente la tendenza su orizzonti temporali medio-lunghi degli afflussi nelle aree dei bacini si è scelto di aggregare i dati degli afflussi sull'anno; inoltre, per focalizzare l'attenzione sulle quantità affluite nei periodi di ricarica, si è provveduto a calcolare i valori cumulati anche in riferimento ai soli mesi per i quali è più significativo l'apporto in termini di ricarica agli acquiferi. Premesso che non esiste una delimitazione temporale certa, è risultato ragionevole considerare per ogni anno il periodo compreso tra l'ottobre

dell'anno precedente e il maggio dell'anno in corso: 8 mesi sui 12 dell'anno, escludendo così sostanzialmente i mesi estivi, per i quali le precipitazioni (più scarse e spesso legate ad eventi temporaleschi, estemporanei) danno un contributo modesto o nullo alle dinamiche di ricarica.

Come variabili di riferimento per l'analisi di trend sulla finestra temporale considerata (1922-2012), sono presi in considerazione, sempre con riferimento alle precipitazioni ragguagliate sull'area di studio:

- i valori cumulati annuali;
- i valori cumulati nel periodo identificato come di ricarica degli acquiferi;
- il numero di giorni piovosi nel periodo identificato come di ricarica.

Le fonti di approvvigionamento idrico

L'elenco delle fonti di approvvigionamento gestito da Acque SpA contiene 949 punti distinti di prelievo. Dei 713 punti con presentano un valore non nullo di prelievo annuo, 427 si riferiscono ad acque sotterranee, 273 a sorgenti, e 15 ad acque superficiali.

Per quanto riguarda le informazioni sulle potenzialità delle fonti di approvvigionamento, si fa riferimento ai dati estratti dal Piano di Bacino, stralcio "Bilancio Idrico", ed in particolare alle indicazioni relative ai corpi idrici sotterranei a bilancio negativo. In base a tali indicazioni, si imposta la valutazione del decremento delle potenzialità delle fonti di approvvigionamento nel seguente modo:

- i prelievi riferiti ai corpi idrici sotterranei o alle zone altamente critiche per le acque superficiali subiscono il 100% del decremento previsto;
- gli altri prelievi subiscono una decurtazione inferiore, stimata al 50%, da interpretare nel seguente modo: anche se la tendenza è quella di una diminuzione nella capacità di ricarica del corpo idrico sotterraneo o del regime delle durate delle portate del corpo idrico superficiale, il margine attualmente disponibile tra potenzialità delle fonti e effettivo prelievi consente di attenuare l'impatto di tale diminuzione.

L'analisi degli afflussi

La valutazione degli afflussi è stata effettuata per ognuno dei tre acquiferi di riferimento; nel seguito, in grafici e tabella, si fa riferimento alla codifica sopra citata per individuare i tre corpi idrici sotterranei (mutuata dal Piano di Bacino dell'Arno, stralcio "Bilancio Idrico").

Iniziando a valutare i valori degli afflussi annuali, si osserva per ognuna delle aree analizzate un trend facilmente identificabile, con un andamento decrescente generalizzato sui 90 anni considerati. In particolare, soffermandosi sull'acquifero più esteso (Pianura di Pisa, A17) si osserva (figura 5) come le variazioni di anno in anno siano consistenti e per lo più non correlate (ovvero, anni molto piovosi e molto secchi si succedono in modo aleatorio), e molto spesso i cumulati annui eccedono l'intervallo caratterizzato da valore medio \pm deviazione standard.

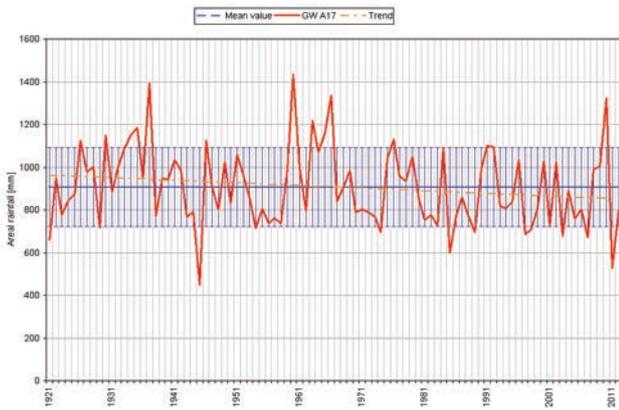


Fig. 5 - Afflussi annuali sull'area relativa all'acquifero della Pianura di Pisa (A17).

Fig. 5 - Annual mean areal rainfall on the groundwater recharge area (A17, Pianura di Pisa)

Anche gli afflussi sugli altri acquiferi analizzati mostrano un analogo trend, con effetti ancora più accentuati, come evidenziato nelle figure 6 e 7.

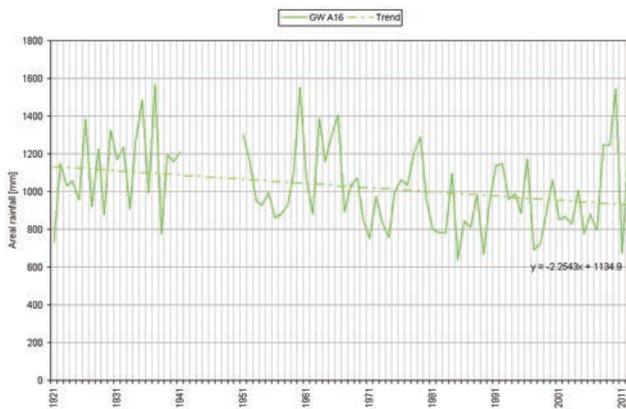


Fig. 6 - Afflussi annuali sull'area relativa all'acquifero di Lucca (A15).

Fig. 6 - Annual Mean areal rainfall on the groundwater recharge area (A15, Lucca).

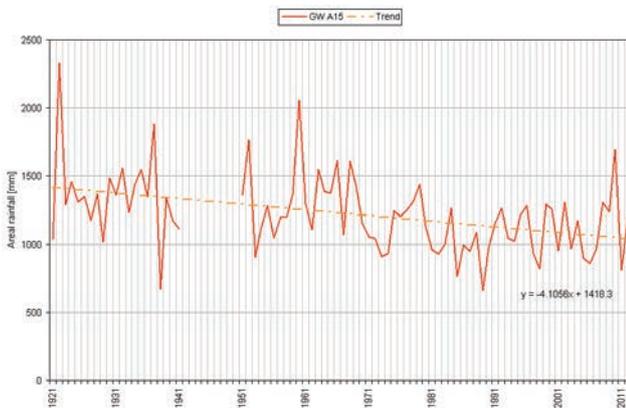


Fig. 7 - Afflussi annuali sull'area relativa all'acquifero di Bientina (A16).

Fig. 7 - Annual Mean areal rainfall on the groundwater recharge area (A16, Bientina).

In termini quantitativi, nella tabella 1 si riportano i valori del gradiente per i tre acquiferi, che di fatto esprime la diminuzione registrata in termini di mm/anno.

Tab. 1 - Gradiente di variazione per gli afflussi annuali sugli acquiferi.

Tab. 1 - Annual areal rainfall degree of variation, for every analyzed groundwater.

Acquifero	Variatione annuale [mm/anno]
A15 - Lucca	-4.1056
A16 - Bientina	-2.2543
A17 - Pianura di Pisa	-1.2345

A fronte di una diminuzione di quantitativi totali affluiti, senza dubbio marcata in tutte le aree, si pone come ulteriore obiettivo la verifica di quanto essa sia associata ad una generale diminuzione degli eventi piovosi. Prescindendo dalla definizione di "evento", in cui non può mancare una componente soggettiva e che comunque mal si presta ad essere caratterizzata sulla base di dati ad aggregazione temporale giornaliera, si considerano piuttosto i giorni piovosi annui, e limitandosi all'acquifero più esteso per esigenze di sintesi (degli altri acquiferi si riportano solo gli indici sintetici relativi al gradiente), si osserva invece un trend opposto, anche se poco marcato: ovvero, si nota una leggera tendenza ad un aumento dei giorni con pioggia (sempre riferendosi ai valori medi areali, figura 8).

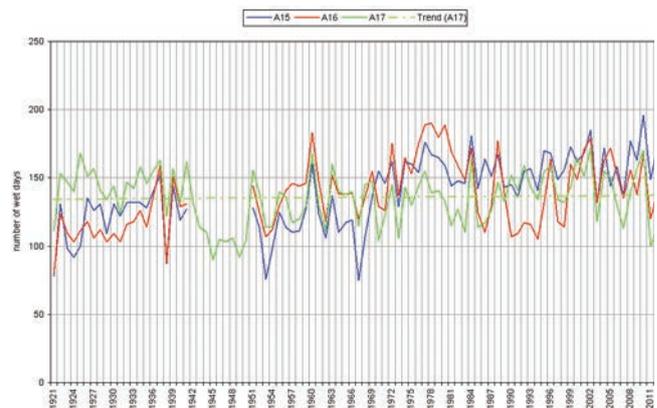


Fig. 8 - Numero di giorni piovosi annuali sui tre acquiferi.

Fig. 8 - Wet days number on annual basis on the analyzed groundwaters.

In termini di variazione annua, derivata dalla retta di regressione, i valori sono riportati nella tabella 2.

Tab. 2 - Gradiente di variazione per i valori di numero di giorni piovosi annuali.

Tab. 2 - Wet days number degree of variation.

Acquifero	Variatione annuale [numero giorni/anno]
A15 - Lucca	0.6399
A16 - Bientina	0.4209
A17 - Pianura di Pisa	0.0347

Scendendo poi nel dettaglio dell'andamento delle precipitazioni cumulate nei soli mesi individuati come di possibile ricarica degli acquiferi (da ottobre a maggio compresi), si osserva come la stessa tendenza di diminuzione dei quantitativi cumulati risulti ancora più accentuata, almeno per due dei tre acquiferi analizzati (figura 9 e tabella 3)

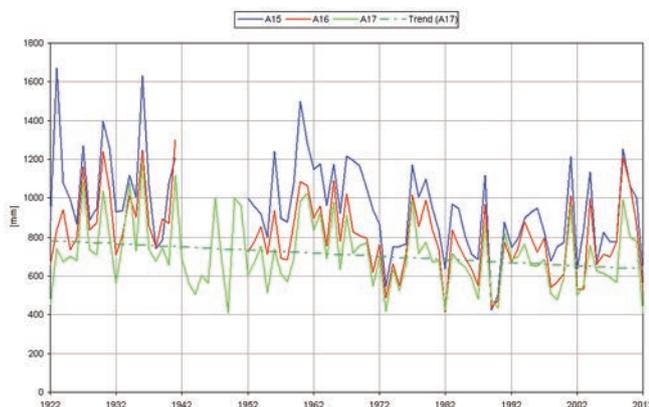


Fig. 9 - Afflussi stimati nel periodo di ricarica (ottobre-maggio).

Fig. 9 - Mean areal rainfall in the recharge time interval (from October to May).

Tab. 3 -Gradiente di variazione per gli afflussi annuali sugli acquiferi.

Tab. 3 - Annual areal rainfall degree of variation, for every analyzed groundwater.

Acquifero	Variatione annuale [mm/anno]
A15 – Lucca	-3.6525
A16 – Bientina	-2.4545
A17 – Pianura di Pisa	-1.6456

La valutazione in termini di numero di giorni piovosi, sempre riferiti al periodo individuato come di potenziale ricarica (figura 10), mostra invece indicazioni discordanti.

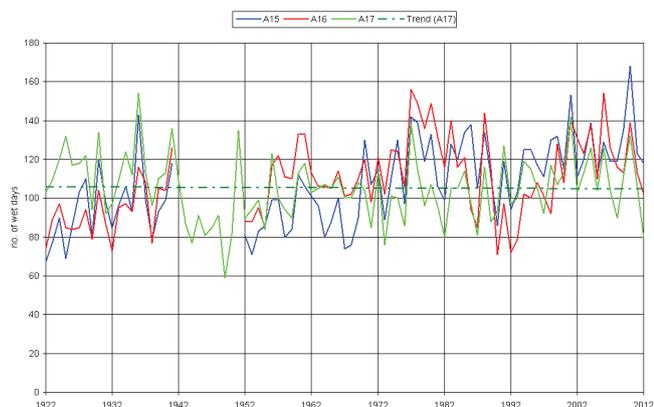


Fig. 10 - Giorni piovosi nel periodo di ricarica (ottobre – maggio).

Fig. 10 - Wet days in the recharge time interval (from October to May).

In termini di variazione annua, i valori sono elencati in tabella 4.

Tab. 4 -Gradiente di variazione per gli afflussi nel periodo di ricarica.

Tab. 4 - Mean areal rainfall degree of variation in the recharge time interval (from October to May).

Acquifero	Variatione annuale [numero giorni/anno]
A15 – Lucca	0.4750
A16 – Bientina	0.3398
A17 – Pianura di Pisa	-0.0131

La situazione risulta quindi mostrare alcuni segnali chiari (la diminuzione costante degli afflussi) e altri meno chiari (la costanza o l'aumento dei giorni piovosi): è di interesse quindi approfondire cercando di capire, al di là dei totali sul periodo, come è cambiato il modo di piovere. Per farlo, senza spingersi in analisi che necessiterebbero di dati a risoluzione temporale maggiore (non disponibili per una serie storica così estesa) si è proceduto ad una classazione dei dati giornalieri di afflussi in base alla loro quantità, adottando come classi di riferimento le seguenti:

- afflusso giornaliero inferiore a 2 mm;
- afflusso giornaliero tra 2 e 4 mm;
- afflusso giornaliero tra 4 e 16 mm;
- afflusso giornaliero superiore a 16 mm.

Si noti che si stanno analizzando afflussi relativi ad aree che variano dai 44 ai 400 km²; e quindi i valori degli afflussi sono generalmente inferiori ai valori che ci possiamo aspettare sulle singole stazioni. Per ogni classe sono stati conteggiati i casi di appartenenza (ovvero, i giorni in cui l'afflusso era compreso nei limiti della classe), sempre riferiti al periodo di ricarica. Per esigenze di sintesi, l'andamento viene riportato facendo riferimento all'acquifero A17 (figura 11), il più significativo sia per dimensione che per continuità della serie storica degli afflussi.

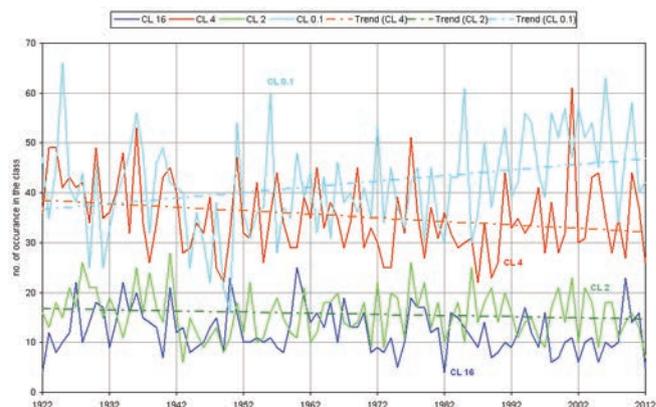


Fig. 11 - Afflussi giornalieri, numero di casi nelle 4 classi individuate (CL_0.1 = afflusso giornaliero inferiore a 2 mm; CL_2 = afflusso compreso tra 2 e 4 mm; CL_4 = afflusso compreso tra 4 e 16 mm; CL_16 = afflusso superiore a 16 mm).

Fig. 11 - Areal rainfall, number of cases in the defined 4 classes.

Si osserva che le variazioni nelle quattro classi considerate hanno andamenti discordanti. Se per la classe degli eventi meno intensi (afflussi inferiori ai 2 mm) si osserva un incremento negli anni, a diminuire maggiormente sono invece i giorni con piogge ragguagliate comprese tra i 4 e i 16 mm – probabilmente la classe a cui si può collegare un più significativo impatto in termini di efficienza del processo di ricarica degli acquiferi. Il risultato quindi, a fronte di un significativo aumento di giorni con piogge modeste e sparse nel territorio ma di una contrazione dei giorni in cui piove in modo più sostenuto e diffuso, risulta coerente con le indicazioni precedentemente viste relativamente ai totali cumulati.

Anche in questo caso, si riportano i gradienti della retta di regressione per ogni acquifero e per le diverse classi (tabella 5 e figura 12).

Tab. 5 -Variazione annua della numerosità delle classi definite per gli afflussi nel periodo di ricarica.

Tab. 5 - Annual variation of class size for daily mean areal rainfall in the recharge time interval (from october to may).

	A15 Lucca	A16 Bientina	A17 Pianura di Pisa
Classe > 16 mm	-0.0689	-0.0688	-0.0349
Classe 4 mm – 16 mm	-0.1179	-0.1016	-0.0682
Classe 2 mm – 4 mm	0.0329	-0.0180	-0.0227
Classe < 2 mm	0.6576	0.5281	0.1128

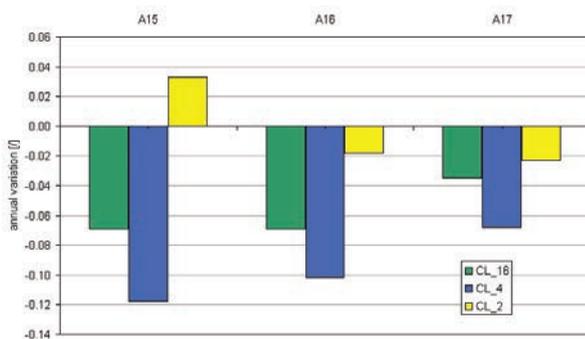


Fig. 12 - Variazione della numerosità delle classi per ogni acquifero.

Fig. 12 - Number of cases in the defined 4 classes, degree of variation for every groundwater

La valutazione degli scenari previsionali

Numerosi sono i modelli globali che forniscono quadri previsionali meteo-climatici per i diversi scenari di evoluzione, alla luce del cambiamento climatico. Di base, si è sempre fatto riferimento agli scenari che l'International Panel on Climate Change (IPCC) ha posto come cardine dei più recenti rapporti. Tali scenari tengono conto di diverse possibili "storie" di condizioni e rapporti socio-economici delle popolazioni mondiali (IPCC 2007a; IPCC 2007b; IPCC 2012).

I modelli meteorologici di circolazione globale, applicati

a scenari previsionali, hanno subito una rapida evoluzione negli ultimi anni, e in numerosi studi sono stati utilizzati per elaborare in cascata simulazioni ad alta risoluzione spaziale in regioni più limitate (Benestad 2005, Fowler et al. 2007, Dankers e Feyen 2008, Dankers e Feyen 2009, Chenoweth et al. 2011), anche con lo scopo di analizzare i trend futuri di media ed estremi di precipitazione (Gao et al. 2006, Beniston 2009, Groppelli et al. 2011, Argüeso et al. 2012), in alcuni casi evidenziando potenziali significative variazioni con incremento dell'intensità e della frequenza degli eventi meteorici (Frei et al. 2006, Schmidli et al. 2007).

Visto l'obiettivo del lavoro, ci si è riferiti in particolare ad uno dei prodotti delle applicazioni modellistiche che diversi centri di ricerca hanno sviluppato in questi ultimi anni, e cioè la stima della variazione dei quantitativi mensili di precipitazione. Dal quadro messo a disposizione dal Centro Dati dell'IPCC (IPCC 2012b) sono stati raccolti i dati relativi a diversi orizzonti temporali per alcuni dei modelli disponibili. La selezione dei modelli è stata impostata tenendo conto della risoluzione spaziale (privilegiando i modelli che riportano output ad una scala più dettagliata). Il quadro di modelli e scenari considerati viene riportato nelle tabelle 6 e 7 (vedi pagina seguente).

Elaborazione dei dati previsionali a scala locale

Le indicazioni estratte dai modelli sono sostanzialmente dei valori mensili di variazione degli afflussi rispetto alla situazione attuale. Ad esempio, per il modello PCM (Parallel Climate Model) del "National Center for Atmospheric Research (NCAR), NSF (a primary sponsor), DOE (a primary sponsor), NASA, and NOAA", per i due scenari SRA2 ("A very heterogeneous world with continuously increasing global population and regionally oriented economic growth that is more fragmented and slower than in other storylines") e SRA1B ("A future world of very rapid economic growth, global population that peaks in mid-century and declines thereafter, and rapid introduction of new and more efficient technologies, with the development balanced across energy sources") vengono proposti i valori raffigurati in Fig.13.

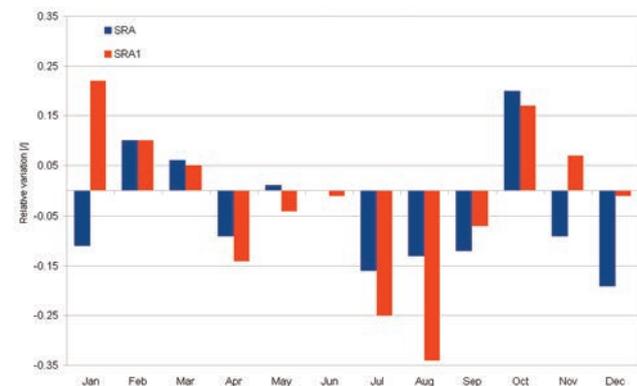


Fig. 13 - Variazione relativa mensile delle precipitazioni differenziati per i due scenari SRA e SRA1B.

Fig. 13 - Mean relative variation of rainfall rate for SRA and SRA1B scenarios.

Tab. 6 -Modelli scelti per la valutazione degli scenari previsionali

Tab. 6 - Selected models for meteorological forecast scenarios

Sigla	Agenzia	Nome	Risoluzione oceanica	Risoluzione orizzontale
NCPCM	National Center for Atmospheric Research (NCAR), NSF (a primary sponsor), DOE (a primary sponsor), NASA, and NOAA	Parallel Climate Model (PCM)	T42, L26	320x384 horizontal grid points, L40
NCCCSM	National Center for Atmospheric Research (NCAR),	Community Climate System Model, version 3.0 (CCSM3)	T85, L26	L40, 1.125x(0.27-1.0)
MIHR	CCSR/NIES/FRCGC, Japan	MIROC3.2 (Model for Interdisciplinary Research on Climate)	T106 L56 in the high-resolution version	0.28125 degree in longitude, 0.1875 degree in latitude, and L47
IPCM4	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), France	IPSL-CM4	2.5 x 3.75 (i.e. 96x71 grid points). L19	2degree (1 degree near equator, in Mediterranean and Red seas)

Tab. 7 -Descrizione degli scenari (da IPCCa, 2007).

Tab. 7 - Scenario description (according to IPCCa, 2007).

COMMIT	SRA2	SRA1B	SRB1
An idealised scenario in which the atmospheric burdens of long-lived greenhouse gases are held fixed at AD2000 levels	A very heterogeneous world with continuously increasing global population and regionally oriented economic growth that is more fragmented and slower than in other storylines	A future world of very rapid economic growth, global population that peaks in mid-century and declines thereafter, and rapid introduction of new and more efficient technologies, with the development balanced across energy sources	A convergent world with the same global population as in the A1 storyline but with rapid changes in economic structures toward a service and information economy, with reductions in material intensity, and the introduction of clean and resource-efficient technologies

Si osserva come per entrambi gli scenari il modello ipotizza una diminuzione delle precipitazioni estive; mentre si propongono effetti opposti sul periodo autunnale-invernale di ricarica (di incremento delle precipitazioni per lo scenario SRA1B, di diminuzione per lo scenario SRA2). Scegliendo una linea prudentiale, si opta (consapevoli del margine di approssimazione) per scegliere i valori minimi (anche in senso negativo) tra i due scenari.

Quindi, si dispone di una serie di 840 valori previsionali di variazione delle precipitazioni con riferimento ai 12 mesi, ai 3 orizzonti temporali, ai 4 scenari globali e ai 4 modelli diversi. Per valutare l'effetto sulle fonti di approvvigionamento attualmente prese in considerazione, si è valutato allora l'effetto di tali variazioni sui valori medi di afflusso sui diversi copri idrici, considerando poi un computo totale annuo prendendo a riferimento i soli mesi di potenziale ricarica, secondo la schematizzazione già citata. In altre parole, analogamente a

quanto condotto per l'analisi delle serie passate, si suppone che le precipitazioni estive non diano un contributo sensibile alla ricarica di acque sotterranee e al deflusso di base dei corpi idrici superficiali, e quindi l'impatto delle variazioni degli orizzonti futuri viene applicato solo ai mesi di interesse per la ricarica.

D'altra parte, sfruttando i modelli per la sola indicazione relativa di variazione (aumento o diminuzione) delle precipitazioni, è possibile svincolarsi dai dati di pioggia (a volte non attuali) utilizzati nei modelli, ma riferirli ai valori calcolati sulla base della densa rete pluviometrica disponibile per le serie storiche di dati giornalieri del periodo 1982-2012. Si sono infatti utilizzati i dati di tutti i pluviometri, procedendo poi ad un'operazione di media spaziale dei valori giornalieri, e per una successiva aggregazione sui mesi. Di conseguenza, il valore mensile di afflusso per una determinata area (zona di ricarica di un acquifero, bacino di riferimento di

un corpo idrico superficiale) viene stimato nel seguente modo:

$$\Delta Pr\{i,j\} = \text{MIN}(P_{\text{att}}\{i\} \times \Delta P\{i,j,k,l\})$$

dove:

- $i = 1, 2, 3, 4, 5, 10, 11, 12$ (mesi di ricarica)
- $j = 1, \dots, n$ (orizzonti)
- $k = 1, \dots, m$ (scenari)
- $l = 1, \dots, N$ (modelli)
- $P_{\text{att}}\{i\}$ = precipitazione media attuale (espressa in mm), riferita al mese i .
- $\Delta P\{i,j,k,l\}$ = rapporto (espresso in valore adimensionale compreso tra 0 e 1) tra la precipitazione media prevista sull'orizzonte j , per lo scenario k , dal modello l , per il mese i e la precipitazione media attuale.

Complessivamente, l'impatto in termini di variazione (diminuzione o aumento) della disponibilità idrica per le fonti riferite ad una determinata area viene poi ottenuta tramite la sommatoria (con segno) dei contributi dei mesi presi in considerazione:

$$P_{\text{tot}}\{j\} = \sum_{i=1,2,3,4,5,10,11,12} [P_{\text{att}}\{i\} + \Delta Pr\{i,j\} \times R]$$

dove R è un fattore correttivo pari a 1.0 per gli acquiferi o i sottobacini a forte criticità, 0.5 altrove, secondo le indicazioni del Piano di Bilancio Idrico.

Proiezioni sulle fonti di approvvigionamento idrico

Per ogni fonte di approvvigionamento è disponibile il riferimento all'acquifero o al sottobacino di riferimento; e per ognuno di essi, in funzione dei calcoli sopra esposti, viene stimato, considerando la situazione più cautelativa (valore inferiore tra vari scenari e modelli), la percentuale rispetto al valore attuale degli afflussi sugli orizzonti 2030-2060-2090. Supponendo, con ipotesi semplificativa, un trasferimento lineare tra la diminuzione degli apporti meteorici e la capacità di ricarica (in senso lato) del corpo idrico, si perviene così alla potenziale variazione delle quantità prelevabili, espresse in mc/anno. In generale, visto l'approccio cautelativo (scelta del valore minimo tra scenari e modelli), si perviene sempre ad una diminuzione delle quantità prelevabili. Analizzando i valori percentuali di diminuzione, si rimane comunque in un intorno a valori intorno al 93-95% dei valori attuali.

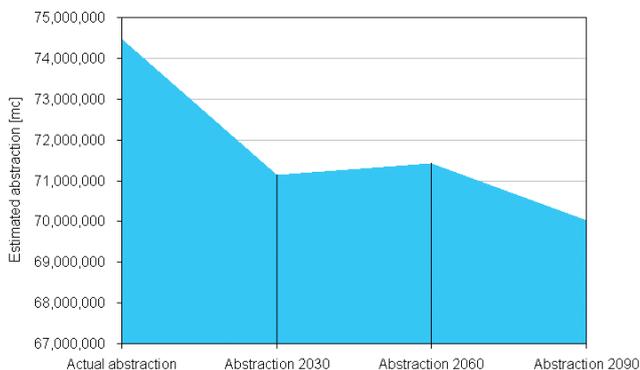


Fig. 14 - Andamento medio della potenzialità dei prelievi sul territorio dell'ATO 2

Fig. 14 - Mean forecast trend for the total amount of potential abstraction for groundwater resource located in the ATO2 boundaries

Discussione dei risultati e conclusioni

L'estensione della serie storica analizzata (circa 90 anni) è del tutto comparabile con l'orizzonte temporale per il quale sono state prese in considerazione le previsioni climatiche a larga scala. Questo consente un agevole confronto tra il trend già registrato, e quello che i modelli prevedono per i diversi scenari futuri. Di fatto, si tratta di variazioni dello stesso ordine di grandezza. Sulla base dei dati sopra riportati, limitandosi a considerare l'acquifero più esteso tra quelli analizzati (quello della Pianura di Pisa), che peraltro è anche quello che in termini di afflussi cumulati nel periodo risulta avere la diminuzione meno accentuata, il confronto in termini percentuali della diminuzione passata e futura si attesta tra 7% (passato) e 11% (futuro). Al netto delle incertezze legate alla scelta dei modelli (il valore citato si riferisce alla stima più cautelativa), sostanzialmente gli scenari futuri confermano la tendenza già registrata nell'ultimo secolo.

D'altra parte, la variabilità dei quantitativi cumulati degli afflussi (più che del numero di giorni piovosi) registrata di anno in anno ha la conseguenza di far perdere la percezione di tale trend. Un anno estremamente piovoso come il 2013 può far pensare cioè ad un'inversione di tendenza, quando invece la valutazione deve essere necessariamente fatta su un orizzonte di più ampio respiro, coerente con gli intervalli temporali su cui vengono fornite le previsioni future.

Legata a questo aspetto, è doverosa l'ammissione della relativa semplicità dei metodi di analisi delle serie storiche utilizzati, per cui i risultati discussi rappresentano una prima indicazione sicuramente perfezionabile: un approfondimento dell'indagine con metodi di analisi non lineari e applicazione di modelli stocastici più complessi può portare ad una maggiore comprensione delle dinamiche di variazione delle risorse idriche disponibili.

In ogni caso, occorre valutare attentamente gli effetti della tendenza che, anche a questo livello di indagine, sembra emergere chiaramente: quella di una progressiva contrazione della disponibilità della risorsa. Facendo riferimento ai numeri del già citato Piano di Bacino del fiume Arno, stralcio "Bilancio Idrico" (Autorità di Bacino del Fiume Arno, 2008), è possibile quantificare, con inevitabile approssimazione ma con utile riferimento agli ordini di grandezza in gioco, il confronto tra volumi affluiti e volumi disponibili negli acquiferi. Limitandosi ai valori di ricarica e ai valori prelevati, utili alla valutazione della dinamica degli acquiferi e adatti a quantificare l'eventuale disequilibrio del saldo tra ingressi e uscite, si cita il caso dell'acquifero della Pianura di Pisa (A17, nella già ricordata codifica del Piano di Bilancio Idrico del bacino dell'Arno). Per esso il volume medio annuo stimato di ricarica si attesta intorno ai 33 Ml mc; confrontando questo valore con la previsione climatica sui prossimi trenta anni, si può stimare che la contrazione del volume affluito possa quantificarsi intorno al 50% di tale volume, cambiando sostanzialmente il saldo dell'acquifero da attivo a passivo.

Considerando l'incremento dei consumi e le perdite delle reti idriche, anche una variazione di entità contenuta deve essere valutata attentamente e può portare nel futuro, in assenza

di misure risparmio idrico e contenimento dei prelievi e di interconnessione dei sistemi acquedottistici, ad un acuirsi delle criticità già adesso tipiche dei periodi estivi.

Questo per ribadire, concludendo, che le scelte di pianificazione territoriale, che implicano un'attenta valutazione di come verrà alterata la richiesta di sfruttamento delle risorse idriche, dovranno sempre di più fare i conti con gli effetti del cambiamento climatico – in atto e futuro.

Ringraziamenti: L'analisi è stata condotta nell'ambito delle attività del Progetto LIFE+ "WIZ" (WaterIze spatial planning: encompass future drinkwater management conditions to adapt to climate change), cod. LIFE 09 ENV/IT/000056.

Le elaborazioni sono state effettuate su base dati del Servizio Idrologico della Regione Toscana e di Acque S.p.A., utilizzando come principali strumenti informatici PostgreSQL Database Management System per l'archiviazione dati e GNU Octave come piattaforma di calcolo.

BIBLIOGRAFIA

- Alpert, P., Ben-Gai, T., Baharad, A., Benjamini, Y., Yekutieli, D., Colacino, M., Diodato, L., Ramis, C., Homar, V., Romero, R., Michaelides, S. and Manes, A. (2002). The paradoxical increase of Mediterranean extreme daily rainfall in spite of decrease in total values. *Geophysical Research Letters* 29: doi: 10.1029/2001GL013554
- Alpert, P., Krichak S.O., Shafir H., Haim D., and Osetinsky I. (2008). Climatic trends to extremes employing regional modeling and statistical interpretation over the E. Mediterranean. *Global and Planetary Change*, 63, 163-170
- APAT – Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per I Servizi Tecnici (2007). *Cambiamenti Climatici Conferenza Nazionale 2007. Sintesi dei lavori*. Roma, ISBN 978-88-448-0344-5
- Argüeso, D., Hidalgo-Muñoz, J.M., Gámiz-Fortis, S.R., Esteban-Parra, M.J. and Castro-Díez, Y. (2012). High-resolution projections of mean and extreme precipitation over Spain using the WRF model (2070-2099 versus 1970-1999). *Journal of Geophysical Research* 117: doi: 10.1029/2011JD017399
- Ashfaq, M., Bowling, L.C., Cherkauer, K., Pal, J.S. and Diffenbaugh, N.S. (2010). Influence of climate model biases and daily-scale temperature and precipitation events on hydrological impacts assessment: A case study of the United States. *Journal of Geophysical Research* 115: doi: 10.1029/2009JD012965
- Autorità di Bacino del Fiume Arno (2008). *Piano di Bacino, stralcio Bilancio Idrico. Relazione Generale*. Firenze
- Benestad, R.E. (2005). Climate change scenarios for northern Europe from multi-model IPCC AR4 climate simulations. *Geophysical Research Letters* 32: doi: 10.1029/2005GL023401
- Beniston, M., D.B. Stephenson, O.B. Christensen, C.A.T. Ferro, C. Frei, S. Goyette, K. Halsnaes, T. Holt, K. Jylha, B. Koffi, J. Palutikof, R. Schoell, T. Semmler, and K. Worth, (2007). Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, 81, 71-95
- Beniston, M. (2009). Trends in joint quantiles of temperature and precipitation in Europe since 1901 and projected for 2100. *Geophysical Research Letters* 36: doi: 10.1029/2008GL037119
- Betts, A. (2011). Climate change policy in the European Union: Confronting the dilemmas of mitigation and adaptation?. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 92: doi: 10.1029/2011EO330006
- Brunetti, M., Maugeri, M., Monti, F. and Nanni, T. (2004). Changes in daily precipitation frequency and distribution in Italy over the last 120 years. *Journal of Geophysical Research* 109: doi: 10.1029/2003JD004296
- Burke, E.J., and Brown S.J. (2008). Evaluating uncertainties in the projection of future drought. *Journal of Hydrometeorology*, 9(2), 292-299
- Chenoweth, J., Hadjinicolaou, P., Bruggeman, A., Lelieveld, J., Levin, Z., Lange, M.A., Xoplaki, E. and Hadjikakou, M. (2011). Impact of climate change on the water resources of the eastern Mediterranean and Middle East region: Modeled 21st century changes and implications. *Water Resources Research* 47: doi: 10.1029/2010WR010269
- Cislaghi, M., De Michele, C., Ghezzi, A., Rosso, R. (2005). Statistical assessment of trends and oscillations in rainfall dynamics: analysis of long daily Italian series. *Atmospheric Research*, 77, 188-202
- Commissione delle Comunità Europee (2009). "Libro Bianco - L'adattamento ai cambiamenti climatici: verso un quadro d'azione europeo". Bruxelles. COM(2009) 147 definitivo
- Dankers, R. and Feyen, L. (2008). Climate change impact on flood hazard in Europe: An assessment based on high-resolution climate simulations. *Journal of Geophysical Research* 113: doi: 10.1029/2007JD009719
- Dankers, R. and Feyen, L. (2009). Flood hazard in Europe in an ensemble of regional climate scenarios. *Journal of Geophysical Research* 114: doi: 10.1029/2008JD011523
- Feyen, L. and Dankers, R. (2009). Impact of global warming on streamflow drought in Europe. *Journal of Geophysical Research* 114: doi: 10.1029/2008JD011438
- Fischer, M.J. and Matthey, D. (2012). Climate variability and precipitation isotope relationships in the Mediterranean region. *Journal of Geophysical Research* 117: doi: 10.1029/2012JD018010
- Fowler, H.J., Ekström, M., Blenkinsop, S. and Smith, A.P. (2007). Estimating change in extreme European precipitation using a multimodel ensemble. *Journal of Geophysical Research* 112. doi: 10.1029/2007JD008619
- Frei, C., Schöll, R., Fukutome, S., Schmidli, J. and Vidale, P.L. (2006). Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. *Journal of Geophysical Research* 111: doi: 10.1029/2005JD005965
- Gao, X., Pal, J.S. and Giorgi, F. (2006). Projected changes in mean and extreme precipitation over the Mediterranean region from a high resolution double nested RCM simulation. *Geophysical Research Letters* 33: doi: 10.1029/2005GL024954
- Giannakopoulos, C., P. Le Sager, M. Bindi, M. Moriondo, E. Kostopoulou, and C.M. Goodess, 2009: Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2°C global warming. *Global and Planetary Change*, 68(3), 209-224
- Giorgi, F. and Lionello P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63(2-3), 90-104
- Gorni, E., Bianchi Janetti, E., Bocchiola, D., Rosso, R. (2008). Cambio climatico nel parco dell'Adamello. *Analisi di serie climatiche quarantennali*. L'Acqua, 5, 47-56
- Groppelli, B., Bocchiola, D. and Rosso, R. (2011). Spatial downscaling of precipitation from GCMs for climate change projections using random cascades: A case study in Italy. *Water Resources Research* 47: doi: 10.1029/2010WR009437

- Hirschi, M., Seneviratne, S.I., Hagemann, S. and Schär, C. (2007). Analysis of seasonal terrestrial water storage variations in regional climate simulations over Europe. *Journal of Geophysical Research* 112: doi: 10.1029/2006JD008338
- IPCC (2007a). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- IPCC (2007b). *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (eds) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- IPCC (2012a). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.
- IPCC (2012b). *Model output described in the 2007 IPCC Fourth Assessment Report (SRES scenarios), multi-year means*. http://www.ipcc-data.org/cgi-bin/ddc_nav/dataset=ar4_gcm. Citato 12 giugno 2013
- ISPRA (2013). *Variazioni e tendenze degli estremi di temperatura e precipitazione in Italia*. Stato dell'Ambiente 37/2013, Roma. ISBN 978-88-448-0599-9
- Jin, F., Kitoh, A. and Alpert, P. (2011). Climatological relationships among the moisture budget components and rainfall amounts over the Mediterranean based on a super-high-resolution climate model. *Journal of Geophysical Research* 116: doi: 10.1029/2010JD014021
- Kelley, C., Ting, M., Seager, R. and Kushnir, Y. (2012). Mediterranean precipitation climatology, seasonal cycle, and trend as simulated by CMIP5. *Geophysical Research Letters* 39: doi: 10.1029/2012GL053416
- Lionello et al., (2009). *Eventi climatici estremi: tendenze attuali e clima futuro sull'Italia*, in: *I cambiamenti climatici in Italia: evidenze, vulnerabilità ed impatti*. Castellari, S. & Artale V. (editori) Bononia University Press
- López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Gimeno, L. and Nieto, R. (2009). Stability of the seasonal distribution of precipitation in the Mediterranean region: Observations since 1950 and projections for the 21st century. *Geophysical Research Letters* 36: doi: 10.1029/2009GL037956
- Moberg, A., Jones, P.D., Lister, D., Walther, A., Brunet, M., Jacobeit, J., Alexander, L.V., Della Marta, P.M., Luterbacher, J., Yiou, P., Chen, D., Klein Tank, A.M.G., Saladié, O., Sigró, J., Aguilar, E., Alexandersson, H., Almarza, C., Auer, I., Barriendos, M., Begert, M., Bergström, H., Böhm, R., Butler, C.J., Caesar, J., Drebs, A., Founda, D., Gerstengarbe, F., Micela, G., Maugeri, M., Österle, H., Pandzic, K., Petrakis, M., Srncic, L., Tolasz, R., Tuomenvirta, H., Werner, P.C., Linderholm, H., Philipp, A., Wanner, H. and Xoplaki, E. (2006). Indices for daily temperature and precipitation extremes in Europe analyzed for the period 1901-2000. *Journal of Geophysical Research* 111: doi: 10.1029/2006JD007103
- Pal, J.S., Giorgi, F. and Bi, X. (2004). Consistency of recent European summer precipitation trends and extremes with future regional climate projections. *Geophysical Research Letters* 31: doi: 10.1029/2004GL019836
- Philipp, A., Wanner, H. and Xoplaki, E. (2006). Indices for daily temperature and precipitation extremes in Europe analyzed for the period 1901-2000. *Journal of Geophysical Research* 111: doi: 10.1029/2006JD007103
- Schmidli, J., Goodess, C.M., Frei, C., Haylock, M.R., Hurrell, J.W., Ribalaygua, J. and Schmith, T. (2007). Statistical and dynamical downscaling of precipitation: An evaluation and comparison of scenarios for the European Alps. *Journal of Geophysical Research* 112: doi: 10.1029/2005JD007026
- Schultz, C. (2011). Slowly but steadily, a stormier Europe. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 92: doi: 10.1029/2011EO380011
- Sillmann, J. and Roeckner E. (2008): Indices for extreme events in projections of anthropogenic climate change. *Climatic Change*, 86(1-2), 83-104
- Tanarhte, M., Hadjinicolaou, P. and Lelieveld, J. (2012). Intercomparison of temperature and precipitation data sets based on observations in the Mediterranean and the Middle East. *Journal of Geophysical Research* 117: doi: 10.1029/2011JD017293
- Tapiador, F.J., Sánchez, E. and Gaertner, M.A. (2007). Regional changes in precipitation in Europe under an increased greenhouse emissions scenario. *Geophysical Research Letters* 34: doi: 10.1029/2006GL029035
- Vautard, R., Yiou, P., D'Andrea, F., de Noblet, N., Viovy, N., Cassou, C., Polcher, J., Ciais, P., Kageyama, M. and Fan, Y. (2007). Summertime European heat and drought waves induced by wintertime Mediterranean rainfall deficit. *Geophysical Research Letters* 34: doi: 10.1029/2006GL028001
- Zolina, O., Simmer, C., Gulev, S.K. and Kollet, S. (2010). Changing structure of European precipitation: Longer wet periods leading to more abundant rainfalls. *Geophysical Research Letters* 37: doi: 10.1029/2010GL042468
- Zveryaev, I.I. (2004). Seasonality in precipitation variability over Europe. *Journal of Geophysical Research* 109: doi: 10.1029/2003JD003668
- Zveryaev, I.I. and Allan, R.P. (2010). Summertime precipitation variability over Europe and its links to atmospheric dynamics and evaporation. *Journal of Geophysical Research* 115: doi: 10.1029/2008JD011213