

SCENARI DI CAMBIAMENTI CLIMATICI NEL PERIODO 2021-2050: QUALE DISPONIBILITÀ IDRICA NEL BACINO DEL FIUME PO?

Renata Vezzoli¹, Paola Mercogliano^{1,2,*}, Sergio Castellari^{3,4}

¹ Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, REgional Models and geo-Hydrological Impacts Division, Capua (CE).

² Centro Italiano Ricerche Aerospaziali, Meteo System & Instrumentation Laboratory, Capua (CE).

³ Istituto Nazionale di Geofisica e di Vulcanologia (INGV), Bologna

⁴ Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, Risk assessment and adaptation strategies Division, Bologna.

Sommario – Il clima degli ultimi decenni nel bacino del fiume Po è stato caratterizzato da cambiamenti sia nelle precipitazioni sia nelle temperature; le proiezioni climatiche effettuate mediante modelli climatici mostrano come su quest'area, in futuro, si debbano attendere un aumento delle temperature e una diminuzione delle precipitazioni, con l'eccezione dell'area Alpina in inverno. Anche gli eventi estremi, massimi di temperatura e della precipitazione, saranno più frequenti. Come conseguenza, la disponibilità idrica in estate è destinata a diminuire mentre la frequenza di eventi di piena ad aumentare, con potenziali ricadute sulle attività produttive e sulla popolazione insediata nel bacino del fiume Po. L'uso di una catena modellistica che include componenti climatiche/idrologiche e di bilancio permette di studiare la futura disponibilità idrica nel Po. Le proiezioni climatiche al periodo 2021-2050, per gli scenari IPCC RCP4.5 e RCP8.5, mostrano che, rispetto al periodo di controllo 1982-2011, le portate del fiume Po si ridurranno in estate con eventi di magra più frequenti e severi, mentre aumenteranno in inverno, coerentemente con le anomalie climatiche identificate per precipitazioni e temperature nel medesimo periodo. La metodologia applicata in questo studio è direttamente trasferibile ad altri bacini idrografici del nostro Paese al fine di prevenire il rischio di crisi idriche, promuovere la sicurezza idraulica e ridurre i potenziali impatti causati dalle future siccità sulla produzione energetica e sul settore agricolo.

Parole chiave: disponibilità idrica, fiume Po, cambiamenti climatici.

CLIMATE CHANGES SCENARIOS AT 2021-2050: HOW MUCH WATER WILL BE AVAILABLE IN PO RIVER BASIN?

Abstract – In the last decades the climate over Po river basin shows changes in precipitation and temperature and projections indicate that in future the area will experience a decrease of total precipitation, with the exception of the Alps in winter while the frequency of extreme precipitation events and temperature are expected to increase. All this, will result in a reduction of water availability in summer and an increasing of floods hazard that may significantly impact on activities and citizens located within Po river basin. Here, the question “what should we expect for future Po

river discharges?” is addressed through a numerical climate/hydrological/water balance modeling chain. The results provide an estimate of the climate change impacts on Po river discharges under the IPCC emission scenarios RCP4.5 and RCP8.5 for the period 2021-2050 with respect to the control period 1982-2011: projected discharges are expected to reduce in summers, thus droughts will be more likely to occur, while discharges will increase in winters, coherently with the precipitation and temperature anomalies obtained from the climate simulations. The methodology presented here can be applied to other Italian river basins to prevent the risk of water crisis, to promote hydraulic security and mitigate the potential impacts of future droughts to energy and agriculture sectors.

Keywords: water availability, Po River, climate changes.

Ricevuto il 13-9-2015; Correzioni richieste il 1-11-2015; Accettazione finale il 5-2-2016.

1. INTRODUZIONE

La Direttiva Europea 2000/60/CE (denominata “Direttiva Acque”) introduce l'obbligo di predisporre piani di gestione dei bacini idrografici per tutti i distretti idrografici (identificati nella Direttiva stessa) al fine di realizzare un adeguato stato ecologico e chimico delle acque e contribuire a mitigare gli effetti delle inondazioni e della siccità. La Direttiva Acque è stata recepita in Italia dal Decreto Legislativo 152/06 del 3 Aprile 2006, che ha istituito otto distretti idrografici (Alpi Orientali, Padano (coincidente con il bacino del fiume Po), Appennino Settentrionale, Serchio, Appennino Centrale, Appennino Meridionale, Sardegna e Sicilia), per ciascuno dei quali è richiesta la predisposizione di un piano di gestione. Tuttavia, la mitigazione del rischio alluvioni e siccità non è tra gli obiettivi principali di tale Direttiva, infatti, il tema della riduzione del rischio di alluvioni viene ripreso nella Direttiva Europea 2007/60/CE (denominata “Direttiva Piene”) recepita in Italia con il Decreto Legislativo n. 49 del 23 Febbraio 2010, che introduce la tematica degli impatti dei cambiamenti climatici sull'occorrenza e la severità di eventi alluvionali.

* Per contatti: via Maiorise snc, 81043 Capua (CE).
Tel. 0823.623337; Fax 0823.62312602. E-mail: p.mercogliano@cira.it.

Per quanto riguarda l'Italia, essendo situata nell'area Mediterranea, gli studi climatici mostrano una buona concordanza nel prospettare (a) una riduzione generalizzata della precipitazione media, con l'eccezione delle Alpi in inverno, (b) un aumento nella frequenza di eventi meteorici estremi, e (c) un incremento della temperatura media (Giorgi e Lionello, 2008; Coppola e Giorgi, 2010; Stocker et al., 2013). La combinazione di questi fattori climatici comporta un'accelerazione del ciclo idrologico, legata all'intensificarsi degli scambi suolo-atmosfera, che si manifesta, tra l'altro, in una maggiore variabilità delle portate fluviali e un incremento nella frequenza di eventi estremi quali piene e magre (Blenkinsop e Fowler, 2007; Garcia-Ruiz et al., 2011; Stocker et al., 2013). Per quanto riguarda il bacino del fiume Po, oltre ad essere il più esteso di Italia, è l'area in cui risiedono circa 17 milioni di persone, e dove si ha il 35% della produzione agricola e il 48% di quella industriale pari a circa il 40% del PIL italiano (Autorità di Bacino del Fiume Po, 2006) è, quindi, comprensibile come la vulnerabilità di quest'area ai cambiamenti climatici non abbia solo ripercussioni sull'ambiente, ma anche, sull'economia nazionale (Bozzola e Swanson, 2014; Castellari et al., 2014a). In particolare, alcuni studi hanno dimostrato come, tra le possibili conseguenze dei cambiamenti climatici su tale area, ci sia un anticipo di circa un mese negli eventi di piena a causa di un anticipo della fusione nivale per le temperature più elevate (Groppelli et al., 2011; Confortola et al., 2013; Coppola et al., 2014), e una riduzione delle precipitazioni in primavera e autunno comporta il prolungamento del periodo di magra (Coppola et al., 2014; Ravazzani et al., 2015; Vezzoli et al., 2015). In particolare, Coppola et al., (2014) e Ravazzani et al. (2015) studiano gli impatti, al 2050, dei cambiamenti climatici sulla portata del fiume Po alla sezione di S. Antonio Po, indicativamente localizzata al confine tra Piemonte e Lombardia. Entrambi gli studi riscontrano un incremento delle portate invernali dovuto alla riduzione dell'accumulo nivale e un anticipo di circa un mese nel verificarsi di eventi di piena primaverili a causa dell'incremento delle temperature che favorisce la fusione nivale; per quanto riguarda gli eventi di magra, i due studi evidenziano una riduzione delle precipitazioni autunnali che comporta il prolungarsi di tale condizione dall'estate all'autunno inoltrato. L'alterazione del ciclo di accumulo/fusione nivale è evidenziata nei lavori di Groppelli et al. (2011) e Confortola et al. (2013) sui fiumi lombardi Oglio e Serio rispettivamente, sempre per proiezioni al 2050.

In questa ottica, il presente studio descrive i risultati di una catena modellistica climatica/idrologica per il bacino del fiume Po (Vezzoli et al., 2015) confrontando tra la disponibilità idrica attesa nel trentennio 2021-2050 sotto gli scenari dell'IPCC RCP4.5 e RCP8.5 (Meinshausen et al., 2011) con la disponibilità nel periodo 1982-2011 al fine di valutare la capacità del bacino del fiume Po di soddisfare, in futuro, le medesime richieste idriche di oggi in assenza di variazioni nella richiesta idrica e nella gestione della risorsa stessa.

Lo scenario IPCC RCP4.5 è considerato come uno scenario intermedio dal punto di vista delle emissioni in atmosfera. Infatti, lo scenario prevede che, a seguito di iniziative di regolazione portate avanti a scala globale, le emissioni si stabilizzino entro il 2070, e di conseguenza, la forzante radiativa, a scala globale, cresca fino a stabilizzarsi al 2100 a 4.5 Wm^{-2} rispetto ai livelli pre-industriali. Sotto lo scenario IPCC RCP8.5 non si prevedono misure di mitigazione/riduzione delle emissioni nei prossimi decenni con un aumento fino a quattro volte delle concentrazioni atmosferiche di CO_2 e un aumento di circa 8.5 Wm^{-2} della forzante radiativa al 2100 rispetto ai livelli pre-industriali.

La catena modellistica, sviluppata dalla Divisione Remhi (Regional Models and geo-Hydrological Impacts) del Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (Cmcc) in collaborazione con il Servizio Idro-Meteo-Clima (Simc) di Arpa Emilia Romagna, include un modello di bilancio a scala di bacino che permette di tenere conto dei prelievi idrici e della regolazione degli invasi montani e fornisce, inoltre, indicazioni sulla sostenibilità futura delle attuali esigenze idriche, permettendo una prima valutazione di quali possano essere le future criticità nella gestione della risorsa acqua. Lo studio è articolato presentando nella Sezione 2 le principali caratteristiche climatiche/idrologiche dell'area di studio e la catena modellistica nonché i modelli che la compongono; i risultati principali vengono presentati e discussi nella Sezione 3, mentre le conclusioni sono riportate nella Sezione 4.

2. MATERIALI E METODI

2.1. Area di studio: il bacino del fiume Po

Il bacino del fiume Po è il più esteso d'Italia con una superficie di circa 70700 km^2 , alla chiusura in prossimità della località di Pontelagoscuro (FE) convenzionalmente presa come sezione di chiusu-

ra del fiume prima del tratto di Delta, a cui si aggiungono le aree costituenti il sottobacino di Burana-Po di Volano e il delta e circa 4000 km² in Svizzera e piccole porzioni in Francia.

Il reticolo idrografico principale, costituito dal Po e dai suoi affluenti principali, ha una lunghezza di circa 6750 km di cui il fiume Po rappresenta poco meno del 10% e si estende su sette regioni (Valle d'Aosta, Piemonte, Liguria, Lombardia, Emilia Romagna, Toscana, Veneto) e una provincia autonoma (Trento) (Segreteria tecnica dell'Autorità di Bacino del fiume Po, 2009).

Dal punto di vista climatico il bacino del Po è un'area complessa, come confermato dagli studi condotti dall'Autorità di Bacino che hanno identificato nel bacino sei climi diversi secondo la classificazione di Köppen-Geiger, tre di tipo mesotermico (climi "miti umidi") e tre di tipo microtermico (climi "delle foreste boreali") e dodici differenti regimi pluviometrici (Autorità di Bacino del fiume Po, 2006, Segreteria tecnica dell'Autorità di Bacino del fiume Po, 2009). Tale varietà climatica è dovuta alla complessità orografica del bacino del fiume Po, in cui le Alpi, proteggono la pianura padana dai venti freddi del Nord Europa, mentre gli Appennini, limitano l'azione mitigante del mar Tirreno.

In generale, a parità di latitudine, il versante adriatico è caratterizzato da un clima più freddo rispetto a quello tirrenico; la temperatura media annua varia tra i circa 5°C delle aree montane e i 10°C e 15°C della pianura.

Per quanto riguarda le precipitazioni, gli studi dell'Autorità di Bacino del fiume Po riportano, una precipitazione media annua sul bacino chiuso a Pontelagoscuro di circa 1200 mm, con la catena Alpina che riceve una precipitazione quasi tripla rispetto alla pianura; di questa precipitazione circa i 2/3 raggiungono il mar Adriatico mentre il rimanente 1/3 viene perso nei processi di percolazione e evapotraspirazione (Autorità di Bacino del fiume Po, 2006).

Studi recenti basati sulle osservazioni meteorologiche disponibili sul bacino del fiume Po mostrano un trend positivo nelle temperature con un incremento stimato in 0.5°C/decade dal 1960 ad oggi, in particolare in estate (Tibaldi et al., 2010), mentre per gli eventi di precipitazione si rileva una riduzione nel numero e un aumento nell'intensità, con una riduzione della precipitazione media di circa il 20% dal 1980, in particolare in primavera ed estate, mentre la precipitazione autunnale pur non variando in media mostra una maggior variabilità interannuale (Tibaldi et al., 2010).

Questi risultati concordano con altre analisi climatiche condotte sia a scala nazionale per il periodo 1865-2003 (Brunetti et al., 2006) che sul Nord Italia per gli anni 1961-2006 (Toreti et al., 2009) o a scala regionale in Piemonte e Valle d'Aosta dal 1952 al 2002 (Ciccarelli et al., 2008) oppure in Emilia Romagna sul periodo 1922-1995 per le precipitazioni estive (Tomozeiu et al., 2000) e sul periodo 1958-2000 per le temperature (Tomozeiu et al., 2006).

Il regime delle portate del fiume Po riflette la distribuzione delle precipitazioni sull'arco alpino con eventi di piena in primavera, alimentati sia dalle precipitazioni sia dalla fusione nivale, e in autunno, sostenuti dalle precipitazioni autunnali; ed eventi di magra in inverno, dovuti per lo più alla riduzione delle precipitazioni liquide a favore di quelle solide, e in estate, dovuti alla scarsità delle precipitazioni ed aggravati dai prelievi ad uso irriguo (Autorità di Bacino del fiume Po, 2006).

La portata media annua alla sezione di Pontelagoscuro è di circa 1470 m³ s⁻¹, con un massimo storico di 10300 m³ s⁻¹ in occasione della piena del 1951, e un minimo storico di circa 168 m³ s⁻¹ durante la magra del 2006 (Montanari, 2012). Negli ultimi decenni, si è registrata una progressiva riduzione della portata media collegabile alla combinazione di riduzione degli afflussi meteorici, incremento dell'evapotraspirazione legata all'aumento delle temperature, e all'aumento della domanda idrica; in particolare, per la sezione di Pontelagoscuro sul periodo 1975-2006 si è stimata una riduzione delle portate di circa il 20% su base annua e del 45% nella stagione estiva (Segreteria tecnica dell'Autorità di Bacino del Fiume Po, 2009; Tibaldi et al., 2010). Allo stesso tempo, l'incremento delle temperature sta comportando un'anticipazione di due/tre settimane della fusione nivale e, di conseguenza, nel manifestarsi degli eventi di piena (Zampieri et al., 2015).

2.2. La catena modellistica

Negli ultimi anni l'attenzione della comunità scientifica si è concentrata sugli impatti dei cambiamenti climatici su vari settori socio-economici, come l'agricoltura, le risorse idriche, le aree urbane e la salute umana. Tale passaggio è stato reso possibile sia dal miglioramento della modellistica climatica che dalla maggior potenza di calcolo disponibile. Infatti, è oggi possibile ottenere proiezioni climatiche con risoluzioni temporali e spaziali compatibili per l'uso con la modellistica idrologica. La struttura della catena modellistica impiegata per la stima degli impatti dei cambiamenti climatici

sulla disponibilità idrica nel bacino del fiume Po è sintetizzata in Figura 1. La catena modellistica include due scenari di possibili futuri sviluppi socio-economici IPCC: RCP4.5 e RCP8.5 (Meinshausen et al., 2011), il modello climatico globale (GCM) CMCC-CM (Scoccimarro et al., 2011; Gualdi et al., 2013), il modello climatico regionale COSMO-CLM (Rockel et al., 2008) nella configurazione ottimizzata per l'Italia (Montesarchio et al. 2014; Bucchignani et al. 2015), la tecnica di rimozione del bias Quantile Mapping (Zollo et al., 2015), il modello idrologico fisicamente basato e spazialmente distribuito TOPKAPI (Liu e Todini, 2002) e il modello di bilancio a scala di bacino RIBASIM (Delft Hydraulics, 2006) che permette di considerare la pressione antropica sul bacino.

Il GCM CMCC-CM utilizza gli scenari IPCC come condizioni iniziali e al contorno per risolvere le equazioni dell'atmosfera su una griglia con risoluzione orizzontale di circa 80 km su cui si innesta il modello non idrostatico COSMO-CLM che restituisce le variabili climatiche con una risoluzione orizzontale di circa 8 km e una risoluzione temporale giornaliera idonea per simulazioni di interesse idrologico. Tuttavia, i valori simulati dalla catena climatica sul bacino del Po evidenziano la presenza di una sovrastima delle precipitazioni invernali e una sottostima della temperatura media dell'aria a 2 metri sul livello del suolo (Montesarchio et al., 2014) generalmente dovuti alla parametrizzazione, alle semplificazioni e alle ipotesi di ciascun modello cli-

matico. Entrambi i bias vanno rimossi prima di procedere alla simulazione degli impatti sul ciclo idrologico (Teutschbein e Seibert, 2010). Esistono diverse tecniche di rimozione del bias, tuttavia la tecnica di Quantile Mapping che corregge l'intera distribuzione di probabilità fornisce i risultati migliori in termini di valori assoluti e correlazioni spaziotemporali (Teutschbein e Seibert 2010, 2012; Lafon et al., 2013; Zollo et al., 2015). Sotto l'ipotesi che il bias sia sistematico la correzione viene applicata anche ai valori simulati nel futuro. Sebbene, in teoria, sia possibile applicare il medesimo approccio anche ad altre variabili climatiche che regolano gli scambi tra suolo e atmosfera, si è scelto di correggere solo le due principali (Vrac et al., 2012) che vengono utilizzate come input per modellistica idrologica (TOPKAPI) oltre alla caratterizzazione del suolo in termini di elevazione, tipo, e uso.

Il modello idrologico fornisce il deflusso superficiale e le portate medie giornaliere in ognuna delle sezioni in cui si interfaccia con il modello di bilancio (RIBASIM) che schematizza il reticolo idrografico come archi e nodi omogenei. Ogni nodo può rappresentare una o più derivazioni (che aggregano tutte le derivazioni del tratto, suddivisibili per ciascun utilizzo), un punto di interazione con la falda o un serbatoio naturale (lago) o artificiale ad uso idroelettrico, irriguo o idropotabile, mentre gli archi rappresentano le connessioni tra i diversi nodi. I rilasci dai serbatoi naturali o artificiali, così come i prelievi da falda e dai corsi d'acqua per soddisfare la domanda idrica lungo l'asta fluviale, sono esplicitamente simulati secondo regole basate sui rilasci/prelievi osservati. Il modello di bilancio ripartisce l'acqua disponibile in funzione della disponibilità e della richiesta nei vari nodi, fornendo così la stima della portata media giornaliera disponibile. La catena modellistica TOPKAPI/RIBASIM è attualmente impiegata dal Simc di Arpa Emilia Romagna per il monitoraggio e la previsione di eventi di magra fluviale. Tutte le simulazioni sono condotte ipotizzando che il fabbisogno idrico da soddisfare nel futuro non vari rispetto a quello presente (1982-2011 assunto come periodo di controllo della simulazione), pertanto, eventuali variazioni nelle statistiche della portata sono da imputare agli scenari di cambiamento climatico. Le simulazioni condotte con la catena modellistica coprono il periodo 1981-2100, tuttavia il primo anno di simulazioni non viene considerato in quanto fortemente condizionato dalle condizioni iniziali della modellistica, per questo motivo si è scelto di utilizzare come periodo di controllo l'arco temporale 1982-2011. La validazione

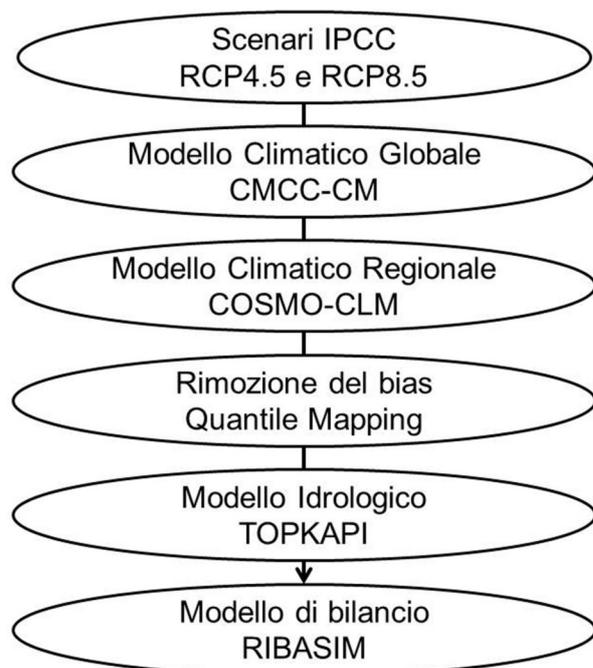


Figura 1 – Struttura della catena modellistica

dell'intera catena modellistica su tale periodo stima che la portata media simulata è inferiore dell'8% a quella osservata nel medesimo periodo alla sezione di Pontelagoscuro (Vezzoli et al., 2015).

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

In questa Sezione vengono presentati i risultati delle simulazioni condotte attraverso la catena modellistica descritta nella Sezione 2, in termini di precipitazione, temperatura dell'aria a 2 metri sul livello del suolo e portata giornaliera del fiume Po. L'uso di due scenari IPCC differenti, RCP4.5 e RCP8.5, consente di fornire un'indicazione dell'incertezza delle stime ottenute. In particolare, si riportano le anomalie stagionali per la precipitazione e la temperatura media dell'aria a 2 metri sul livello del suolo (Figura 2) ed anche l'anomalia mensile delle portate a Pontelagoscuro (Figura 3) come rappresentativa della risposta complessiva del bacino al clima e alla pressione antropica. Per quanto riguarda la precipitazione e le portate, l'anomalia viene calcolata come scarto percentuale tra la simulazione nel futuro (2021-2050) e nel periodo di controllo (1982-2011), mentre per la temperatura media dell'aria a 2 metri sul livello del suolo, l'anomalia è definita come differenza (in °C) tra il valore nel futuro e nel periodo di controllo. Le stagioni sono così definite: inverno, Dicembre-Gennaio-Febbraio; primavera, Marzo-Aprile-Maggio; estate, Giugno-Luglio-Agosto; autunno, Settembre-Ottobre-Novembre. Per quanto riguarda le precipitazioni, Figura 2 mette in evidenza come l'anomalia sia distribuita in modo abbastanza omogeneo sull'intero bacino, con

l'eccezione dell'inverno (primavera) sotto lo scenario IPCC RCP4.5 (RCP8.5) in cui si evidenziano due aree con comportamento tra loro opposto. In generale, lo scenario IPCC RCP4.5 proietta una riduzione (circa 8%) della precipitazione media, mentre sotto lo scenario IPCC RCP8.5 la precipitazione media annuale è invariata rispetto al periodo di controllo. A scala stagionale, la simulazione RCP4.5 proietta una riduzione della precipitazione in primavera (-10%) e estate (-21%) e una variazione quasi nulla in autunno ed inverno. Tuttavia, in inverno si evidenzia una diversa ripartizione delle precipitazioni rispetto al periodo di controllo: in aumento dell'ultimo tratto dell'asta fluviale e in diminuzione sui rilievi. Al contrario, la simulazione RCP8.5 proietta un incremento nella precipitazione invernale (11%) ed autunnale (8%), una diminuzione (-14%) in estate, mentre in primavera è complessivamente stabile (-2%) con un aumento degli afflussi sull'arco alpino piemontese e una diminuzione delle precipitazioni in Liguria ed Emilia Romagna. Per le temperature entrambi gli scenari sono caratterizzati da anomalie positive: 1.1°C per lo scenario IPCC RCP4.5 e 1.3°C per lo scenario IPCC RCP8.5, maggiormente marcate sulla parte di pianura. Lo scenario IPCC RCP4.5 colloca la minima anomalia in inverno (0.67°C) e la massima in estate (1.4°C), mentre lo scenario IPCC RCP8.5 mostra la massima anomalia in inverno (1.4°C) e la minima (1.2°C) in autunno. Il verificarsi della massima anomalia in inverno, per lo scenario IPCC RCP8.5, e in estate, per lo scenario IPCC RCP4.5, è coerente con il segno dell'anomalia di precipitazione in quelle stagioni, infatti, in generale, in presenza

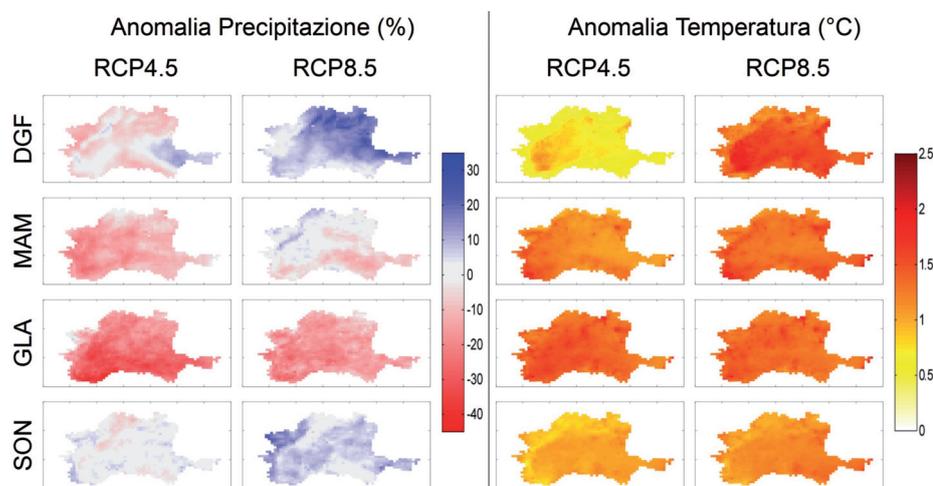


Figura 2 – Anomalia climatica stagionale per la precipitazione (colonna 1 e 2, in %) e per la temperatura media dell'aria a 2 metri (colonna 3 e 4, in °C) per il periodo 2021-2050 rispetto al periodo di controllo 1982-2011, sul bacino del Po, per gli scenari IPCC RCP4.5 (colonna 1 e 3) e RCP8.5 (colonna 2 e 4)

di precipitazioni la temperatura media invernale è più elevata, mentre, in estate, accade il contrario: in assenza di precipitazioni la temperatura sale.

L'andamento dell'anomalia delle portate medie mensili del fiume Po (Figura 3, pannello superiore) è influenzato dalla variazione delle precipitazioni e delle temperature. La portata invernale mostra un'anomalia positiva in entrambe le simulazioni del 2% con lo scenario IPCC RCP4.5 e del 15% per lo scenario IPCC RCP8.5, dovuta all'aumento della temperatura che riduce la precipitazione che si accumula nel bacino sotto forma di neve che, per lo scenario IPCC RCP8.5 all'incremento delle precipitazioni. In particolare, entrambe le simulazioni vedono l'anomalia crescere tra Dicembre e Gennaio e diminuire tra Gennaio e Febbraio, con la differenza che sotto lo scenario IPCC RCP8.5 l'anomalia è sempre positiva mentre sotto lo scenario IPCC RCP4.5 si ha una riduzione delle portate (anomalia negativa) in Febbraio, mese in cui le precipitazioni medie della simulazione RCP4.5 sono, di poco, inferiori a quelle del periodo di controllo. In primavera, le portate simulate mostrano un andamento parallelo, ma la simulazione RCP4.5 vede una riduzione complessiva dell'11% mentre la simulazione RCP8.5 porge un'anomalia positiva del 6% circa, coerentemente con l'anomalia riscontrata nelle precipitazioni stagionali.

In estate, la diminuzione della precipitazione combinata con l'incremento della temperatura e la ridotta fusione nivale a causa del mancato accumulo invernale, comporta una riduzione della portata fluviale. Inoltre, al diminuire delle precipitazioni aumenta la quota della richiesta idrica a uso irriguo che viene soddisfatta mediante prelievi da falda e dai corsi d'acqua, una parte dei prelievi dai corsi d'acqua può venire compensata aumentando i rilasci dai laghi e/o dai serbatoi artificiali, ma, complessivamente, la portata fluviale diminuisce. Nel complesso, per la simulazione RCP4.5 la riduzione media nelle portate estive è circa il 29% costante nei tre mesi, mentre, per la simulazione RCP8.5 è limitata al 17% e i mesi più gravosi sono Luglio e Agosto, in cui la riduzione si assesta attorno al 22-25%. Per quanto riguarda l'autunno, per entrambe le simulazioni, le portate sono inferiori a quelle nel periodo di controllo nei primi due mesi, mentre nel terzo sono superiori. L'anomalia negativa delle portate a Settembre è legata alle ridotte precipitazioni in quel mese, inoltre, il suolo arrivando inaridito dalla stagione estiva trattiene maggiormente le precipitazioni autunnali riducendo il deflusso superficiale fino a quando, in Novembre, le portate tornano a crescere (2% RCP4.5 e 8% RCP8.5).

La variazione nelle portate qui illustrata è in linea con i risultati di Coppola et al. (2014) e Ravazzani et al. (2015) alla sezione S. Antonio Po.

Come evidenziato dall'analisi dell'anomalia delle portate, i cambiamenti climatici comportano variazioni sia nella quantità di acqua disponibile che nella sua distribuzione temporale e, poiché, l'eccesso e il deficit idrico sono tra le maggiori problematiche da affrontare nella gestione della risorsa idrica, si è analizzata la ripartizione temporale e i volumi associati alle portate superiori a Q_7 o inferiori a Q_{300} . Le portate Q_7 e Q_{300} , entrambe in $m^3 s^{-1}$, rappresentano le portate superate, in media, per 7 e 300 giorni l'anno, rispettivamente. Tali portate, stimate dalla curva di durata delle portate nel periodo di controllo, sono state assunte come soglie di riferimento per identificare eventi di piena e magra fluviale, ciò permette il confronto diretto della severità degli eventi tra il periodo di controllo e quello di proiezione. I risultati sono sintetizzati nel pannello centrale ($Q > Q_7$) e inferiore ($Q < Q_{300}$) di Figura 3.

I volumi in eccesso (V_E in m^3) stimati per la condizione $Q > Q_7$ sono considerati indicativi della distribuzione temporale e della severità degli eventi di piena sotto l'ipotesi di cambiamenti climatici mentre i deficit volumetrici (V_D in m^3) associati alla condizione $Q < Q_{300}$ sono rappresentativi degli eventi di magra e della loro severità.

Il volume in eccesso nel generico mese i (con $i = 1, 2, \dots, 12$) è definito come la somma dei volumi in eccesso in ciascun giorno j del mese i :

$$V_{E,i} = \sum \begin{cases} 86400 \times (Q(j) - Q_7) & \text{se } Q(j) > Q_7 \\ 0 & \text{se } Q(j) \leq Q_7 \end{cases} \quad (1)$$

In maniera analoga, il deficit volumetrico nel generico mese i è definito come la somma dei volumi mancanti in ciascun giorno j del mese i :

$$V_{D,i} = \sum \begin{cases} 86400 \times (Q_{300} - Q(j)) & \text{se } Q(j) < Q_{300} \\ 0 & \text{se } Q(j) \geq Q_{300} \end{cases} \quad (2)$$

In entrambi i casi, l'indice j varia tra 1 e 28 (29 per gli anni bisestili) a Febbraio, tra 1 e 30 per i mesi di Aprile, Giugno, Settembre e Novembre e tra 1 e 31 per i mesi di Gennaio, Marzo, Maggio, Luglio, Agosto, Ottobre e Dicembre. Nei pannelli centrale e inferiore di Figura 3 sono rappresentati i valori medi su 30 anni dei volumi mensili stimati con le equazioni (1) e (2).

Per quanto riguarda gli eventi di piena ($Q > Q_7$), pannello centrale di Figura 3, nel periodo di controllo sono distribuiti tra i mesi di Ottobre e Novembre, mentre, nel futuro l'eccesso volumetrico viene simulato solo nel mese di Novembre; per questo me-

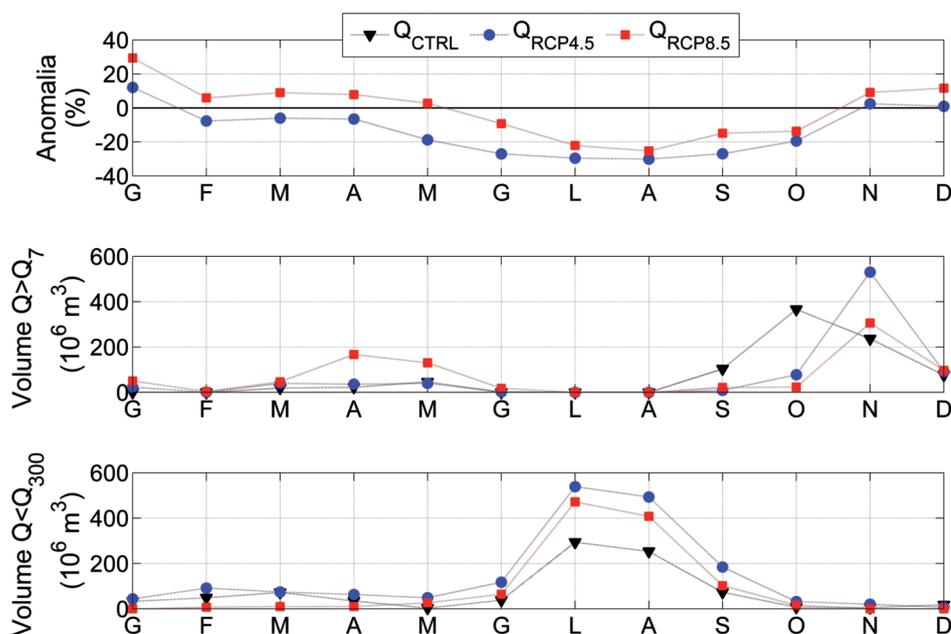


Figura 3 – In alto. Anomalia mensile della portata nel 2021-2050 rispetto al periodo di controllo 1982-2011 per le simulazioni sotto gli scenari IPCC RCP4.5 e RCP8.5. Al centro. Per ciascun mese, eccesso di volume relativo alle sole portate giornaliere superiori a Q_7 . In basso. Per ciascun mese, deficit volumetrico relativo alle sole portate inferiori a Q_{300} . Entrambe le soglie Q_7 e Q_{300} sono stimate sulla curva di durata delle portate nel periodo di controllo. I dati relativi al periodo di controllo sono in nero, quelli relativi le simulazioni RCP4.5 e RCP8.5 sono, rispettivamente, in blu e rosso

se lo scenario RCP8.5 proietta volumi paragonabili alle stime nel periodo di controllo mentre la simulazione RCP4.5 porge un valore quasi doppio. Il volume degli eventi primaverili è nettamente inferiore a quello degli eventi autunnali/invernali, in particolare la simulazione RCP4.5 non mostra particolari differenze rispetto al periodo di controllo mentre la simulazione RCP8.5 proietta un incremento nei volumi nei mesi di Aprile e Maggio.

Per quanto riguarda i deficit volumetrici, pannello in basso di Figura 3, sono significativi quelli estivi in cui la portata persiste per diversi giorni al di sotto della soglia Q_{300} mentre sono trascurabili quelli negli altri mesi in cui la portata scende sotto tale soglia solo occasionalmente. I deficit volumetrici estivi sono legati alla combinazione di (1) ridotta precipitazione, (2) possibile incremento dell'evapotraspirazione dovuto alle temperature più elevate ma limitato dalla disponibilità di contenuto idrico nel suolo, e (3) maggiori prelievi idrici per soddisfare i fabbisogni irrigui assunti pari a quelli attuali.

Per questa grandezza si vede come i deficit più significativi sono localizzati nel periodo Luglio-Settembre con stime sul periodo 2021-2050 quasi doppie rispetto al 1982-2011. Si noti che la stima del deficit volumetrico non tiene conto della capacità di compensazione del fiume nel corso del mese, ovvero del fatto che la portata potrebbe oscillare

sopra e sotto la soglia Q_{300} nel corso del mese e di conseguenza il volume mancante complessivamente essere inferiore a quello calcolato con equazione (2). Ad esempio, la portata media mensile in estate nel periodo 1982-2011 è sempre superiore alla Q_{300} , quindi, nella realtà, l'effetto dei giorni di magra sul fabbisogno idrico è, parzialmente, mitigato dai giorni in cui la portata è sopra la Q_{300} . Il medesimo confronto tra portate medie mensili e la soglia Q_{300} per il periodo 2021-2050 dipinge un quadro diverso poichè la portata media nei mesi di Luglio e Agosto risulta inferiore alla soglia indicando come, nel futuro, il fabbisogno idrico attuale non possa essere soddisfatto neppure attraverso una modulazione a scala mensile delle portate.

4. CONCLUSIONI

Per quanto affetti dall'incertezza della catena modellistica, i risultati qui presentati, relativi agli scenari IPCC RCP4.5 e RCP8.5, forniscono delle prime indicazioni utili per la pianificazione e la gestione della risorsa idrica nel bacino del Po nei prossimi anni, di sicuro interesse per gli amministratori regionali e locali.

L'analisi dell'occorrenza delle portate $Q > Q_7$ permette di identificare quali mesi/stagioni potrebbero essere, in futuro, maggiormente soggetti ad

eventi di piena. In generale, i risultati mostrano che, in autunno, le portate del fiume Po più elevate ($Q > Q_7$), tenderanno a concentrarsi nel mese Novembre invece di distribuirsi tra i mesi di Ottobre e Novembre, mentre nei mesi primaverili si evidenzia, sotto lo scenario IPCC RCP8.5, un incremento sensibile nei volumi ad esse associati in virtù dell'anomalia positiva nelle precipitazioni tra Settembre e Marzo. La simulazione RCP4.5 proietta aumenti di volume, rispetto al periodo di controllo, più contenuti che sono compatibili con la ridotta anomalia nelle precipitazioni invernali. Tuttavia, poiché nelle simulazioni non si fa uso di un modello idraulico per la propagazione delle portate in alveo, non sarebbe corretto cercare di estrarre informazioni sulla frequenza e severità degli eventi di piena da queste simulazioni. Ulteriori simulazioni effettuate con una maggiore risoluzione temporale e/o spaziale e con un modello idraulico potrebbero fornire indicazioni più di dettaglio ad supporto di attività di pianificazione di infrastrutture quali argini, casse di espansione e/o dighe.

Per quanto riguarda gli eventi di magra, il modello di bilancio è adeguato per caratterizzarli: in questo caso, i risultati mostrano come nelle prossime primavere ed estati possa diventare difficile soddisfare la richiesta idrica sul bacino del Po se questa resta invariata. In particolare, la riduzione della portata media giornaliera nei mesi estivi al di sotto della soglia di magra, pare indicare che in tali mesi la condizione di deficit idrico diventerà la norma invece che l'eccezione, con le proiezioni dello scenario IPCC RCP4.5 più gravose rispetto allo scenario IPCC RCP8.5. Da questo punto di vista, le magre si pongono come una sfida di non facile soluzione da affrontarsi con un'azione condivisa di tutte le parti interessate per identificare le esigenze idriche da garantire (e.g. il deflusso minimo vitale, la produzione idro-elettrica) e da ridurre (e.g. miglioramento dell'efficienza di irrigazione) e il modo migliore per ottenere tale risultato.

4.1. Considerazioni per i portatori di interesse nel bacino del fiume Po

Il bacino del fiume Po, come il presente studio ha mostrato, subirà nei prossimi decenni impatti provocati dai cambiamenti climatici, come la variazione della disponibilità idrica media annuale e la maggiore frequenza ed intensità degli eventi meteorici estremi, che sommandosi alla trasformazione socio-economica in corso potranno provocare una tendenza di eccessivo, e comunque non sosten-

nibile sfruttamento delle risorse naturali, quali acqua e suolo. In particolare, si configura il rischio futuro che la variazione dei deflussi idrici del fiume Po potranno essere compensabili solo parzialmente dalle opere idrauliche di regolazione artificiale esistenti. Questa tendenza è confermata dall'analisi delle serie storiche nel bacino. Quindi, un'azione coordinata di adattamento climatico tra i diversi livelli di governance del territorio (nazionale, regionale e locale) si rende necessaria da attuare nel bacino del fiume Po al fine da prevenire le crisi idriche, promuovere la sicurezza idraulica e ridurre i potenziali impatti causati dalle future siccità sulla produzione energetica e sul settore agricolo. Inoltre le possibili alterazioni del regime idrologico potrebbero indurre rischi aggravati (alluvioni, frane, etc.) anche alle aree urbane e produttive, alle infrastrutture essenziali di trasporto e di mobilità, di distribuzione dell'energia elettrica, delle telecomunicazioni e dell'acqua.

Il nostro Paese, con il coordinamento istituzionale del Ministero dell'Ambiente della Tutela del Territorio e del Mare, si è recentemente dotato di una Strategia Nazionale di Adattamento ai cambiamenti climatici (SNAC, <http://www.minambiente.it/comunicati/ambiente-degani-ok-conferenza-unificata-strategia-adattamento-clima-e-grande-risultato>) che è stata elaborata dalla comunità scientifica nazionale, coordinata dal Cmcc, con il supporto dei portatori di interesse. Tale strategia include una proposta di azioni di adattamento prioritaria a livello di distretto idrografico del Po, quale dimensione fisico-istituzionale più adeguata per la difesa del suolo e la gestione delle acque. Purtroppo la governance di tutela e pianificazione delle risorse idriche nel bacino del fiume Po presenta un tale livello di complessità gestionale che può costituire un ostacolo ad una efficace azione di adattamento (Castellari et al., 2014b).

5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Autorità di Bacino del fiume Po (2006) Caratteristiche del bacino del fiume Po e primo esame dell'impatto ambientale delle attività umane sulle risorse idriche. Parma: Autorità di bacino del fiume Po.
- Blenkinsop S. e Fowler J.H. (2007) Changes in European drought characteristics projected by the PRUDENCE regional climate models. *International Journal of Climatology* 27: 1595-1610.
- Bozzola M. e Swanson T. (2014) Policy implications of climate variability on agriculture: Water management in the Po river basin, Italy. *Environmental Science & Policy* 43: 26-38.
- Brunetti M., Maugeri M., Monti F. et al. (2006) Temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenised instrumental time series. *International Journal Of Climatology* 26: 345-381.

- Bucchignani E., Montesarchio M., Zollo A.L. et al. (2015) High-resolution climate simulations with COSMO-CLM over Italy: performance evaluation and climate projections for the 21st century. *International Journal of Climatology* (consultato il 02 Settembre 2015).
- Castellari S., Venturini S., Ballarin Denti A. et al. (a cura di) (2014a) Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità ed adattamento ai cambiamenti climatici in Italia. Roma: Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.
- Castellari S., Venturini S., Giordano F. et al. (2014b), Elementi per una Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici. Roma: Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.
- Ciccarelli N., Von Hardenberg J., Provenzale A. et al. (2008) Climate variability in north-western Italy during the second half of the 20th century. *Global and Planetary Change* 63(2-3): 185-195.
- Confortola G., Soncini A. e Bocchiola D. (2013) Climate change will affect hydrological regimes in the Alps. A case study in Italy. *Journal of Alpine Research* 101(3).
- Coppola E., Verdecchia M., Giorgi F. et al. (2014) Changing hydrological conditions in the Po basin under global warming. *Science of The Total Environment* 493: 1183-1196.
- Delft Hydraulics (2006) RIBASIM River basin planning and management simulation program. In: Proceedings of the iEMSs Third Biennial Meeting: "Summit on Environmental Modelling and Software". Burlington, USA: International Environmental Modelling and Software Society.
- García-Ruiz J.M., López-Moreno J.I., Vicente-Serrano S.M. et al. (2011) Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Reviews* 105(3-4): 121-139.
- Giorgi F. e Lionello P. (2008) Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change* 63(2-3): 90-104.
- Groppelli B., Soncini A., Bocchiola D. et al. (2011) Evaluation of future hydrological cycle under climate change scenarios in a mesoscale Alpine watershed of Italy. *Natural Hazard Earth System Science*: 11: 1769-1785.
- Gualdi S., Somot S., Li L. et al. (2013) The CIRCE simulations: regional climate change projections with realistic representation of the Mediterranean Sea. *Bulletin of American Meteorological Society*: 94(1): 65-81.
- Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K. et al. (a cura di) (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Lafon T., Dadson S., Buys G. et al. (2013) Bias correction of daily precipitation simulated by a regional climate model: a comparison of methods. *International Journal of Climatology* 33(6): 1367-1381.
- Liu Z. e Todini E. (2002) Towards a comprehensive physically-based rainfall-runoff model. *Hydrology and Earth System Sciences* 6 (5): 859-881.
- Meinshausen M., Smith S.J., Calvin K. et al. (2011) The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change* 109(1-2): 213-241.
- Montesarchio M., Zollo A.L., Bucchignani E. et al. (2014) Performance evaluation of high-resolution regional climate simulations in the Alpine space and analysis of extreme events. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(6): 3222-3237.
- Ravazzani G., Barbero S., Saladin A. et al. (2015) An integrated hydrological model for assessing climate change impacts on water resources of the Upper Po River basin. *Water Resources Management*, 29(4): 1193-1215.
- Rockel B., Will A. e Hense A. (2008) The regional climate model COSMO-CLM (CCLM). *Meteorologische Zeitschrift* 17 (4): 347-348.
- Scoccimarro E., Gualdi S., Bellucci A. et al. (2011), Effects of tropical cyclones on ocean heat transport in a high resolution coupled General Circulation Model. *Journal of Climate*, 24: 4368-4384.
- Segreteria tecnica dell'Autorità di bacino del fiume Po (2009) Il territorio del fiume Po L'evoluzione della pianificazione lo stato delle risorse e gli scenari di riferimento. Parma: Edizioni Diabasis.
- Teutschbein C. e Seibert J. (2010) Regional climate models for hydrological impact studies at the catchment scale: a review of recent modeling strategies. *Geography Compass* 4(7): 834-860.
- Teutschbein C. e Seibert J. (2012) Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology* 456-457: 12-29.
- Tibaldi S., Cacciamani C. e Pecora S. (2010) Il Po nel clima che cambia. *Biologia Ambientale* 24(1): 21-28.
- Tomozeiu R., Busuioc A., Marletto V. et al. (2000) Detection of changes in the summer precipitation time series of the region Emilia-Romagna, Italy. *Theoretical and Applied Climatology* 67: 193-200.
- Tomozeiu R., Pavan V., Cacciamani C. et al. (2006) Observed temperature changes in Emilia-Romagna: mean values and extremes. *Climate Research*, 31: 217-225.
- Toreti A., Fioravanti G., Perconti W. et al. (2009) Annual and seasonal precipitation over Italy from 1961 to 2006. *International Journal of Climatology*, 29(13): 1976-1987.
- Vezzoli R., Mercogliano P., Pecora S. et al. (2015) Hydrological simulation of Po River (North Italy) discharge under climate change scenarios using the RCM COSMO-CLM. *Science of the Total Environment*, 521-522: 346-358.
- Vrac M., Drobinski P., Merlo A. et al. (2012) Dynamical and statistical downscaling of the French Mediterranean climate: uncertainty assessment. *Natural Hazards and Earth System Science* 12: 2769-2784.
- Zampieri M., Scoccimarro E., Gualdi S. et al. (2015) Observed shift towards earlier spring discharge in the main Alpine rivers. *Science of The Total Environment* 503-504: 222-232.
- Zollo A.L., Turco M. e Mercogliano P. (2015), Assessment of hybrid downscaling techniques for precipitation over the Po River basin. In *Engineering Geology for Society and Territory*, 1, Switzerland: Springer International Publishing.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano il Dr. Carlo Cacciamani, il Dr. Silvano Pecora e il personale dell'Area Idrologia del Servizio Idro-Meteo-Clima di Arpa Emilia Romagna per aver messo a disposizione la modellistica idrologica e di bilancio del bacino del fiume Po, per il tempo e le risorse dedicate alle simulazioni e per i continui e proficui scambi di conoscenze che hanno contribuito ai risultati qui presentati.



INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2016 è sostenuta da:

