

Analisi del Rischio

I cambiamenti climatici in Italia



Analisi del Rischio

I cambiamenti climatici in Italia

Citazione raccomandata: Spano D., Mereu V., Bacciu V., Marras S., Trabucco A., Adinolfi M., Barbato G., Bosello F., Breil M., Chiriaco M. V., Coppini G., Essenfelder A., Galluccio G., Lovato T., Marzi S., Masina S., Mercogliano P., Mysiak J., Noce S., Pal J., Reder A., Rianna G., Rizzo A., Santini M., Sini E., Staccione A., Villani V., Zavatarelli M., 2020. *"Analisi del rischio. I cambiamenti climatici in Italia"*. DOI: 10.25424/CMCC/ANALISI_DEL_RISCHIO

ISBN 978-88-97666-15-8

© Fondazione CMCC - Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici 2020



Salvo diversa indicazione, tutti i contenuti pubblicati in quest'opera sono soggetti alla licenza Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

È dunque possibile riprodurre, distribuire, trasmettere e adattare liberamente dati e analisi che vi sono contenuti a condizione che venga citata adeguatamente la fonte.

Immagini, loghi (compreso il logo della Fondazione CMCC), marchi registrati e altri contenuti di proprietà di terzi appartengono ai rispettivi proprietari e non possono essere riprodotti senza il loro consenso.



La Fondazione CMCC Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici è un ente di ricerca no-profit la cui mission è realizzare studi e modelli del sistema climatico e delle sue interazioni con la società e con l'ambiente, per garantire risultati affidabili, tempestivi e rigorosi al fine di stimolare una crescita sostenibile, proteggere l'ambiente e sviluppare, nel contesto dei cambiamenti climatici, politiche di adattamento e mitigazione fondate su conoscenze scientifiche.

All'organizzazione di ricerca della Fondazione CMCC partecipano istituzioni che collaborano nelle attività multidisciplinari di studio e di indagine di temi inerenti le scienze dei cambiamenti climatici. Il CMCC si avvale della vasta esperienza nel campo della ricerca dei sette soci della Fondazione: Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV); Università del Salento; Centro Italiano di Ricerche Aerospaziali (CIRA S.c.p.a.); Università Ca' Foscari Venezia; Università della Tuscia; Università di Sassari; Politecnico di Milano, Università di Bologna, RFF - Resources for the Future.

Le attività scientifiche della Fondazione CMCC sono distribuite su nove divisioni di ricerca che condividono tra loro diverse competenze e conoscenze nel campo delle scienze del clima: Advanced Scientific Computing; Climate Simulations and Predictions; Economic analysis of Climate Impacts and Policy; Impacts on Agriculture, Forests and Ecosystem Services; Ocean modeling and Data Assimilation; Ocean Predictions and Applications; Risk Assessment and Adaptation Strategies; Regional Models and Hydrogeological Impacts; Sustainable Earth Modelling Economics.

Con sede a Lecce presso il campus Ecotekne, il Centro di Supercalcolo della Fondazione CMCC fornisce l'infrastruttura tecnologica e la capacità di calcolo necessaria a sviluppare simulazioni e modelli climatici altamente accurati, dettagliati e con un sempre maggiore livello di definizione. L'infrastruttura del CMCC si conferma una delle più importanti in Europa e l'unica in Italia ad essere dedicata esclusivamente allo studio dei cambiamenti climatici.

Analisi del rischio. I cambiamenti climatici in Italia

*Gli autori**

Rapporto a cura di: Donatella Spano^a e Valentina Mereu

Comitato scientifico: Donatella Spano^a, Valentina Mereu, Valentina Bacciu, Serena Marras^a, Antonio Trabucco

1. ANALISI DEGLI SCENARI CLIMATICI ATTESI PER L'ITALIA

Paola Mercogliano, Marianna Adinolfi, Giuliana Barbato, Angela Rizzo, Veronica Villani

Aree marino/costiere

Simona Masina, Giovanni Coppini, Tomas Lovato e Marco Zavatarelli^b

2. IL RISCHIO AGGREGATO PER L'ITALIA

Jaroslav Mysiak^c, Sepehr Marzi^c, Jeremy Pal^c, Arthur Essenfelder^c

3. ANALISI DEL RISCHIO ATTESO PER L'ITALIA: SETTORI CHIAVE

Ambiente urbano

Francesco Bosello^{c,d,e}, Serena Marras^a, Margaretha Breil^{c,d,e}, Paola Mercogliano, Alfredo Reder

Rischio geo-idrologico

Paola Mercogliano, Guido Rianna

Risorse idriche

Jaroslav Mysiak^c, Andrea Staccione^c, Silvia Torresan^c, Antonio Trabucco

Agricoltura

Valentina Mereu, Antonio Trabucco, Maria Vincenza Chiriaco

Incendi boschivi

Valentina Bacciu, Monia Santini, Sergio Noce

4. COSTI, STRUMENTI E RISORSE

Spunti per una valutazione economica degli impatti

Francesco Bosello^{c,d,e}

Programmi di adattamento ai cambiamenti climatici Risorse finanziarie per l'adattamento

Giulia Galluccio, Eugenio Sini

5. INIZIATIVE DI ADATTAMENTO

Serena Marras^a, Valentina Bacciu, Valentina Mereu

Revisione e cura editoriale

Mauro Buonocore

Progetto grafico

Lorenzo Tarricone, Renato Dalla Venezia

* Tutti gli autori del report svolgono le loro attività per la **Fondazione CMCC - Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici**, eventuali ulteriori affiliazioni sono indicate vicino ai singoli autori: ^aUniversità di Sassari, ^bUniversità di Bologna, ^cUniversità Ca' Foscari Venezia, ^dUniversità degli Studi di Milano, ^eRFF-CMCC European Institute on Economics and the Environment

Con il supporto di



Sommario

Presentazione di Antonio Navarra	6
Prefazione di Donatella Spano	8
Introduzione	10
Analisi degli scenari climatici attesi per l'Italia	13
Un'introduzione metodologica: i modelli climatici regionali	15
Proiezioni delle temperature medie e delle precipitazioni	17
Proiezioni per indicatori estremi di temperature e precipitazioni	22
Aree marine costiere	26
Il rischio aggregato per l'Italia	31
Rischio climatico e resilienza ai disastri	33
Indice di Rischio Climatico	37
Indice Climatico Attuariale	39
Indice completo di Resilienza ai Disastri	40
Analisi del rischio atteso per l'Italia: settori chiave	43
Ambiente urbano: stress termico e precipitazione intensa	46
Il rischio geo-idrologico	52
Risorse idriche	56
Agricoltura	63
Incendi boschivi	71
Costi, strumenti e risorse	79
Spunti per una valutazione economica degli impatti	82
Programmi e risorse per contrastare i cambiamenti climatici	85
Programmi di adattamento	85
Risorse finanziarie per l'adattamento	87
Iniziative di adattamento	93
Iniziative a livello urbano	94
Iniziative a livello regionale	99
Iniziative per il settore agroforestale	100
Considerazioni finali	105
Glossario	110
Bibliografia	113

Presentazione

Ciascuno di noi, che lo sappia o no, è abituato a vivere quotidianamente con il rischio, a valutarlo e, in qualche modo, a gestirlo. Il rischio fa parte delle nostre vite forse più di quanto non siamo abituati a riconoscere: le polizze assicurative, gli investimenti finanziari, la scelta di una terapia per curare una malattia, la decisione su l'acquisto o l'affitto di un immobile, una nuova offerta di lavoro da accettare o rifiutare, perfino la decisione se prendere o no l'ombrello quando si esce di casa. A vari livelli, tutte queste attività (e molte altre), dai piccoli gesti alle scelte che possono avere ripercussioni a lungo nel tempo, hanno a che fare con il rischio e con un nostro ragionamento ad esso associato che culmina in una decisione, in una scelta tra le diverse possibili.

Non sembri strano se, alla luce di queste premesse, la ricerca scientifica sui cambiamenti climatici ha molto a che fare con i rischi, con la complessità con cui siamo soliti descrivere le società contemporanee e con i processi decisionali che si sviluppano a tutti i livelli, da quello individuale, al governo locale, regionale, nazionale e oltre.

Quanto più i molteplici aspetti delle società contemporanee si intrecciano, diventano interdipendenti, tanto più la ricerca scientifica gioca un ruolo determinante nel cercare di illuminare tale complessità e di farla emergere di fronte alla conoscenza di chi è chiamato a prendere decisioni collettive.

Da una parte, vediamo che la situazione connessa alla pandemia di COVID-19 sta drammaticamente evidenziando come una crisi sanitaria si componga di molteplici dimensioni che, a partire dalla diffusione di un virus pericoloso, coinvolge le strutture sanitarie, la salute delle persone, l'economia e i percorsi di sviluppo, le questioni ambientali e le dinamiche sociali. Dall'altra parte, la ricerca scientifica è chiamata a delineare scenari per gli anni a venire, definire ipotesi diverse di futuro in base alle diverse scelte che si vorranno adottare e, da qui, analizzare le varie ripercussioni sui diversi settori che si ritengono rilevanti per la crescita socio-economica di una comunità e di uno Stato.

Quanto appena descritto è esattamente lo sforzo che è stato compiuto per la realizzazione di questo report, i cui contenuti sono il frutto di una intensa collaborazione interdisciplinare. Da uno sguardo sugli scenari futuri nascono valutazioni che approfondiscono diversi settori del tessuto socio-economico del nostro Paese. Sappiamo bene che la regione Mediterranea è un'area chiave dei cambiamenti climatici, un'area in cui i cambiamenti che abbiamo già iniziato a verificare di stagione in stagione, avranno una maggiore intensità nel futuro, con conseguenze diverse per quel che concerne il rischio a queste condizioni associate. Le città, il dissesto geo-idrologico, le risorse idriche, l'agricoltura e gli incendi sono i temi selezionati per analizzare il rischio climatico e fornire una valutazione scientificamente fondata.

Il quadro che emerge da questa ricerca multidisciplinare rivela i cambiamenti climatici come un fattore che interviene in maniera trasversale su molti settori. Emergono i temi della complessità, dell'interconnessione multisettoriale, dell'importanza della ricerca avanzata e di come questa possa aiutare a comprendere il modo in cui l'interrelazione tra il sistema climatico e i nostri sistemi socio-economici abbia un impatto molto concreto sulla produttività, sulla sicurezza, sulla salute, sui costi economici e sulle risorse finanziarie che vorremo e sapremo impegnare.

La buona notizia è che lo stato attuale delle nostre conoscenze ci permette di analizzare e valutare il rischio connesso ai cambiamenti climatici. Per questo motivo l'attività della Fondazione CMCC non si ferma all'elaborazione scientifica, ma compie il passo ulteriore di tradurre le informazioni e i dati affinché questi arrivino alle persone in modo comprensibile e si presentino in maniera tale da essere utili ai processi decisionali a tutti i livelli.

Questo report e l'attività della Fondazione CMCC vogliono essere un contributo per migliorare la comprensione di questi problemi e fornire supporto alle scelte complesse.

Settembre 2020

Antonio Navarra

Presidente
Fondazione CMCC - Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Antonio Navarra', with a stylized, flowing script.

Prefazione

È nostro dovere di scienziati e cittadini consapevoli contribuire a mantenere attiva l'attenzione e l'azione sulla più importante e gravosa questione del nostro secolo: il cambiamento climatico. In questo senso la Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC) ha risposto alla proposta dell'European Climate Foundation con la preparazione del rapporto 'Analisi del rischio. I cambiamenti climatici in Italia'. Si tratta di un documento di sintesi delle conoscenze scientifiche su impatti, rischi e interazioni dei cambiamenti climatici a livello nazionale in relazione a diversi gradi di riscaldamento e modelli di sviluppo, con un approfondimento su alcuni settori chiave del sistema economico italiano. Nell'esposizione vengono delineate anche le principali opportunità finanziarie per ridurre la vulnerabilità territoriale e sono riportati esempi di buone pratiche attuate a diversi livelli amministrativi, nazionale, regionale e locale.

Il documento, preparato dai ricercatori ed esperti del CMCC e della rete delle università che compongono la Fondazione CMCC, rappresenta una solida base scientifica e tecnica a supporto del processo decisionale per le fasi di programmazione, pianificazione e allocazione delle risorse necessarie per mettere in atto politiche climatiche e territoriali adeguate e sinergiche fra loro. Riferimenti scientifici robusti devono essere infatti disponibili per i sistemi istituzionali e per i diversi livelli di governance a garanzia dell'aumento della resilienza sociale e ambientale.

Il rapporto può inoltre costituire un contributo scientifico chiave per i prossimi negoziati sul clima e sull'ambiente, dalla Conferenza delle Nazioni Unite sulla Convenzione sui cambiamenti climatici alla Conferenza delle Parti della Convenzione delle Nazioni Unite per la lotta alla desertificazione.

Si tratta anche di uno strumento ad ampio carattere divulgativo e di facile consultazione per agevolare la diffusione dell'informazione e aumentare la consapevolezza dei singoli sul cambiamento climatico al fine di coinvolgere in un processo partecipato e iterativo i portatori di interesse locale, i cittadini e le componenti più vulnerabili della società.

Questo lavoro viene pubblicato mentre in Italia si sta lavorando per costruire la ripresa dagli effetti devastanti causati dalla pandemia da Covid-19, un processo che non può che essere basato su una transizione sostenibile, nell'ambito della quale il cambiamento climatico rappresenta uno dei pilastri fondamentali dell'agenda politica, mentre le conseguenti azioni di mitigazione e adattamento alle nuove condizioni climatiche sono indirizzate a limitare l'intensificarsi degli eventi estremi, la distruzione di ecosistemi, di infrastrutture, gli impatti negativi sulle popolazioni e la stessa diffusione di virus.

Non vi è dubbio, infatti, che ritardare l'azione di contrasto e adattamento ai cambiamenti climatici allontanerebbe la prospettiva di uno sviluppo sostenibile contribuendo a impatti sempre più negativi e rischi sempre più accentuati. Sulla base delle conoscenze attuali è necessario, quindi, intraprendere azioni a breve e lungo termine al fine di costruire capacità individuali e istituzionali, accelerare il trasferimento delle conoscenze, migliorare il trasferimento e l'implementazione della tecnologia, abilitare i meccanismi finanziari, attuare sistemi di allerta precoce e migliorare la gestione dei rischi.

La conoscenza degli impatti e l'analisi di rischio integrato dei cambiamenti climatici in Italia, sul suo capitale ambientale, naturale, sociale ed economico e le opzioni di risposta individuate dai risultati della ricerca scientifica consentono di sviluppare piani di gestione integrata e sostenibile del territorio valorizzandone le specificità, peculiarità e competenze dei diversi contesti territoriali. Tale approccio nasce dall'adozione di percorsi di sviluppo resilienti ai cambiamenti climatici e consente di legare le azioni da intraprendere ai 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDGs), sviluppati dalle Nazioni Unite per cercare di eradicare la povertà, proteggere gli ecosistemi, ridurre le disuguaglianze, garantire salute, energia e sicurezza alimentare, e realizzare città ed economie sostenibili.

Questo scorcio del 2020 e il 2021 rappresentano quindi un periodo strategico, un'opportunità per un cambiamento di direzione, per la redazione di strategie di sviluppo concrete, capaci di apportare trasformazioni radicali verso obiettivi di resilienza e sostenibilità.

I messaggi chiave, le infografiche e un estratto di sintesi accompagnano il report costruito su cinque capitoli nei quali vengono illustrati (1) gli scenari climatici attesi per l'Italia, (2) analisi di rischio aggregato, (3) l'analisi di rischio per l'ambiente urbano, il sistema geo-idrologico, le risorse idriche, l'agricoltura, le foreste e gli incendi boschivi, (4) costi strumenti e risorse per la valutazione economica degli impatti e (5) alcune iniziative di adattamento.

Consapevoli della sfida che ci attende proseguiamo a studiare e lavorare per accrescere la conoscenza e mettere a disposizione nuovi strumenti scientifici di analisi ma continueremo parallelamente ad adeguare l'accessibilità e la comunicazione dei risultati per contribuire a costruire comunità consapevoli e informate.

Questo report è stato costruito proprio con questo obiettivo. Buona lettura.

Settembre 2020

Donatella Spano

Strategic Advisor, Fondazione CMCC
Università di Sassari



Introduzione

Il fenomeno del riscaldamento globale è ormai inequivocabile, come confermato dagli ultimi rapporti dell'IPCC (IPCC, 2014; 2018), con cambiamenti in atto che non hanno precedenti su una scala multi-decennale, centenaria o addirittura ultra-millenaria. La temperatura media globale osservata è oggi di circa 1°C superiore rispetto ai livelli dell'era preindustriale e questo sta già determinando importanti effetti, tra cui (solo per citarne alcuni) l'aumento di fenomeni meteorologici estremi (ondate di calore, siccità, forti piogge), l'innalzamento del livello del mare, la diminuzione del ghiaccio Artico, l'incremento di incendi boschivi, la perdita di biodiversità, il calo di produttività delle coltivazioni.

La regione Mediterranea è considerata uno degli “*hot spot*” del cambiamento climatico, con un riscaldamento che supera del 20% l'incremento medio globale e una riduzione delle precipitazioni in contrasto con l'aumento generale del ciclo idrologico nelle zone temperate comprese tra i 30° N e 46° N di latitudine (Lionello e Scarscia, 2018).

In Italia, l'analisi dei dati climatici misurati dalle principali reti di osservazione nazionali e regionali ha permesso di osservare¹ un incremento di oltre 1,1°C della temperatura media annua nel periodo 1981-2010 rispetto al trentennio 1971-2000. Gli ultimi anni, sono stati comunque caratterizzati da incrementi di temperatura piuttosto elevati. Il 2019 è stato, ad esempio, il terzo anno più caldo dall'inizio delle osservazioni (+1,56°C rispetto al trentennio 1961-1990), dopo i record già registrati nel 2018 e nel 2015². Inoltre, otto dei dieci anni più caldi della serie storica sono stati registrati dal 2011 in poi, con anomalie comprese tra +1,26°C e +1,71°C. Sono dati che, è utile sottolinearlo, si riferiscono alla temperatura media annuale e fanno registrare aumenti molto significativi per

lo studio del clima e dei suoi impatti sui sistemi sociali, economici, ambientali.

L'andamento storico delle precipitazioni cumulate dalla metà del secolo scorso mostra invece un'elevata variabilità su scala nazionale con una diminuzione più marcata rilevata a cavallo tra gli anni 80 e 90. L'ampia dinamica dei sistemi di circolazione atmosferica e la complessità orografica del territorio nazionale caratterizzano una forte variabilità delle precipitazioni sul territorio con valori più elevati (superiori a 2.000 mm), lungo le zone alpine e prealpine mentre le precipitazioni medie annue più basse (comprese tra 400 e 600 mm) sono riscontrate principalmente per la Sicilia meridionale, la Puglia, la Sardegna meridionale e, localmente, in Valle d'Aosta e in Alto Adige. Dall'analisi delle tendenze di una serie di indicatori di estremi climatici basati su dati di temperatura e precipitazione, si evince per il periodo 1961-2012 un aumento della loro intensità (ISPRA, 2013) nel territorio italiano, con variazioni di 1°C ogni 10 anni dei valori annuali massimi della temperatura minima e massima. Tale andamento è confermato anche dagli indici che considerano la variazione del numero delle notti calde (con un aumento di circa 14 giorni in 10 anni) e delle giornate calde (con un aumento di circa 21 giorni in 10 anni). Per quanto riguarda le precipitazioni, gli indici degli estremi mostrano una maggiore disomogeneità nei valori delle osservazioni. Ad ogni modo, gli indici di precipitazione evidenziano un generale aumento, statisticamente significativo, dell'intensità degli eventi di precipitazione sia al Nord che al Sud (ISPRA, 2013).

I cambiamenti climatici già osservati negli ultimi decenni potranno essere ulteriormente inaspriti dalle variazioni attese del clima, determinando rischi di diversa entità a seconda di quanto si riuscirà a fare per limitare il riscaldamento

1 www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/stato-dellambiente/variazioni-e-tendenze-degli-estremi-di-temperatura-e-precipitazione-in-italia
www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/stato-dellambiente/valori-climatici-normali-di-temperatura-e-precipitazione-in-italia

2 www.isprambiente.gov.it/files2020/pubblicazioni/stato-ambiente/rapporto_clima_2019-1.pdf

damento globale. Come afferma l'IPCC nel rapporto speciale del 2018, contenere il riscaldamento globale al di sotto di 1,5°C anziché al di sotto di 2°C può consentire di ridurre in maniera significativa alcuni rischi, permettendo alle persone e agli ecosistemi di avere maggiori possibilità di adattamento alle mutate condizioni climatiche.

Ridurre i rischi climatici e aumentare la resilienza agli impatti dei cambiamenti climatici sono obiettivi comuni dell'Accordo di Parigi e del Quadro di Riferimento di Sendai (UNISDR, 2015), a cui ha aderito il governo italiano insieme al favore di numerosi altri governi durante la ventunesima conferenza delle Parti tenutasi a Parigi nel 2015. Con la definizione di obiettivi e priorità su scala globale in riferimento al rischio da disastri naturali, il Riferimento Quadro di Sendai pone l'accento sulla riduzione del rischio, l'esposizione e la vulnerabilità e sul rafforzamento della resilienza a tutti i livelli attraverso "l'implementazione di misure socioeconomiche, ambientali, tecnologiche e istituzionali integrate e inclusive". Durante la COP26, rinviata al 2021 a causa dall'attuale pandemia COVID-19, i governi saranno chiamati a rivedere i loro Contributi Determinati su base Nazionale (NDC), con l'ambizione di contenere l'aumento della temperatura media globale "ben al di sotto" dei 2°C sopra i livelli preindustriali, perseguendo naturalmente gli obiettivi di riduzione del riscaldamento globale attraverso l'abbattimento delle emissioni di gas serra (la cosiddetta mitigazione), di adattamento e aumento della resilienza.

Rendere i sistemi naturali ed antropici più resilienti appare ancora più urgente nell'attuale situazione di crisi causata dalla pandemia di COVID-19 che ha determinato forti impatti su tutti gli ambiti della società, rimettendo al centro del dibattito governativo l'esigenza di convergere verso uno sviluppo sostenibile e resiliente capace di garantire una minore vulnerabilità agli stress di diversa origine.

L'obiettivo di questo rapporto è quindi quello di evidenziare quali sono gli scenari di cambiamento climatico attesi per l'Italia e quali rischi principali tali scenari potranno determinare in corrispondenza di diversi possibili livelli di riscaldamento globale, evidenziando alcune chiare priorità di intervento, anche in riferimento alla valutazione economica delle stesse e alle opportunità finanziarie.

Oltre all'urgenza di agire con determinazione per contrastare i cambiamenti climatici in atto e ridurre i rischi attesi, molto lavoro deve essere fatto anche sul fronte dell'adattamento, in maniera capillare sul territorio italiano affinché esso sia reso resiliente e pronto a rispondere alle sfide climatiche in atto.

Soluzioni di mitigazione e di adattamento devono essere attuate con urgenza e in sinergia al fine di ottimizzare i risultati e contribuire a quella trasformazione non più rinviabile verso uno sviluppo sostenibile e resiliente del nostro territorio.



1 | Analisi degli scenari climatici attesi per l'Italia

Temperatura in aumento. I diversi modelli climatici sono concordi nel valutare un aumento della temperatura fino a 2°C nel periodo 2021-2050 (rispetto a 1981-2010). Variazioni maggiori in zona alpina e stagione estiva sono attese nello scenario con cambiamenti climatici più intensi, per il quale l'innalzamento della temperatura può raggiungere i 5°C a fine secolo.

Meno piogge ma più intense. Tra i principali risultati evidenziati dalle analisi degli scenari climatici vi è una diminuzione delle precipitazioni nel periodo estivo (più lieve in primavera) per il Sud e per il Centro Italia, aumentano le precipitazioni nel periodo invernale nel Nord Italia. Associato a questi segnali vi è un aumento sul territorio della massima precipitazione giornaliera per la stagione estiva ed autunnale, più marcata per lo scenario ad elevate emissioni di gas serra.

Più giorni caldi e secchi. Sia per lo scenario ad emissioni contenute che per quello ad emissioni elevate emerge un consistente aumento di giorni con temperatura minima superiore a 20°C in estate e, nella stessa stagione, un aumento della durata dei periodi senza pioggia.

Come cambia il mare. I cambiamenti climatici stanno interessando in modo crescente l'ambiente marino (costiero e mare aperto) determinando un aumento delle temperature superficiali e del livello del mare, dell'acidificazione delle acque marine e dell'erosione costiera. Tali cambiamenti necessitano di una particolare attenzione data l'importanza strategica, ambientale, economica e sociale delle nostre coste.

Un mare di beni e servizi. Le conseguenze indotte dai cambiamenti climatici potranno avere un impatto su "beni e servizi ecosistemici" costieri che sostengono sistemi socioeconomici attraverso la fornitura di cibo e servizi di regolazione del clima (quali assorbimento/rilascio e redistribuzione del calore e dei gas atmosferici, sequestro e rilascio di CO₂ in atmosfera).

Il valore aggiunto della ricerca avanzata. I modelli climatici ad alta risoluzione risultano particolarmente importanti per comprendere l'evoluzione attesa (in termini di variazione in frequenza ed intensità) per alcuni impatti, quali ad esempio alluvioni, frane meteo-indotte, siccità e ondate di calore, ma anche per fornire indicazioni utili a studi e pianificazione di adattamento a diverse scale, da quella nazionale a quella locale.

Un'introduzione metodologica: i modelli climatici regionali

Per descrivere il clima che possiamo attenderci per il futuro di una determinata area geografica, dobbiamo partire dalla conoscenza di come i cambiamenti climatici influiscano sulle principali variabili atmosferiche – quali ad esempio temperatura, precipitazioni, vento – sia in termini di valori medi (prendendo in considerazione le medie delle stagioni o di interi anni), sia in termini di valori estremi (piogge intense giornaliere, giorni consecutivi senza pioggia, per quanti giorni consecutivi la temperatura è stata particolarmente elevata), quei valori cioè che rappresentano eventi straordinari rispetto alle medie di periodi più o meno lunghi.

I cambiamenti attesi, così come li abbiamo appena definiti, sono generalmente valutati come differenza, per la variabile o indice di interesse, tra l'andamento simulato per il periodo futuro di interesse (valutato sulla base di proiezioni climatiche) e l'andamento simulato su un periodo di riferimento, ovvero su un periodo attuale o del recente passato. A tal proposito, è importante notare

che le **proiezioni climatiche** sono ottenute attraverso l'utilizzo di modelli climatici che si basano sul presupposto che le condizioni climatiche future dipendano dall'evoluzione in atmosfera delle concentrazioni di gas climalteranti che, a loro volta, dipendono dall'attuazione o meno di politiche di mitigazione, ossia di riduzione delle emissioni di tali gas, a scala globale. In particolare, nel Quinto Rapporto di Valutazione sui Cambiamenti Climatici (AR5) pubblicato dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), le simulazioni climatiche ad alta risoluzione sono riferite a quattro diversi scenari di concentrazione dei gas serra, aerosol e gas chimicamente attivi (Moss et al., 2008), che vengono denominati RCP (*Representative Concentration Pathways* – Percorsi Rappresentativi di Concentrazione: Box 1).

Secondo questi scenari, è probabile che l'aumento della temperatura media globale entro la fine del XXI secolo sarà superiore a 1,5°C, rispetto al periodo preindustriale. In particolare, è probabile che l'innalzamento della temperatura superi i 2°C per gli scenari con livelli più alti di concentrazione di gas serra a fine secolo (RCP6.0 e RCP8.5), mentre per lo scenario con concentrazioni intermedie (RCP4.5) è più probabile che non superi i 2°C.

BOX 1. PERCORSI RAPPRESENTATIVI DI CONCENTRAZIONE (RCP)

I Percorsi Rappresentativi di Concentrazione (*Representative Concentration Pathways*, RCP) sono scenari climatici espressi in termini di concentrazioni di gas serra piuttosto che in termini di livelli di emissioni. Il numero associato a ciascun RCP si riferisce al Forzante Radiativo (Radiative Forcing - RF) espresso in unità di Watt per metro quadrato (W/m²) ed indica l'entità dei cambiamenti climatici antropogenici entro il 2100 rispetto al periodo preindustriale: ad esempio, ciascun RCP mostra una diversa quantità di calore addizionale immagazzinato nel sistema Terra quale risultato delle emissioni di gas serra.

In particolare, gli scenari IPCC principalmente adottati per effettuare le simulazioni climatiche ad alta risoluzione, sono i seguenti:

- **RCP8.5** (comunemente associato all'espressione "Business-as-usual", o "Nessuna mitigazione") - crescita delle emissioni ai ritmi attuali. Tale scenario assume, entro il 2100, concentrazioni atmosferiche di CO₂ triplicate o quadruplicate (840-1120 ppm) rispetto ai livelli preindustriali (280 ppm).
- **RCP2.6** ("Mitigazione aggressiva") - emissioni dimezzate entro il 2050. Questo scenario assume strategie di mitigazione 'aggressive' per cui le emissioni di gas serra si avvicinano allo zero più o meno in 60 anni a partire da oggi. Secondo questo scenario è improbabile che si superino i 2°C di aumento della temperatura media globale rispetto ai livelli preindustriali.

Secondo lo scenario con minore concentrazione di gas serra (RCP2.6), è invece improbabile che la temperatura media globale superi i 2°C. Per tutti gli scenari RCP, eccetto lo scenario RCP2.6, l'aumento di temperatura continuerà anche oltre il 2100. Tuttavia, è importante sottolineare che queste variazioni termiche non saranno uniformi nelle diverse aree geografiche, sia su scala globale che su scala locale: il clima cambia in maniera diversa in aree diverse del pianeta, così come cambia in maniera diversa in diverse regioni, città e aree locali di uno stesso stato.

A scala globale, le variabili climatiche sono analizzate attraverso l'utilizzo di Modelli di Circolazione Generale (GCM), i quali sono in grado di simulare la risposta del sistema climatico globale alle forzanti esterne con una risoluzione di circa 100-50 km. Tuttavia, a causa delle loro caratteristiche e risoluzione sono poco adatti alle

esigenze degli utilizzatori finali – come decisori politici, attività produttive di beni e servizi, società civile – che necessitano, sulla scala regionale o locale, di un'attenta valutazione sia delle caratteristiche del clima, che degli impatti. Uno degli strumenti più efficaci che è stato sviluppato per fornire analisi climatiche utili per tale scopo è rappresentato dai Modelli Climatici Regionali (RCM), i quali permettono di descrivere la variabilità del clima con un dettaglio molto più elevato.

In questo capitolo si illustrano le proiezioni climatiche delle temperature medie e delle precipitazioni per il nostro Paese riferite a tre scenari IPCC (RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5) e simulate attraverso i diversi modelli regionali. Nello specifico, si discutono i risultati relativi al modello regionale COSMO-CLM nella configurazione sviluppata dal CMCC in maniera specifica per l'Italia e dei modelli del programma EURO-CORDEX (Box 2).

BOX 2. MODELLI CLIMATICI AD ALTA RISOLUZIONE UTILIZZATI NEL REPORT

COSMO-CLM (Bucchignani *et al.*, 2016; Zollo *et al.*, 2016) è un Modello Climatico Regionale (RCM) realizzato nell'ambito del consorzio europeo CLM Assembly. Le analisi di questo Report utilizzano una particolare configurazione specifica per l'Italia che è stata sviluppata appositamente dal CMCC. Questo modello copre il territorio italiano con una risoluzione spaziale di circa 8 km. In questo caso, le simulazioni climatiche sono disponibili dal 1971 al 2100 per due scenari IPCC (RCP4.5 e RCP8.5). In Italia, un gran numero di istituzioni pubbliche e private ha adottato questo modello nell'ambito di specifici studi volti alla valutazione del rischio climatico e alla definizione di strategie e azioni di adattamento, su scala sia regionale sia locale.

Modelli EURO-CORDEX (Jacob *et al.*, 2014). Questi modelli, sviluppati nell'ambito del programma EURO-CORDEX, coprono tutto il territorio europeo. La massima risoluzione disponibile di questi modelli, in Europa, è di circa 12 km. In questo caso, le simulazioni climatiche sono disponibili dal 1971 al 2100 per tre scenari IPCC (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5). EURO-CORDEX è il ramo europeo dell'iniziativa internazionale CORDEX, un programma mondiale sponsorizzato dal World Climate Research Program (WCRP). Il programma CORDEX mira a realizzare un quadro coordinato a livello internazionale al fine di produrre proiezioni regionali ad alta risoluzione sui cambiamenti climatici per tutte le regioni del mondo. Ulteriori informazioni specifiche sui dati di EURO-CORDEX sono fornite in Hennemuth *et al.* (2017). Nello specifico, i dati climatici utilizzati in questo studio si basano sull'insieme dei risultati di 18 modelli per gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 e 11 modelli per lo scenario RCP2.6.

Per quanto riguarda l'uso dei modelli EURO-CORDEX, è importante sottolineare che la scelta di utilizzare un insieme di modelli climatici regionali offre l'opportunità di valutarne il valore medio (denominato spesso *ensemble mean*), che rappresenta il risultato più affidabile, ma anche la distribuzione dei singoli modelli intorno a questo valore medio. Conoscere questa distribuzione dei modelli attorno al valore medio è molto importante per una valutazione dell'incertezza associata alla media dell'insieme. Al fine di calcolare le anomalie climatiche, vengono confrontati due set di dati simulati: il primo set è riferito alle proiezioni climatiche attese per i periodi futuri, il secondo set include gli andamenti climatici storici, ottenuti eseguendo la stessa simulazione per il periodo scelto di riferimento. Come raccomandato dall'IPCC, i periodi di analisi hanno una lunghezza di almeno 30 anni (IPCC, 2014).

Proiezioni delle temperature medie e delle precipitazioni

La penisola italiana rappresenta un interessante caso studio per i modelli climatici regionali a causa della complessa topografia e delle influenze del clima arido del Nord Africa e di quello temperato e piovoso dell'Europa centrale. Grazie ai modelli utilizzati, COSMO-CLM e quelli derivanti dal programma EURO-CORDEX, è possibile rappresentare le caratteristiche sia medie sia estreme del clima su scala locale. Tali informazioni sono utili per diverse applicazioni, in particolare come input per i modelli di impatto dei cambiamenti climatici. È importante sottolineare che i risultati prodotti da tali scenari climatici si basano su delle ipotesi riguardanti l'evoluzione della concentrazione di gas climalteranti in atmosfera

che dipendono dalle politiche di mitigazione che saranno attuate o meno in futuro (Box 1). Nei seguenti paragrafi sono riportati gli andamenti attesi per una selezione di variabili e di indici climatici di maggiore interesse.

Temperatura media

In Figura 1 è riportato l'andamento della crescita della temperatura media su scala annuale per l'Italia fino al 2100 utilizzando tutti i modelli disponibili nell'ambito del programma EURO-CORDEX. Considerando il valore medio (*ensemble*), l'incremento di temperatura arriva fino a circa 1°C per lo scenario a più basse concentrazioni di gas serra a fine secolo (RCP2.6) e fino a 5°C per lo scenario con concentrazioni più elevate (RCP8.5). Tali valori di incremento della temperatura media ben evidenziano come le variazioni attese possano cambiare notevolmente a seconda dello scenario considerato.

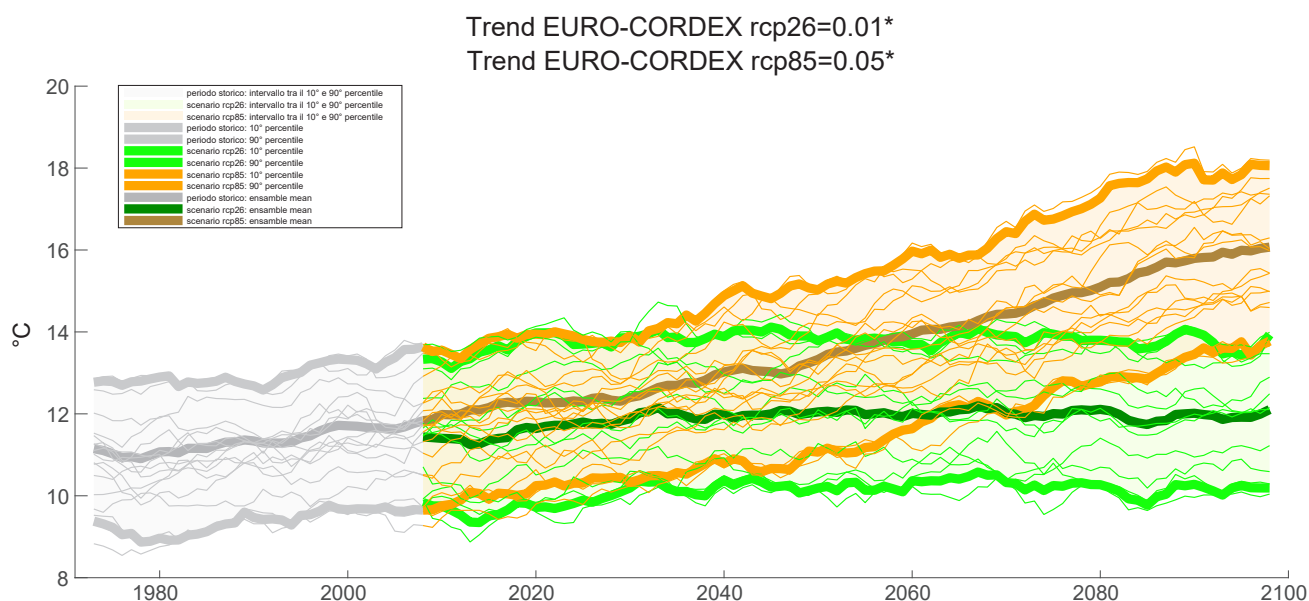


Figura 1. Proiezioni della temperatura media sull'Italia dall'*ensemble* EURO-CORDEX con gli scenari più estremi RCP2.6 e RCP8.5.

Nel grafico, il periodo storico viene riportato in colore grigio mentre i dati relativi allo scenario RCP2.6 sono riportati nella scala dei colori del verde e quelli relativi allo scenario RCP8.5 nella scala dei colori dell'arancione. La linea spessa scura (verde scuro per lo scenario RCP2.6 e marrone per lo scenario RCP8.5) indica la proiezione climatica media (*ensemble mean*), calcolata facendo la media dei valori di tutte le simulazioni considerate; le aree racchiuse tra questo valore medio e le curve più spesse con colore più chiaro (verde brillante per lo scenario RCP2.6 e arancione per lo scenario RCP8.5) rappresentano l'intervallo tra il 10° e il 90° percentile dei valori simulati da tutti i modelli e forniscono una misura dell'incertezza relativa alle proiezioni considerando i diversi modelli climatici regionali (altre possibili scelte sono la deviazione standard attorno alla media o i modelli con il valore minimo e massimo per la variabile di interesse). Le curve invece più sottili rappresentano i valori dei singoli modelli che concorrono alla definizione del valore medio.

Se analizziamo la distribuzione geografica, i modelli utilizzati sono concordi nel simulare un incremento della temperatura rispetto al periodo di riferimento. Negli scenari che riportano gli incrementi di temperatura maggiore (RCP4.5 e RCP8.5), nel periodo 2021-2050 questi sono distribuiti pressoché uniformemente su tutto il territorio (Figura 2), sebbene alcune differenze siano apprezzabili soprattutto in primavera ed in estate. In particolare, tra i due scenari, quello con una variazione di concentrazioni di gas serra minori (RCP4.5) rispetto all'altro scenario considerato indica in primavera una variazione di temperatura media compresa tra 0,5°C e 1°C mentre lo scenario RCP8.5, con maggiore concentrazione di gas climalteranti in atmosfera, indica una variazione compresa tra 1°C e 1,5°C su Centro (soprattutto versante Adriatico) e Sud Italia. In estate lo scenario RCP8.5 indica una variazione di temperatura media compresa tra 1,5°C e 2°C su Centro e Sud Italia mentre l'innalzamento della temperatura media nello scenario RCP4,5 rimane più contenuto, seppur evidente.

Nella zona alpina sono attese le variazioni maggiori secondo lo scenario che non prevede iniziative di mitigazione (RCP8.5). Tale area, vista la sua complessità, rappresenta una sfida per gli attuali modelli climatici che non riescono ancora a catturare del tutto le dinamiche dei fenomeni atmosferici a piccola scala. Ciò si traduce in una maggior incertezza nelle proiezioni climatiche, specie per quanto riguarda gli andamenti delle caratteristiche estreme del clima. I modelli climatici di nuova generazione attualmente in fase di sviluppo, caratterizzati anche da un'altissima risoluzione (intorno ai 2 km), puntano a cogliere meglio tali caratteristiche in zone complesse come quelle alpine. I risultati dell'*ensemble* EURO-CORDEX sono in buon accordo con le proiezioni ottenute con il modello climatico regionale COSMO-CLM sull'Italia. La Figura 3, ottenuta a partire dai dati del modello COSMO CLM, mostra le serie temporali della temperatura a 2 metri dal suolo, su scala annuale, per Nord, Centro e Sud Italia, proiettando un riscaldamento medio di circa 3,2°C al 2100 per RCP4.5 e circa 6,3°C al 2100 per RCP8.5.

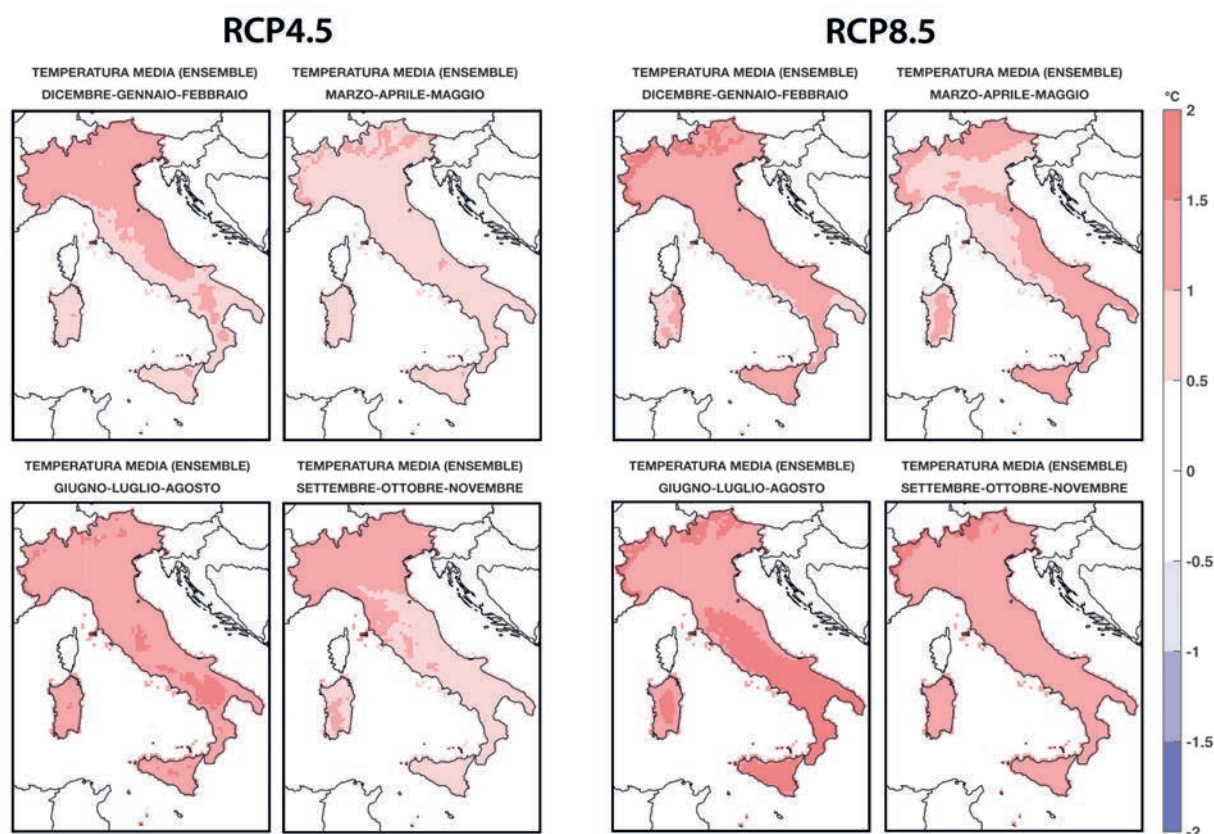


Figura 2. Mappe di variazione della temperatura a due metri su scala stagionale sull'Italia dall'*ensemble* EURO-CORDEX secondo gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 per il periodo 2021-2050 rispetto al periodo di riferimento 1981-2010.

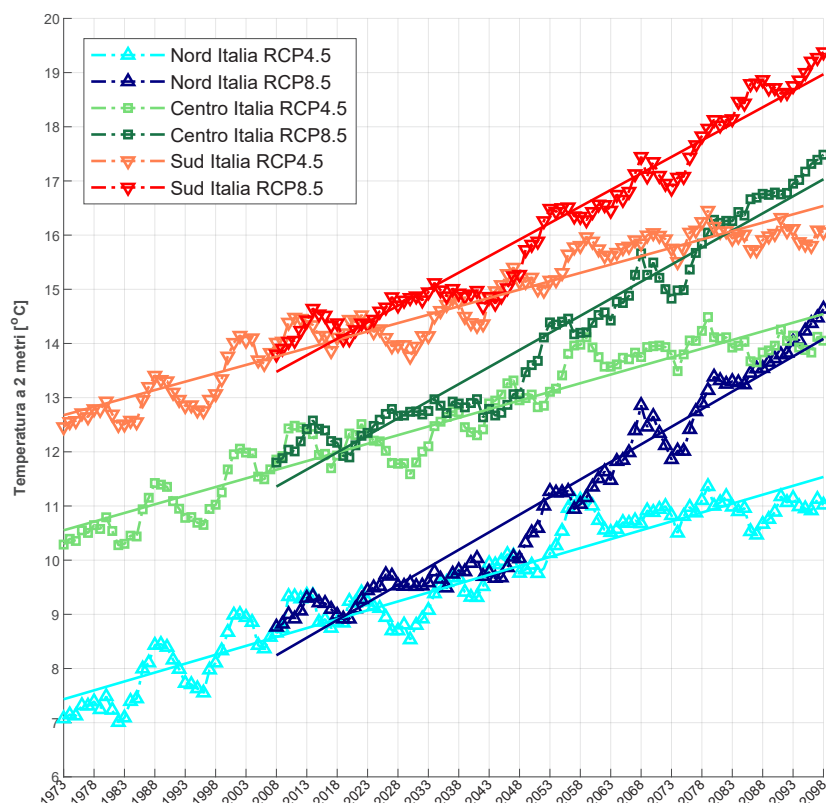


Figura 3. Proiezioni della temperatura media dalla simulazione climatica eseguita con COSMO-CLM sull'Italia con gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 (Bucchignani *et al.*, 2016).

Precipitazione annuale

Le variazioni in termini di precipitazione annuale sono interessanti per far comprendere quanto l'Italia, dal punto di vista dei cambiamenti climatici, necessiti di politiche e strategie differenziate a seconda dell'area, ma anche di modelli e strumenti, quali le reti osservative, che siano capaci di cogliere la complessità del territorio e le dinamiche atmosferiche locali. Se la tendenza appena analizzata e relativa alla temperatura media (Figura 1) evidenzia un chiaro segnale di crescita per tutti i diversi scenari, la variazione delle precipitazioni annuali nei prossimi decenni indica basse differenze sull'area italiana (un aumento di circa 96 mm in 100 anni per lo scenario RCP2.6 o una diminuzione di circa 54 millimetri nello stesso periodo per lo scenario RCP8.5) per i diversi scenari considerati (Figura 4). Trattandosi di una media

annuale su scala nazionale, questo risultato è dovuto ad un effetto “di compensazione” sulle diverse regioni del territorio italiano: ci sono aree in cui la variazione è molto accentuata in senso negativo (riduzione di piogge), altre in cui lo è in senso opposto (aumento della pioggia). Comportamenti opposti nelle diverse aree del Paese e nelle diverse regioni finiscono per annullarsi se si considera la scala annuale e nazionale.

In particolare, ciò si può evincere guardando le mappe stagionali delle variazioni attese di precipitazione per il trentennio 2021-2050 rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP4.5 e RCP8.5, sulle diverse zone dell'Italia (Figura 5).

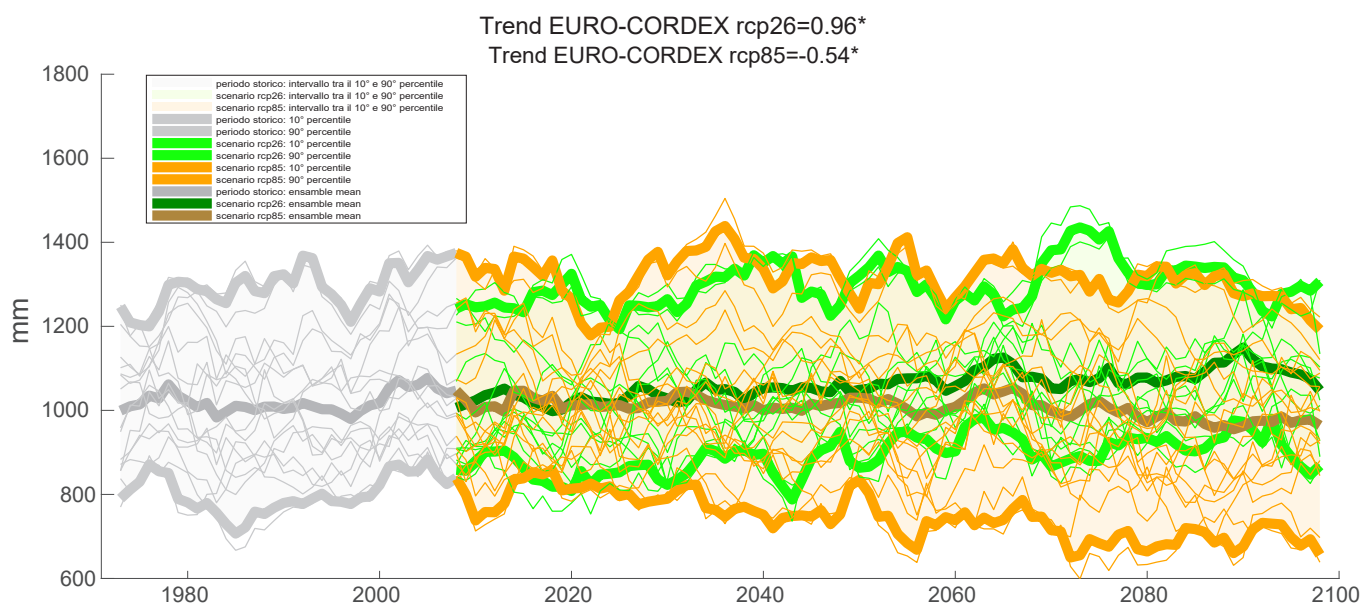


Figura 4. Proiezioni della precipitazione cumulata su scala annuale sull'Italia dall'*ensemble* EURO-CORDEX con gli scenari più estremi RCP2.6 e RCP8.5.

Nel grafico, il periodo storico viene riportato in colore grigio mentre i dati relativi allo scenario RCP2.6 sono riportati nella scala dei colori del verde e quelli relativi allo scenario RCP8.5 nella scala dei colori dell'arancione. La linea spessa scura (verde scuro per lo scenario RCP2.6 e marrone per lo scenario RCP8.5) indica la proiezione climatica media (*ensemble mean*), calcolata facendo la media dei valori di tutte le simulazioni considerate; le aree racchiuse tra questo valore medio e le curve più spesse con colore più chiaro (verde brillante per lo scenario RCP2.6 e arancione per lo scenario RCP8.5) rappresentano l'intervallo tra il 10° e il 90° percentile dei valori simulati da tutti i modelli e forniscono una misura dell'incertezza relativa alle proiezioni considerando i diversi modelli climatici regionali (altre possibili scelte sono la deviazione standard attorno alla media o i modelli con il valore minimo e massimo per la variabile di interesse). Le curve invece più sottili rappresentano i valori dei singoli modelli che concorrono alla definizione del valore medio.

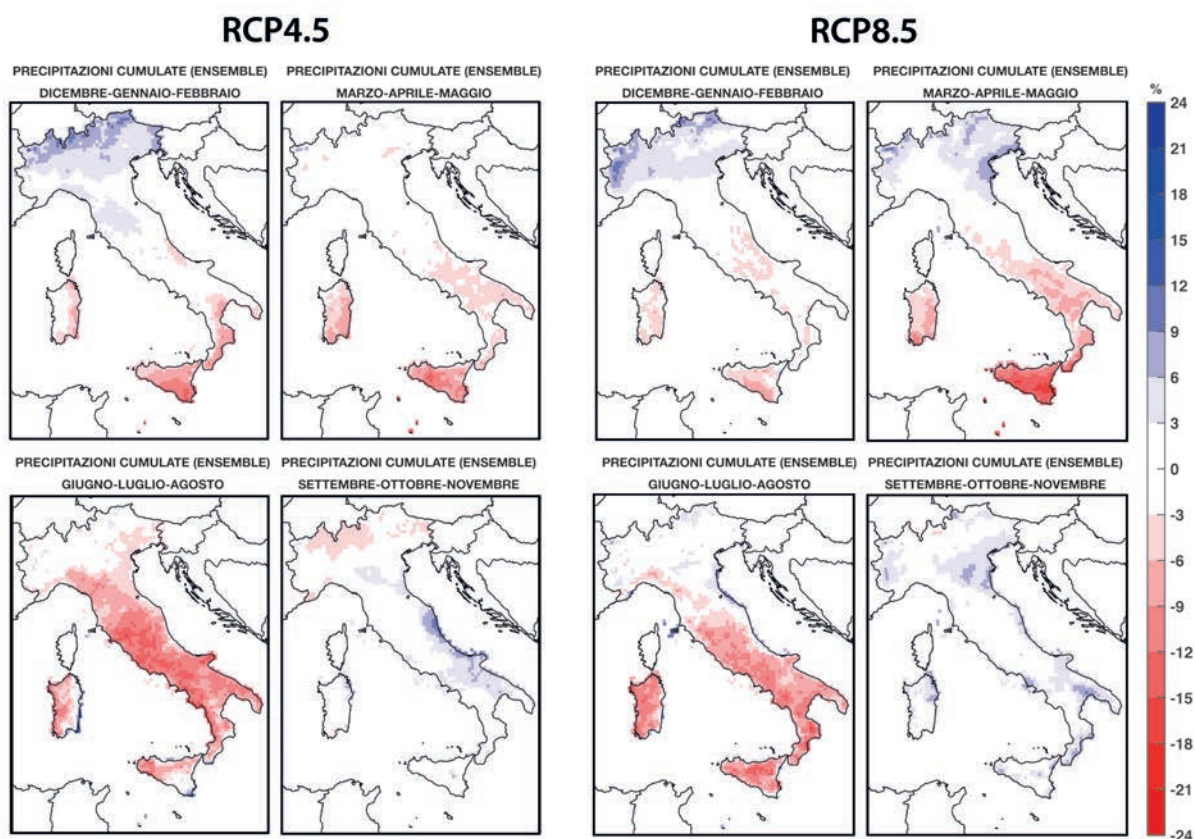


Figura 5. Mappe stagionali di variazione della precipitazione sull'Italia dall'*ensemble* EURO-CORDEX secondo gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 per il periodo 2021-2050 rispetto al periodo di riferimento 1981-2010.

Lo scenario RCP4.5 riporta le maggiori variazioni in inverno, con un aumento delle precipitazioni sulle Alpi e una riduzione su Sicilia e parte della Puglia e della Sardegna, e durante la stagione estiva con una generalizzata diminuzione delle precipitazioni su tutta l'Italia centrale e meridionale. Lo scenario RCP8.5 indica un aumento più esteso che riguarda il Nord Italia (ad eccezione della Liguria e delle regioni del basso Piemonte), eccetto in estate dove non si riportano variazioni di rilievo. Lo scenario RCP8.5 riporta inoltre basse variazioni sulla parte centrale dell'Italia e una diminuzione nel Sud Italia specie durante la stagione estiva. Il segnale di aumento della pioggia durante il periodo autunnale sul sud dell'Italia è dovuto essenzialmente ai valori molto bassi riscontrati sul periodo di riferimento in quest'area; per questo anche minime variazioni positive (non significative in termini assoluti) vengono riportate come un aumento se si considerano variazioni percentuali.

Analizzando le proiezioni sul lungo termine, essenzialmente si riscontra una diminuzione delle precipitazioni

sull'intero territorio durante la stagione estiva, mentre in inverno sono attesi una diminuzione delle piogge nel Sud e Centro Italia e un aumento nell'area settentrionale. Nella Figura 6 si riporta il dettaglio per il trend delle precipitazioni medie giornaliere valutate su base annuale dal modello COSMO-CLM nelle quali si nota sempre un lieve trend di diminuzione per le tre aree, leggermente maggiore per lo scenario RCP8.5; si tenga conto che nel periodo di riferimento 1981-2010 vi è già una differenza tra la piovosità che caratterizza queste tre aree.

La variazione attesa nel periodo 2071-2100 rispetto al 1971-2000 secondo lo scenario RCP4.5 indica un aumento moderato e non significativo delle precipitazioni in inverno sull'area alpina orientale e una significativa riduzione in estate sull'Italia settentrionale e in primavera nell'Italia centrale e meridionale. Secondo lo scenario RCP8.5 si proietta un aumento significativo delle precipitazioni in inverno sull'Italia centrale e settentrionale, più pronunciato in Liguria, mentre l'Italia centrale e settentrionale sono caratterizzate da una significativa riduzione

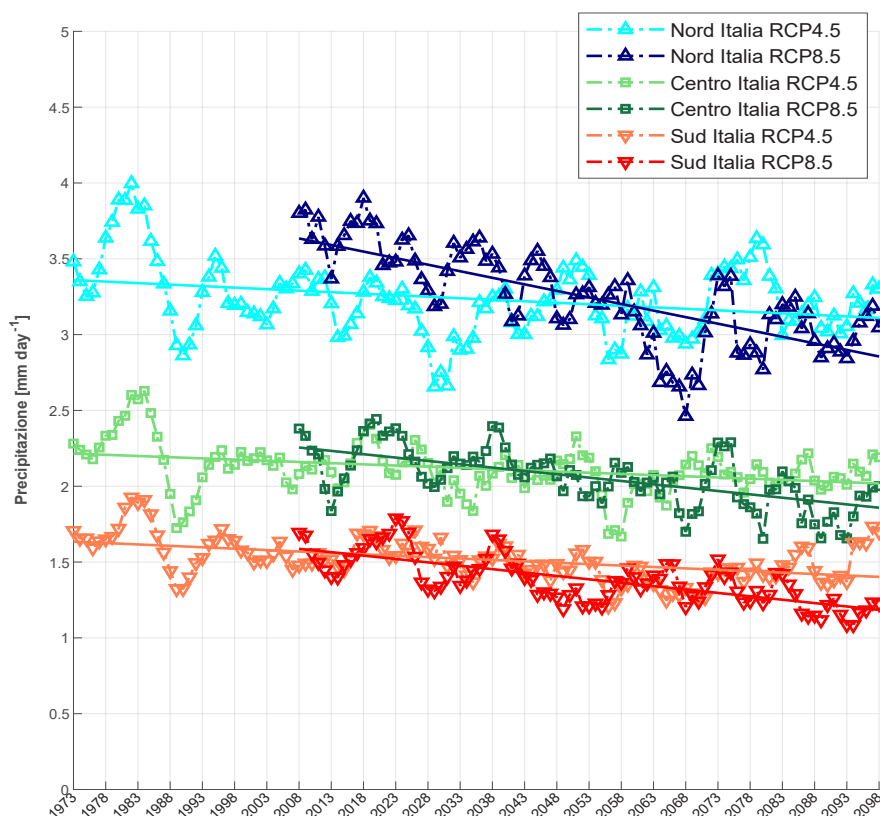


Figura 6. Proiezioni della precipitazione dalla simulazione climatica eseguita con COSMO-CLM sull'Italia con gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 (Bucchignani *et al.*, 2016).

delle precipitazioni in estate, particolarmente evidente nell'area alpina. In generale, per l'intera area italiana, è proiettata una significativa riduzione delle precipitazioni in primavera, specialmente nelle zone di alta montagna, mentre in autunno solo gli Appennini sono interessati da una riduzione delle precipitazioni. Tali variazioni sono attribuite ai modelli di cambiamento della circolazione anticiclonica che interessano l'intera regione del Mediterraneo.

Proiezioni per indicatori estremi di temperature e precipitazioni

Gli estremi climatici possono essere considerati come indicatori di processi potenzialmente pericolosi, quali ad esempio alluvioni, frane, siccità, ondate di calore e incendi, dovuti al verificarsi di eventi meteorologici intensi. La valutazione della variazione in frequenza, intensità e persistenza degli estremi climatici è generalmente effettuata attraverso il calcolo di specifici indici ed indicatori che tengono conto delle principali variabili atmosferiche, in grado di supportare la valutazione della pericolosità climatica in una specifica area. Il Team di Esperti sul Rilevamento dei Cambiamenti Climatici e Indici (*Expert*

Team on Climate Change Detection and Indices - ETC-CDI) è un gruppo nato nell'ambito di istituzioni internazionali con l'obiettivo di trovare soluzioni all'esigenza di misurazioni e descrizioni obiettive dei cambiamenti e della variabilità del clima. Il team internazionale ha così definito un set di indici climatici che possono essere calcolati attraverso l'utilizzo di dati di temperatura e precipitazione. Oltre a questo insieme di indici, ne esistono anche altri che si riferiscono a variabili atmosferiche e che possono essere utili sempre allo scopo di descrivere le caratteristiche atmosferiche più importanti per determinare se un certo settore/territorio sarà influenzato o meno dai cambiamenti climatici e in che termini. Tali valutazioni sono fondamentali nella scelta di pratiche di gestione sostenibili e nell'implementazione delle strategie di adattamento più idonee alle condizioni climatiche locali. Alcuni indicatori climatici che risultano particolarmente utili per questo scopo sono illustrati nella Tabella 1.

Gli eventi di pioggia intensa sono definiti in questi scenari climatici dall'indicatore che caratterizza la variazione dei valori massimi di precipitazione giornaliera (RX1DAY). Si tratta di un indicatore molto significativo nell'analisi del rischio connesso ai cambiamenti climatici perché un aumento delle piogge intense e, in generale, del regime

Tabella 1. Indicatori climatici selezionati per le analisi riportate in questo studio

		Unità di misura	
RX1DAY	Quantità massima di precipitazione giornaliera nel periodo considerato. <i>L'indicatore viene valutato su base stagionale o annuale.</i>		Percentuale di mm di pioggia
TN	Numero di giorni con temperatura minima giornaliera maggiore di 20°C. <i>L'indicatore viene valutato su base stagionale o annuale.</i>		Giorni
CDD	Numero massimo di giorni consecutivi senza pioggia (ovvero con pioggia inferiore ad 1 mm). <i>L'indicatore viene valutato su base stagionale o annuale.</i>		Giorni

delle piogge, può determinare degli importanti effetti al suolo come, ad esempio, un aggravamento del rischio idrogeologico.

Entrambi gli scenari qui presi in considerazione (uno con elevate emissioni e un altro con emissioni contenute – Figura 7) mostrano generalmente una tendenza all'aumento delle precipitazioni massime giornaliere specie per lo scenario RCP8.5 (per esempio sono indicati un incremento compreso tra il 12% ed il 16% in primavera su Emilia-Romagna e una riduzione compresa tra 8% e 12% in inverno su Sicilia).

Le notti tropicali (TN - *Tropical Nights*) rappresentano invece l'indicatore con cui si definisce il numero di giorni con temperatura minima maggiore di 20°C. Si tratta di un valore molto importante per valutare l'impatto dei cambiamenti climatici sul benessere fisico delle persone. Se la temperatura minima rimane al di sopra del valore di

20°C, il corpo umano non ha la possibilità di rinfrescarsi dopo una giornata di caldo intenso. Ci sono fasce della popolazione, come anziani e persone malate, che sono particolarmente vulnerabili a questa difficoltà di raffreddamento, pertanto diversi studi correlano l'aumento delle notti tropicali con un aumento della mortalità. Tale indicatore suggerisce inoltre un potenziale impatto sul settore energetico: infatti, temperature più elevate potrebbero determinare un maggior utilizzo dell'area condizionata influenzando così la domanda e i consumi di energia elettrica.

Le mappe in Figura 8 mostrano come le proiezioni riportino un marcato aumento su scala annuale (mediamente fino a 18 giorni) per la stagione estiva per entrambi gli scenari sulla maggior parte del territorio italiano. Nella stagione primaverile si vede come tale indicatore sia in lieve aumento, per entrambi gli scenari, sulle zone costiere.

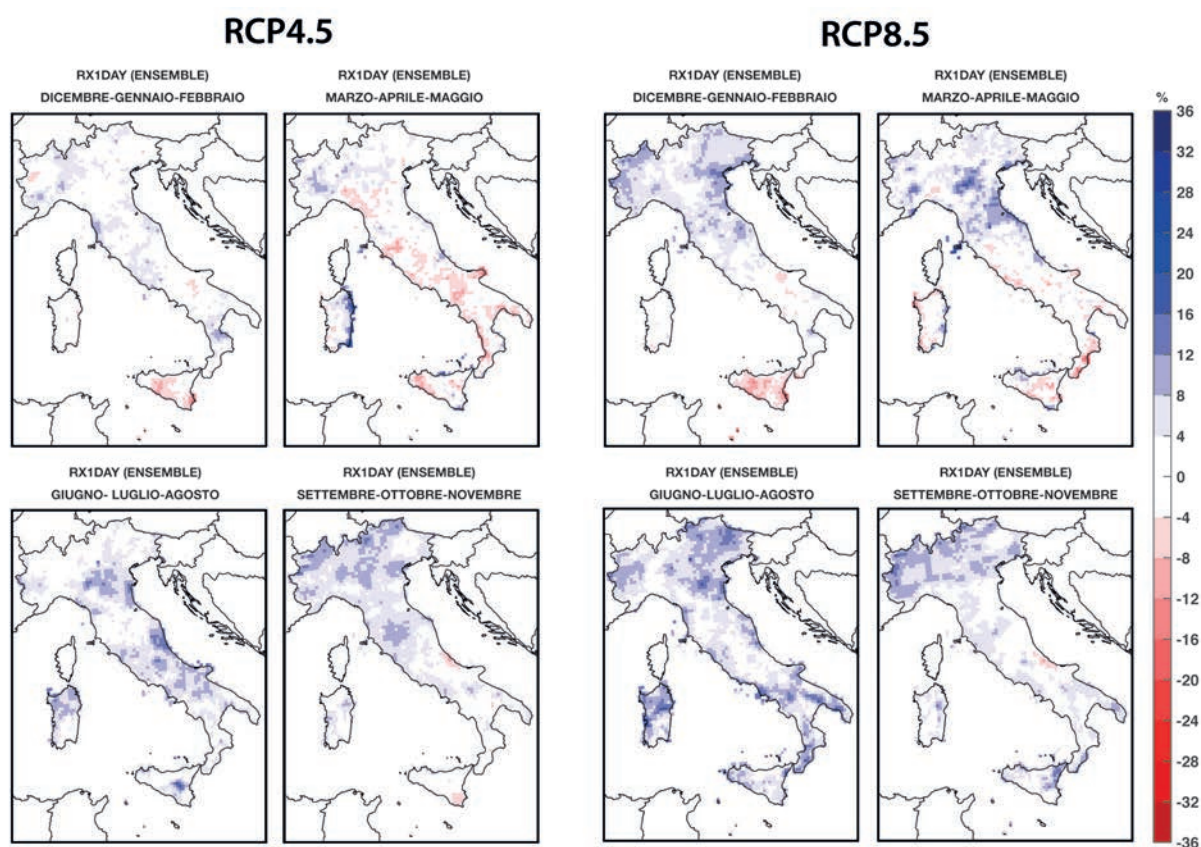


Figura 7. Mappe stagionali di variazione dell'indicatore RX1DAY sull'Italia dall'ensemble EURO-CORDEX secondo gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 per il periodo 2021-2050 rispetto al periodo di riferimento 1981-2010.

Un terzo indicatore particolarmente significativo è rappresentato dal numero dei giorni secchi consecutivi (CDD – *Consecutive Dry Days*): negli scenari climatici si prende in considerazione la variazione del numero di giorni consecutivi in cui non piove o piove pochissimo (meno di 1 mm). Si tratta di un indicatore molto importante da diversi punti di vista. Da una parte, infatti, il prolungarsi di giorni senza pioggia è significativo per analizza-

re gli impatti dei cambiamenti climatici su alcuni settori produttivi, primo fra tutti l'agricoltura. Dall'altra parte, si tratta di un indicatore che aiuta a capire la tendenza di eventi pericolosi come gli incendi.

Le proiezioni riportate in Figura 9 indicano che secondo lo scenario con elevate emissioni (RCP8.5) è principalmente atteso un lieve aumento nella stagione estiva,

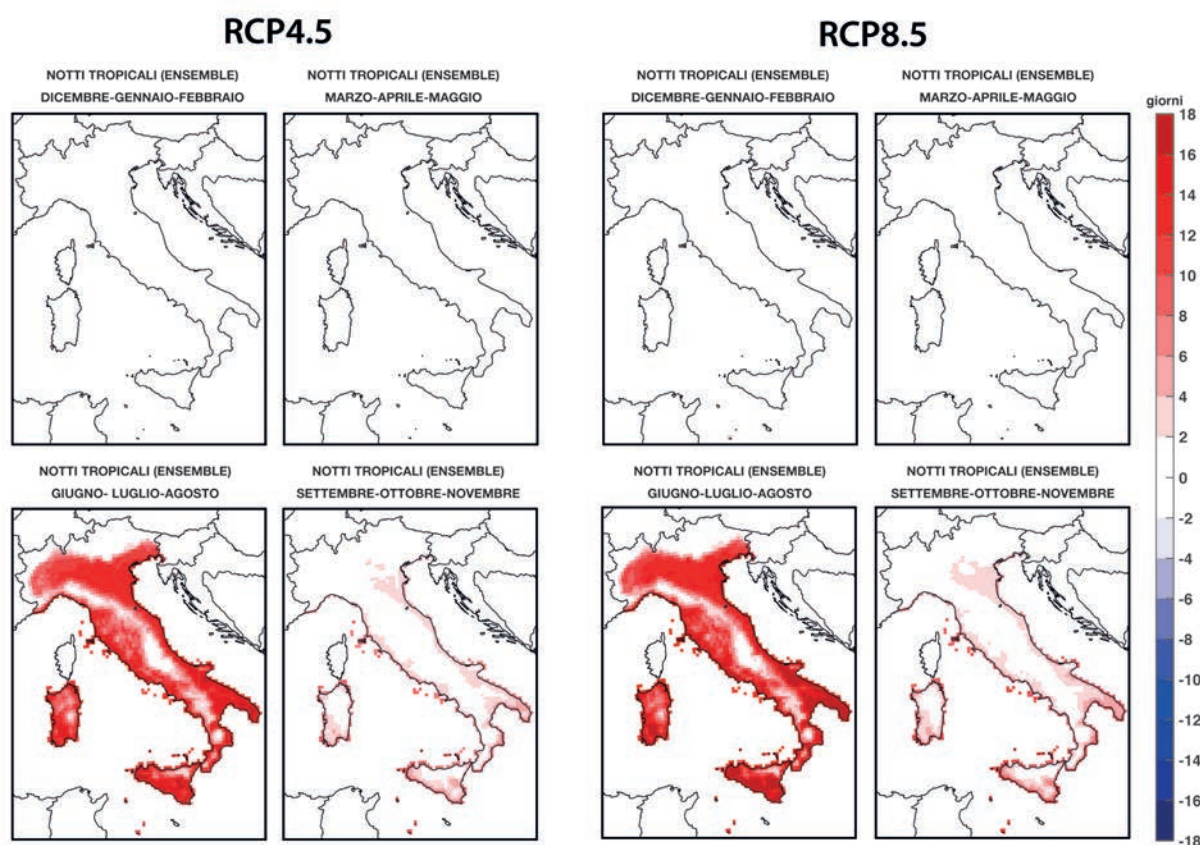


Figura 8. Mappe stagionali di variazione dell'indicatore TN (notti tropicali) sull'Italia dall'*ensemble* EURO-CORDEX secondo gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 per il periodo 2021-2050 rispetto al periodo di riferimento 1981-2010.

soprattutto nell'Italia Centrale e Meridionale. Tale lieve aumento interessa anche la stagione primaverile per quanto riguarda il Sud Italia e le Isole. Per lo scenario RCP4.5 (emissioni contenute) si nota invece essenzial-

mente un aumento che interessa quasi tutta l'Italia ad eccezione dell'area del Nordest. Si nota anche un aumento sulla Sicilia per la stagione primaverile.

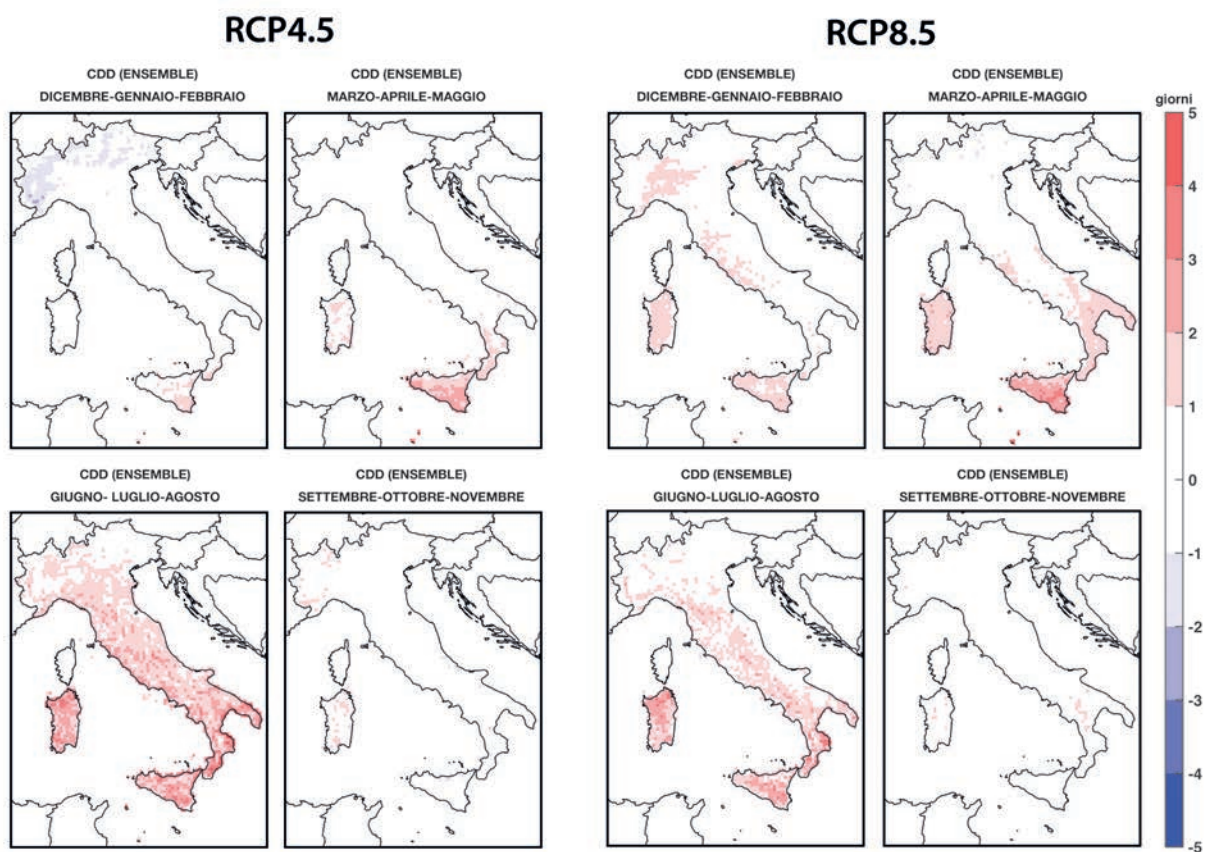


Figura 9. Mappe stagionali di variazione dell'indicatore CDD (giorni consecutivi con pioggia inferiore a 1 millimetro) sull'Italia dall'*ensemble* EURO-CORDEX secondo gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 per il periodo 2021-2050 rispetto al periodo di riferimento 1981-2010.

Aree marine costiere

I temi riconosciuti rilevanti nell'ambito marino costiero sono il riscaldamento e l'acidificazione delle acque, la variazione del livello del mare e l'erosione costiera, anche relativamente alle conseguenze che le modifiche ai processi ambientali potrebbero avere sulla fornitura dei cosiddetti "beni e servizi ecosistemici". Questi servizi risultano particolarmente sensibili ai cambiamenti climatici con possibili conseguenze anche sui sistemi socio-economici.

Il Rapporto Speciale IPCC su Oceano e Criosfera in un clima che cambia, pubblicato nel 2019 e i cui approfondimenti sono disponibili sul sito dell'IPCC Focal Point per l'Italia (<https://ipccitalia.cmcc.it/oceano-e-criosfera-in-un-clima-che-cambia>), si è concentrato sul mare e sulle aree ghiacciate del pianeta, e su come il loro rapporto con i cambiamenti climatici sia estremamente importante sia per le popolazioni che vivono in queste aree, sia anche per gli equilibri degli ecosistemi marini e costieri. Il messaggio del report è molto chiaro: la Terra si sta scaldando e questo riscaldamento produce impatti indiscutibili sulla criosfera, che si sta gradualmente riducendo, e sull'oceano che si scalda molto più velocemente di quanto non sia accaduto in passato, con un conseguente innalzamento del livello del mare. Gli scenari mostrano un oceano sottoposto a riscaldamento e

aumento del livello marino per tutto il XXI secolo, perdita di ossigeno, maggiore acidificazione, ondate di calore marine sempre più frequenti e più intense. Senza l'adozione di strategie e misure di adattamento, assisteremo ad un aumento dei rischi di inondazione ed eventi estremi per le comunità costiere, ad un aumento degli impatti negativi sulla biodiversità marina e ad una riduzione del potenziale di pesca e delle risorse marine in generale, con conseguenze negative per la sicurezza alimentare, il turismo, l'economia e la salute. A livello medio globale, il livello del mare è cresciuto a un ritmo di 3,6 mm all'anno nel periodo 2005-2015. Questo aumento è senza precedenti nel corso dell'ultimo secolo e sta accelerando a causa dello scioglimento dei ghiacci della Groenlandia e della calotta polare dell'Antartide, e dell'espansione termica dell'oceano causata dal suo riscaldamento. Con aumento medio del livello del mare rispetto alla terraferma si indica un andamento di lungo termine che non tiene conto di fenomeni più brevi, come onde e maree. Esso è dovuto sia alla crescita del volume d'acqua presente negli oceani, sia agli spostamenti verticali della superficie delle terre emerse rispetto all'acqua. Il volume degli oceani varia per due motivi: la progressiva fusione dei ghiacci e l'aumento della temperatura degli oceani e dei mari che porta ad una crescita del loro volume (espansione termica).

Si prevede che il livello del mare alla fine del secolo aumenterà di circa 0,43 m nello scenario di riduzione molto

Tabella 2. Anomalia media della temperatura superficiale (SSTA) e del livello del mare (SSHA), calcolata come differenza tra il periodo 2021-2050 e 1981-2010 usando il dataset MEDSEA. I valori si riferiscono all'anomalia media nella fascia entro le 12 miglia marine delle regioni costiere.

Area Costiera	SSTA [°C]	SSHA [cm]
NADR / Adriatico Settentrionale	+1.58	+7
CADR / Adriatico Centrale	+1.60	+7
SADR / Adriatico Meridionale	+1.48	+7
IONS / Mar Ionio e Mediterraneo Centrale	+1.31	+7
CMED / Mar Mediterraneo Centrale	+1.26	+8
LIGS / Mar Ligure	+1.27	+8
TYRS / Mar Tirreno	+1.28	+9
WMED / Mar Mediterraneo Occidentale	+1.27	+9

GHIACCIO E LIVELLO DEL MARE

Il livello del mare è cresciuto senza precedenti nel corso dell'ultimo secolo e sta accelerando (+3,6 mm all'anno nel periodo 2006 - 2015) a causa dello scioglimento dei ghiacci della Groenlandia e della calotta polare dell'Antartide, e dell'espansione termica dell'oceano causata dal suo riscaldamento.

Innalzamento del livello del mare e frequenza degli eventi estremi ad esso correlati

+15 cm

+84 cm

Nel 2100
rispetto alla
media 1986 - 2005

Scenario
ad **alta**
emissione

+43 cm

Nel 2100
rispetto alla
media 1986 - 2005

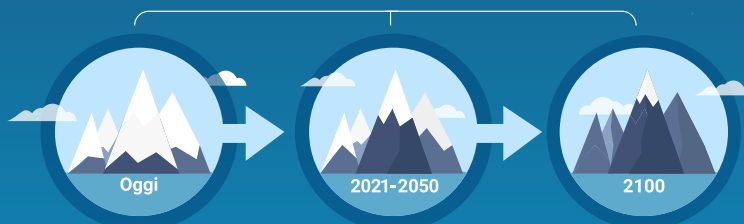
Scenario
a **bassa**
emissione

Oggi

2100

Ghiacciai: le riduzioni di massa fino al 36% tra il 2015 e il 2100

Per le Alpi europee, si prevede che i ghiacciai scompaiono in gran parte entro il 2100.



Diminuzione dello spessore della neve in quasi tutte le regioni

fino al 90%

Scenario
ad alta
emissione

fino al 40%

Scenario
a bassa
emissione

In tutti gli scenari lo spessore della neve diminuisce ed è atteso un **incremento dello scongelamento** e del degrado del permafrost.

elevata delle emissioni (RCP2.6), e di circa 0,84 m nello scenario ad alte emissioni (RCP8.5), rispetto al periodo 1986-2005. Inoltre, l'oceano, che assorbe oltre il 90% del calore in eccesso nel sistema climatico, si sta riscaldando senza sosta dal 1970. Questo riscaldamento è dovuto alle attività umane ed avviene a tutte le profondità. Il tasso di riscaldamento degli oceani è più che raddoppiato dal 1993 (nello strato tra la superficie e 2000 m di profondità).

Proiezioni climatiche future per il Mediterraneo

In Italia, le analisi scientifiche di supporto al Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC) hanno rappresentato un primo tentativo di mostrare la situazione italiana anche per quanto riguarda l'aumento della temperatura e del livello medio dei mari italiani e di fornire misure pratiche di adattamento.

L'analisi sulle aree marino/costiere del territorio nazionale condotta per il PNACC ha avuto come obiettivo la caratterizzazione delle stesse, sia per il periodo climatico attuale sia per le proiezioni climatiche future, al fine di supportare l'analisi multisettoriale degli impatti derivanti. Il livello del mare prodotto dal modello forzato e dalle rianalisi deve essere opportunamente trattato per includere non solo l'evoluzione della superficie libera del mare, riferita come componente di massa degli ocea-

ni, ma anche l'effetto di espansione e contrazione del volume dovuto ai cambiamenti di temperatura e salinità delle masse oceaniche. Il livello del mare presentato nel PNACC tiene conto dell'effetto cumulativo sia dell'espansione termica sia della componente dovuta alla fusione dei ghiacciai, ma non della componente dovuta alla subsidenza della costa.

I dati riportati sono stati ottenuti tramite un modello sviluppato dalla Fondazione CMCC e descrivono l'evoluzione del sistema per lo scenario climatico RCP8.5, che non prevede interventi significativi per limitare le emissioni di gas serra (Lovato *et al.*, 2013).

Le anomalie della temperatura superficiale del mare indicano un aumento di circa 1,2°C su base annuale per il bacino del Mediterraneo (Figura 10, pannello a sinistra). In particolare, l'aumento maggiore rispetto al periodo di riferimento delle temperature invernali e primaverili si ha per il bacino Adriatico, con valori compresi tra 1,5°C e 2°C. Nel periodo estivo si hanno le anomalie più alte e diffuse nel Mar Tirreno (~1,5°C), nell'alto Adriatico e nello Ionio.

Le variazioni del livello del mare attese per il periodo 2021-2050 sono presentate su base annuale in Figura 10 (pannello di destra). È evidente una diversa dinamica tra

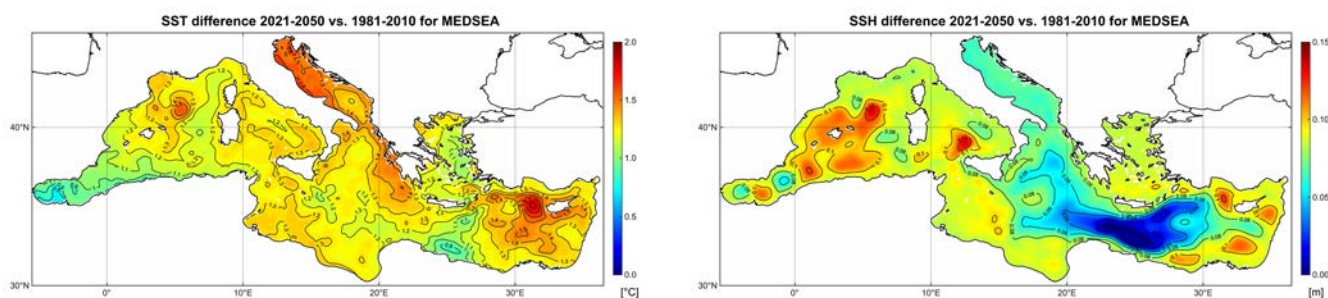


Figura 10. Distribuzione dell'anomalia per la temperatura superficiale (°C, pannello a sinistra) e per il livello del mare (m, pannello a destra), calcolata come differenza tra il periodo 2021-2050 e 1981-2010 usando il modello del CMCC.

il bacino orientale e occidentale del Mediterraneo, che si riflette nei valori attesi per il Mare Adriatico (+6 cm) e il Mar Tirreno (+8 cm). Le differenze maggiori si hanno nelle stagioni primaverile e autunnale, in cui i valori del livello del mare nel Tirreno e nell'Adriatico superano rispettivamente 10 e 8 cm.

Un'analisi di dettaglio delle proiezioni climatiche future per le aree marine della fascia costiera (12 miglia dalla costa), basata sulla suddivisione regionale riportata nella Marine Strategy Framework Directive (MSFD, Directive 2008/56/EC), ha mostrato che tutte le aree costiere italiane saranno caratterizzate da un aumento di temperatura rispetto al periodo di riferimento 1981-2010. Tale aumento

varia da un minimo di 1,3°C nelle zone del Mediterraneo Centrale e Occidentale e nel Mar Ligure ad un massimo di 1,6°C nell'Adriatico Settentrionale e Centrale. L'aumento è pressoché costante durante tutto l'anno mantenendo quindi invariata la stagionalità di ciascuna zona. Analogamente alla temperatura superficiale dell'acqua, l'aumento del livello del mare durante il periodo 2021-2050 per lo scenario RCP8.5 caratterizza tutte le aree costiere. Rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, i valori vanno da un minimo di 7 cm per le tre sottoregioni del bacino Adriatico e nel Mar Ionio, fino ad un massimo di 9 cm nel Mar Tirreno e nel Mediterraneo Centrale e Occidentale.

BOX 3. CLIMA E ZONE COSTIERE: SINTESI DEI RISCHI

Le principali minacce per le zone costiere italiane in conseguenza dell'evoluzione del clima dato dalle proiezioni climatiche riguardano l'alterazione dei servizi ecosistemici svolti dalle zone costiere, quali:

1. Servizi di supporto (ciclo dei nutrienti e produzione primaria)

- Alterazioni dei cicli biogeochimici del mare costiero, indotte da alterazioni fisico-chimiche della struttura e della dinamica dell'ecosistema marino
- Alterazione del servizio "produzione primaria" con conseguente modifica delle risorse disponibili per le attività alieutiche e di acquacoltura e anche dei servizi di regolazione del clima

2. Servizio di fornitura per attività alieutiche e di acquacoltura

- Scomparsa di specie commercialmente importanti e conseguente danno economico
- Variazioni qualitative e quantitative delle popolazioni ittiche commercialmente importanti, causate dalle ingressioni di specie maggiormente adattate ad alte temperature
- Maggior incidenza di patologie
- Aumento del livello del mare e conflitti d'interesse con la creazione di strutture di difesa costiera

3. Servizi di regolazione

- Modificazioni nell'attività di depurazione delle acque costiere a causa di variazioni della struttura chimico, fisica ed ecologica dell'ecosistema marino costiero
- Aumento dei rischi di erosione e inondazione in seguito a variazioni nel livello del mare e nelle condizioni estreme dello stato del mare

4. Servizi culturali

- Perdita di valore estetico dovuto ad alterazioni dell'equilibrio ambientale o a misure di adattamento/contenimento, con danno alle attività economiche legate al turismo.
- I cambiamenti climatici stanno interessando in modo crescente l'ambiente marino, sia costiero che di mare aperto, determinando un aumento delle temperature superficiali e del livello del mare, oltre che dell'acidificazione delle acque marine e dell'erosione costiera. Tali cambiamenti necessitano di una particolare attenzione data l'importanza strategica, ambientale, economica e sociale delle nostre coste.
- Le conseguenze indotte dai cambiamenti climatici potranno avere un impatto sulla fornitura dei cosiddetti "beni e servizi ecosistemici" costieri che sostengono sistemi socioeconomici attraverso la fornitura di cibo (attraverso pesca e/o acquacoltura) e servizi di regolazione del clima (es. l'assorbimento/rilascio e la redistribuzione del calore e dei gas atmosferici, sequestro e rilascio di CO₂ in atmosfera).



2 Il rischio aggregato per l'Italia

Tutto il territorio. La capacità di adattamento e la resilienza in Italia sono temi che interessano l'intero territorio italiano da Nord a Sud. Anche se più ricche e sviluppate le regioni del Nord non sono immuni agli impatti dei cambiamenti climatici, né sono più preparate per affrontarli.

Numeri già in crescita. Per quanto riguarda gli eventi estremi, la probabilità del rischio è aumentata in Italia del 9% negli ultimi vent'anni.

Locale, regionale, nazionale. Gli indici compositi vanno applicati a diverse scale di governance. Questo consentirebbe di far fronte alla perdita di informazioni dei livelli amministrativi minori che possono portare a politiche di adattamento non ottimali.

Più opzioni per conoscere il rischio. Testare un ampio ventaglio di opzioni metodologiche (analisi di sensitività) aiuta a ridurre l'incertezza associata agli indici di rischio.

Ricerca avanzata per risultati più raffinati. Gli indici di estremi climatici (CEI) mostrano una notevole discrepanza nei risultati, che dovrebbe essere maggiormente approfondita con ulteriore ricerca scientifica avanzata.

Rischio climatico e resilienza ai disastri

I concetti di rischio e di resilienza sono stati interpretati in diversi modi, riflettendo l'evoluzione di una varietà di discipline scientifiche nel campo dell'adattamento ai cambiamenti climatici (CCA - Climate Change Adaptation) e della riduzione del rischio di disastri (DRR - Disaster Risk Reduction). Secondo l'IPCC, il rischio di impatti climatici deriva dall'interazione di pericoli legati al clima (compresi eventi e tendenze pericolosi) con la vulnerabilità e l'esposizione dei sistemi umani e naturali (IPCC, 2014). I cambiamenti nel sistema climatico e nei processi socioeconomici, inclusi l'adattamento e la mitigazione, sono driver di pericolo, esposizione e vulnerabilità. Secondo il recente Report di Valutazione Globale (Global Assessment Report, UNDRR, 2019), la crescita della resilienza richiede, sulla base di valutazioni, "pianificazio-

ne e preparazione per evitare o minimizzare la creazione del rischio e ridurre lo stock esistente di rischio, sviluppo della capacità di ripristinare le funzioni in modo rapido ed efficace a fronte di interruzioni e capacità di adattarsi e cambiare dopo uno shock".

Per l'Italia, sono state effettuate valutazioni di rischio climatico e resilienza basate sull'analisi di diversi indicatori al fine di produrre elementi a supporto delle decisioni politiche. In questo capitolo verranno descritte le valutazioni basate su indicatori per la misurazione rispettivamente di tre Indici: l'Indice di Rischio Climatico (CRI), l'Indice Climatico Attuariale (ACI) e l'Indice di Resilienza ai Disastri (DRI) (Figura 11) (si veda Box 4 per approfondimenti).



Climate Risk Index (CRI)

Misura il rischio climatico (pericolo, esposizione e sensibilità) e la capacità di adattamento.



Actuaries Climate Index (ACI)

Misura gli eventi meteorologici estremi e i rischi associati.



Disaster Resilience Index (DRI)

Misura la resilienza ai disastri per supportare l'implementazione del Quadro di Riferimento di Sendai (SFDRR) in Europa.

Figura 11. Definizioni sintetiche dei tre indici utilizzati.

BOX 4. INDICI PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO CLIMATICO E DELLA RESILIENZA

Indice di Rischio Climatico (CRI)

Per l'Italia (Mysiak *et al.*, 2018) supporta le autorità nazionali nella progettazione di politiche e piani di adattamento, guidando la fase iniziale di formulazione dei problemi (identificazione delle principali minacce, problematiche e vulnerabilità), nonché una rapida selezione e definizione delle priorità delle aree (regioni o province) con una maggiore propensione ad essere influenzate negativamente da condizioni climatiche estreme. L'indice integra: (i) i pericoli amplificati dai cambiamenti climatici approssimati da anomalie di indici climatici estremi selezionati; (ii) una combinazione di esposizione e sensibilità che include set di dati e indicatori ad alta risoluzione su capitali economici, sociali, naturali e costruiti o fabbricati; (iii) la capacità di adattamento, che comprende indicatori istituzionali, tecnologici ed economici.

I parametri di pericolo, esposizione e sensibilità sono inizialmente integrati nella valutazione dei potenziali impatti per quattro categorie di capitale - fabbricato, naturale, sociale, finanziario ed economico - e quindi combinati con la capacità di adattamento per stimare l'indice di rischio finale.

Indice Climatico Attuariale (ACI)

Sviluppato precedentemente dalle organizzazioni attuariali del Nord America (come il Canadian Institute of Actuaries, la Society of Actuaries, la Casualty Actuarial Society, e l'American Academy of Actuaries) è un indicatore composto da sei componenti meteorologiche (American Academy of Actuaries, 2019):

1. Frequenza delle temperature superiori al 90° percentile (T90; eventi caldi);
2. Frequenza delle temperature inferiori al 10° percentile (T90; eventi freddi);
3. Precipitazione massima mensile in 5 giorni consecutivi (P; eventi di forte pioggia);
4. Massimo numero di giorni secchi consecutivi all'anno (D; periodi secchi);
5. Frequenza della velocità del vento superiore al 90° percentile (W; eventi di forte vento);
6. Cambiamenti del livello del mare (S).

L'ACI fu ideato per aiutare gli attuari americani e canadesi, i decisori politici pubblici, e il grande pubblico a conoscere meglio gli eventi meteorologici estremi e i rischi ad essi associati. Ogni componente è standardizzata in base ad un periodo di riferimento in modo da avere media pari a zero e deviazione standard pari a uno, ed è poi sommata per formare l'ACI.

Indice completo di Resilienza ai Disastri (DRI)

È stato sviluppato su scala comunale per l'Italia per informare l'implementazione delle indicazioni fornite dalle Nazioni Unite per la riduzione del rischio da disastri e per la loro prevenzione contenute nel Quadro di Riferimento di Sendai per la riduzione del rischio di disastri (SFDRR) in Europa (Marzi *et al.*, 2019 - Figura 12). Tale indice è basato su una vasta ricerca sull'indice di vulnerabilità sociale (SVI) dell'Istituto Nazionale di Statistica italiano (ISTAT) (ISTAT, 2018). Esso riconcilia i vari indicatori utilizzati per descrivere la resilienza, compresi gli attributi innovativi basati sulla riduzione della distanza, come la distanza di viaggio verso i centri di servizio, che caratterizzano le politiche contemporanee di sviluppo rurale e tengono conto di vari aspetti delle aree svantaggiate. La struttura per lo sviluppo del DRI è ispirata a Cutter *et al.* (2014, 2008) and Parsons *et al.* (2016) ed è incentrata sulla capacità di adattamento e imitazione come principali dimensioni della resilienza. L'indice comprende otto componenti: l'accesso ai servizi, la coesione, le risorse economiche, le condizioni abitative, l'istruzione, lo stato ambientale e le istituzioni. La scelta dei 26 indicatori è stata guidata da un'ampia revisione della letteratura.

Il Sendai Framework for Disaster Risk Reduction dello United Nations Office for Disaster Risk Reduction, UNDRR, definisce sette obiettivi globali da raggiungere entro il 2030

Ridurre la mortalità globale relativa a disastri

Ridurre il numero di persone colpite da disastri

Ridurre le perdite economiche dirette reattive ai disastri in rapporto al PIL

Ridurre i danni provocati da disastri a infrastrutture importanti e l'interruzione di servizi di base

Aumentare il numero di Paesi dotati di strategie locali e nazionali per la riduzione del rischio da disastri

Favorire la collaborazione internazionale con Paesi in via di sviluppo attraverso azioni adeguate e sostenibili per integrare le loro iniziative nazionali

Migliorare la disponibilità e l'accessibilità di sistemi di allerta precoce (*early warning*) e di informazione sul rischio da disastri

Figura 12. Gli obiettivi definiti dal Sendai Framework for Disaster Risk Reduction.

Tabella 3. Descrizione degli indici di estremi climatici (CEI) utilizzati nello studio

Unità di misura

R95P	Precipitazione nei giorni molto piovosi	Somma annuale delle precipitazioni giornaliere superiori al 95° percentile		mm
RX1DAY	Massima precipitazione in 1 giorno	Valore massimo mensile di precipitazione in 1 giorno (annuale)		mm
R20MM	Numero di giorni con precipitazione molto intensa	Numero di giorni nell'anno con precipitazione ≥ 20 mm		Giorni
RJJA	Totale precipitazione nei mesi estivi	Somma delle precipitazioni giornaliere in riferimento al periodo giugno-agosto		mm
PRCPTOT	Totale annuale di precipitazione	Totale annuale di precipitazione nei giorni piovosi (con precipitazione ≥ 1 mm)		mm
CDD	Giorni consecutivi senza pioggia	Numero massimo di giorni consecutivi con precipitazione giornaliera < 1 mm		Giorni
HWM-TX95P	Magnitudo delle onde di calore (HWM) come definito dal 95 ° percentile della temperatura massima	Temperatura media di tutte le singole ondate di calore annuali		°C
CWM-ECF	Magnitudo delle onde fredde (CWM) come definito dal fattore di freddo in eccesso (ECF)	Temperatura media di tutte le singole ondate di freddo annuali		°C
SPI-3	Indice di precipitazione standardizzato a 3 mesi (SPI), utilizziamo solo i valori severi (S) [-1,99; -1,5] ed estremamente grave (E) [-2,99; -2,5] eventi di siccità	Una misura di siccità definita come deficit di precipitazione su una scala di 3 mesi		Nessuna
SPI-12	SPI a 12 mesi, utilizziamo solo gli eventi di siccità gravi (S) ed estremamente gravi (E) come in SPI-3	Una misura di siccità specificata come deficit di precipitazione su una scala di 12 mesi		Nessuna

Indice di Rischio Climatico

Per valutare i pericoli legati ai cambiamenti climatici attraverso l'Indice di Rischio Climatico (CRI), sono state analizzate simulazioni climatiche derivate dai modelli regionali EURO-CORDEX (Jacob *et al.*, 2014) per due periodi futuri (2021-2050 e 2071-2100), nell'ambito dello scenario ad emissioni contenute (RCP4.5), con riferimento al periodo 1961-1990. È stata impiegata un'ampia gamma di Indice di Estremi Climatici (CEI) descritti nella Tabella 3. I CEI sono calcolati a livello di griglia per i domini spaziali e temporali scelti usando le variabili meteorologiche giornaliere simulate a 2m:

- temperatura massima dell'aria;
- temperatura minima dell'aria;
- precipitazioni.

La valutazione combinata di esposizione e sensibilità si basa su indicatori che rappresentano il grado in cui gli elementi a rischio sono esposti e influenzati negativamente dai pericoli climatici. Gli elementi a rischio sono stati selezionati secondo una pratica consolidata nelle valutazioni della sostenibilità (Goodwin, 2003) e sono:

- **Capitale manifatturiero** - si riferisce a beni materiali o immobilizzazioni che supportano il processo di produzione (ad esempio macchine ed edifici industriali);
- **Capitale naturale** - comprende le risorse naturali e i processi (rinnovabili e non rinnovabili) che producono beni e servizi per il benessere delle persone;
- **Capitale sociale** - è riferito ai fattori che costituiscono il capitale umano a livello individuale (salute, conoscenza, abilità) e collettivo (istituzionale) (ad es. famiglie, comunità, organizzazioni, scuole);
- **Capitale economico** - comprende i beni e i servizi di proprietà.

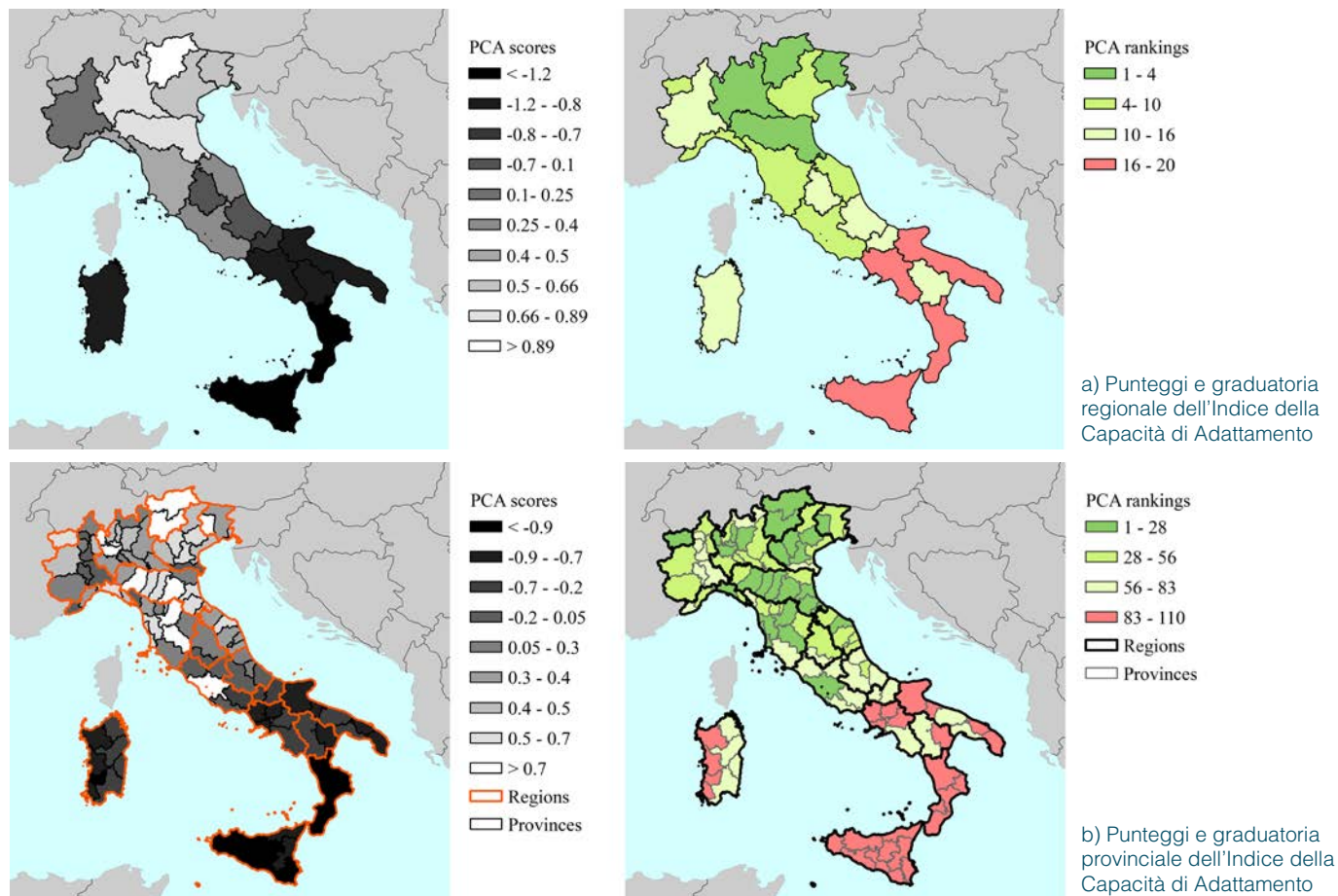


Figura 13. Risultati aggregati dell'Indice della Capacità di Adattamento.

L'indice della Capacità di Adattamento (AC) è stato calcolato secondo l'analisi descritta da (Marzi *et al.*, 2018), combinando un insieme di dieci indicatori relativi alle risorse economiche disponibili (come il PIL provinciale, il tasso di popolazione a rischio povertà e disoccupazione), alle infrastrutture, a istruzione e tecnologia (ad es. accesso ad Internet, livello di istruzione, domande di brevetto), e alla qualità delle istituzioni. I dati usati nella costruzione dell'indice sono stati ottenuti principalmente dalla banca dati degli indicatori territoriali per le politiche di sviluppo (ISTAT, 2015b), parte del settore territoriale delle informazioni statistiche sulle politiche strutturali del 2010-2014.

Ulteriori dati sono stati ottenuti da ESPON (2012), Eurostat (2017), e ISTAT (2017). La Figura 13 mostra i risultati dell'indice (punteggi e classifica) su scala regionale e provinciale. I risultati hanno mostrato, come previsto, che i punteggi sono più alti nelle regioni settentrionali. Tuttavia, è stato dimostrato che elevati punteggi regionali dell'indice sono spesso guidati dalle prestazioni superiori alla media dei capoluoghi regionali e che le prestazioni inferiori alla media a livello provinciale sono nascoste nelle valutazioni regionali dell'indice.

I risultati finali dell'analisi dell'Indice di Rischio Climatico (CRI) permettono la pianificazione provinciale dell'adattamento climatico e della valutazione delle relative esigenze. La metodologia usata è abbastanza flessibile per poter produrre una classificazione relativa al rischio climatico delle unità statistiche e amministrative a livello provinciale. Il confronto tra gli indici di rischio climatico e capacità di adattamento (Figura 14) può servire come parametro per definire le priorità di pianificazione e distribuzione dei fondi ai fini di una valutazione del rischio climatico più dettagliata. Le unità provinciali che sono soggette ad un rischio elevato e hanno una bassa capacità di adattamento dovrebbero essere sostenute in un percorso verso la riduzione del rischio dai decisori politici pubblici o da enti privati e organizzazioni comunitarie. L'analisi ha messo in discussione la visione stereotipata del divario Sud-Nord, radicata nelle persistenti disuguaglianze economiche e sociali. Risulta, infatti, che il Nord non è immune agli impatti dei cambiamenti né è meglio preparato per affrontarli. Al contrario, parte delle province meridionali potrebbero essere premiate dall'aumento della loro capacità di ripresa e della capacità di adattarsi ai cambiamenti climatici. A livello regionale, la metodologia può essere sfruttata anche per aggiornare la valutazione dei cambiamenti climatici e informare la politica di coesione europea (ESPON, 2011).

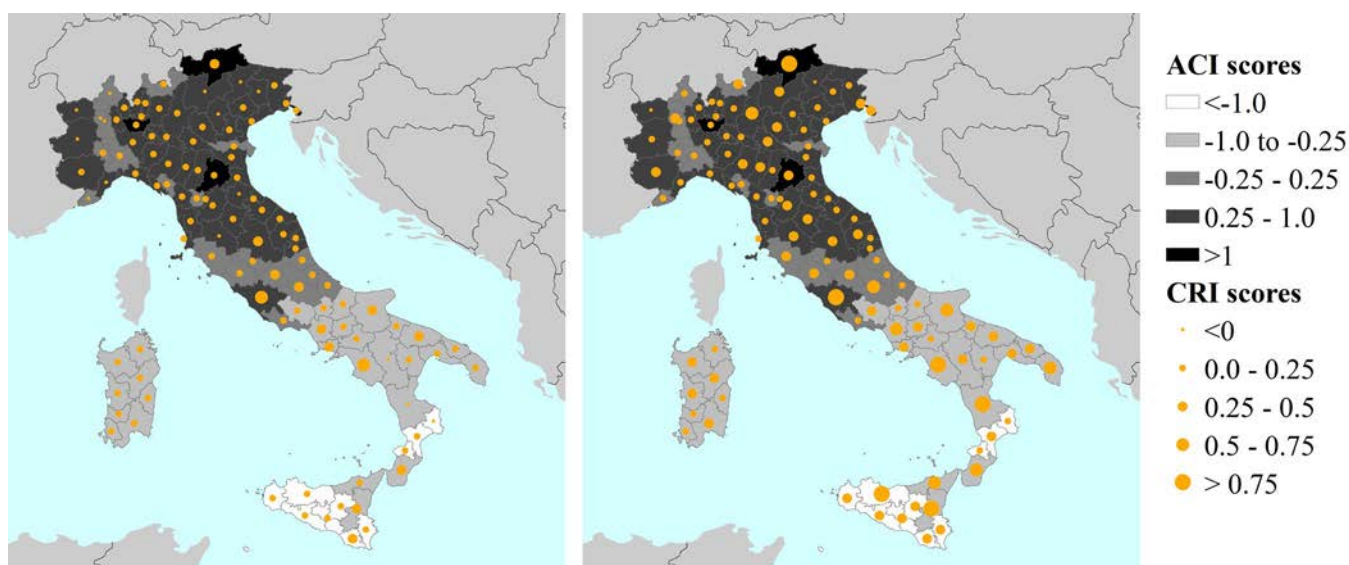


Figura 14. Risultati aggregati dell'indice di Rischio Climatico (CRI) e dell'indice di Capacità di Adattamento (AC). CRI MED (a sinistra) e CRI MAX (destra) per il periodo 2021–2050 (Mysiak *et al.*, 2018).

Indice Climatico Attuariale

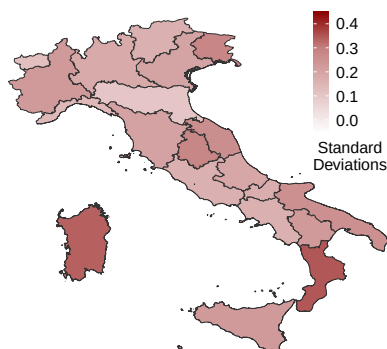
L'Indice Climatico Attuariale (ACI), che come spiegato nel Box 4 è stato sviluppato per conoscere meglio gli eventi meteorologici estremi e i rischi ad essi associati, è stato adattato dal CMCC attraverso una ricostruzione su base oraria delle variabili meteorologiche derivate dal database ERA5 (Weedon *et al.*, 2014) del Centro europeo per le previsioni meteorologiche a medio termine (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - ECMWF).

In quest'analisi preliminare, il livello del mare non è stato considerato. Rispetto agli indici di temperatura e precipitazioni introdotti nella prima parte del rapporto, ACI considera gli eventi di forte vento e le variazioni del livello del mare per il futuro che possono causare gravi danni e perdite soprattutto nelle zone costiere (Vousdoukas *et*

al., 2018). Nel caso di temperature estreme, anziché valori giornalieri massimi e minimi, l'ACI tiene conto della frequenza delle temperature al di sotto e al di sopra del 10° e del 90° percentile.

In Italia, nel periodo 1999-2018 per l'intero Paese, l'ACI è aumentato di 0,21 deviazioni standard rispetto ai 20 anni precedenti (1979-1998) (Figura 15). Ciò rappresenta un aumento della probabilità del rischio meteorologico estremo di circa il 9%, trascurando i pericoli associati al livello del mare. Se si considera anche il livello del mare, si prevede un cambiamento più elevato a causa dell'alta concentrazione di coste e regioni a bassa quota in Italia. Sono in corso analisi per calcolare un secondo indice sui cambiamenti climatici chiamato Indice di Rischio Climatico Attuariale (ACRI - Actuaries Climate Risk Index), che accoppia ACI ai danni (ad es. perdite economiche, mortalità e infortuni).

a) Actuaries Climate Index – Regional
Difference: 1999–2018 – 1979–1998



Actuaries Climate Index – Italy

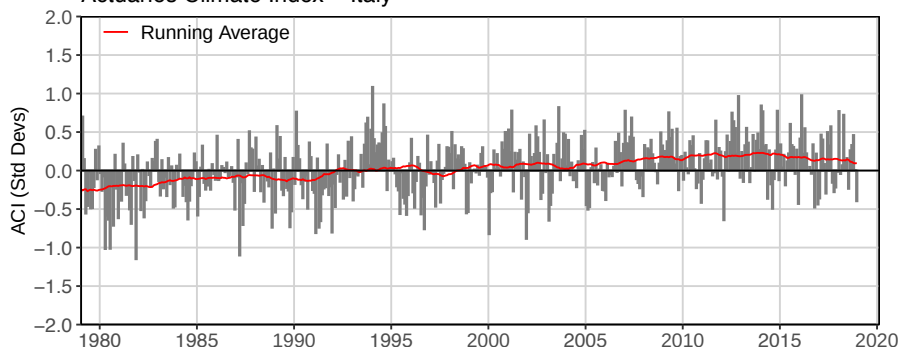


Figura 15. L'ACI utilizza i dati WFDE5 per l'Italia in deviazioni standard: a) differenza tra il periodo 1999-2018 e il periodo 1979-1998; e b) serie storiche e per il periodo 1979-2018. Nel riquadro b) le barre verticali rappresentano l'ACI per l'anno dato e la linea rossa rappresenta la media corrente a 5 anni.

Indice completo di Resilienza ai Disastri

L'analisi relativa al calcolo dell'Indice di Resilienza ai Disastri (DRI) è stata effettuata raccogliendo da più fonti i dati relativi alle componenti che lo costituiscono (quali accesso ai servizi, coesione, risorse economiche, condizioni abitative, istruzione, stato ambientale e istituzioni), in particolare il censimento nazionale italiano del 2011, il database del censimento delle 8 miglia (ISTAT, 2015a), il Dipartimento delle Finanze (Dipartimento delle Finanze, 2018), il database dell'Agenzia Entrate (Agenzia Entrate, 2013), la rete Natura 2000 (EEA, 2017a, 2017b) e il programma Copernicus dell'UE (Copernicus, 2018).

I risultati del DRI su scala comunale sono mostrati in Figura 16 insieme all'Indice di Vulnerabilità Sociale (SVI) pubblicato da ISTAT.

In generale, i risultati del DRI indicano che le aree settentrionali e centrali dell'Italia hanno punteggi di resilienza più elevati rispetto ai risultati SVI. Tuttavia, è presente un numero considerevole di comuni che riscontra condizio-

ni peggiori quando si passa dalla vulnerabilità sociale alle misurazioni della resilienza (osservate principalmente nelle regioni settentrionali e in Sardegna). Tali differenze tra SVI e DRI sono principalmente radicate nelle variazioni dell'accessibilità e degli attributi basati sulla riduzione della distanza.

È difficile validare le misure di resilienza per eventi rari in merito ai quali specifiche comunità e condizioni di disastro non sono mai esattamente le stesse. Tuttavia, è possibile esplorare la sensibilità dei punteggi degli indici di resilienza rispetto alle scelte e alle ipotesi metodologiche e comunicare chiaramente le implicazioni di tali scelte. I risultati dell'analisi di sensibilità mostrano che l'accoppiamento delle variazioni delle scelte metodologiche in ogni fase (metodi di normalizzazione e aggregazione e diverse configurazioni di peso) porta a risultati che possono essere significativamente diversi, un risultato che sottolinea l'importanza che i decisori politici prestino molta attenzione alla metodologia utilizzata per sviluppare tali indici. A seconda del tipo di applicazione delle politiche e dell'interesse dei decisori, sono disponibili diverse soluzioni.

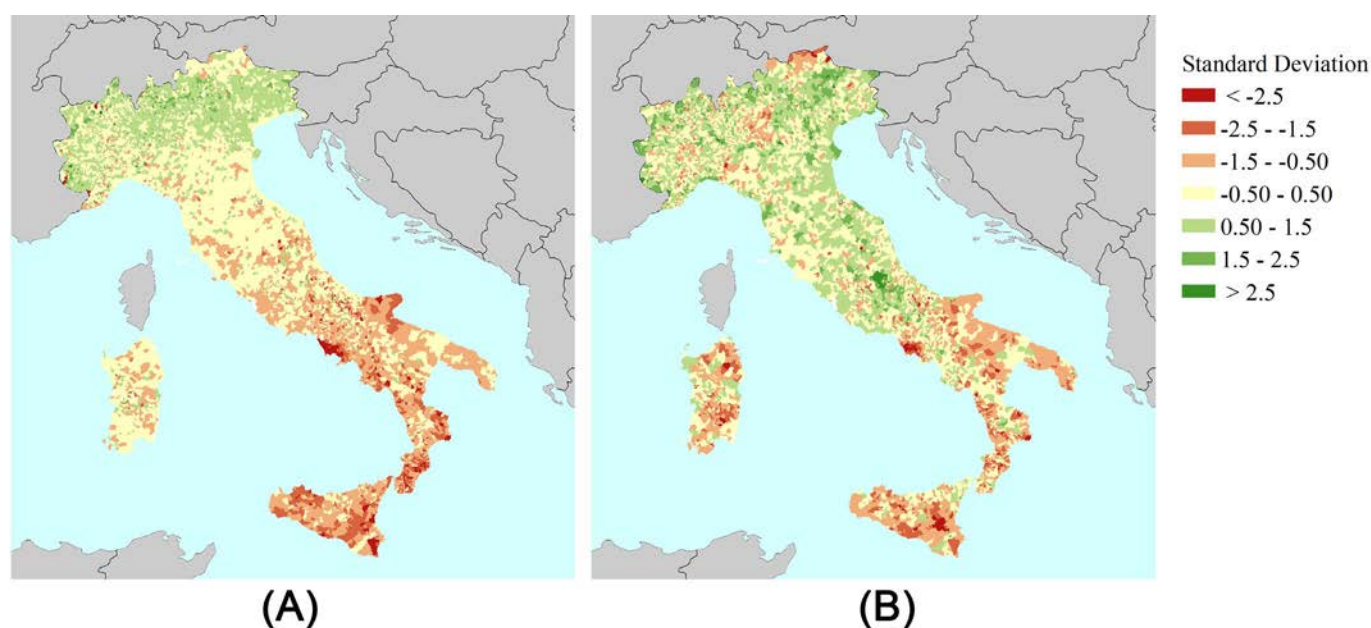


Figura 16. Confronto tra l'Indice di Vulnerabilità Sociale (SVI) di ISTAT (A) e l'Indice di Resilienza ai Disastri (DRI) (B). I risultati SVI sono invertiti (cioè segnale opposto) per facilitare il confronto visivo tra i risultati: in rosso i valori di elevata vulnerabilità sociale e bassa resilienza ai disastri, in verde, viceversa, bassa vulnerabilità sociale ed elevata resilienza.



Figura 17. Il rischio da cambiamenti climatici, come definito e illustrato nel Quinto Rapporto di Valutazione dell'IPCC (IPCC, 2014), deriva dall'interazione di vulnerabilità, l'esposizione e pericolosità. Elaborazione grafica: Fondazione CMCC.



3 | Analisi del rischio atteso per l'Italia: settori chiave

Ambiente urbano. L'ambiente urbano è caratterizzato dalla presenza di superfici impermeabili, ricoperte da cemento e asfalto, e da poche aree di carattere naturale (suolo e vegetazione). In seguito all'incremento nelle temperature medie ed estreme, alla maggiore frequenza (e durata) delle ondate di calore e di eventi di precipitazione intensa, bambini, anziani, disabili e persone più fragili saranno coloro che subiranno maggiori ripercussioni. Sono attesi, infatti, incrementi di mortalità per cardiopatie ischemiche, ictus, nefropatie e disturbi metabolici da stress termico e un incremento delle malattie respiratorie dovuto al legame tra i fenomeni legati all'innalzamento delle temperature in ambiente urbano (isole di calore) e concentrazioni di ozono (O_3) e polveri sottili (PM_{10}).

Rischio geo-idrologico. Molti fattori antropici hanno contribuito negli anni in maniera determinante all'innescare o all'esacerbazione del rischio geo-idrologico in Italia. I cambiamenti climatici inducono un aumento di frequenza e intensità di alcuni eventi atmosferici che regolano l'occorrenza dei fenomeni di dissesto. Dall'analisi combinata di questi fattori e degli scenari climatici si evince che è atteso l'aggravarsi di una situazione di per sé molto complessa. L'innalzamento della temperatura e l'aumento di fenomeni di precipitazione localizzati nello spazio hanno un ruolo importante nell'esacerbare il rischio. Nel primo caso, lo scioglimento di neve, ghiaccio e permafrost indica che le aree maggiormente interessate da variazioni in magnitudo e stagionalità dei fenomeni di dissesto sono le zone alpine e appenniniche. Nel secondo caso, precipitazioni intense contribuiscono a un ulteriore aumento del rischio idraulico per piccoli bacini e del rischio associato a fenomeni franosi superficiali nelle aree con suoli con maggior permeabilità.

Risorse idriche. La sicurezza idrica è un requisito fondamentale per una crescita equa e sostenibile, per la competitività delle imprese e la tutela dell'ambiente naturale. Gran parte degli impatti dei cambiamenti climatici sulle risorse idriche prospettano una riduzione della quantità della risorsa idrica rinnovabile, sia superficiale che sotterranea, in quasi tutte le zone semi-aride con conseguenti aumenti dei rischi che ne derivano per lo sviluppo sostenibile del territorio. I cambiamenti climatici attesi (periodi prolungati di siccità, eventi estremi e cambiamenti nel regime delle precipitazioni, riduzione della portata degli afflussi), presentano rischi per la qualità dell'acqua e per la sua disponibilità. Nel primo caso, i rischi principali per la qualità dell'acqua riguardano fenomeni di eutrofizzazione, variazione nei contenuti di ossigeno, apporto di nutrienti e contaminanti da agricoltura e zootecnia. I rischi più rilevanti per la disponibilità idrica sono legati a elevata competizione settoriale (uso civile, agricolo, industriale, ambientale, produzione energetica) che si inasprisce nella stagione calda quando le risorse sono più scarse e la domanda aumenta (ad esempio per fabbisogno agricolo e turismo). In una simile situazione l'inadeguatezza dell'infrastruttura (perdite di acqua fino al 50%) rappresenta una evidente vulnerabilità e un fattore importante nella gestione del rischio.

Agricoltura e allevamento. I sistemi agricoli possono andare incontro ad una aumentata variabilità delle produzioni con una tendenza alla riduzione delle rese per molte specie coltivate, accompagnata da una probabile diminuzione delle caratteristiche qualitative dei prodotti, con risposte tuttavia fortemente differenziate a seconda delle aree geografiche e delle specificità colturali. In termini generali, si può evidenziare una condizione di rischio più elevato per le aree del Sud Italia, con potenziale perdita di vocazionalità per la produzione di prodotti tradizionali e maggiori costi di produzione per le produzioni irrigue a causa di una possibile minore disponibilità idrica. Impatti negativi sono attesi anche per il settore dell'allevamento, con impatti sia diretti che indiretti sugli animali allevati e conseguenti ripercussioni sulla qualità e la quantità delle produzioni.

Incendi. Gli incendi boschivi rappresentano una delle principali minacce per il comparto forestale italiano. L'aumento delle temperature e la riduzione delle precipitazioni medie annue, e allo stesso tempo la maggiore frequenza di eventi meteorologici estremi quali le ondate di calore o la prolungata siccità, interagiscono con gli effetti dell'abbandono delle aree coltivate, dei pascoli e di quelle che un tempo erano foreste gestite, del forte esodo verso le città e le aree costiere, e delle attività di monitoraggio, prevenzione e lotta attiva sempre più efficienti. Si prevede che i cambiamenti climatici esacerberanno ulteriormente specifiche componenti del rischio di incendi, con conseguenti impatti su persone, beni ed ecosistemi esposti nelle aree più vulnerabili. Sono attesi incrementi della pericolosità di incendio, spostamento altitudinale delle zone vulnerabili, allungamento della stagione degli incendi e aumento delle giornate con pericolosità estrema che, a loro volta, si potranno tradurre in un aumento delle superfici percorse con conseguente incremento nelle emissioni di gas a effetto serra e particolato, con impatti quindi sulla salute umana e sul ciclo del carbonio.

Ambiente urbano: stress termico e precipitazione intensa

I centri urbani sono dei veri e propri “hot-spot” per i cambiamenti climatici, ossia aree geografiche caratterizzate da vulnerabilità ed esposizione molto elevate. Se nelle città, infatti, vive oltre il 56% della popolazione italiana e se si tratta di luoghi in cui si erogano servizi sociali e culturali essenziali, è proprio qui che i cambiamenti climatici condensano i loro effetti su una elevata percentuale di soggetti e attività sensibili. Questi effetti, inoltre, sono accentuati da un’elevata eterogeneità inter e intra specifica, determinata da caratteristiche topografiche, morfologiche, demografiche e socioeconomiche. Spesso la vulnerabilità delle realtà urbane e gli effetti delle misure atte a ridurla si originano da e/o hanno ricadute su aree più vaste o diverse rispetto al centro urbano stesso, andando a costituire interconnessioni complesse. Infine, per comprendere quanto le città siano determinanti in tema di cambiamenti climatici, è utile ricordare che se, da una parte sono particolarmente vulnerabili ed esposte agli effetti di un clima che cambia, dall’altra sono anche tra i principali responsabili delle emissioni di gas serra, contribuendo in modo sostanziale alle cause del problema. In quanto ambienti artificiali, la propensione al rischio e la resilienza dei centri urbani sono determinate tanto da fattori climatici quanto da quelli non climatici, socioeconomici e istituzionali.

Sono molti e molto diversi i modi in cui i cambiamenti climatici interagiscono con gli ambienti urbani e sono correlati a situazioni di rischio. Tra questi, i principali fattori climatici sono elencati nella tabella 4, in cui sono associati anche agli eventi indotti e ai relativi impatti. Nelle pagine che seguono si esaminano in particolare lo stress termico e la precipitazione intensa, che risultano essere due tra i fattori che permettono di caratterizzare meglio il contesto urbano italiano.

Stress termico in ambiente urbano

Gli ultimi decenni in Italia sono stati caratterizzati da aumenti significativi delle temperature medie e delle onda-

te di calore (Gaudioso *et al.*, 2014). Otto dei dieci anni più caldi della serie storica sono stati, infatti, registrati dal 2011 in poi, con anomalie comprese tra +1,26 °C e +1,71°C, mentre il 2019 è risultato il terzo anno più caldo dall’inizio delle osservazioni (+1,56°C rispetto al trentennio 1961-1990) (ISPRA, 2020). Si prevede che questo andamento vada rafforzandosi, con un incremento nelle temperature medie ed estreme e nella frequenza e durata delle ondate di calore, sia per lo scenario con emissioni contenute (RCP4.5) che in quello con emissioni elevate (RCP8.5), comportando quindi notevoli impatti per i centri urbani. L’ambiente urbano, infatti, è caratterizzato dalla presenza di superfici impermeabili, ricoperte da cemento e asfalto, e da poche aree di carattere naturale (suolo e vegetazione). Queste superfici assorbono la radiazione solare (diretta e riflessa) accumulando calore durante il giorno e liberandolo durante la notte. Questo calore si aggiunge a quello prodotto dai processi di combustione dei veicoli, dall’industria e dagli impianti di climatizzazione, rendendo le città più “calde” rispetto all’ambiente rurale circostante.

È infatti noto che i centri urbani sperimentano temperature più elevate anche di 5-10°C rispetto alle aree rurali circostanti. Noto come “isola di calore”, questo fenomeno presenta temperature notturne particolarmente elevate per effetto del rilascio differito del calore accumulato durante il giorno da parte degli edifici. Inoltre, la presenza di “canyon” in molti agglomerati urbani riduce i moti convettivi e la ventilazione, limitando la dispersione del calore rispetto alle aree naturali più aperte. Ne derivano temperature percepite più elevate.

A causa di questo fenomeno, in ambiente urbano si riscontra un aumento di danni sulla salute dovuti allo stress termico, come incrementi di mortalità per cardiopatie ischemiche, ictus, nefropatie e disturbi metabolici. Periodi estesi di caldo estremo, solitamente definiti come ondate di calore, sono stati collegate con una sostanziale crescita di mortalità, ed eventi specifici sono stati registrati come disastri per la salute pubblica (Gasparrini & Armstrong, 2011). L’Italia è uno dei Paesi europei maggiormente colpiti dal-

Tabella 4. Città e cambiamenti climatici: i principali fattori climatici ed impatti che influiscono sull'ambiente urbano e sui servizi erogati (Elaborata a partire da Giordano *et al.*, 2013)

CLIMA	EVENTO INDOTTO	IMPATTI
Eventi estremi di precipitazione	Alluvioni urbane	• Distruzione di case, luoghi di lavoro e infrastrutture • Degradazione del verde pubblico • Perdita di biodiversità • Perdita del patrimonio immobiliare e delle comunità private • Perdita di posti di lavoro e fonti di reddito • Danni al patrimonio culturale • Incertezza nella pianificazione dell'uso del suolo a lungo termine e nella progettazione di infrastrutture • Interruzione servizi pubblici e non • Costi per l'installazione di sistemi e incremento dei costi assicurativi • Costi per periodi improduttivi
Eventi estremi di temperatura	Ondate di calore esacerbate da effetti di isola di calore urbana e diminuzione qualità dell'aria	• Problemi di salute pubblica • Danni al patrimonio culturale • Aumento domanda energetica degli edifici • Aumento del fenomeno dell'isola di calore • Aumento di aree geografiche e stagionalità per la diffusione di malattie trasmesse da vettori • Aumento rischio incendi • Perdita di biodiversità • Ridotta capacità di lavorare, ridotta produttività, ritardate consegne di prodotti e servizi ai clienti • Riduzione nell'uso degli spazi pubblici e quindi della vita sociale • Ostacoli nella fornitura di beni e nel trasporto di pendolari per danni a infrastrutture (strade/binari deformati dalle alte temperature) • Problemi di raffreddamento delle centrali energetiche e mancata erogazione di energia • Costi per periodi improduttivi
Aumento delle temperature medie	Riscaldamento area urbana	• Anticipo e aumento della durata di periodi di pollinazione • Problemi di salute pubblica
Riduzione media delle precipitazioni	Scarsità/qualità idrica	• Competizione per uso dell'acqua con altri settori (agricoltura e turismo) • Diminuzione fornitura acqua • Limitato accesso all'acqua potabile • Aumentato rischio di contaminazione delle acque • Aumento rischio incendi
Aumento del livello del mare	Aumento erosione costiera e inondazioni	• Perdita di patrimonio privato di proprietà della comunità • Perdita di porzioni di spiaggia • Modifiche alle zone umide per livello del mare, erosione costiera e intrusione di acqua salata • Perdita di biodiversità • Perdita del patrimonio culturale

le ondate di calore e, ogni estate, si osserva un quantificabile incremento nella mortalità e morbidità associata al manifestarsi di tali fenomeni (Michelozzi *et al.*, 2010). A causa dell'“effetto di isola urbana di calore”, le persone che vivono in città hanno un rischio più elevato di morte quando le temperature e l'umidità sono elevate rispetto a chi vive in zone suburbane o rurali. L'esposizione a condizioni di disagio termico è infatti generalmente maggiore negli agglomerati urbani, in conseguenza delle caratteristiche dei materiali utilizzati (Sanchez Martinez *et al.*, 2016). Gli studi sulla mortalità collegata alle ondate di calore hanno ampiamente dimostrato che le categorie di persone più vulnerabili sono gli anziani (età superiore a 75 anni) (Conti *et al.*, 2004). A questi si aggiungono i bambini e i pazienti con patologie già in atto, ma anche persone con reddito pro capite basso, che vivono in condizioni economiche svantaggiate, e lavoratori che svolgono le loro attività all'aperto e sono quindi esposti per tempi prolungati ad alte temperature.

In considerazione delle analisi degli scenari climatici e dell'atteso aumento della temperatura media (si veda Capitolo 1 di questo report), la situazione appena descritta potrà acuirsi sia in termini di valori medi che per quello che riguarda gli estremi. Allo stesso modo potranno diventare più severi gli impatti associati a tale aumento.

In questo contesto, alcune città hanno iniziato a prendere in considerazione strumenti per la creazione di un modello di verifica dell'impatto dei cambiamenti climatici sulla salute umana (Box 5). Esiste inoltre un forte legame tra incremento di temperatura e inquinamento atmosferico. L'ambiente urbano è infatti caratterizzato da elevate emissioni sia di gas ad effetto serra (CO_2 , CH_4) ma anche di sostanze quali SO_2 , NO_2 , CO , benzene (C_6H_6), particolato fine (PM_{10} e $\text{PM}_{2.5}$) e ozono troposferico (O_3) che compromettono la qualità dell'aria (IPCC, 2013). Questi composti non solo derivano dall'immissione diretta per traffico veicolare, attività industriale e termoregolazione degli edifici, ma si formano anche in atmosfera. L'energia solare, infatti, agisce sui legami fotochimici dei loro precursori presenti

in atmosfera, innescando reazioni secondarie che portano alla formazione di questi agenti inquinanti. Un incremento dell'irraggiamento solare e delle temperature, ma anche modifiche nel regime dei venti, delle precipitazioni e alterazioni nell'altezza dello strato di rimescolamento degli inquinanti, determinano un incremento nelle concentrazioni di questi composti (EEA, 2013) (IPCC, 2013).

Secondo il rapporto dell'ISPRA (2018), nel 2017, 35 aree urbane sulle 106 per le quali erano disponibili dati hanno superato il valore limite giornaliero del PM_{10} . Nello stesso anno, si legge nel Rapporto, il valore limite annuale per l' NO_2 è stato superato in almeno una delle stazioni di monitoraggio di 25 aree urbane; si sono poi registrati più di 25 giorni di superamento dell'obiettivo a lungo termine per l'ozono in 66 aree urbane su 91 per le quali erano disponibili dati e il superamento del valore limite annuale per il $\text{PM}_{2.5}$ ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) in 13 aree urbane su 84. Nei primi nove mesi del 2018, in 7 aree urbane sono stati registrati oltre 35 giorni di superamento della soglia di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per il PM_{10} e si sono infine registrati più di 25 giorni di superamento dell'obiettivo a lungo termine per l'ozono in 53 aree urbane su 89.

Le categorie di persone più colpite risultano, anche in questo caso, anziani e bambini, persone cioè già affette da malattie cardiache o polmonari spesso non diagnosticate (i primi) o con apparati respiratori non ancora completamente sviluppati (i secondi). In concomitanza del verificarsi di ondate di calore si registra, infatti, un incremento dei ricoveri ospedalieri per malattie cardiovascolari e ictus così come un incremento delle malattie respiratorie dovuto al legame tra concentrazioni di O_3 e PM_{10} e temperatura (Gaudioso *et al.*, 2014). Le condizioni climatiche influiscono anche sull'entità di reazioni allergiche, in virtù della sinergia tra variabili climatiche, inquinanti atmosferici e i processi di produzione e sulle caratteristiche degli aero-allergeni (D'Amato *et al.*, 2010). In merito alle ondate di calore è utile sottolineare che nel 2019, come negli ultimi decenni, “l'indice rappresentativo delle ondate di calore (Warm Spell Duration Index, WSDI) è stato superiore alla media del periodo 1961-1990, facendo registrare circa 29 giorni

in più nell'anno di caldo molto intenso. Questo dato, associato alle proiezioni sui decenni a venire, fa prevedere un significativo aumento delle ondate di calore, soprattutto per gli scenari che non includono consistenti interventi di contenimento del riscaldamento globale (ISPRA, 2020).

Eventi di precipitazione intensa in ambiente urbano

L'Italia evidenzia una tendenza generalizzata su tutto il territorio nazionale all'aumento in frequenza ed intensità dei fenomeni di precipitazione estrema non solo in scenari di elevato cambiamento climatico come l'RCP8.5, ma anche nello scenario con cambiamento più contenuto RCP4.5.

BOX 5. ONDATE DI CALORE E SALUTE UMANA: UNA VALUTAZIONE PER IL COMUNE DI PRATO

L'amministrazione comunale avverte gli impatti dei cambiamenti climatici come una fonte di rischio per la salute pubblica e studia un modo per far entrare l'analisi di questi temi dentro le procedure ordinarie di pianificazione dell'amministrazione. È questa una delle innovazioni più importanti del progetto che ha visto come promotore il Comune di Prato e si è concentrato sulla valutazione degli impatti delle ondate di calore sulla salute umana, su come questi siano indotti dai cambiamenti climatici e sul ruolo delle scelte di pianificazione urbanistica per definire una strategia di adattamento compatibile ed integrata con il quadro strategico del Piano Operativo. Si tratta di uno studio che, fra i primi a livello nazionale, è improntato a un approccio di revisione ed aggiornamento delle procedure ordinarie di pianificazione (VAS, VIA, formazione dei piani e agende urbane, ecc.) per ottenere il recepimento degli obiettivi climatici nei processi di formazione di programmi e piani e tradurli in azioni specifiche di adattamento¹. L'analisi quantitativa della pericolosità, è effettuata attraverso la valutazione dell'evoluzione dell'indice climatico *Humidex* che descrive il grado di malessere termico percepito combinando gli effetti della temperatura e dell'umidità atmosferica. La valutazione quantitativa degli effetti dei cambiamenti climatici si basa sul cambiamento nella frequenza di valori associati ad ondate di calore per l'indice *Humidex*. Le variazioni attese di questo indicatore sono state effettuate con il modello climatico regionale COSMO-CLM nella configurazione ottimizzata sull'Italia (Bucchignani *et al.*, 2016; Zollo *et al.*, 2016). La pericolosità, intesa come la frequenza relativa annuale di occorrenza di *Humidex* giornaliero, riconducibile alla categoria 5 (IH>45), ovvero a condizioni di disagio termico assimilabili a ondate di calore², è riportata nella Figura 18.

L'analisi ha evidenziato un incremento della pericolosità dovuta ai cambiamenti climatici, che determina una maggiore frequenza futura di condizioni di disagio termico diurno e notturno rispetto alle condizioni attuali, e un incremento dei decessi stimati in presenza di condizioni di disagio termico, al netto di variazioni negli scenari demografici e dell'implementazione di misure di mitigazione del disagio termico.

Ulteriori elaborazioni, effettuate nell'ambito del progetto H2020 CLARA introducendo l'incertezza nella valutazione della pericolosità grazie all'utilizzo dell'*ensemble* di dati climatici del programma EURO-CORDEX, evidenziano un'evoluzione dell'indicatore *Humidex* con un trend di crescita statisticamente significativo con entrambi gli scenari considerati.

I risultati preliminari di evoluzione futura del rischio sono esemplificativi di quanto il valore di pericolosità microclimatica, cioè riferita a un clima di una circoscritta area geografica, possa variare al netto di interventi significativi di mitigazione. Ad esempio, l'aumento della percentuale di aree verdi rispondenti a specifiche caratteristiche dimensionali, geometriche e vegetazionali all'interno delle Unità Territoriali Omogenee Elementari più critiche in termini di livelli di rischio può mitigare l'impatto delle variazioni di temperatura sulla salute della popolazione. Inversamente, le stime di rischio potrebbero rivelarsi non cautelative (ovverosia, sottostimanti l'effettivo rischio futuro) in quanto si riferiscono agli scenari di esposizione attuali. Gli scenari di esposizione futuri potrebbero essere peggiorativi, sia nel senso di un aumento della popolazione, sia nel senso del progressivo invecchiamento della popolazione (incremento della frazione di popolazione di età superiore ai 65 anni). L'analisi ha evidenziato che le maggiori incertezze nelle stime di rischio sono dovute principalmente alle incertezze nella parametrizzazione della vulnerabilità climatica della popolazione (dovuta alla generalità delle cause di decesso intrinseca ai dati sanitari) e alle incertezze nei dati demografici di esposizione.

Tuttavia, le tendenze all'incremento del rischio rivelate nello studio sono significative dal punto di vista statistico, a conferma della rilevanza degli effetti dei cambiamenti climatici sulla salute umana.

¹ Per approfondimenti su tale metodologia si veda la relazione tecnica (Versione 1.0 del 30/06/2017) "Analisi quantitativa di rischio per la salute della popolazione "over 65" in presenza di ondate di calore e valutazione degli effetti dei cambiamenti climatici". Si veda anche "Servizi climatici: clima, salute e pianificazione urbanistica. Il caso Prato". www.cmcc.it/it/articolo/climate-health-and-urban-planning-the-case-study-of-the-municipality-of-prato-2

² In letteratura sono disponibili diversi sistemi di classificazione della severità climatica basati sull'*Humidex*. Nel presente studio, si è fatto riferimento alla classificazione utilizzata dal Governo canadese (Masterson & Richardson, 1979).

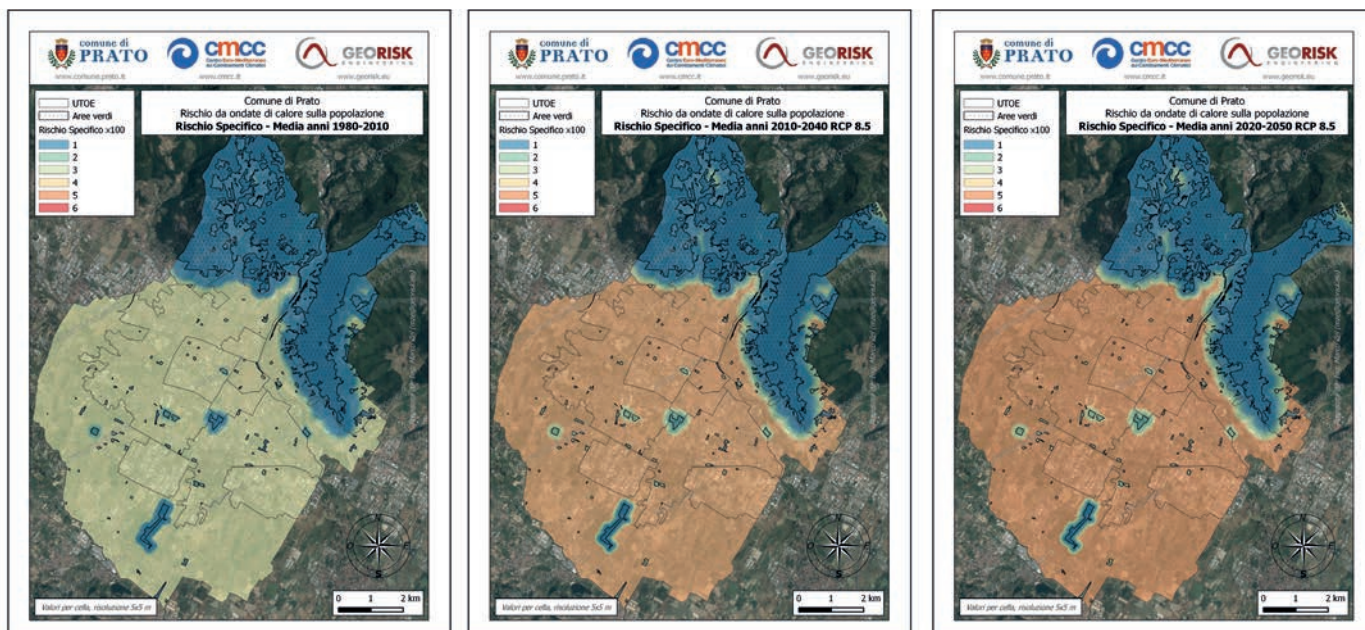


Figura 18. Evoluzione del rischio specifico dal periodo di riferimento al periodo 2021-2050, scenario RCP4.5. Il rischio specifico quantifica il rischio per unità di esposizione, cioè la probabilità annuale di morte per ogni individuo in condizioni di malessere termico (presenza di ondata di calore).

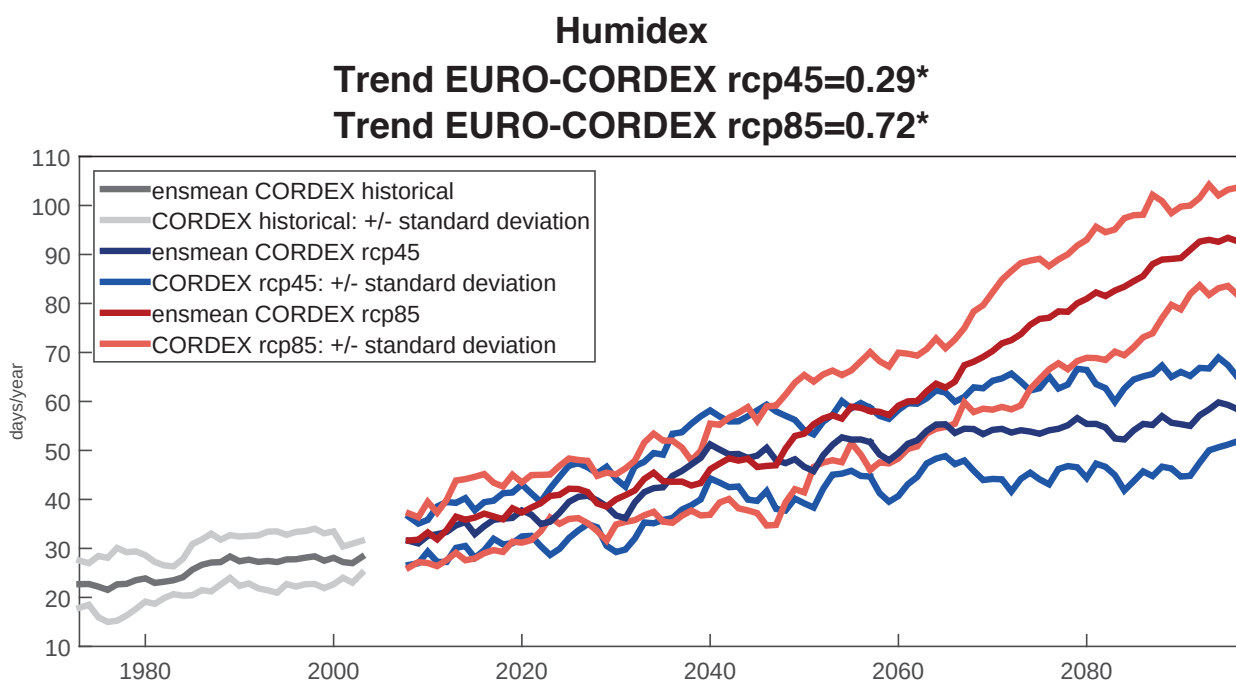


Figura 19. Proiezioni dell'indicatore climatico *Humidex* sulla città di Prato utilizzando i dati dall'*ensemble* EURO-CORDEX con gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 a valle dell'applicazione di una tecnica di correzione dell'errore sistematico dei modelli climatici. Nel grafico, il periodo storico viene riportato in colore grigio mentre i dati relativi allo scenario RCP4.5 sono riportati nella scala dei colori del blu e quelli relativi allo scenario RCP8.5 nella scala dei colori del rosso. La linea spessa scura (blu per lo scenario RCP4.5 e rosso per lo scenario RCP8.5) indica la proiezione climatica media (*ensemble mean*), calcolata facendo la media dei valori di tutte le simulazioni considerate; le aree racchiuse tra questo valore medio e le curve più spesse con colore più chiaro (blu brillante per lo scenario RCP4.5 e rosso chiaro per lo scenario RCP8.5) rappresentano un intervallo pari ad una deviazione standard attorno alla media dei valori simulati da tutti i modelli e forniscono una misura dell'incertezza relativa alle proiezioni considerando i diversi modelli climatici regionali.

I rischi principali derivanti da eventi di precipitazione intensa in città sono principalmente due: esondazione di corpi idrici superficiali in bacini idrici a monte delle aree urbane, e inondazioni nelle aree urbane per una insufficiente capacità dei sistemi di drenaggio di smaltire grandi quantità di acqua in poco tempo. In queste condizioni, l'acqua in eccesso viene principalmente smaltita per deflusso superficiale creando accumuli e corsi di acqua nelle strade, nelle zone e infrastrutture più basse come sottopassi, metrò, etc., e nei piani inferiori degli edifici.

Emblematici sono gli esempi di Roma dove, tra il 2010 e il 2019, si sono verificati 18 eventi di allagamenti a seguito di piogge intense, o quello di Milano, con 23 eventi totali nello stesso periodo, di cui 17 relativi a esondazioni dei fiumi Seveso e Lambro. Il 91% dei comuni italiani risulta comunque a rischio per frane e alluvioni; mentre oltre 7 milioni di persone vivono o lavorano in aree definite a "maggiore pericolosità" (Legambiente, 2019).

Non solo eventi di precipitazione intensa, ma anche le caratteristiche geografiche e idrogeologiche del territorio, soprattutto forma e ubicazione delle città, rendono questi ambienti particolarmente esposti a questi impatti negativi. Durante l'ultimo secolo, a causa di un processo di urbanizzazione scarsamente controllato, le città sono state costruite in aree alluvionali e nei fondi valle di fiumi e torrenti, contribuendo al sostanziale incremento del rischio idrogeologico in tutte le aree urbane (Amanti *et al.*, 2014). Anche il fenomeno del progressivo incremento del consumo di suolo, con la trasformazione di suoli permeabili (tipici delle superfici naturali) in superfici impermeabili quali strade, parcheggi, piazze ed edifici, argini e letti dei corsi d'acqua cementificati, ha aumentato frequenza e intensità delle onde di piena nei centri abitati. Preoccupa il fatto che, nonostante il progressivo trend di decrescita demografica, il consumo di suolo in Italia continui a crescere. Dalle cifre pubblicate dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) (Munafò, 2019) emerge infatti che il trend di aumento del consumo del suolo prosegue negli anni più recenti, con un consumo annuale di 51 km² nel 2017 e di 53,5 km² nell'anno prece-

dente (Munafò, 2019). Dal 2012 al 2018 sono stati consumati 315 km² (ISPRA, 2020). Di queste superfici rese artificiali, circa metà riguarda le aree urbane, soprattutto le aree periferiche (32%) ma anche le aree verdi nei centri urbani (15%) (ISPRA, 2020). Oltre ad avere un impatto negativo sul clima, anche le aree impermeabilizzate fuori dai centri impattano negativamente gli insediamenti in quanto velocizzano e aumentano le ondate di piena nei bacini idrici, favorendo i fenomeni di inondazione fluviale di aree urbane.

Gli insediamenti urbani, inoltre, sono caratterizzati da una elevata eterogeneità per forma e disposizione di zone residenziali, servizi, aree produttive e infrastrutture. Ciò influenza anche la vulnerabilità delle diverse aree interne alla città nei confronti di questi eventi. Un ulteriore elemento di differenziazione del grado con cui le aree urbane interne sono colpite è rappresentato, infine, dalle caratteristiche della popolazione residente. La presenza di persone anziane, persone con problemi di deambulazione, e/o famiglie povere che vivono più frequentemente in aree più degradate e prone al rischio, aumenta la sensibilità delle diverse aree ai danni che si possono verificare.

Un'interessante analisi esplorativa in questa direzione viene fornita sempre dal rapporto SNPA del 2019 (Munafò, 2019). Lo studio evidenzia che, in generale, i quartieri che nelle 14 aree metropolitane italiane considerate, rientrano nelle classi di "disagio sociale" maggiori classificate cioè in "vulnerabili" o "di degrado", sono caratterizzati da valori medi di densità di consumo di suolo (espressa in m²/ha) significativamente più elevati di quelli delle aree di benessere relativo. Si può quindi identificare una relazione biunivoca tra disagio sociale/povertà, maggiore esposizione al rischio climatico da eventi estremi e uso non oculato del suolo.

Il rischio geo-idrologico

I fenomeni di dissesto geologico, idrologico e idraulico sono diffusi e frequenti in Italia dove provocano gravi danni e costituiscono una seria minaccia per la popolazione.

Infatti, nel corso degli ultimi anni, in differenti occasioni si sono registrati danni ingenti e vittime. A tal proposito, il dataset globale EM-DAT (www.emdat.be) stima, per il territorio italiano dall'inizio del nuovo millennio, l'occorrenza di circa trentacinque eventi di differente intensità che hanno causato nel complesso più di duecento vittime e duecento feriti con danni economici per diverse decine di milioni di euro.

Per comprendere l'entità di tale rischio in Italia, risulta sicuramente rilevante l'impatto dovuto all'antropizzazione. Infatti, l'elevata espansione urbana che ha interessato l'Italia dal dopoguerra ad oggi, l'occupazione delle aree periferiche e la conseguente artificializzazione della rete idrografica, lo sviluppo di insediamenti, strutture e infrastrutture in aree collinari e montane, hanno portato all'occupazione di territori fragili, alla diminuzione degli spazi a disposizione di fiumi e torrenti, alla concentrazione delle onde di piena (picchi più elevati, ampiezze minori e tempi di traslazione minori) ed alla riduzione della permeabilità dei suoli, esponendo ad un rischio elevato una parte consistente della popolazione. La qualità, a volte lontana dall'ottimale, degli insediamenti, delle costruzioni e, localmente, anche delle opere di difesa, ha contribuito ad aumentare la vulnerabilità e i livelli di rischio.

Sebbene, quindi, le peculiarità del territorio italiano (geomorfologia, meteorologia e climatologia) siano fondamentali nell'originare tali fenomeni, diversi fattori antropici hanno contribuito in maniera determinante all'innescare o all'esacerbazione delle loro conseguenze.

Per questo motivo, i potenziali incrementi indotti dai cambiamenti climatici sulla frequenza e intensità di alcune tipologie di eventi atmosferici (ad esempio, piogge di breve durata ed elevata intensità) che regolano l'occor-

renza dei fenomeni di dissesto è atteso possano aggravare una situazione già di per sé complessa. Sicuramente i cambiamenti climatici avranno l'effetto di modificare in un senso o in un altro la condizione attuale del rischio che, in alcuni casi, è già molto elevata.

Attualmente sussistono diversi fattori che rendono complessa ed incerta la stima della variazione di occorrenza e magnitudo dei fenomeni di dissesto, quali ad esempio la quantità e la qualità delle serie storiche di osservazioni, limiti dal punto di vista della risoluzione spaziale e temporale dei modelli climatici che rappresentano l'input per i modelli idrologici, idraulici e di stabilità dei pendii, un'adeguata conoscenza spaziale e temporale delle variazioni nell'uso e nella copertura del suolo e dei livelli di antropizzazione). Tuttavia, vista la rilevanza e la diffusione del problema del dissesto geo-idrologico sull'intero territorio nazionale, la definizione delle azioni di adattamento e dei contesti prioritari su cui operare per mitigare gli effetti di tali fenomeni risulta essere attualmente essenziale e non più prorogabile.

A causa delle limitazioni sopra descritte, risulta molto complesso valutare l'effetto dei cambiamenti climatici sull'evoluzione del rischio geologico, idrologico e idraulico; tuttavia, essendo l'Italia un'area fortemente soggetta a questo rischio (Figura 20), un notevole numero di ricerche e progetti ha tentato sia a livello nazionale che europeo, specie negli ultimi anni, di comprendere come l'evoluzione del clima possa influenzare anche l'evoluzione di questo rischio e, quindi, suggerire delle misure di adattamento e mitigazione dell'impatto.

Tali studi hanno evidenziato come l'impatto dei cambiamenti climatici sul rischio geologico, idrologico ed idraulico è dovuto essenzialmente ai cambiamenti delle temperature e del regime delle precipitazioni che si verificano con modalità fortemente variabili nello spazio e nel tempo, e sono influenzati da condizioni naturali e antropiche locali.

La comunità scientifica ascrive un importante ruolo nell'esacerbare il rischio geo-idrologico all'aumento di

temperatura, con conseguente effetto sullo scioglimento della neve, del ghiaccio e del permafrost. Tali variazioni degli andamenti di temperatura sono determinabili con maggior accordo ed affidabilità (specie per quanto attiene i valori medi) con i modelli climatici e sono state estensivamente studiate dalla letteratura specializzata, alla quale si rimanda per approfondimenti (IPCC, 2013).

L'analisi dei cambiamenti del regime delle precipitazioni è più complessa, in quanto questi si verificano con spiccata eterogeneità spaziale. Per questo motivo, risulta necessario basarsi su una conoscenza dettagliata del contesto locale da diversi punti di vista. Ad esempio, affinché le azioni di adattamento siano efficaci ed efficienti, esse devono necessariamente basarsi sull'interpretazione dei cambiamenti dei regimi pluviometrici su una scala locale. Pertanto è necessario un continuo monitoraggio di tali regimi che deve affiancarsi ad un aggiornamento delle conoscenze nell'analizzare e processare tali dati anche integrando diverse fonti di dati. Inoltre, risulta fondamentale lo sviluppo di scenari climatici ad altissima risoluzione sia dal punto di vista spaziale che temporale (con elevata predicibilità almeno sulla scala oraria).

Per questo scopo la letteratura scientifica propone due strumenti di indagine principali: l'analisi di serie storiche delle precipitazioni, e l'analisi mediante modelli climatici ad alta risoluzione.

I dati disponibili sull'Italia in merito alle precipitazioni suggeriscono che le condizioni di rischio geologico, idrologico e idraulico risultino esacerbate in conseguenza di (i) un aumento del numero degli eventi di precipitazione estrema (caratteristica attesa dagli studi di cambiamento climatico) e (ii) una crescente urbanizzazione del territorio che ha portato, da un lato, a un incremento dei deflussi e ad una riduzione della capacità di smaltimento da parte degli alvei (tombamenti, riduzione dell'estensione delle aree golenali, ecc.), dall'altro lato, a un aumento dell'esposizione al rischio.

Gli eventi estremi di precipitazione sembrano essere aumentati in tutta Italia, in accordo quindi ad un'analisi

sull'aumento in frequenza di eventi estremi di pioggia estesa a tutto l'emisfero Nord (Montanari e Papalexiou, 2016). Accanto a questo andamento ve ne è un secondo, riscontrato grazie all'analisi eseguita su lunghe serie storiche giornaliere, che evidenzia invece una diminuzione della quantità di precipitazione totale sull'anno specie per l'area meridionale (Brunetti, 2004; Brunetti *et al.*, 2000).

Questo comportamento è più evidente nell'area settentrionale della penisola. Per l'Italia meridionale, dove la diminuzione del numero di giorni piovosi è più sensibile, non si notano significative variazioni negli eventi più intensi. Tuttavia, tale analisi si basa su un numero ridotto di stazioni e, come già menzionato, vista la complessità del territorio italiano in termini di regime pluviometrico, la possibilità di avere un quadro dettagliato e aggiornato è una condizione indispensabile alla corretta e approfondita valutazione del rischio. Risulta quindi di fondamentale importanza migliorare tale conoscenza grazie alla messa a sistema di informazioni più estese.

Inoltre, va sottolineato che, nelle aree dove è atteso un incremento di intensità dei fenomeni di precipitazione, cresce il rischio idraulico per i bacini di modesta estensione (che in caso di precipitazione intensa esondano prima di bacini più grandi), mentre aumenta il rischio di frane superficiali per le zone il cui suolo è caratterizzato da maggiore permeabilità.

Poiché uno degli effetti attesi dei cambiamenti climatici è l'incremento del numero di eventi di precipitazione altamente localizzati nello spazio e nel tempo, risulta fondamentale in questo contesto dotarsi di una rete di monitoraggio in situ con la disponibilità di dati di precipitazione sulla scala sub oraria, così come dell'integrazione di quest'ultima con la rete radar nazionale e con i dati/prodotti satellitari che negli ultimi anni hanno avuto grande sviluppo.

Maggiore consenso della comunità scientifica, sulla base delle variazioni attese per la temperatura, vi è sull'asserzione che i fenomeni di dissesto che potrebbe-

ro essere interessati dalle maggiori variazioni in magnitudo e stagionalità risultano associati alle dinamiche di fusione nivale, che interesserebbero quindi soprattutto l'area Alpina ed Appenninica.

Particolarmente complesso in tale ambito è lo studio dell'evoluzione del rischio legato alle frane. Questo principalmente per due motivi. Il primo consiste nel fatto che il rischio non è noto allo stesso livello conoscitivo e per tutte le diverse tipologie di frana (grandi, piccole, superficiali, profonde) su tutto il territorio nazionale. In secondo luogo, è ormai noto che gli effetti dei cambiamenti climatici e ambientali attesi sono molto diversi, e anche contrastanti, per diverse tipologie di dissesto (Comegna *et al.*, 2013; Rianna *et al.* 2014; Paranunzio *et al.*, 2016; Gariano e Guzzetti, 2016).

Quello che emerge dalle analisi scientifiche è che i dissesti profondi e lenti tenderanno a rallentare la loro attività, mentre ci si attende che aumenti la frequenza degli eventi di frana superficiali e veloci. Questo dato indica che è da attendersi un cambiamento nella tipologia e nella distribuzione del rischio rispetto a quello attuale (Gariano e Guzzetti 2016).

I risultati di questi studi suggeriscono la necessità di una strategia di adattamento efficace ed efficiente che si basi sulla combinazione di azioni di mitigazione (intesa, in campo idrologico, come riduzione delle portate fluviali al colmo e, in campo geologico, ridisegno delle opere di difesa per le diverse tipologie di dissesto) e di adattamento (finalizzato all'incremento della resilienza del sistema sociale).

In particolare, nella pianificazione delle azioni di adattamento ai cambiamenti climatici occorre valutare con attenzione il fattore "tempo". Lo sviluppo sociale, seppur positivo, ha un impatto sempre più significativo sull'ambiente e sulla società stessa. Questo influisce sui cambiamenti del clima e del territorio che si stanno manifestando a una velocità che non ha precedenti. I fenomeni naturali e sociali che determinano l'evoluzione di detti cambiamenti sono spiccatamente non lineari, e quindi

caratterizzati da effetti soglia e punti di non ritorno. Sebbene i sistemi ambientali siano per loro natura in grado di compensare perturbazioni esogene, la velocità alla quale i cambiamenti si stanno verificando può limitare, o addirittura inibire, i processi di compensazione. Tale evidenza richiede uno sviluppo rapido delle azioni di adattamento. Quindi, per la mitigazione del rischio geologico, idrologico ed idraulico, è opportuno privilegiare le azioni di previsione, prevenzione e gestione dell'emergenza, limitando per quanto possibile le azioni emergenziali e di ripristino a quelle utili per la riduzione progressiva del rischio, e per il ripristino di condizioni generali di sicurezza territoriale. Il miglioramento delle conoscenze attuali sulle dinamiche di cambiamento, in termini di frequenza e magnitudo dell'impatto, con una valutazione accurata anche dell'incertezza - che risulta fondamentale per un'accurata valutazione del rischio a supporto di utenti privati e pubblici - potrebbero essere di particolare rilevanza per affrontare efficacemente il rischio.

Un altro punto importante per il miglioramento della capacità di adattamento rispetto al rischio geo-idrologico, risulta fondamentale mettere a sistema, ed eventualmente ampliare, le reti di monitoraggio al suolo (ad es. per la misura del livello idrometrico e della portata idrica di fiumi e laghi, ma anche relativi ad uso e tipo di suolo). Infine, tra le azioni utili ad affrontare efficacemente il rischio geo-idrologico, va menzionato lo sviluppo di tecniche avanzate per l'individuazione delle aree vulnerabili, per la valutazione di elementi a rischio, popolazione inclusa, oltre alla realizzazione e al miglioramento di opere di difesa adeguate. Iniziative, queste, che, da un lato, possono beneficiare del supporto di dati e conoscenze scientifiche aggiornate, mentre, dall'altro, possono tenere in conto gli studi più recenti e avanzati in merito all'implementazione di *nature based solutions*, soluzioni che si basano sul funzionamento di sistemi naturali.

I cambiamenti climatici, quindi, contribuiscono a modificare le condizioni di rischio rendendo così ancor più rilevanti una serie di azioni che comprendano lo sviluppo di una moderna cultura della prevenzione per favorire la pianificazione e la gestione integrata del territorio e delle

risorse, una mitigazione del rischio coordinata a diverse scale geografiche, temporali e organizzative e, infine, una massiccia consapevolezza a partecipazione attiva della popolazione.

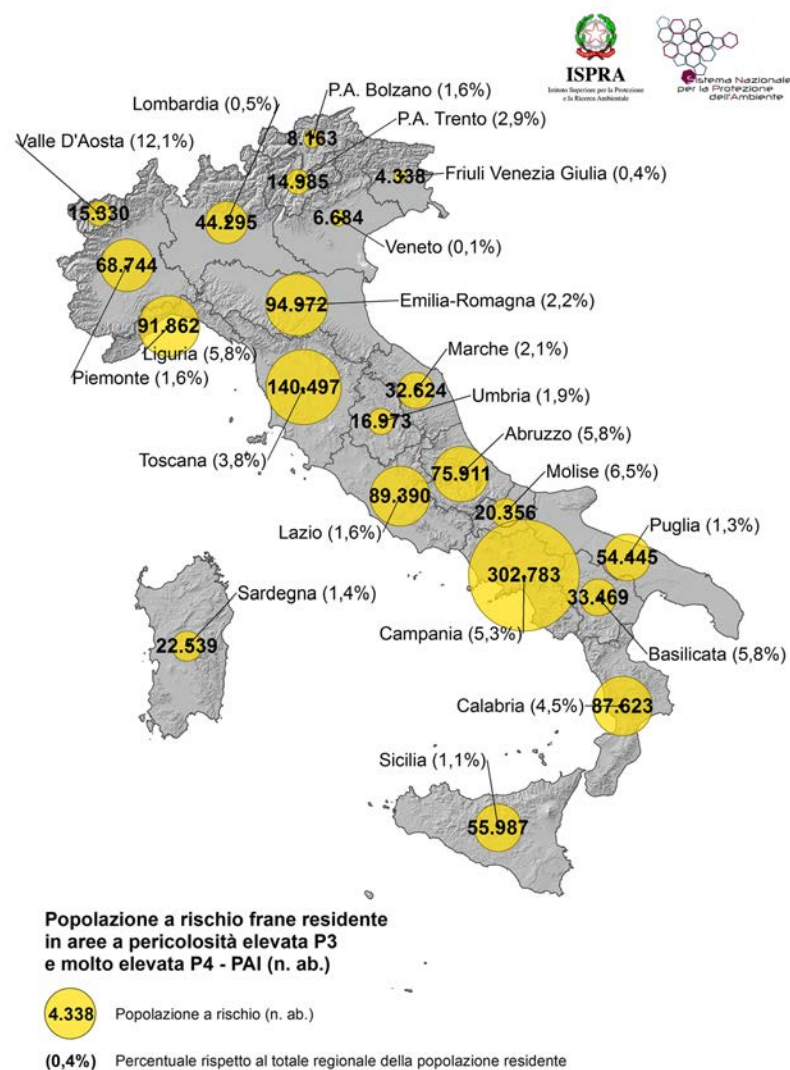


Figura 20. Popolazione a rischio frane residente in aree a pericolosità elevata P3 e molto elevata P4. (ISPRA, 2018) www.isprambiente.gov.it/files2018/area-stampa/comunicati-stampa/pallogrammi_Popolazione_PAI_frane_Rapporto_2018_rid.jpg

Risorse idriche

Per uno sviluppo sostenibile del territorio che garantisca una crescita equa, competitività delle imprese e tutela dell'ambiente naturale, la sicurezza idrica è un requisito fondamentale. L'acqua è al centro di una sfida che è resa più difficile dai cambiamenti climatici, che modificano il ciclo idrologico con forti impatti su qualità e quantità di risorsa idrica e con un conseguente aumento dei rischi ad essa associati. Con un utilizzo medio tra il 30 e il 35% delle sue risorse idriche rinnovabili e con consumi in aumento (WHO, 2018), l'Italia è considerata un Paese con stress idrico medio-alto.

In Italia, secondo le stime dell'Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT, 2015c), l'afflusso meteorico medio annuo nel trentennio 1971-2000 è stato di 241 miliardi di m³ con un lieve aumento della precipitazione media (+1,8%) nell'ultimo decennio (2001-2010). L'evapotraspirazione reale, che secondo ISTAT è pari al 65% delle precipitazioni, gioca un ruolo significativo nelle stime di bilancio idrico. Il territorio italiano è caratterizzato da una fitta rete idrografica, superficiale e sotterranea. I Piani di Gestione dei Bacini Idrografici¹ individuano 8.600 corpi idrici superficiali in Italia, di cui 7.644 fluviali di una lunghezza media pari a 1.236 km; 300 corpi lacustri con un'estensione media di 7 km²; 181 corpi di acqua di transizione e 489 corpi di acque costiere. Il numero di corpi idrici sotterranei ammonta a 733 con una superficie media di 275 km² (EC, 2012). Complessivamente confluiscono a mare 116 miliardi di m³ d'acqua, compresi gli apporti provenienti dai territori confinanti con l'Italia (30 miliardi di m³). In termini di riserva idrica, la ricarica degli acquiferi ammonta a 55 miliardi di m³. L'estensione totale dei ghiacciai è pari a 116 miliardi di m³ (368 km²) e rappresenta il 18% di tutti i ghiacciai presenti nell'intero arco alpino (Smiraglia & Diolaiuti, 2015), nonostante una riduzione superficiale del 30% (159 km²) rispetto a rilevazioni condotte nel periodo 1959-1962. Il volume invasabile autorizzato dei serbatoi di competenza del Registro

delle Grandi Dighe per l'utilizzo antropico della risorsa idrica ammonta a 12,1 miliardi di m³, comprendendo gli sbarramenti che regolano il deflusso dei grandi laghi naturali (ISPRA, 2015). A tali volumi si aggiungono quelli dei piccoli invasi con sbarramenti inferiori o uguali a 15 metri oppure volumi di invaso inferiori o uguali a 1 milione di m³.

Il prelievo di acqua non avviene solo per l'uso civile (ISTAT, 2014b) e agricolo (ISTAT, 2013, 2014a), ma vanno inclusi anche gli usi industriale ed energetico (ISTAT, 2016).

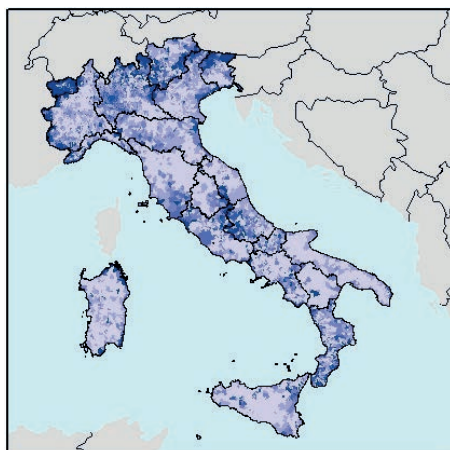
Dall'ultimo rapporto ISTAT sull'utilizzo e la qualità della risorsa idrica in Italia risulta che il prelievo di acqua ad uso potabile è in crescita (+6,9% dal 1999) e ammonta a 9,5 miliardi di m³, pari a 156 m³ annui pro capite, risultando essere il più elevato tra i Paesi europei (ISTAT, 2019). Secondo ISTAT, circa l'85% proviene da acque sotterranee mentre il 15% da acque superficiali. I maggiori prelievi per uso potabile si riscontrano nelle regioni del Nord-ovest e nel Sud Italia. Tuttavia, solamente 8,8 miliardi di m³ (l'80% del volume prelevato) sono immessi nelle reti comunali di distribuzione dell'acqua potabile (Figura 21a) e il volume erogato agli utenti è ulteriormente ridotto dell'11,6% a causa di dispersioni di rete² (ISTAT, 2019), con aree più o meno colpite da questo fenomeno (Figura 21bb). Le perdite percentuali reali ammontano al 38,8% (in aumento rispetto al 2012 in cui arrivavano al 37,4%) e sono dovute non solo alle perdite derivanti dalle rotture nelle condotte, ma anche ai consumi non autorizzati e agli errori di misura³.

Tra gli altri usi della risorsa idrica, si individuano quelli energetico e industriale. Il rapporto ISTAT (ISTAT, 2019) ha stimato l'uso d'acqua per la produzione di energia elettrica e per il raffreddamento degli impianti termoelettrici intorno ai 18,5 miliardi di m³, di cui soltanto l'11,9% proviene da acque interne e il restante dal mare. I processi di produzione manifatturiera invece usano 5,5 mi-

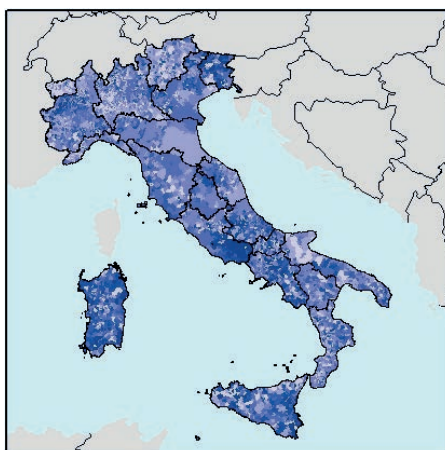
1 Si veda www.direttivaacque.minambiente.it

2 Le dispersioni sono calcolate come differenza percentuale tra i volumi immessi ed erogati. Le dispersioni non derivano esclusivamente dalle perdite dovute alle rotture nelle condotte. Inoltre, sono inclusi anche i consumi non autorizzati e gli errori di misura.

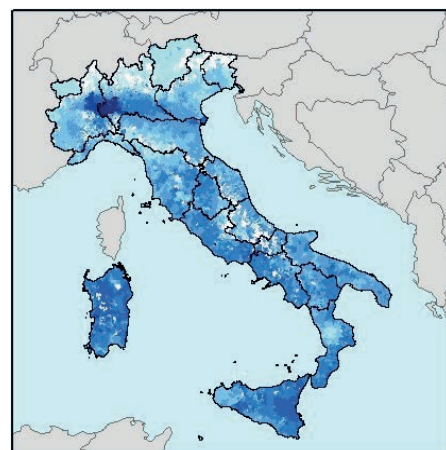
3 L'ISTAT evidenzia che la maggiore diffusione dei contatori, particolarmente all'utenza finale, ha rilevato criticità precedentemente non individuate.



21a: Acqua emessa dalle reti di distribuzione idropotabile nel 2012.



21b: Percentuale delle dispersioni del volume immesso ed emesso dalle reti di distribuzione.



21c: Utilizzo di acque irrigue nell'annata agricola 2009-2010.

Sopra: in litri al giorno pro capite.
Sotto: in % rispetto alla media nazionale.

Sopra: in % rispetto alla media nazionale.
Sotto: in % rispetto alla media nazionale.

Sopra: in m³ per ha irrigato.
Sotto: in % rispetto alla media nazionale.

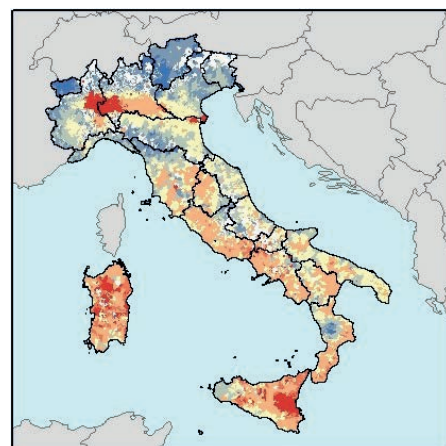
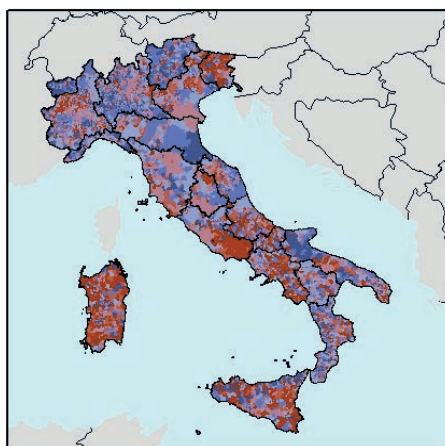
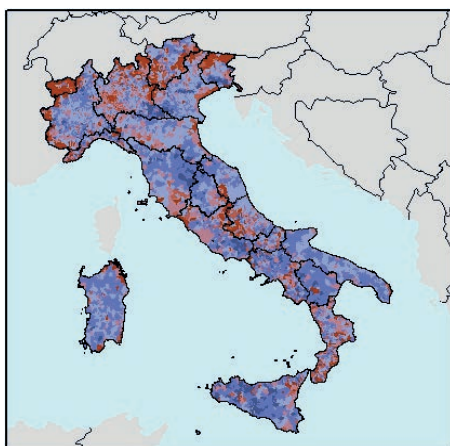


Figura 21. Fonte dei dati: 21a, 21b – ISTAT, Censimento delle acque per uso civile secondo l'ultimo aggiornamento 2012 (ISTAT, 2019); 21c – ISTAT, Censimento generale dell'agricoltura 2010 (ISTAT, 2013, 2014a). Elaborazione dei dati da parte degli autori. (MATTM 2017, da elaborazioni CMCC, disponibile al seguente link: www.minambiente.it/sites/default/files/archivio_immagini/adattamenti_climatici/allegato_2_impatti_e_azioni.pdf)

liardi di m³ con l'impiego di 8,8 litri di acqua per ogni euro di produzione.

L'agricoltura rappresenta l'altro grande settore di utilizzo della risorsa idrica. Secondo il 6° Censimento Generale dell'Agricoltura, l'estensione dell'area agricola irrigata ammonta a 24.800 km², pari a circa il 20% della superficie agricola utilizzata, (ISTAT, 2014a). Nell'annata agricola 2009-2010 i volumi di acqua dedicati all'irrigazione sono stati pari a 11,6 miliardi di m³, per la maggior parte dedicati alla coltura del riso (Figura 21c). Tra il 2012 e il 2013 la superficie irrigata è aumentata del 23,5% sino a raggiungere i 30.000 km² (ISTAT, 2016).

Gli impatti dei cambiamenti climatici sulla quantità della risorsa idrica

Il Quinto Rapporto (AR5) dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2014), l'organismo delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici, ha fornito un quadro sullo stato della conoscenza globale e regionale sui fenomeni collegati all'aumento della temperatura e i possibili impatti sulla disponibilità delle risorse idriche (RI). Secondo gli scenari proposti dall'IPCC per il futuro è attesa una riduzione della quantità della risorsa idrica rinnovabile, sia superficiale che sotterranea, in quasi tutte le zone semi-aride. Al contrario, nelle alte latitudini si prospetta un aumento di disponibilità della risorsa.

Un aspetto ancora incerto in merito alle risorse idriche è rappresentato dall'impatto che avrà la trasformazione della vegetazione, a sua volta influenzata dalle maggiori concentrazioni dei gas serra e dalla temperatura (Jiménez Cisneros *et al.*, 2014).

I cambiamenti climatici modificheranno in modo marcato la variazione del flusso fluviale stagionale. In particolare, la crescente temperatura aumenterà l'evapotraspirazione e innalzerà il limite nevoso ad altitudini e latitudini maggiori e diminuirà le riserve nevose e glaciali. Questo comporterà un aumento del flusso invernale in Nord Europa e nei fiumi montani, e minori portate fluviali estive (EEA, 2018). In particolare, secondo un'analisi effettuata da Forzieri *et al.*, (2014), i cambiamenti climatici avranno un impatto pronunciato sulle portate basse con tempo di ritorno di 20 anni a partire dagli anni 2050 (2041–2070) per poi arrivare negli anni successivi (2080) ad una diminuzione di oltre il 40% di queste portate. Questo risultato deriva da una riduzione della precipitazione e dell'aumento dell'evapotraspirazione in seguito alle temperature più alte. Un'ulteriore diminuzione delle portate (10-15%) è causata dall'aumento dei prelievi antropici, per i quali si ipotizza un incremento tra il 5% e 25% nel Nord e Centro Italia ed una diminuzione nel resto del Paese. L'analisi di Roudier *et al.*, (2016) indica una diminuzione fino ad oltre il 15% di portate basse corrispondenti al tempo di ritorno di 10 anni, anche se si è riscontrata un'ampia discordanza tra i modelli.

La maggior parte delle analisi sugli effetti dei cambiamenti climatici si concentra sui distretti e i bacini idrografici più grandi ed importanti, tra tutti il Bacino Idrografico del Po. Coppola *et al.*, (2014), confrontando lo scenario di medio-lungo termine (2020-2050) con la serie di dati storica (1960-1990) dell'alto bacino del Po, mostrano un anticipo del picco di portata primaverile da maggio ad aprile, a causa dell'accelerato scioglimento della neve. Il deflusso ne risulta in diminuzione per l'intero anno ad eccezione del periodo invernale. La variazione del deflusso invernale è concentrata nella parte settentrionale del bacino del Po, in aumento del 40% nelle zone di alta quota, mentre le parti pianeggianti registrano un aumento del

20%. In primavera il deflusso diminuisce del 20% lungo l'intero corso del fiume Po e arriva al 40% negli estremi settentrionali e meridionali del bacino. Una simile diminuzione della portata (-20%) caratterizza il deflusso estivo. Nello studio di Vezzoli *et al.*, (2015), per i due scenari climatici RCP4.5 (che indica contenute emissioni di CO₂) e RCP8.5 (elevate emissioni), si è stimato che il deflusso medio annuo dell'asta principale del Po diminuisca per i periodi 2041–2070 e 2071–2100, rispetto al periodo di riferimento 1982–2011. Nel medio-lungo periodo (2041–2070) il deflusso si abbassa tra i mesi di maggio e novembre, mentre rimane costante durante il resto dell'anno. Nel lungo periodo (2071–2100), il calo di deflusso diventa più pronunciato e si assesta al 60% per i mesi più freddi, tra dicembre e aprile. Pedro-Monzonís *et al.*, (2016) hanno studiato la disponibilità idrica del Po nello scenario RCP4.5 (scenario con consistente riduzione di emissioni di gas serra): rispetto alle condizioni attuali il volume delle riserve idriche scende da 95 a 72 km³, il volume relativo all'apporto meteorico si riduce di 23 km³, il deflusso alla foce si riduce a 33 km³ rispetto agli oltre 50 km³. È inoltre interessante notare come l'evapotraspirazione, in aumento, contribuisca in modo più rilevante dei prelievi antropici (tre volte tanto nello scenario RCP4.5).

Per quanto riguarda altri bacini fluviali nel Nord Italia i trend previsti sono diversi. Lo studio sul fiume Toce di Ravazzani *et al.*, (2014) ha evidenziato che il deflusso medio mensile potrebbe aumentare del 36-68% nel mese di gennaio, dell'81-119% a febbraio e del 48-126% a ottobre. I deflussi nei mesi estivi invece diminuiscono notevolmente (del 36% ad agosto). Un'analisi simile condotta per il fiume Serio in Lombardia da Confortola *et al.*, (2013) mostra invece una minore diminuzione delle precipitazioni (7-21%).

In tutti gli scenari presentati si evidenzia nel Nord Italia una riduzione del manto nevoso, mentre la portata media annua non subisce variazioni oppure aumenta leggermente, e la variabilità intra-annua aumenta notevolmente: fino al -75% nei periodi secchi, e raggiunge il +150% (o addirittura 350%) in autunno e in inverno.

Un'attenzione particolare va rivolta anche al tipo di precipitazione, che ha una notevole rilevanza per i bacini idrografici. Ad esempio, analizzando il deflusso del fiume Tagliamento in Friuli-Venezia Giulia, Gunawardhana e Kazama (2012) hanno studiato gli effetti prodotti da un cambiamento del tipo di precipitazioni (più pioggia e meno neve) su deflusso e durata del manto nevoso. I risultati dell'analisi evidenziano sia un aumento delle portate minime (+25%) che un maggior numero degli eventi di magra (16 e 15 giorni in più rispettivamente in primavera ed estate).

Per quanto riguarda altri distretti idrografici, D'Oria *et al.*, (2019) hanno analizzato gli effetti dei cambiamenti climatici sulle precipitazioni, sulle portate fluviali e sulla ricarica della falda sotterranea in Toscana, ed in particolare nel bacino del Serchio. Per lo scenario RCP4.5, i risultati mostrano una diminuzione delle precipitazioni di 0,6% nel medio termine e di 2,8% nel lungo periodo. Le portate si riducono nel medio e lungo termine di rispettivamente 1,1% e 6,8%, così come per la ricarica della falda, per la quale si registra una diminuzione di 3,3% e 8,1%. Romano e Preziosi (2013) hanno evidenziato un trend di precipitazioni in diminuzione nel bacino del Tevere (-8% principalmente dovuto alla diminuzione delle precipitazioni invernali), sebbene diverse parti del bacino attestino una variazione diversa. Anche in Sicilia la stima delle precipitazioni medie annue diminuisce dall'11 al 13% per lo scenario con emissioni di gas serra contenute, e del 22-24% per lo scenario con elevate emissioni (Pumo *et al.*, 2016). I risultati qui evidenziano che i cambiamenti climatici potrebbero rafforzare il carattere torrenziale dei fiumi analizzati, con delle variazioni stagionali accentuate.

Sono diversi gli studi che hanno analizzato le tendenze osservate nelle precipitazioni sulla scala sub-nazionale o di bacino (Bartolini *et al.*, 2014; Brunetti *et al.*, 2000). A livello di distretto idrografico, l'analisi della disponibilità idrica è stata fatta tramite simulazioni di deflusso per gli scenari RCP2.6 (emissioni minime o assenti), RCP4.5 (emissioni contenute), e RCP8.5 (elevate emissioni),

tre periodi (2020; 2050; 2080) rispetto al periodo di riferimento 1971-2000. I risultati dei diversi modelli per i diversi scenari considerati mostrano una maggiore incertezza nella media annua della disponibilità idrica in tutti i distretti, con variazioni tra -20 e +20% a seconda dello scenario e del periodo di riferimento (per approfondimenti, si vedano i documenti del Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici⁴). La variazione della disponibilità mensile rende invece riconoscibile l'aumento della disponibilità nei mesi invernali e primaverili, durante i quali la domanda idrica è bassa, e una marcata diminuzione nei mesi in cui la domanda è alta e crescente.

Gli impatti dei cambiamenti climatici sulla qualità della risorsa idrica

Il Quinto Rapporto dell'IPCC (Jiménez Cisneros *et al.*, 2014) rileva che gli impatti finora osservati sui parametri di qualità idrica provengono da studi isolati, condotti su riserve, laghi e fiumi, prevalentemente di Paesi sviluppati e disponibili solamente per un numero ridotto di variabili (es. variazioni di temperatura, contenuti di ossigeno, concentrazioni di nutrienti). Inoltre è importante sottolineare come, allo stato attuale delle conoscenze, le proiezioni degli impatti dei cambiamenti climatici sulla qualità della risorsa idrica siano rappresentate da un numero esiguo di studi difficilmente comparabili in quanto presentano un grande livello di eterogeneità, sono fortemente dipendenti dalle condizioni locali, dai presupposti climatici e ambientali e dallo stato di riferimento del corso d'acqua (Bonte & Zwolsman, 2010; Kundzewicz & Krysanova, 2010; Sahoo *et al.*, 2011; Whitehead, Wade, *et al.*, 2009; Whitehead, Wilby, *et al.*, 2009).

Ciononostante, tali studi permettono di identificare come le principali alterazioni dovute a cambiamenti di temperatura e precipitazioni riguardino una maggiore incidenza di fenomeni di eutrofizzazione, ossia un aumento della biomassa vegetale nella forma di fioriture (*bloom*) algali dovuti ad un aumento delle temperature e del carico di nutrienti. Inoltre, un aumento del tasso di *run-off*, il ruscellamento superficiale delle acque non trattate

dal suolo dovuto a precipitazioni intense, comporterebbe un maggiore dilavamento di sostanze presenti nel terreno (Benítez-Gilabert *et al.*, 2010; Gascuel-Oudou *et al.*, 2010; Howden *et al.*, 2010; Loos *et al.*, 2009; Macleod *et al.*, 2012), contribuendo ad aumentare i carichi di nutrienti, sali, coliformi fecali, patogeni e metalli pesanti (Boxall A. B. A. *et al.*, 2009; Paerl *et al.*, 2006; Pednekar *et al.*, 2005; Tibby & Tiller, 2007) veicolati nei corsi d'acqua con conseguenti impatti sulla salute umana e sull'uso della risorsa a scopo potabile (Weatherhead & Howden, 2009). L'aumento di temperatura e fenomeni di *run-off*, in concomitanza anche con un elevato consumo di suolo, sono stati identificati come le principali variabili a influenzare l'apporto e le concentrazioni di nutrienti e contaminanti nei corpi idrici (Kaushal *et al.*, 2014). È stato osservato come la riduzione delle portate e delle velocità degli afflussi di acqua dolce, in concomitanza con fenomeni prolungati di siccità, sfavorisca la diluizione e aumenta i tempi di residenza delle acque, promuovendo la proliferazione algale e la riduzione dei livelli di ossigeno disciolto (Grover, 2015). Allo stesso modo, fenomeni di alluvioni improvvise (*flash-floods*) dovuti a precipitazioni intense e concentrate in brevi periodi, aumentano in maniera incontrollata il ruscellamento (*run-off*) e quindi l'apporto di nutrienti e contaminanti provenienti da fonti diffuse quali pratiche agricole e zootecniche, oltre al dilavamento del suolo urbano, causando così picchi di carico di tali sostanze nei corpi idrici. Sono inoltre osservabili alterazioni dei cicli bio-geo-fisici degli elementi principali dovuti all'aumento di temperature, soprattutto in regioni aride e semi-aride sotto forma di aumento nella concentrazione di sostanza organica disciolta e nutrienti come nitrati e fosfati (Benítez-Gilabert *et al.*, 2010; Chang, 2004; Ozaki *et al.*, 2003).

Fenomeni di siccità e la conseguente riduzione delle portate, uniti a condizioni di sovra sfruttamento della risorsa idrica, rendono i corsi d'acqua e le riserve idriche sotterranee costiere (soprattutto nelle zone di bassopiano) maggiormente esposti all'azione dell'innalzamento del livello del mare, con conseguente intrusione di acqua salata e aumento di salinità nella riserva di acqua dolce (Morgan *et al.*, 2015).

Questo tipo di impatti negativi è stato osservato in riserve idriche naturali e artificiali (Bonte & Zwolsman, 2010; Ducharme, 2008; Marshall & Randhir, 2008; Qin *et al.*, 2010; Sahoo *et al.*, 2011), fiumi (Andersen *et al.*, 2006; Bowes *et al.*, 2012; Whitehead, Wade, *et al.*, 2009; Whitehead, Wilby, *et al.*, 2009) e acque sotterranee (Butscher & Huggenberger, 2009; Rozemeijer *et al.*, 2009) con entità degli impatti variabili a seconda della natura del corpo idrico in questione.

Una recente valutazione della letteratura scientifica a livello europeo conferma come le variazioni di temperatura e precipitazione siano quelle che giocano un ruolo chiave nell'alterazione dei parametri chimici della risorsa idrica. Queste variazioni influiscono sui contenuti di ossigeno disciolto con conseguenti fenomeni di anossia (Grover, 2015; Huttunen *et al.*, 2015; Liu & Chan, 2016), sul ciclo dei nutrienti (Yushun Chen *et al.*, 2016), quindi sulle concentrazioni di fitoplancton (Bussi *et al.*, 2016; Xia *et al.*, 2016) e sulla diffusione di organismi patogeni (Grover, 2015; Huttunen *et al.*, 2015). Alterazioni della temperatura e del regime delle precipitazioni possono essere positivamente correlate anche ad alterazioni del pH, instaurando condizioni di iperacidità o eccessiva salinità (Elorenzo, 2015; Grover, 2015). Altri studi osservano come l'aumento della temperatura dell'aria influisca sulla mobilità e solubilizzazione dei metalli (A.B.A. Boxall, 2014; Zaharescu *et al.*, 2016) e dei composti organici del suolo come policlorobifenili (PCB), (Lu *et al.*, 2015), sottolineando come il percorso di questi composti venga alterato, aumentandone la tossicità per gli organismi che interagiscono con i sistemi idrici interessati.

Mentre negli ultimi anni sono stati sviluppati diversi studi sugli impatti dei cambiamenti climatici sulla qualità delle risorse idriche a livello internazionale, a tutt'oggi emerge una carenza di letteratura sull'argomento su scala nazionale. A livello italiano si trovano molti studi riguardanti gli ecosistemi lacustri, in cui si osservano conseguenze indirette dell'aumento di temperatura sulla stratificazione termica e sull'allungamento delle stagioni produttive, con implicazioni sulle fioriture algali che tenderebbero a verificarsi in anticipo in primavera e a terminare più

BOX 6. SCARSITÀ IDRICA IN AMBIENTE URBANO

Uno stressor climatico particolarmente rilevante per le aree urbane deriva dalla riduzione delle precipitazioni, soprattutto nel periodo estivo, in tutte le macroregioni climatiche italiane ad eccezione di alcune zone del Veneto e della Toscana e delle zone alpine. Questo fenomeno determinerà situazioni di siccità e scarsità idrica più frequenti e aumento della competizione tra domanda d'acqua potabile per uso urbano e per usi agricoli, industriali-energetici e per garantire il funzionamento dei servizi ecosistemici. Questo conflitto potenziale si colloca in un contesto di stress idrico medio-alto esistente già oggi, in cui si sfrutta più del 30% delle risorse idriche rinnovabili, a fronte dell'obiettivo europeo di efficienza che prevede di non estrarre più del 20% delle risorse idriche rinnovabili disponibili.

In realtà, la richiesta di acqua potabile rappresenta solo il 12% delle derivazioni di acqua a livello nazionale, e la legislazione ne attribuisce la priorità su tutti gli altri usi (d.lgs., n 152/2006). Tuttavia, le città rimangono vulnerabili alla scarsità idrica, soprattutto per la dipendenza da singole (e potenzialmente limitate) fonti di approvvigionamento. Questa vulnerabilità è emersa per esempio durante gli eventi di siccità del 2003/2007, in città come Ferrara e Parma che dipendono principalmente da prelievi da fiume (Mysiak *et al.*, 2013). Inoltre, a fronte di consumi pro capite medi nazionali in diminuzione, la quantità di acqua prelevata per uso potabile e quella immessa nelle reti comunali di distribuzione sono in crescita.

Al contempo, le quantità di acqua disperse nella rete, pur stabilizzatesi negli ultimi anni, permangono a livelli cospicui (36,6% nel 2017) mentre si registra comunque un aumento del numero di città italiane in cui la dispersione supera il 30% (Legambiente, 2019). Il fenomeno non è distribuito in maniera uniforme tra le regioni, e i tassi di efficienza della rete di distribuzione sono tendenzialmente inferiori proprio in quelle macroregioni climatiche, come l'appenino centro-meridionale, Sud e Isole, che sono maggiormente esposte a scarsità idrica.

tardi in autunno (Thackeray *et al.*, 2010). Tali studi mettono in relazione l'incedere dei cambiamenti climatici con l'aumento di specie potenzialmente tossiche nei laghi, con particolare riferimento ai cianobatteri (Paerl & Huismann, 2009; Posch *et al.*, 2012). Infatti, Mosello e Lami (2012) rilevano un marcato impatto dell'aumento della temperatura sulle dinamiche zooplanctoniche nel Lago Maggiore e registrano come l'incremento di temperature negli ultimi 45 anni (+1,4°C) avrebbe favorito le fioriture di cianobatteri e l'introduzione di specie non indigene e potenzialmente tossiche. Un ulteriore studio, condotto invece sul lago Trasimeno in Umbria (Ludovisi & Gaino, 2010), ha rilevato come le variazioni di temperatura e precipitazione avvenute negli ultimi 50 anni abbiano profondamente alterato le caratteristiche fisico-chimiche del corpo d'acqua. In particolare, l'aumento di temperatura (+0,65°C per decennio) e la riduzione delle precipitazioni hanno influito sul bilancio idrico del lago causando prolungati periodi di siccità (-20% di volume negli ultimi due decenni). Come conseguenza si sono osservati un aumento della concentrazione di sali disciolti (3,5 x 10⁻⁶ kg per anno), un aumento dell'alcalinità totale e una riduzione della trasparenza. Considerando gli scenari futuri, un aumento degli eventi siccitosi potrebbe ulteriormente

compromettere la qualità idrica lacustre specialmente per ciò che riguarda il contenuto di sali e la trasparenza, così come una maggior disponibilità di nutrienti a causa della riduzione della diluizione delle acque di scarico. Eventi di eutrofizzazione non sono quindi esclusi come conseguenza del riscaldamento delle acque (Visconti *et al.*, 2008).

Simili risultati e trend si ritrovano anche in diverse categorie di corpi idrici. Sperotto *et al.* (2019), ad esempio, hanno studiato la variazione del carico di nutrienti in condizioni di cambiamento climatico nel bacino scolante della Laguna di Venezia. Le analisi hanno riportato anche in questo caso un incremento del carico di nutrienti (azoto e fosforo) nel medio e lungo termine, in modo particolare nelle stagioni autunnali e invernali.

Conflitti settoriali e risorse idriche

Mantenere l'equilibrio tra domanda e disponibilità idrica è diventata una delle principali sfide odierne. Lo sfruttamento della risorsa idrica ha raggiunto un livello critico molto alto non più sostenibile. Diverse regioni italiane caratterizzate da precipitazioni estremamente variabili e spesso poco "capaci" di rigenerare le risorse idriche

sono diventate particolarmente vulnerabili alla siccità. La crisi idrica del 2017 ne è un esempio: le scarse precipitazioni registrate dall'autunno del 2016, in concomitanza con le elevate temperature registrate, hanno causato condizioni di prolungata siccità da Nord a Sud. Questa situazione ha causato carenze idriche sia per l'uso potabile che agricolo, portando a interruzioni e turnazioni delle risorse (ISTAT, 2019).

L'equilibrio tra domanda e offerta è reso più instabile dai forti interessi e conflitti settoriali legati ad usi civili (relativi al consumo umano e ai servizi d'igiene, collettivi e privati), usi agricoli (relativi alla produzione di prodotti agricoli), usi industriali, usi ambientali (quota dei deflussi minimi vitali necessaria a garantire la salvaguardia naturale dei corsi d'acqua), e produzione energetica (in particolare relativa a produzione idro-elettrica). Dalla seconda metà del XX secolo, l'intensificazione e la meccanizzazione dei processi agricoli, con un'ampia diffusione delle pratiche irrigue, hanno portato ad un forte aumento della produttività agricola. Attualmente in Italia l'agricoltura raggiunge una quota tra il 30% e l'60% del consumo totale di acqua, a causa della forte dipendenza dall'irrigazione diffusa per sostenere ed aumentare le rese di diverse colture (EEA, 2009). Questa intensificazione causa diversi impatti negativi sulle proprietà ecologiche dei sistemi agricoli, un aumento dell'eutrofizzazione e declino della qualità delle acque in alcune aree (Langmead *et al.*, 2007). I conflitti tra questi settori emergono in modo critico nella stagione estiva, in cui aumenta la domanda di risorse idriche proprio nei mesi in cui sono più scarse. La gestione ordinaria della risorsa d'acqua è atta a garantire un uso sostenibile e mitigare conflitti tra settori. Confrontando le risorse disponibili con i fabbisogni, è possibile elaborare scenari di bilancio idrico prevedibili nel breve e medio termine per tutti gli invasi del sistema. Queste informazioni vengono trasformate in indicatori di siccità dei sistemi idrici, rilevanti per gli strumenti di pianificazione, per la valutazione dei rischi, per poter gestire proattivamente eventuali crisi idriche e mitigare conflitti tra settori. L'Italia meridionale subirà in modo particolare una riduzione delle prestazioni dei bacini idrici in condizioni di cambiamento climatico, come evidenziato da Longo-

bardi *et al.*, (2014). Si è visto come la maggior causa dell'insufficienza dei sistemi in Sud Italia sia legata alla riduzione delle precipitazioni disponibili piuttosto che alla capacità del serbatoio, problema principale invece per i sistemi analizzati in Centro Italia (Preziosi *et al.*, 2013). La questione del calo della disponibilità idrica dovuto ai minori apporti dalle precipitazioni è forse più critica di un aumento della domanda idrica settoriale. Tuttavia, è importante tenere in considerazione che le distribuzioni del volume d'acqua possono essere influenzate anche da forti perdite d'acqua nei sistemi di irrigazione (fino al 50% delle perdite di distribuzione dell'acqua per l'agricoltura irrigua). In questo contesto, secondo Stakhiv e Stewart (2010), il principale fattore di vulnerabilità sono le infrastrutture datate e inadeguate, per le quali sono necessari ulteriori sforzi mirati a migliorare la gestione delle risorse idriche, non solo per le esigenze antropiche ma anche per il mantenimento percentuale di flusso idrico per gli ecosistemi (flusso minimo ambientale fino al 10% del flusso) conformemente alle direttive UE. L'impatto dei cambiamenti climatici, la distribuzione delle colture irrigate e i cambiamenti nei modelli di coltivazione possono diventare i fattori chiave che influenzeranno la futura domanda di irrigazione nelle aree mediterranee. Dovrebbero essere sviluppate politiche volte a ridurre il rischio di scarsità d'acqua nel sistema di approvvigionamento, guardando sia a mitigazione e all'adattamento rispetto a eventi siccitosi, che al miglioramento della capacità e/o dell'adeguatezza delle infrastrutture.

Agricoltura

Le produzioni, sia vegetali che animali, sono fortemente influenzate dall'andamento delle condizioni climatiche. L'incremento della concentrazione atmosferica di anidride carbonica, il riscaldamento globale, la variazione del regime delle precipitazioni, l'intensificarsi di fenomeni estremi, sono elementi che influenzano fortemente sia la quantità che la qualità delle produzioni alimentari, con conseguenze rilevanti dal punto di vista economico e sociale. Le attività agricole sono anche responsabili di una quota di emissioni di gas serra in atmosfera e per questo è necessario promuovere uno sviluppo dell'agricoltura orientato non solo verso i principi della resilienza ma anche verso quelli della sostenibilità, come fortemente richiesto anche nella strategia europea Farm to Fork recentemente pubblicata (Box 8). La sfida è quella di aumentare la produzione di cibo per unità di superficie coltivata, soddisfare l'aumento della domanda legato al crescente incremento della popolazione, ma farlo in maniera sostenibile, garantendo la qualità delle produzioni, la tutela dell'ambiente, della sicurezza alimentare e della salute. Questo richiederà una profonda trasformazione sia nelle scelte politiche ed economiche sia nei comportamenti individuali e collettivi dei produttori e dei consumatori.

I principali rischi per le produzioni vegetali

I recenti rapporti speciali dell'IPCC (IPCC, 2018, 2019) hanno indicato già evidenti variazioni significative della produttività colturale a livello globale, con impatti differenti a seconda delle aree geografiche e delle specie e varietà coltivate. Questi effetti saranno ancora più marcati con le variazioni climatiche attese per i prossimi decenni, soprattutto in areali altamente vulnerabili come la regione Mediterranea, che è considerata un "hot spot" del cambiamento climatico nel XXI secolo, con incrementi di temperatura che superano del 20% il tasso di incremento medio globale e una tendenza alla riduzione delle precipitazioni, contrariamente a quanto avviene mediamente nel ciclo idrologico di altre aree comprese tra le latitudini 30° N e 46° N (Lionello e Scarascia, 2018).

Le colture rispondono all'incremento atteso nelle temperature medie con una variazione della durata della stagione di crescita, una precocità della manifestazione delle fasi fenologiche e un potenziale spostamento degli areali di coltivazione verso maggiori latitudini e quote in cui si possono creare migliori condizioni di crescita e sviluppo. L'accelerazione del ciclo di crescita delle colture può limitare il periodo a disposizione per l'accumulo di biomassa e di conseguenza portare a riduzioni della resa (Ciscar *et al.*, 2018; EEA, 2019). I maggiori decre-

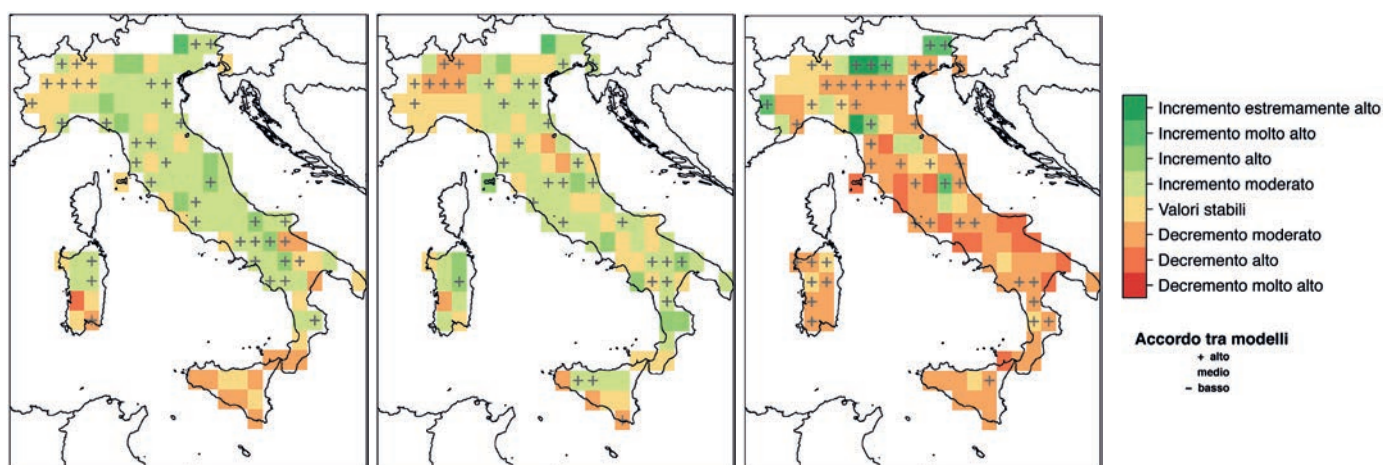


Figura 22. Proiezioni di variazione (%) di resa per frumento duro (sinistra), frumento tenero (centro) e mais (destra) in Italia per il 2036-2065 con lo scenario RCP8.5, considerando la classe più frequente di variazione di resa in seguito alla simulazione con 5 modelli climatici a 0.5 gradi di risoluzione (GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM e NorESM1-M, da ISIMIP Proje). Le mappe indicano anche l'accordo tra i modelli associato alla variazione di resa (Mereu *et al.*, 2020).

menti di produttività per l'Italia sono attesi per le colture a ciclo primaverile-estivo, specialmente se non irrigate, con riduzioni delle rese soprattutto per mais, girasole e barbabietola da zucchero, mentre leggeri incrementi sono attesi per il frumento (Ciscar *et al.*, 2018). Webber *et al.*, (2018) hanno analizzato gli effetti dello stress termico e della carenza idrica sulla resa di mais e grano in Europa e hanno riportato che lo stress termico non incrementa per nessuna delle due colture in condizioni non irrigue, mentre lo stress idrico si intensifica solo per il mais (con decrementi di resa in Italia attorno a valori di -20%) e non per il frumento (che invece presenta rese stabili o anche incrementi fino a +20% in alcune aree del Paese).

La recente analisi effettuata per l'Europa nell'ambito del progetto Peseta IV (Hristov *et al.*, 2020) indica per l'Italia, per il periodo 2030-2040 con lo scenario RCP8.5, una riduzione fino a -25% rispetto alle rese attuali per il mais in irriguo, con risultati abbastanza omogenei nel territorio, mentre per il frumento sono simulate riduzioni (fino anche a -50% rispetto ai valori attuali) soprattutto nelle Regioni del Sud (Sicilia, Sardegna e Puglia) e possibili incrementi in alcune Regioni del Centro e del Nord (fino anche a +25%). Risultati abbastanza in linea con questi sono stati ottenuti anche dalle simulazioni effettuate dal CMCC (Mereu *et al.*, 2020) su scala europea (in Figura 22 è riportato il dettaglio per l'Italia) per alcune varietà di frumento e mais parametrizzate da Mereu *et al.*, (2019). L'analisi è riferita al periodo 2036-2065 (centrato al 2050), utilizzando diversi modelli climatici dal progetto ISIMIP – Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project⁵ con lo scenario RCP8.5. L'analisi mostra impatti più negativi per il mais (simulato in irriguo) rispetto al frumento (in asciutto). Le riduzioni attese per il mais ricadono prevalentemente nella classe di decremento moderato (fino a -20%) e decremento alto (fino a -50%), mentre per il frumento si attendono impatti soprattutto nelle regioni del Sud Italia (fino anche a -20% in alcune aree) e del Nord-ovest. Moderati incrementi sono invece attesi in altre aree del Paese. Questo può lasciar ipotizzare la possibilità di espansione della coltivazione del frumento

in nuovi areali rispetto a quelli tradizionali, anche se le proiezioni cambiano a seconda dei modelli climatici utilizzati e l'accordo tra le proiezioni è generalmente medio, mentre è elevato solo in poche aree. In generale, tuttavia, si può confermare una minore suscettibilità per le colture a ciclo autunno-invernale rispetto a quelle primaverili-estive.

Possibili effettivi positivi nel Nord Italia sono stati riportati anche per il riso nello studio di Bocchiola (2015), che evidenzia rese costanti o in incremento rispetto all'attuale sia nel medio (2050) che nel lungo (2080) periodo, con gli scenari più moderati (RCP2.6 e RCP4.5), determinate dall'effetto positivo della maggiore concentrazione atmosferica di CO₂ nel compensare l'effetto negativo dei cambiamenti climatici, anche se a fronte di una maggiore richiesta idrica.

L'effetto diretto della concentrazione atmosferica di CO₂ nella potenziale compensazione degli impatti negativi delle mutate condizioni climatiche è ancora controverso data la complessità dei fenomeni che regolano questi meccanismi. Colture classificate come C3, che comprendono la maggior parte dei cereali (ad esempio frumento, riso e orzo), colture leguminose, foraggere e piante da frutto, potrebbero beneficiarne incrementando il proprio tasso fotosintetico e quindi aumentando la resa. Effetto che sulle specie C4 (ad esempio, mais, sorgo, miglio e canna da zucchero) è molto meno marcato (Qian *et al.*, 2010). La più elevata concentrazione di CO₂ può influenzare anche la chiusura stomatica, consentendo una riduzione delle perdite per traspirazione e quindi un incremento dell'efficienza dell'uso dell'acqua sia nelle C3 che nelle C4, anche se in alcuni casi questo miglioramento dell'efficienza di traspirazione è ridotto dal fatto che, ad esempio, incrementa nelle C3 la superficie fogliare un'elevata concentrazione di CO₂ fogliare e la temperatura delle colture, determinando un aumento dell'uso dell'acqua (Webber *et al.*, 2018). Inoltre, è stato provato che l'elevata concentrazione atmosferica di CO₂ può influenzare negativamente la qualità nutrizionale di alcuni

BOX 7. STIMA DELLA VARIAZIONE DEI FABBISOGNI IRRIGUI CULTURALI IN SARDEGNA

Nell'ambito della Strategia di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (SRACC') della regione Sardegna, modelli di bilancio idrico del suolo giornaliero (Snyder *et al.*, 2012; Masia *et al.*, 2018) sono stati sviluppati ed utilizzati per calcolare l'evapotraspirazione effettiva per le principali colture presenti in Sardegna, sia arboree che erbacee, nonché i fabbisogni irrigui ed i volumi irrigui da utilizzare in funzione dei cambiamenti climatici secondo gli scenari RCP4.5 e 8.5 che ipotizzano, rispettivamente, la messa in pratica di iniziative per limitare in maniera consistente le emissioni di gas serra nel primo caso, nessuna iniziativa per contenere le emissioni nel secondo. Sulla base di queste simulazioni, e delle proiezioni climatiche utilizzate, è chiaro che le colture principalmente influenzate dai cambiamenti climatici in termini di impatto sui fabbisogni irrigui sono quelle con periodi di crescita prevalentemente primaverili, laddove si verificano i cali più consistenti di precipitazioni, oltre che le arboree sempreverdi e le colture annuali. Le colture con stagione di crescita nel periodo estivo risultano essere quelle con minori anomalie nel fabbisogno irriguo. I regimi di precipitazioni risultano essere più estremi in futuro e quindi, nell'ambito di un bilancio idrico del suolo, meno utili a soddisfare i fabbisogni idrici delle colture in campo.

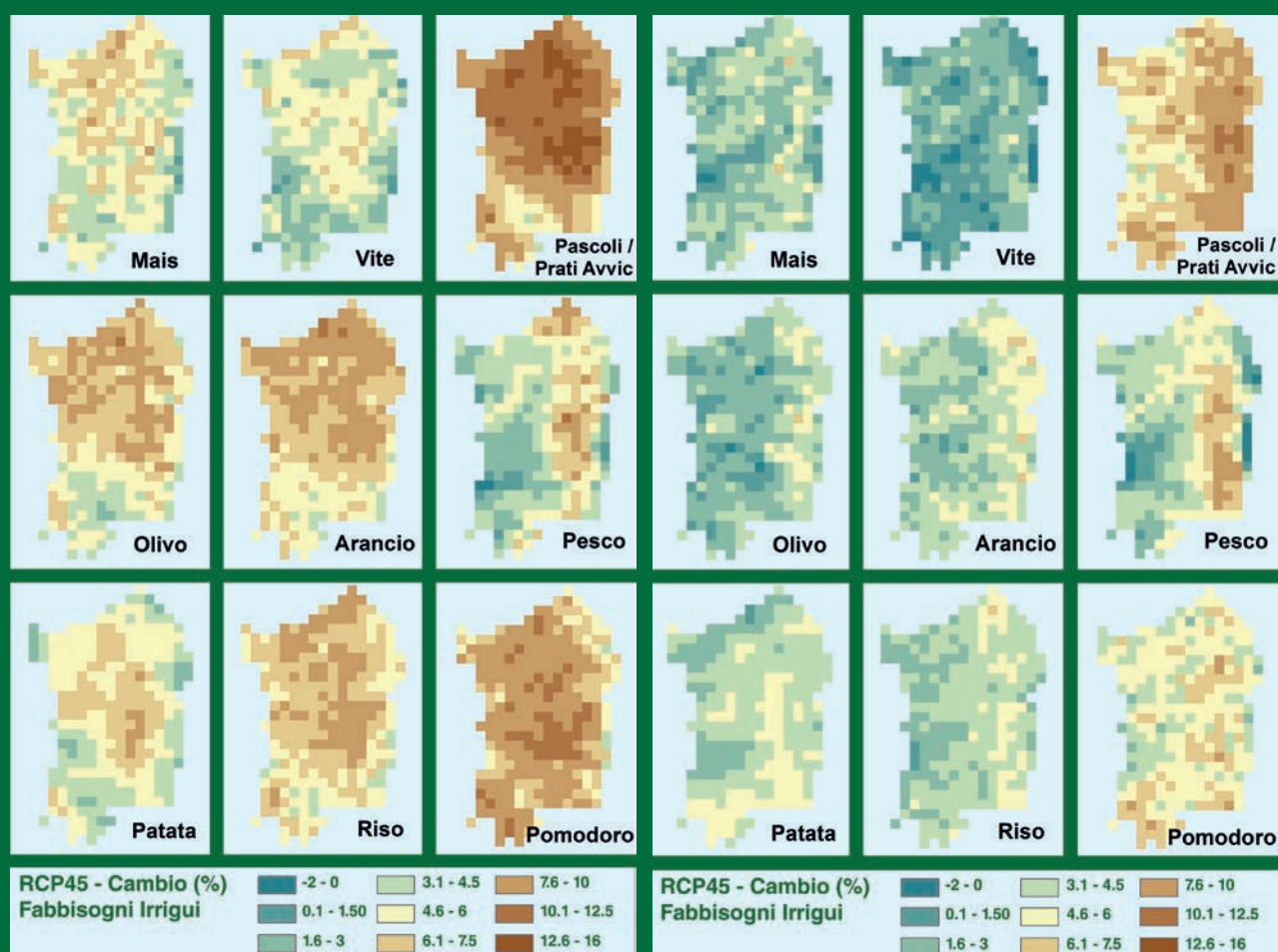


Figura 23. Anomalie di fabbisogni irrigui (%) per diverse colture rappresentative in Sardegna con RCP4.5 e RCP8.5, periodo 2021-2050 vs 1980-2010.

prodotti, ad esempio riducendo il contenuto proteico dei cereali (Fernando, 2015; Zhou *et al.*, 2018), la qualità di panificazione del grano (Högy *et al.*, 2013) e il contenuto di elementi come il ferro e lo zinco (Beach *et al.*, 2019) con importanti ripercussioni sugli aspetti alimentari.

Anche per le colture arboree, studi effettuati con proiezioni di cambiamento climatico hanno evidenziato una possibile espansione verso nord degli areali di coltivazione per specie come olivo e vite. Simulazioni effettuate per l'olivo riportano potenziali incrementi di vocazionalità territoriale negli areali più settentrionali rispetto agli attuali areali di coltivazione (Tanasijevic *et al.*, 2014, Moriondo *et al.*, 2013a, Mereu *et al.*, 2008). Tuttavia, considerate le richieste di basse temperature per la ripresa vegetativa, questa espansione dell'areale di coltivazione dell'olivo verso nord potrebbe essere limitata dal mancato soddisfacimento delle esigenze in freddo, causato dall'incremento delle temperature durante i mesi invernali. L'incremento delle temperature, causando un anticipo delle fasi fenologiche, può influenzarne la produttività in areali tradizionali. Avolio *et al.*, (2012) riportano in uno studio fatto per la Calabria, un possibile anticipo della fioritura tra i 10 e i 34 giorni previsto per fine secolo e Orlandi *et al.*, (2020) riportano proiezioni di decremento di resa per molti areali di coltivazione in Italia, dovuto sia all'incremento delle temperature che a maggiori condizioni di aridità estiva, anche se le proiezioni mostrano un certo grado di incertezza legato ai modelli climatici utilizzati, che in alcuni casi simulano anche un incremento delle produzioni. Anche per la vite, diversi studi evidenziano una generale riduzione della lunghezza del ciclo vegetativo (con anticipo della maturazione soprattutto negli areali meridionali) e la potenziale perdita di vocazionalità e produttività degli areali di coltivazione attuali con possibile espansione verso aree più settentrionali (Moriondo *et al.*, 2013b, Fraga *et al.*, 2016, Teslic *et al.*, 2017). Un'analisi effettuata per alcune aree viticole del Trentino (Eccel *et al.*, 2016) indica un possibile beneficio legato alle proiezioni attese di cambiamento climatico, che potrebbero portare ad una migliore maturazione e un migliore stato sanitario delle uve. Tuttavia, bisogna tenere presente che la coltivazione della vite nelle aree più

settentrionali è limitata dalla disponibilità di radiazione solare, dalle basse temperature primaverili e dalle alte precipitazioni estive che possono limitare l'accumulo di zucchero nell'uva e aumentare il rischio di danni da parassiti. Salinari *et al.*, (2006) hanno valutato per i decenni futuri un possibile aumento di attacchi di peronospora nei vigneti del Piemonte a causa delle temperature più favorevoli nei mesi di maggio e giugno. Santos *et al.*, (2020) evidenziano come le aree del Sud Europa subiranno le maggiori perdite di vocazionalità per produzioni di elevato livello a causa della maggiore siccità, ma anche delle temperature molto elevate che possono causare perdita di qualità delle produzioni (es. degradazione organolettica, contenuto alcolico troppo elevato).

In termini generali, sia per le colture arboree sia per quelle erbacee, si possono attendere impatti più marcati nelle aree del Sud, in cui l'aumento della temperatura, combinato alla carenza idrica, può determinare una maggiore variabilità delle rese con una tendenza alla riduzione delle produzioni per molte varietà coltivate, con potenziali spostamenti degli areali di coltivazione tradizionali verso regioni più settentrionali o altitudini maggiori. In altre parole, aree attualmente non vocate per la coltivazione di alcune specie o varietà potrebbero diventare idonee alla loro coltivazione in futuro e, viceversa, alcuni territori potrebbero perdere la capacità di produrre prodotti tipici e locali. Tuttavia, le risposte sono fortemente differenziate a seconda delle caratteristiche delle aree geografiche e dalle specificità delle colture e varietà analizzate.

Inoltre, a limitare la possibilità di espansione verso nuovi areali c'è il problema di eventi climatici estremi ormai sempre più frequenti. Il manifestarsi ad esempio di ondate di calore, di periodi siccitosi e/o eventi di precipitazione intensa, o di gelate durante specifiche fasi dello sviluppo - come la fase di ripresa vegetativa, la fioritura, l'impollinazione e il riempimento del frutto - potranno ulteriormente accentuare gli impatti determinati dalle variazioni medie del clima causando variazioni nella quantità e qualità dei prodotti, e di fatto limitando la possibilità di espansione verso nuovi areali.

Periodi di siccità prolungati ed eventi estremi più frequenti, associati ad aumenti sensibili dell'evapotraspirazione in conseguenza dell'innalzamento della temperatura, portano a marcati squilibri idrologici che possono influenzare gli apporti idrici e diminuire le risorse disponibili negli invasi a soddisfare i fabbisogni irrigui e di altri settori, determinando una maggiore competizione fra i diversi usi (agricolo, civile e industriale) e quindi un potenziale incremento dei costi per la produzione delle colture irrigue.

I risultati di uno studio effettuato sulla variazione dei fabbisogni irrigui colturali per diverse colture erbacee e arboree in Sardegna (Box 7) indicano incrementi particolarmente marcati per pascoli e prati avvicendati e pomodoro. Valori molto simili per il pomodoro (dal 10 al 30% di incremento nella richiesta idrica giornaliera) sono riportati anche in uno studio effettuato in Capitanata (Tavoliere della Puglia) da Ventrella *et al.*, (2012), nonostante una riduzione della lunghezza del ciclo colturale, e conseguenti riduzioni di resa che possono variare dal 10 al 26%. Nello studio di Saadi *et al.*, (2015) sono invece evidenziate riduzioni delle richieste irrigue che variano dal 4% per colture a ciclo autunno-vernino, all'8% per quelle a ciclo primaverile-estivo come conseguenza del-

la riduzione della lunghezza della stagione di crescita delle colture, che possono avere un anticipo della maturazione anche di diverse settimane rispetto all'attuale.

La valutazione del rischio per l'agricoltura irrigua a causa dei cambiamenti climatici è fortemente legata alle specifiche esigenze colturali e alle condizioni climatiche di ogni area e richiede inoltre un'attenta valutazione della vulnerabilità e della resilienza dei sistemi di approvvigionamento idrico per soddisfare un aumento della domanda di acqua delle colture. Il rischio di scarsità d'acqua nei sistemi di approvvigionamento idrico è correlato all'intensità della siccità, alla capacità delle infrastrutture e alle politiche di adattamento in caso di eventi di siccità.

I principali rischi per le produzioni animali

I cambiamenti climatici possono influenzare direttamente la salute e il benessere degli animali allevati, determinando impatti diretti sulla produzione e la riproduzione degli animali e impatti indiretti prevalentemente legati alla quantità e qualità degli alimenti, alla disponibilità idrica e agli agenti patogeni (EEA, 2019). Effetti particolarmente importanti sono attesi soprattutto nelle aree del Sud Europa a causa proprio dell'effetto combinato di impatti diretti e indiretti sugli animali (EEA, 2019). Tra gli impatti

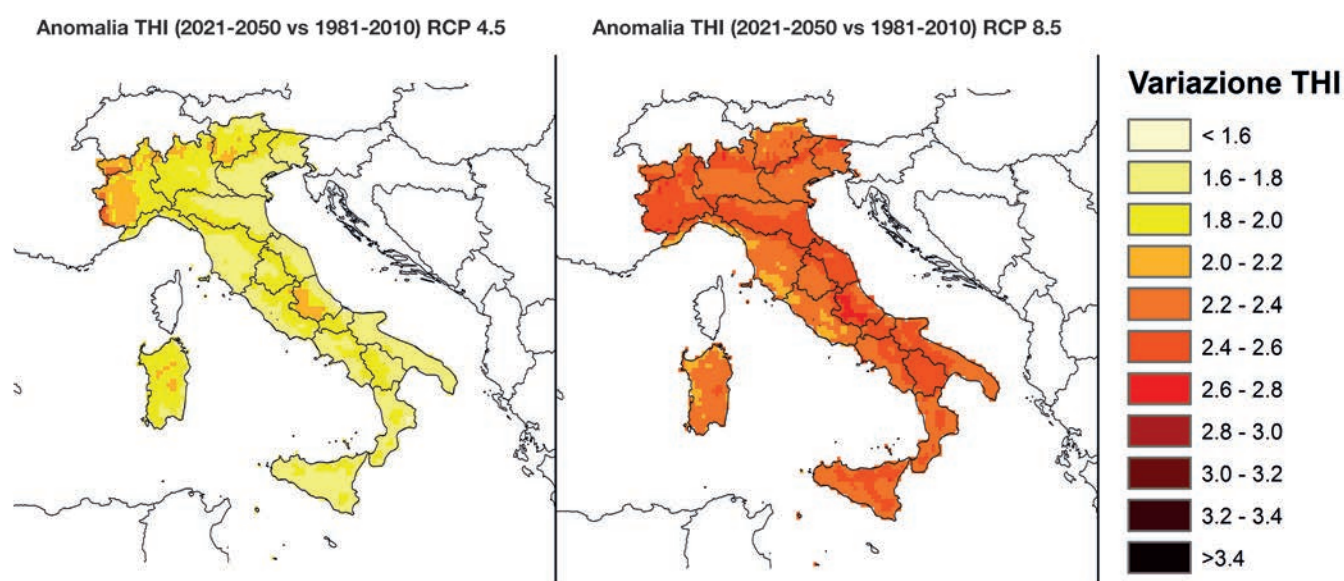


Figura 24. Proiezioni di variazioni medie dell'indice THI per il periodo 2021-2050 rispetto al periodo storico 1981-2010, calcolati con lo scenario RCP4.5 (sinistra) e RCP8.5 (destra), con il modello climatico COSMO-CLM, 8 km di risoluzione (MATTM 2017, da elaborazioni CMCC, disponibile al seguente link: www.minambiente.it/sites/default/files/archivio_immagini/adattamenti_climatici/allegato_2_impatti_e_azioni.pdf)

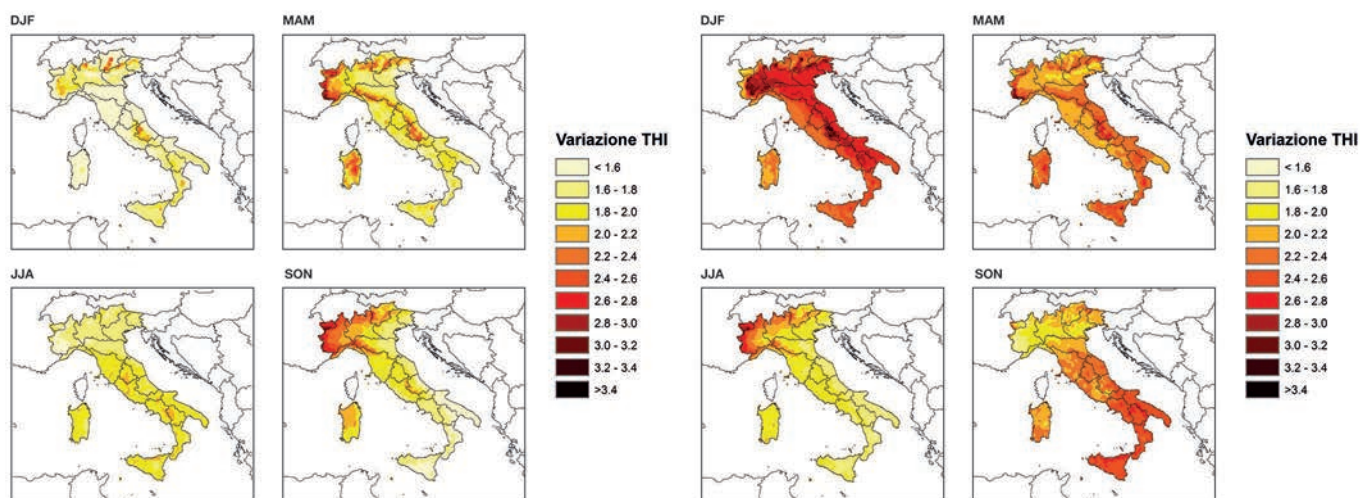


Figura 25. Proiezioni di variazioni stagionali dell'indice THI per il periodo 2021-2050 rispetto al periodo storico 1981-2010, calcolati con lo scenario RCP4.5 (a sinistra) e RCP8.5 (a destra), modello climatico COSMO-CLM, 8 km di risoluzione. DJF = mesi invernali; MAM = mesi primaverili; JJA = mesi estivi; SON = mesi autunnali (MATTM 2017, da elaborazioni CMCC, disponibile al seguente link: www.minambiente.it/sites/default/files/archivio_immagini/adattamenti_climatici/allegato_2_impatti_e_azioni.pdf)

diretti, l'effetto delle elevate temperature, soprattutto se associato ad altri fattori quali umidità e radiazione solare, è uno dei fattori principali in quanto influenza negativamente la produttività, la crescita, lo sviluppo e la riproduzione degli animali e la possibile insorgenza di malattie (Kipling *et al.*, 2016; Vitali *et al.*, 2015; Bertocchi *et al.* 2014; Nardone *et al.* 2010; Lacetera *et al.*, 2005, 2006). Uno degli indicatori bioclimatici comunemente utilizzato per valutare il livello di disagio per gli animali di allevamento è il *Temperature Humidity Index* (THI), che esprime l'effetto combinato della temperatura e dell'umidità relativa sul benessere animale. Da uno studio realizzato dalla Fondazione CMCC, utilizzando dati ad elevata risoluzione spaziale del modello COSMO-CLM (Bucchignani *et al.*, 2016; Zollo *et al.*, 2016), si riportano le anomalie medie (Figura 18) e le anomalie stagionali (Figura 25) dell'indice THI calcolato per il periodo 2021-2050 con gli scenari RCP4.5 (emissioni contenute) e RCP8.5 (nessuna limitazione di emissioni di gas serra) per l'Italia. I risultati di questo indicatore sono stati utilizzati a supporto di analisi per la pianificazione dell'adattamento ai cambiamenti climatici a diversi livelli (es. PNACC⁶ e SRACC⁷). Le mappe indicano un peggioramento delle proiezioni dell'indice bioclimatico THI, con variazioni previste nel-

le aree di maggiore interesse zootecnico comprese tra 1,5 (RCP4.5) e 2,5 (RCP8.5) unità di THI. L'analisi delle variazioni dell'indice su scala stagionale, indicano valori variazioni al rialzo dei valori dell'indice non solo per la stagione estiva, che è particolarmente rilevante per la valutazione dello stress da caldo sugli animali, ma anche per le stagioni primaverile e autunnale, evidenziando quindi un'esposizione molto prolungata a condizioni di disagio per gli animali, con maggiori criticità con lo scenario RCP8.5.

In termini generali, gli autori dell'analisi degli impatti dei cambiamenti climatici sul settore zootecnico realizzata a supporto Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC) ipotizzano impatti negativi dei cambiamenti climatici sullo stato di salute, sulla produzione e sulla riproduzione della maggior parte delle specie di interesse zootecnico, con vulnerabilità maggiori per gli animali più sensibili alle elevate temperature come i ruminanti da latte e i suini, e vulnerabilità media per gli avicoli e medio-bassa per i ruminanti da carne.

Tra gli effetti indiretti che i cambiamenti climatici possono determinare sugli animali da allevamento, si può fare

6 www.minambiente.it/sites/default/files/archivio_immagini/adattamenti_climatici/allegato_2_impatti_e_azioni.pdf

7 <https://delibere.regione.sardegna.it/protected/45525/0/def/ref/DBR45368>

BOX 8. UN FUTURO PIÙ RESILIENTE E SOSTENIBILE PER L'AGRICOLTURA

La **strategia europea** Farm to Fork, al centro del Green Deal e dell'agenda della Commissione per il raggiungimento degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) delle Nazioni Unite, guida la transizione verso un sistema alimentare equo, sano e rispettoso dell'ambiente, lungo tutta la filiera, dalla coltivazione fino al consumatore. I sistemi alimentari non possono essere resilienti alle crisi, come ad esempio quella innescata dall'attuale pandemia di COVID-19, se non sono sostenibili. Devono pertanto essere ridisegnati in un'ottica che integri sostenibilità e resilienza, considerando le minacce sempre più forti che la crisi climatica sta determinando sul settore alimentare. Anche la **futura PAC (Politica Agricola Comune) 2021-2027** ha identificato come obiettivi specifici le azioni per il clima e l'ambiente e mira a sostenere uno sviluppo intelligente, resiliente e sostenibile del settore agricolo, promuovendo investimenti in azioni di adattamento e mitigazione.

Sia per le produzioni vegetali sia per quelle animali sono attualmente disponibili diverse soluzioni di adattamento ai cambiamenti climatici, che consentano allo stesso tempo di contribuire agli obiettivi di mitigazione. Tali soluzioni possono includere la realizzazione di **interventi strutturali** (quali ad esempio nuove infrastrutture per l'irrigazione che possano aiutare l'agricoltura a gestire l'acqua in maniera più efficiente), l'implementazione di **adeguate pratiche di gestione culturale e aziendale** (quali tecniche innovative di agricoltura di precisione, l'adozione di tecniche colturali più sostenibili secondo i principi dell'agricoltura conservativa, la coltivazione di specie e varietà a minore richiesta idrica, l'agricoltura integrata e biologica), il **miglioramento genetico**, l'utilizzo di genotipi (vegetali e animali) maggiormente adattabili a situazioni estreme sempre più frequenti con i cambiamenti climatici in atto. In generale, sono da preferirsi quelle opzioni che seguono i principi della **Climate Smart Agriculture** (FAO 2013) e che uniscono gli obiettivi della sostenibilità delle produzioni alle necessità di adattamento ai cambiamenti climatici e di mantenimento dei livelli di reddito degli agricoltori. Una produzione agricola sostenibile consente di perseguire molteplici obiettivi dal punto di vista economico, agronomico e ambientale, contribuendo ad aumentare la capacità di sequestro di carbonio nel suolo, ridurre le emissioni di gas serra in atmosfera, conservare la biodiversità, preservare sia la risorsa suolo che la risorsa acqua, aiutare a stabilizzare e incrementare le produzioni e ridurre potenziali rischi di erosione e di eventi catastrofici come frane e alluvioni.

Preservare ed incrementare la resilienza sia delle colture sia degli animali allevati ai vari stress e incrementare la sostenibilità delle produzioni consente di ridurre i rischi non solo rispetto alle perdite di produzione, ma anche in termini di sicurezza alimentare e di rischi per la salute umana.



una differenziazione tra allevamenti intensivi ed estensivi, come riportato dagli autori dell'analisi effettuata per il PNACC⁸. Negli allevamenti estensivi, gli impatti indiretti sono associati prevalentemente all'effetto che i cambiamenti climatici potranno determinare sulla disponibilità di colture foraggere destinate all'alimentazione del bestiame. Molteplici fattori, tra cui ad esempio condizioni di siccità, fenomeni di desertificazione, di salinizzazione delle falde, di avanzamento della macchia nelle aree dedicate al pascolo, possono ridurre e modificare la composizione delle specie presenti e quindi la disponibilità di cibo per gli animali. Impatti indiretti sugli animali sono inoltre legati alla qualità degli alimenti, con rischi di contaminazioni da micotossine, e alle dinamiche con cui le mutate condizioni climatiche modificano la distribuzione spaziale, l'intensità e i modelli stagionali di infezione dei parassiti (Kipling *et al.*, 2016). Nel caso degli allevamenti intensivi in stalla sono prevalenti i rischi indiretti associati ad esempio a fenomeni climatici estremi (es. eventi alluvionali), che possono danneggiare fabbricati e attrezzature e mettere a rischio i capitali investiti, ma anche legati ai potenziali incrementi del costo dell'acqua, alla volatilità del prezzo dei mangimi e del costo dei trasporti e alla minore adattabilità dei genotipi (IPCC, 2019). In generale, i sistemi intensivi hanno una maggiore capacità di adattamento in quanto fanno un maggiormente ricorso all'utilizzo di tecnologie innovative, attraggono maggiori investimenti e riescono meglio a contrastare gli effetti negativi dei cambiamenti climatici rispetto ai sistemi estensivi.

Tuttavia lo sviluppo del settore deve essere orientato sia verso una maggiore resilienza che consenta di preservare la produttività e il reddito delle aziende, sia verso una maggiore sostenibilità al fine di contribuire al raggiungimento degli obiettivi di mitigazione.

8 www.minambiente.it/sites/default/files/archivio_immagini/adattamenti_climatici/allegato_2_impatti_e_azioni.pdf

Incendi boschivi

Il patrimonio forestale italiano: numeri, servizi e minacce

Il recente Rapporto sullo stato delle foreste e del settore forestale in Italia 2017-2018 (RaF Italia, 2019), illustrando le principali caratteristiche del nostro patrimonio forestale (circa 9 milioni di ha di foreste e quasi 2 milioni di ha di altre terre boscate⁹, oltre il 35% del territorio nazionale) sulla base dei dati raccolti dall'Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio (INFC), evidenzia l'aumento costante della superficie forestale. Solo nell'ultimo decennio INFC (2015) ha certificato un aumento del 6% della superficie forestale, frutto principalmente della colonizzazione spontanea di aree marginali da parte di specie arbustive e della crescita di boschi di nuova formazione legati a un rimboschimento naturale a seguito dell'esodo rurale e montano a favore delle aree urbane e costiere. Il fenomeno riguarda, con intensità diversa, tutte le regioni italiane.

Il patrimonio forestale svolge un fondamentale ruolo multifunzionale capace di erogare, a vantaggio della collettività, benefici sia di tipo economico che di tipo ambientale. Sebbene la massa legnosa ritraibile annualmente ammonti a circa 13,5 milioni di m³, la superficie forestale disponibile al prelievo legnoso si assesta intorno all'81% del totale e la massa legnosa potenzialmente esportabile potrebbe aggirarsi su circa 35,5 milioni di m³ (INFC, 2005). Le attività produttive inerenti alla selvicoltura e all'industria del legno e della carta valgono circa l'1% del Prodotto Interno Lordo (PIL), in linea con la media comunitaria (RaF Italia, 2019). La prospettiva cambia considerando la sola selvicoltura, che contribuisce al PIL con uno 0,03% (a fronte dello 0,2% riscontrabile nel resto dell'EU). Questo significa una scarsa attitudine a produrre legname di qualità a fronte di una fiorente industria di trasformazione (RaF Italia, 2019), a causa del basso tasso di utilizzo delle risorse forestali nazionali.

Oltre alla funzione produttiva, le foreste forniscono una serie di servizi ecosistemici cruciali per l'economia del Paese. Pensiamo per esempio ai servizi di supporto (quali la formazione di suolo, la produttività e il ciclo dei nutrienti), propedeutici per i servizi di regolazione (quali la tutela idrogeologica, la regolazione del ciclo dell'acqua, la capacità di assorbimento del carbonio nell'ottica della riduzione della concentrazione di gas di serra in atmosfera, la conservazione della biodiversità) e culturali (legati alle attività turistico-ricreative, sportive, di didattica ambientale). Per esempio, per quanto riguarda la quantità di carbonio organico accumulato nelle foreste italiane, le stime dell'INFC (2005) riportano un ammontare complessivo all'anno di riferimento pari a 1,24 miliardi di tonnellate, corrispondenti a 4,5 miliardi di tonnellate di anidride carbonica assorbita. Grazie all'accrescimento degli alberi, ogni anno vengono fissati circa 12,6 Mt di carbonio, pari a circa 5 tonnellate per ettaro di CO₂ equivalente dall'atmosfera.

Circa l'81% della superficie forestale nazionale è interessata da vincolo idrogeologico, e in particolare la superficie del bosco vincolata è pari all'87% del totale, mentre le altre terre boscate risultano vincolate per il 49% della loro superficie (RaF Italia, 2019). Una qualche forma di vincolo naturalistico si riscontra invece in poco più del 27% della superficie forestale nazionale. L'incidenza è maggiore in alcune regioni del Centro e Sud Italia dove si arriva fino al 50% (e.g. Abruzzo, Campania, Puglia e Sicilia). Evidenziamo anche che circa il 3.5% della superficie forestale ricade esclusivamente nei parchi nazionali e regionali, mentre il 17.3% rientra esclusivamente nei siti della rete Natura2000 (Sic e Zps) (RaF Italia, 2019), rappresentando quindi anche un'importante fonte economica per il territorio e per il settore turistico.

D'altra parte, RaF Italia (2019) riporta che, complessivamente, soltanto il 18% della superficie forestale nazionale risulta attualmente gestita mediante piani di gestione forestale o piani di assestamento forestale. Da questo

9 Con il termine "altre terre boscate" si intendono in prevalenza arbusteti, boscaglie e macchia.

BOX 9. FORESTE IN MOVIMENTO

Le foreste italiane si stanno adattando alle nuove condizioni climatiche, modificando la composizione dei popolamenti (Chelli *et al.*, 2017) e “muovendo” i loro areali di distribuzione sia in termini latitudinali che altitudinali (Pecchi *et al.*, 2020). Conoscere queste dinamiche di adattamento acquisisce, quindi, un'importanza capitale nelle strategie di pianificazione forestale future per tutelare i servizi ecosistemici forniti nella loro globalità.

Si prevede che nel bacino del Mediterraneo gli impatti futuri sugli areali siano estremamente variegati per i diversi gruppi di essenze forestali, ma in generale gli studi hanno evidenziato una forte riduzione di vocazionalità (*suitability*) territoriale futura (sia a medio che lungo termine) per molte delle specie caratterizzanti i popolamenti forestali (Noce *et al.*, 2017). In questo caso si parla in particolare di *habitat suitability* guidata dal clima, cioè l'idoneità di una porzione di territorio con le relative condizioni climatiche ad ospitare una data specie forestale. Utilizzando una combinazione di modelli di distribuzione spaziale delle specie (Species Distribution Models, SDMs) guidati da un *ensemble* di scenari sotto molteplici modelli climatici e diverse assunzioni nelle possibili traiettorie di emissione di gas serra, ci si aspetta per l'Italia evidenti alterazioni nella distribuzione e diversità delle specie forestali che, verosimilmente, porteranno nel complesso ad una riduzione del numero di specie e, quindi, della diversità forestale locale (Noce *et al.*, 2017). Questo suggerisce una potenziale riorganizzazione delle associazioni a vantaggio di quelle più ricche di specie meno esigenti in termini di disponibilità idrica e più capaci di tollerare periodi siccitosi e caldi più lunghi (Bussotti *et al.*, 2014). Aspetto fondamentale, che merita di essere sottolineato, è il ruolo che la regione alpina sarà probabilmente chiamata a svolgere: grazie anche al profilo altitudinale più ampio si prevede infatti che questa potrebbe fungere da area rifugio per la migrazione delle specie forestali (Noce *et al.*, 2017).

Andando nel particolare di alcune delle specie, o gruppi di specie, più diffuse sul territorio italiano (Figura 26) appare evidente come la riduzione di *suitability* sia particolarmente accentuata nella regione appenninica e nei rilievi prealpini. Per l'importante gruppo delle querce mediterranee (ad esempio Roverella, Leccio, Cerro), se si eccettua il margine meridionale dell'areale (Sicilia) interessato da elevato rischio di desertificazione (Blasi, 2007), si prevede un evidente ampliamento di aree con *suitability*.

Le previsioni, sintetizzando il complesso dei vari spostamenti degli areali di distribuzione, suggeriscono che sia a livello di composizione sia di diversità locale i cambiamenti climatici potrebbero portare a modifiche significative in futuro, interessando i popolamenti forestali con diversi livelli di impatto tra le specie ed ovviamente con vari livelli di incertezza legati in particolare all'eterogeneità propria del territorio italiano, dei tratti autoecologici propri delle varie specie e delle strategie di adattamento.

discende quindi la carenza nel mantenimento delle caratteristiche strutturali e funzionali delle foreste, con ripercussioni sul loro stato di salute e sui servizi che esse elargiscono, incluso l'assetto idrogeologico e lo sviluppo socioeconomico di molte realtà locali.

L'ampio spettro di servizi ecosistemici offerti dalle foreste è ulteriormente minacciato dall'azione dei cambiamenti climatici in atto e futuri e dai conseguenti impatti. La risposta degli ecosistemi forestali ai cambiamenti climatici, come evidenziato anche nell'ambito del Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNAC, 2017), si sta traducendo in cambiamenti dei tassi di crescita e della produttività, della composizione delle specie e spostamenti altitudinali e latitudinali degli habitat forestali (Box 9). A questi fenomeni si accompagna inoltre la perdita locale di biodiversità e una maggiore vulnerabilità ai fenomeni di disturbo, quali gli incendi, gli attacchi parassitari e gli eventi meteorologici avversi.

Cosa ci dicono le statistiche sugli incendi boschivi in Italia

Una delle principali minacce per il comparto forestale italiano è rappresentata dagli incendi boschivi che si verificano sia nella stagione estiva sia in quella invernale. Pensiamo per esempio al 2017, quando circa il 70% della superficie territoriale percorsa da incendi era rappresentata da popolamenti forestali (RaF Italia, 2019). Durante il periodo 1980-2018, la media del numero di incendi nel nostro Paese è stata poco superiore a 8.900 per anno, mentre l'area percorsa ha fatto registrare, in media, 104.000 ettari (Figura 27). Complessivamente, circa 4 milioni di ettari sono stati percorsi dalle fiamme. Confrontando questi dati con il totale registrato nei cinque Paesi del Mediterraneo più colpiti dal fenomeno (Italia, Portogallo, Spagna, Francia e Grecia), il nostro Paese contribuisce per circa il 19% sul numero degli incendi e circa il 23% sull'area percorsa dagli stessi (Figura 28).

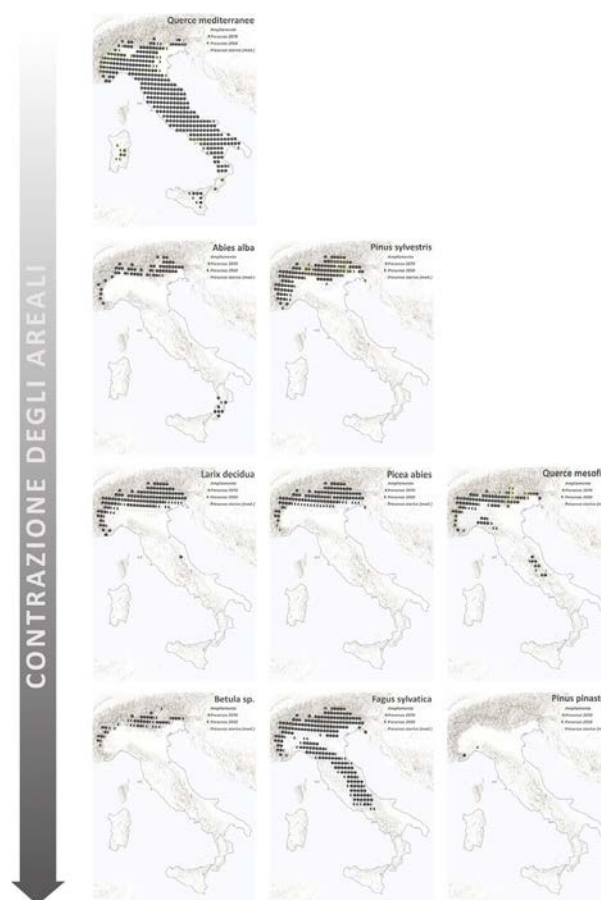


Figura 26. Focus degli output in Noce *et al.* 2017 sull'Italia per alcune delle maggiori specie (o gruppi). Dall'alto verso il basso la contrazione degli areali appare sempre più evidente. La presenza futura è considerata in caso di positività di almeno il 70% dei membri dell'*ensemble* (IPCC AR5 Guidance – Mastrandrea *et al.*, 2011).

La tematica ha assunto sempre maggior rilievo nell'Europa Mediterranea e in Italia, specialmente a causa di recenti eventi che hanno comportato ingenti perdite e impatti sulla società.

In Europa, dal 2000 al 2017, sono state registrate 611 morti (34 persone all'anno) e il rapporto nel progetto europeo PESETA II stima in media danni economici di almeno 3.000 milioni di euro all'anno. Rimangono impressi nella memoria i grandi eventi avvenuti recentemente in Portogallo nel 2017 (Pedrógão Grande, 53.000 ha percorsi e 64 morti), in Grecia nel 2018 (Attica, 6.824 ha percorsi e 102 morti), e quelli che hanno colpito il territorio italiano nel 2017 (Val Susa-Piemonte 1.000 ha, Parco del Vesuvio 1.980 ha, Parco del Gran Sasso 900 ha, Alà dei Sardi-Sardegna 2.000 ha). Nell'Europa Mediterranea, il 2017 è stato uno degli anni peggiori mai registrati dalle statistiche (Marchetti e Ascoli, 2018) e in Italia l'anno più

critico dell'ultimo decennio in termini di superfici percorse, pari a oltre 160.000 ha (RaF Italia, 2019). Secondo i dati EFFIS (aggiornati all'inizio di settembre 2017) il dato supera di circa il 300% la media registrata nel periodo 2008-2016 (Figura 29).

Se da una parte è ormai noto (e.g. Turco *et al.*, 2016; Spano *et al.*, 2014) che l'area percorsa dalle fiamme e il numero di incendi siano gradualmente diminuite a partire dagli anni '80 ad oggi (Figura 28), grazie al forte investimento nella lotta attiva, dall'altra si osserva chiaramente come la variabilità inter-annuale della superficie bruciata rimanga molto alta. Questi due lati della stessa medaglia, cioè la variazione dei regimi degli incendi e il verificarsi di alcune stagioni con il doppio o il triplo dell'area percorsa dal fuoco rispetto agli anni precedenti (come appunto il 2017, Figura 27), sono il segnale di un'ampia e comune tendenza influenzata da molteplici

ci fattori predisponenti, interagenti fra loro, che hanno interessato l'intero bacino del Mediterraneo negli ultimi decenni: uso del territorio, processi socioeconomici e gestione del fuoco, a cui dobbiamo aggiungere i cambiamenti climatici in atto.

Impatti dei cambiamenti climatici sul rischio di incendi boschivi

L'aumento delle temperature e la riduzione delle precipitazioni medie annue, e allo stesso tempo la maggiore frequenza di eventi meteorologici estremi quali le ondate di calore o la prolungata siccità (e.g. Ruffault *et al.*, 2017), interagiscono con gli effetti dell'abbandono delle aree coltivate, dei pascoli e di quelle che un tempo erano foreste gestite, del forte esodo verso le città e le aree costiere, e delle attività di monitoraggio, prevenzione e lotta attiva sempre più efficienti. I conseguenti cambiamenti nella struttura e nella continuità delle comunità vegetali e nel mosaico paesistico, specialmente nelle fragili aree di interfaccia urbano-rurale caratterizzate da una massiccia presenza di residenze immerse nella vegetazione, creano le condizioni predisponenti verso una maggior vulnerabilità rispetto al passaggio del fuoco e quindi la generazione di grandi eventi (Bovio *et al.*, 2017), estesi e distruttivi, con ripercussioni su beni antropici e servizi ecosistemici. Nonostante il potenziamento nel corso dei decenni di tutti i sistemi antincendio boschivo (AIB) regionali e della Protezione Civile a livello nazionale, le difficoltà nel gestire gli incendi in anni a meteorologia estrema sono tali da compromettere la tenuta del sistema, invece efficiente in anni a meteorologia mite.

Si prevede che i cambiamenti climatici esacerberanno ulteriormente specifiche componenti del rischio di incendi in molte zone d'Europa (de Rigo *et al.*, 2017; Nature Climate Change, 2017), con conseguenti impatti su persone, beni ed ecosistemi esposti nelle aree più vulnerabili.

In uno dei primi studi a riguardo, Moriondo e colleghi (2006) hanno utilizzato un solo modello regionale sotto

gli scenari A2 e B2, ossia due scenari che corrispondono a diverse ipotesi di sviluppo socioeconomico. Nel primo caso, A2, si ipotizza un mondo molto eterogeneo, un continuo aumento della popolazione, sviluppo economico orientato su base regionale e con cambiamenti tecnologici frammentati e lenti. Si tratta di uno scenario assimilabile a quelli che non prevedono per il futuro alcuna riduzione di emissioni di gas serra. Nel secondo caso, B2, si descrive un mondo orientato a soluzioni locali ispirate dalla sostenibilità sociale, ambientale ed economica. Lo studio in questione evidenzia significativi aumenti della pericolosità potenziale di incendio boschivo in Spagna, nel Sud della Francia e in Italia. In particolare, lo studio suggerisce per il nostro Paese un aumento della pericolosità di incendio (calcolato attraverso l'indice FWI¹⁰) fino al 25% per la fine del secolo e sotto lo scenario A2. Uno studio più recente (Bedia *et al.*, 2014) conferma per l'Italia un incremento di pericolosità (dal 20 al 40%) verso il 2100, utilizzando un *ensemble* di modelli e un diverso scenario di emissioni (A1B, uno scenario climatico che descrive un mondo futuro di crescita economica molto rapida, che vedrà la rapida introduzione di tecnologie nuove e più efficienti). Entrambi gli studi prevedono un allungamento della stagione degli incendi da circa 20 (sotto lo scenario A1B) a 40 giorni (sotto lo scenario A2) in più per la fine del secolo, proprio a causa di prolungati periodi di siccità e precoci ondate di calore che influenzano lo stato idrico della vegetazione (Bedia *et al.*, 2014; Pellizzaro *et al.*, 2014) e che quindi la rendono molto più suscettibile all'innescò e capace di sostenere incendi di grande intensità, con possibili passaggi ad incendi di chioma.

L'allungamento della stagione degli incendi e l'aumento delle giornate con pericolosità estrema si potrà tradurre in un aumento delle superfici percorse. Diversi studi hanno stimato questo elemento e i risultati mostrano un intervallo di variazione molto più ampio rispetto a quello riscontrato per la pericolosità potenziale perché dipende non solo dagli scenari climatici o dal modello utilizzato ma anche dai fattori che lo guidano (Turco *et al.*, 2018;

10 FWI – Il "Fire Weather Index" è uno degli indici più utilizzati al mondo per il monitoraggio delle condizioni meteorologiche predisponenti gli incendi, e tiene conto delle precipitazioni, della temperatura e del vento.

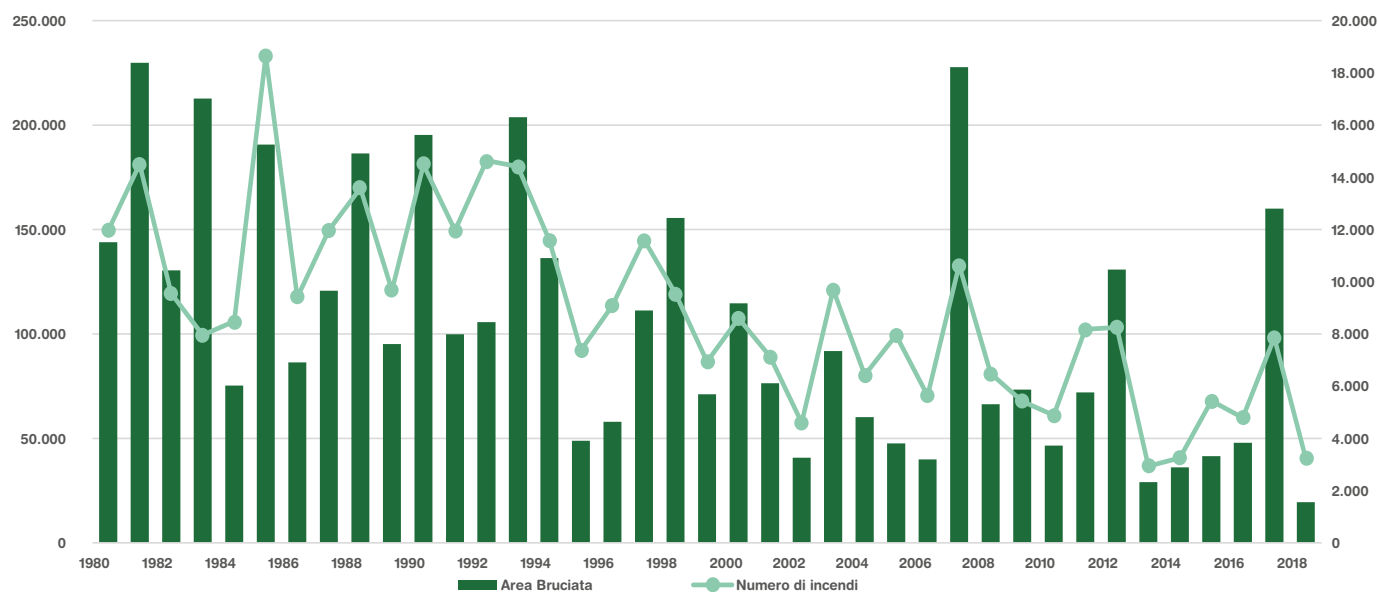


Figura 27. Numero di incendi e area bruciata (ha) in Italia durante il periodo 1980-2018. Elaborazione CMCC su dati EFFIS (<https://effis.jrc.ec.europa.eu>).

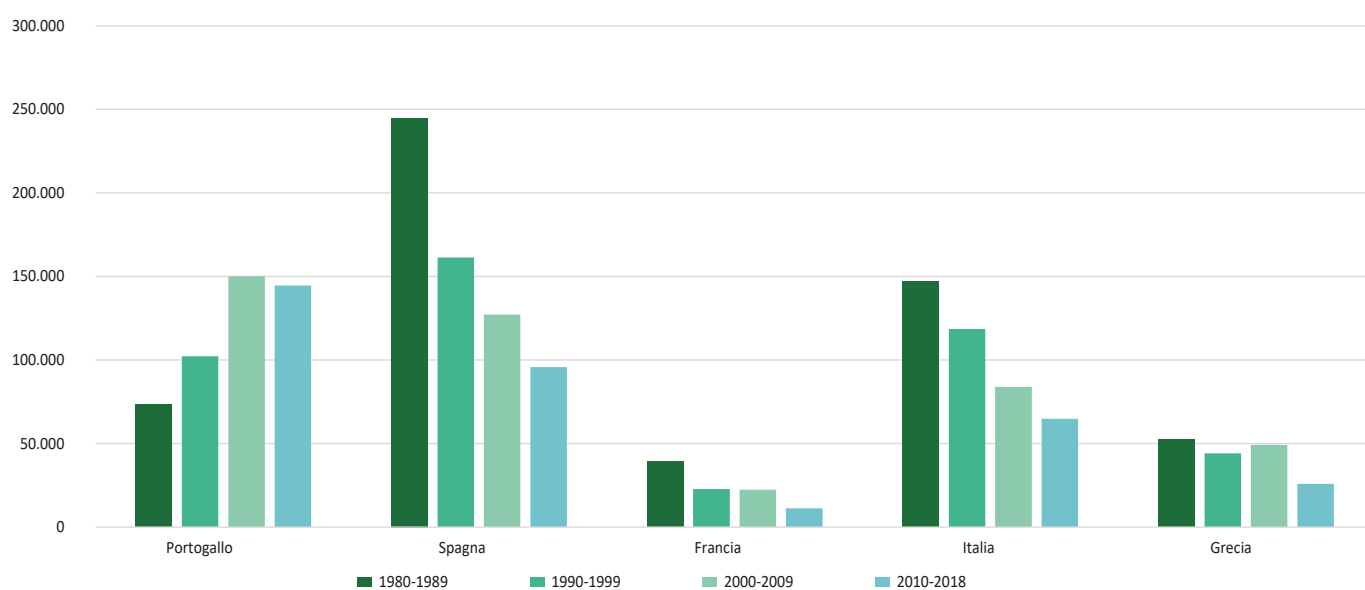


Figura 28. Area bruciata media (in ha) per decennio nei cinque Paesi del Mediterraneo più colpiti dal fenomeno (Portogallo, Spagna, Francia, Italia e Grecia). Elaborazione CMCC su dati EFFIS (<https://effis.jrc.ec.europa.eu>).

Dupuy *et al.*, 2020). Amatulli e colleghi (2013), combinando la pericolosità di incendio (FWI, calcolato a partire da un solo modello climatico e due scenari di emissione, A2 e B2) con diversi modelli statistici, prospettano un aumento dell'area bruciata nel periodo 2071-2100 rispetto al periodo 1985-2004 dal 66% al 140% per l'area Euro-Mediterranea e dal 21% al 43% per l'Italia, a seconda dello scenario considerato. Lo studio però non tiene conto delle attività di spegnimento e lotta attiva che sicuramente verranno introdotte per limitare il rischio a

beni e persone, e del ruolo giocato dalla vegetazione. Attraverso un approccio modellistico più sofisticato in grado di tenere in considerazione questi aspetti chiave, Migliavacca e colleghi (2013) hanno suggerito delle stime più conservative che prevedono per la fine del secolo (2070-2100), e sotto lo scenario A1B, un 37% di aumento dell'area bruciata nell'Europa Mediterranea rispetto al periodo 1960-1990. Più recentemente, Turco e colleghi (2018) hanno stimato, attraverso modelli statistici, l'area bruciata estiva nell'Europa Mediterranea per fine secolo,

considerando tre scenari di riscaldamento globale (1.5°, 2° e 3°C). Lo studio riporta un robusto aumento di area bruciata specialmente per gli scenari di riscaldamento a 2°C (con valori fra il 62 e l'87% a seconda delle specifiche del modello) e 3°C (con valori fra il 96 e il 187%).

Pochi studi in Europa, e principalmente concentrati su aree limitate, si sono occupati di simulare gli impatti dei cambiamenti climatici sulle caratteristiche degli incendi (probabilità di ignizione in una data area, lunghezza di fiamma, o ancora dimensione degli incendi) (Arca *et al.*, 2012; Kalabokidis *et al.*, 2015; Mitsopoulos *et al.*, 2016). A livello italiano, un unico studio (Lozano *et al.*, 2016) si è focalizzato su questi aspetti. I risultati riportano come il Sud Italia e le Isole spicchino fra le aree subnazionali analizzate per quanto riguarda l'aumento di valori di intensità ed esposizione al rischio potenziali e di possibilità nell'avere grandi incendi per la fine del secolo. Tali risultati sono dovuti alla combinazione fra tipologie arbustive di combustibile (molto infiammabili nel periodo estivo), umidità del combustibile e venti di forte intensità, in grado di alimentare la propagazione degli incendi e influenzare la lunghezza di fiamma.

L'aumento dell'area bruciata comporterà inoltre un incremento delle emissioni (CO₂, gas a effetto serra, ossia GHG, e particolato) dovute alla combustione del materiale vegetale (Bacciu *et al.*, 2015). Questo non solo potrà influenzare negativamente la qualità dell'aria e la salute umana a scala locale (Miranda *et al.*, 2008; Adefona *et al.*, 2016), ma potrà avere un importante impatto sul budget atmosferico e sul ciclo del carbonio a scala regionale e globale (Miranda *et al.*, 2014; Urbansky *et al.*, 2011). Ad oggi soltanto pochi lavori hanno trattato il possibile impatto dei cambiamenti climatici sulle emissioni da incendi boschivi in ambito nazionale. Per l'area Euro-Mediterranea si stima un aumento di emissioni di carbonio di circa il 94% per la fine del secolo rispetto al periodo 1960-1990 (Migliavacca *et al.*, 2013), considerando un *ensemble* di modelli sotto lo scenario A1B. Knorr e colleghi, nel 2016, hanno invece simulato per l'Italia un aumento delle emissioni di particolato (PM2.5) che va dal 70% al 124%, utilizzando un *ensemble* di modelli e i nuovi scenari di emissione RCP (*Representative Concentration Pathways*) 4.5 e 8.5.

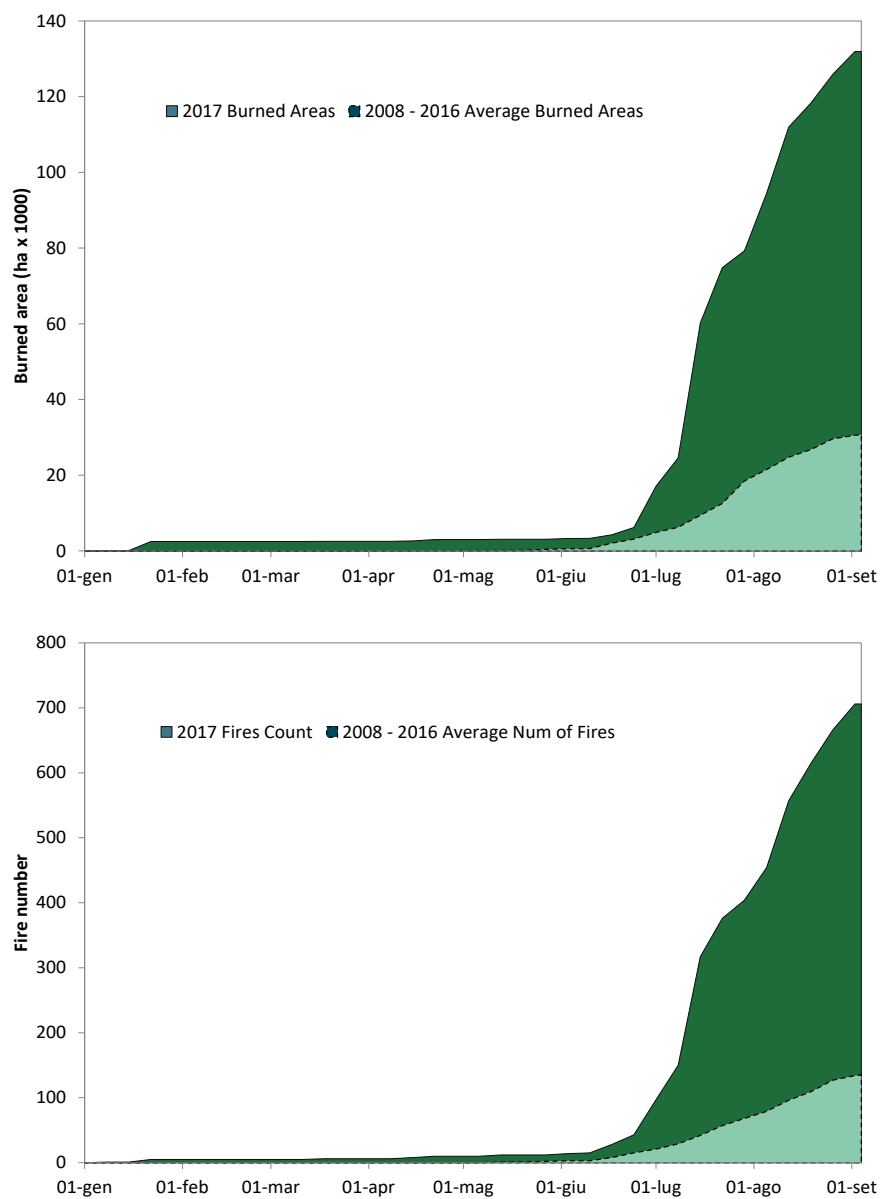


Figura 29. Confronto fra il numero di incendi (FN, in alto) e l'area percorsa (BA, in basso) in Italia nel 2017 rispetto alla media del periodo 2008-2016. Dati EFFIS (<http://effis.jrc.ec.europa.eu>) aggiornati al 3 settembre 2017.



4 Costi, strumenti e risorse

Più alta la temperatura, più elevati i costi. Gli impatti economici dei cambiamenti climatici in Italia risultano essere ancora gestibili seppur presentando costi comunque non trascurabili, circa lo 0,5% del PIL nazionale, solo per aumenti di temperatura inferiori ai 2°C rispetto al periodo preindustriale. Per incrementi di temperatura superiori, i costi aumentano rapidamente e in modo esponenziale. Ad esempio, nello scenario climatico ad alte emissioni, che prevede un aumento della temperatura medio di 4°C rispetto al periodo preindustriale a fine secolo, le perdite di PIL pro capite sarebbero superiori al 2,5% nel 2050 e tra il 7-8% a fine secolo.

Disuguaglianze. I cambiamenti climatici aumentano la disuguaglianza economica tra regioni. Gli impatti economici negativi tendono ad essere più elevati nelle aree relativamente più povere. Ad esempio, in uno scenario RCP8.5, gli indicatori di "uguaglianza" peggiorano del 16% nel 2050 e del 61% nel 2080

I settori più colpiti. Tutti i settori dell'economia italiana risultano impattati negativamente dai cambiamenti climatici, tuttavia le perdite maggiori vengono a determinarsi nelle reti e nella dotazione infrastrutturale del Paese, come conseguenza dell'intensificarsi dei fenomeni di dissesto idrogeologico, nell'agricoltura e nel settore turistico nei segmenti sia estivo che invernale.

Investimenti. I cambiamenti climatici richiederanno numerosi investimenti e rappresenteranno per l'Italia un'opportunità per investire in uno sviluppo sostenibile che il Green Deal europeo riconosce come unico modello di sviluppo per il futuro.

Un'occasione da non perdere (né rimandare). È il momento migliore in cui nuovi modi di fare impresa e nuove modalità per una gestione sostenibile del territorio devono entrare a far parte del bagaglio di imprese ed enti pubblici, locali e nazionali.

Usare le risorse. L'Europa e l'Italia hanno messo a disposizione ingenti risorse economiche: capacità di acquisirle con competenza e una giusta dose di innovazione, ed a volte ingegnosità, sarà la sfida per il prossimo trentennio.

Spunti per una valutazione economica degli impatti

Gli studi che propongono un'analisi degli impatti macro-economici dei cambiamenti climatici in Italia sono un numero limitato. Quelli esistenti si sviluppano principalmente secondo due approcci metodologici: il primo utilizza modelli macro-economici che traducono in termini di perdita di PIL per il Paese gli impatti ambientali indotti dei cambiamenti climatici; il secondo utilizza invece tecniche econometriche per proiettare al futuro la relazione tra performance economica e variabili climatiche precedentemente stimata su periodi storici osservati.

Tra gli studi modellistici, Carraro *et al.*, (2009) riportano perdite non trascurabili per l'Italia anche in uno scenario di moderato cambiamento climatico di 1°C rispetto al periodo preindustriale. Il PIL è previsto contrarsi tra lo 0,12 e lo 0,2% (in valori assoluti circa 2 - 3,5 miliardi di euro). Il secondo studio è Mcallum *et al.*, (2013), secondo il quale le perdite, ancora relativamente contenute attorno allo 0,5% del PIL in uno scenario di incremento della temperatura di 2°C, coerente con gli obiettivi minimi dell'Accordo di Parigi, potrebbero aumentare al 2% del PIL (circa 35 miliardi di euro) per incrementi di temperatura di 4°C, caratteristici dello scenario RCP8.5. Entrambi gli studi non prendono in considerazione alcune importanti categorie di impatto a causa della loro difficile quantificazione in termini di PIL: ci si riferisce ad esempio agli impatti conseguenti gli eventi estremi, agli impatti sulla salute e a quelli su ecosistemi e biodiversità. I valori proposti devono essere quindi considerati delle stime per difetto.

Nel filone di studi econometrici, in continua espansione, sulla relazione tra impatti economici e cambiamenti climatici – si veda Carleton e Hsiang (2015) per una rassegna –, due contributi recenti riportano dei risultati per l'Italia. Kahn *et al.*, (2019), conducono uno studio su dati in panel per 174 Paesi nel periodo 1960-2014, ed identificano una relazione statisticamente rilevante tra temperatura e performance economica nel lungo termine. Proiettandola

al futuro, risulta che l'Italia potrebbe perdere lo 0,9%, il 2,56% e il 7,1% del PIL pro capite nello scenario RCP8.5 nel 2030, 2050 e 2100 rispettivamente¹. Le perdite sarebbero molto più contenute, pari al massimo allo 0,05% del PIL pro capite nel 2100, nello scenario RCP2.6, coerente con la stabilizzazione dell'aumento della temperatura entro i 2°C entro fine secolo. Un secondo studio condotto sull'Italia (Fondazione per lo Sviluppo Sostenibile, 2019), utilizzando dati su scala sub-nazionale sia climatici che socioeconomici e applicando tecniche di econometria spaziale, evidenzia perdite più elevate pari al 3,7% nel 2050 e dell'8,5% nel 2080 con lo scenario RCP8.5. Lo studio riporta anche alcune considerazioni distributive: la disuguaglianza di reddito tra regioni in seguito agli impatti asimmetrici dei cambiamenti climatici, sempre in uno scenario RCP8.5, incrementerebbe del 16% nel 2050 e del 61% nel 2080.

Si può già notare, nonostante la diversità negli approcci adottati e in parte nei risultati, una sostanziale concordanza tra i diversi studi. Questi evidenziano come in uno scenario in cui l'aumento della temperatura rimanesse al di sotto dei 2°C le perdite economiche sarebbero per il Paese ragionevolmente contenute, per aumentare invece in modo esponenziale per livelli di temperatura più elevati.

Oltre agli studi per l'economia nel suo complesso, è disponibile una serie di ricerche che propongono delle stime economiche per settore o "area di impatto". Queste stime riportano i cosiddetti costi diretti. Rispetto agli studi precedenti l'analisi condotta è "parziale", nel senso che non considera le potenziali interazioni all'interno dell'intero sistema economico. I risultati di seguito riportati partono dalla rassegna effettuata in ambito di Piano Nazionale di Adattamento per l'Italia con alcuni aggiornamenti dalla letteratura più recente. Si sottolinea come fonti e metodologie siano altamente eterogenee, cosa che rende un confronto tra studi particolarmente complesso. Tuttavia il quadro che si delinea è quello di un Paese in cui i cambiamenti climatici comportano elevati rischi economici anche per diversi settori produttivi.

¹ Per confronto con gli studi precedenti si ricorda che l'RCP8.5 configura un aumento medio di temperatura di circa 2°C nel 2050 e superiore ai 4°C nel 2100 rispetto al periodo preindustriale (Rogelij *et al.*, 2012).

Impatti economici elevati sono previsti a seguito dell'intensificarsi dei fenomeni di dissesto idrogeologico. Secondo Ciscar *et al.*, (2018) l'Italia è il Paese europeo con la più alta esposizione economica al rischio alluvionale. In uno scenario di aumento di temperatura pari a 3°C al 2070, i costi diretti in termini di perdita attesa di capitale infrastrutturale si aggirerebbero tra gli 1 e i 2,3 miliardi di euro annui nel periodo 2021-2050, e tra gli 1,5 e i 15,2 miliardi di euro annui nel periodo 2071-2100. Alfieri *et al.*, (2015) quantificano i danni da eventi alluvionali nello scenario RCP8.5 tra i 4,5 e gli 11 miliardi nel 2050 e tra i 14 e i 72 miliardi nel 2080.

Costi diretti attesi elevati sono imputabili anche all'innalzamento del livello del mare e alle inondazioni costiere. Il già citato studio di Ciscar *et al.*, (2018) proietta per il 2050 perdite attese tra i 650 milioni di euro nell'RCP4.5 e i 900 milioni di euro nell'RCP8.5. Nel 2100 le perdite salirebbero a 3,1 miliardi di euro nell'RCP4.5 e a 5,7 miliardi di euro nell'RCP8.5.

Il settore agricolo risulta particolarmente esposto a riduzioni nelle rese a causa di fenomeni di scarsità idrica e siccitosi. Secondo McCallum *et al.*, (2013) in caso di innalzamento della temperatura di 2°C e 4°C rispetto all'epoca preindustriale, il valore complessivo della produzione agricola persa potrebbe aggirarsi tra i 13 e i 30 miliardi di euro rispettivamente. Van Passel e Massetti (2016) stimano nello scenario A2 dell'IPCC, il più pessimista dal punto di vista dello sviluppo sostenibile, un decremento di valore dei terreni agricoli in l'Italia valutabile tra gli 87 e 162 miliardi di euro al 2100.

Un settore che nel nostro Paese fornisce un elevato contributo alla produzione di valore aggiunto ed è al contempo sensibile ai cambiamenti climatici è quello turistico. McCallum *et al.*, (2013) riportano alcune stime delle possibili variazioni dei flussi turistici basati sulla semplice variazione delle condizioni di comfort termico associato alle temperature future. In uno scenario di aumento della temperatura di 2°C, si stima una riduzione del 15% degli arrivi internazionali, del 21,6% in uno scenario di aumento di 4°C. Tenendo conto anche del comportamento dei tu-

risti nazionali, l'impatto netto sulla domanda totale italiana risulta comunque in una contrazione del 6,6% e dell'8,9% con perdite dirette per il settore stimate in 17 e 52 miliardi di euro nei due scenari climatici, rispettivamente. Discorso a parte merita il segmento turistico invernale. Secondo l'OCSE (Abegg *et al.*, 2007), già in caso di una variazione moderata di temperatura (+1 °C), tutte le stazioni sciistiche del Friuli-Venezia Giulia non avrebbero una copertura nevosa naturale sufficiente a garantire la stagione. Lo stesso accadrebbe al 33%, 32% e 26% delle stazioni in Lombardia, Trentino e Piemonte, rispettivamente. Con un aumento di 4°C solo il 18% di tutte le stazioni operanti nel complesso dell'arco alpino italiano avrebbe una copertura nevosa naturale idonea a garantire la stagione invernale.

A livello italiano, non sono al momento invece disponibili valutazioni economiche della variazione dei consumi o della produzione energetica conseguenti i cambiamenti climatici. Qui si propongono quindi delle considerazioni di massima. Il Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici per l'Italia riporta un cospicuo aumento dei *cooling degree days*, eventi in cui la temperatura media giornaliera supera i 24°C, sia nello scenario RCP4.5 che 8.5, e una riduzione degli *heating degree days*, eventi in cui la temperatura media giornaliera scende al di sotto dei 15°C. Si può pertanto concludere preliminarmente che, alla luce della minore efficienza e del maggior costo della conversione della domanda energetica in consumi di energia finale, che caratterizza le tecnologie di raffreddamento rispetto a quelle di riscaldamento, l'incremento dei costi per i primi supererà i risparmi relativi ai secondi. L'offerta di energia dovrà invece far fronte ad una più problematica gestione dei flussi, dal momento che, seppur con connotazioni geografiche diversificate, la disponibilità delle risorse idriche per la produzione idroelettrica o per il raffreddamento delle centrali termoelettriche è prevista ridursi, mentre la variabilità nei regimi idrici nell'arco dell'anno è prevista aumentare. Altro elemento impattante l'offerta di energia sono gli eventi climatici estremi previsti in intensificazione con chiare implicazioni sulla sicurezza e continuità della produzione e distribuzione. Non sono infine da trascurare gli effetti sulle reti elettriche dovuti

agli aumenti della temperatura e alla siccità. La temperatura riduce la capacità dei trasformatori, aumenta la resistenza dei cavi e quindi aumenta le perdite di trasmissione. La capacità di trasporto dei cavi sotterranei, inoltre, si riduce anche in seguito al diminuire dell'umidità del suolo ed è quindi vulnerabile agli episodi di siccità. Elementi tutti che caratterizzeranno in modo crescente la penisola.

Si conclude infine con il settore ittico. Al momento, le conoscenze disponibili sono insufficienti a prevedere con precisione gli impatti dei cambiamenti climatici sulla fisiologia delle specie allevate, sulla disponibilità di siti idonei per le attività di acquacoltura e sulla capacità produttiva delle aziende. Si nota tuttavia che l'acquacoltura in Italia è particolarmente sviluppata negli ambienti ritenuti più vulnerabili ai cambiamenti climatici, in particolare lungo le zone costiere e lagunari del Mar Adriatico dove si concentrano, per naturale vocazione del territorio, la maggior parte delle attività di molluschicoltura e piscicoltura estensiva. Per la pesca due progetti Europei, il progetto SESAME² del 6PQ e VECTORS del 7PQ per la ricerca europea, propongono alcune stime relative agli impatti sulle catture delle principali specie ittiche commerciali in Italia concludendo che in base alle forzanti climatiche dello scenario A1B dell'IPCC si osserverebbe una contrazione al 2030 di circa l'8-9% nella produzione settoriale.

Programmi e risorse per contrastare i cambiamenti climatici

Programmi di adattamento

Per far fronte ai costi dei cambiamenti climatici e per trasformare potenziali danni in opportunità di crescita economica, nell'ultimo decennio sono state avviate a livello europeo e nazionale una serie di politiche e per la prima volta sono stati dedicati dei fondi specifici sul tema, con la consapevolezza che le risorse finanziarie investite oggi sono inferiori del costo in termini di danni e di mancata crescita di domani.

La Strategia Europea di Adattamento

L'Unione Europea è una delle istituzioni più ambiziose a livello internazionale in fatto di contrasto ai cambiamenti climatici. Anche sul fronte dell'adattamento, l'UE si è mossa in anticipo rispetto a molte altre istituzioni mondiali. Nel 2013, la Commissione ha approvato una Strategia di Adattamento ai Cambiamenti Climatici avente tre

principali obiettivi: promuovere l'azione degli Stati Membri, fornire gli strumenti per decisioni politiche informate dai risultati della ricerca scientifica e promuovere l'adattamento delle infrastrutture strategiche attraverso i programmi di finanziamento diretti dell'Unione. La Strategia, approvata nella forma di una Comunicazione della Commissione al Parlamento, non prevede azioni obbligatorie e dà invece mandato d'azione agli Stati Membri, anche per tenere in considerazione i differenti impatti a cui i Paesi europei sono differenzialmente esposti. Nel 2018 è stata portata a termine la valutazione della Commissione, la quale ha riconosciuto che in cinque anni dall'entrata in vigore, gli obiettivi della Strategia sono stati raggiunti: quasi tutti gli Stati Membri hanno sviluppato una strategia di adattamento nazionale; attraverso il programma Horizon 2020 e la piattaforma Climate-ADAPT le conoscenze scientifiche a disposizione dei decisori politici sono aumentate e migliorate, l'adattamento è stato integrato nei programmi e negli investimenti dell'Unione Europea.

Tabella 5. Fonti finanziarie per l'azione climatica a disposizione delle amministrazioni locali

Programmi di finanziamento Europei	LIFE	Urban Innovation Action	CIVITAS	URBACT	Programmi Interreg	Horizon 2020
Programmi co-finanziati da Italia e UE	PON	POR - FESR	POR - FSE	PSR		
Programmi finanziati dall'Italia	Piani Stralcio	Patti per il Sud				
Strumenti istituzioni finanziarie UE	BEI: Municipal Loans	BEI: Deep Green	BEI: NCFF	BEI: EEEF	BEI: ELENA	BEI: JASPERS
Strumenti istituzioni finanziarie Italia	CDP: Prestito ordinario	CDP: Prestito riqualificazione periferie urbane	CDP: Prestito conto termico			
Prodotti finanziari sul mercato	Prestiti	Partenariati Pubblico Privati	Green Bonds	Contratti di Efficienza Energetica	On bill financing	

SNAC e PNACC. Un quadro unico per l'adattamento in Italia

A seguito della pubblicazione della Strategia Europea di Adattamento, l'Italia ha risposto con la definizione di una propria strategia di adattamento di livello nazionale: la SNAC – Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici³. Il documento, approvato con il decreto direttoriale n. 86 del 16 giugno 2015, ha definito i confini di una possibile azione di adattamento: sono state passate in rassegna le conoscenze scientifiche al fine di produrre scenari attendibili dei possibili impatti (Castellari et al., 2014). Sono quindi stati identificati 18 settori strategici, i relativi impatti, e sono state proposte alcune azioni per l'adattamento.

L'Italia ha successivamente iniziato il processo di definizione di un piano che realizzasse gli obiettivi programmatici della SNAC. È stato così sviluppato il Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC), non ancora formalmente approvato dal governo ma la cui bozza è stata già sottoposta a due consultazioni pubbliche nel 2017. Il PNACC riconosce che l'adattamento deve essere affrontato a livello locale, in quanto gli impatti possono essere differenti in base alle condizioni climatiche (e l'Italia, per conformazione, ospita climi molto diversi, dalle Alpi alla Sicilia), ai differenti beni esposti e alle differenti traiettorie di sviluppo locale. Obiettivi del piano sono sia la riduzione della vulnerabilità territoriale, sia la trasformazione dei rischi in nuove opportunità di sviluppo in base alle condizioni locali.

Il documento quindi offre un quadro per l'analisi climatica, identificando sei macroregioni climatiche terrestri e proiettando due differenti scenari di concentrazione delle emissioni (lo scenario medio RCP4.5 e lo scenario RCP8.5 come definiti dal Quinto Rapporto di Valutazione dell'IPCC) per capire come cambierà il clima.

Le amministrazioni locali possono quindi **conoscere il clima futuro** nella propria regione e verificare quali siano i **principali impatti attesi**, sia a livello territoriale sia settoriale, seguendo la suddivisione proposta dalla SNAC.

Il Piano definisce anche un ricco database di possibili **azioni di adattamento** per ciascun settore, che gli amministratori locali possono selezionare in base alle proprie strategie di sviluppo locale. Nel documento si raccomanda di lavorare in maniera integrata, ovvero prediligendo le azioni che gravitano intorno ad una stessa risorsa con un approccio trans-settoriale, ma anche integrando l'azione climatica nelle normali procedure e nei normali programmi di spesa delle pubbliche amministrazioni.

Infine il PNACC spiega come istituire un **sistema di monitoraggio** delle azioni efficace a scala locale, ma propone anche l'istituzione di una cabina di regia per il monitoraggio del Piano stesso. Quest'ultimo è indispensabile, dato che l'azione vera e propria dovrebbe essere portata avanti a livello locale mentre il livello centrale dovrebbe invece garantire la standardizzazione delle informazioni, l'omogeneità degli approcci e il supporto.

3 <https://www.minambiente.it/notizie/strategia-nazionale-di-adattamento-ai-cambiamenti-climatici-0>

Risorse finanziarie per l'adattamento

Prima di entrare nel merito dell'analisi della finanza pubblica, occorre fare una precisazione. I fondi espressamente dedicati all'adattamento sono una novità nel panorama finanziario e per altro sono abbastanza limitati in termini di dimensioni. Possono essere utili per misure urgenti o comunque applicabili nel breve periodo, ma la vera sfida per il futuro è integrare l'adattamento nelle normali voci di spesa delle politiche pubbliche (*mainstreaming*). Il tema dell'adattamento deve essere preso in considerazione quando si fanno le normali politiche di pianificazione, si elaborano programmi di spesa o si sviluppano progetti di investimento. Di seguito analizziamo le principali risorse finanziarie per progetti riconducibili all'adattamento o il cui tema possa facilmente essere integrato, ma non espressamente dedicati.

La maggior parte delle risorse è resa disponibile nel quadro delle priorità previste dal programma finanziario pluriennale 2014-2020 definito in sede europea a cui gli Stati Membri partecipano co-finanziando con risorse proprie. In base alle regole europee, tali risorse sono allocate su base competitiva: sia i programmi gestiti direttamente dalla Commissione Europea, sia i PON e i POR sono tutti distribuiti sulla base della presentazione e se-

lezione di proposte da parte degli enti locali. La disponibilità delle risorse è quindi soggetta ad una valutazione della proposta. In questo impianto, alle amministrazioni locali che intendono applicare per ottenere finanziamenti è richiesto lo spirito di iniziativa e la capacità di proporre progetti che possano vincere le risorse a disposizione, magari combinando più opportunità insieme e non limitandosi alla sola finanza pubblica, ma esplorando possibilità provenienti anche dal settore della finanza privata. Di seguito un quadro non esaustivo delle risorse a disposizione delle pubbliche amministrazioni locali nel periodo di programmazione 2014-2020 per poter investire in misure di adattamento ai cambiamenti climatici.

È indispensabile notare che i programmi di finanziamento europei non permettono investimenti in lavori o infrastrutture (se non per infrastrutture leggere come nel caso di alcuni Interreg o piccoli lavori finalizzati alla conservazione della biodiversità nel caso del programma LIFE). Anche i programmi di assistenza allo sviluppo di progetti della Banca Europea degli Investimenti non finanziano direttamente investimenti, ma solo la preparazione di progetti successivamente finanziati dalla Banca stessa. Le risorse finanziate o co-finanziate dagli Stati Membri restano le più numerose per finanziare lavori, insieme a quelle messe a disposizione dalle istituzioni finanziarie e dal mercato finanziario.

Tabella 6. Fonti finanziarie per l'azione climatica a disposizione delle amministrazioni locali

Programmi di finanziamento Europei	LIFE	Urban Innovation Action	CIVITAS	URBACT	Programmi Interreg	Horizon 202
Programmi co-finanziati da Italia e UE	PON	POR - FESR	POR - FSE	PSR		
Programmi finanziati dall'Italia	Piani Stralcio	Patti per il Sud				
Strumenti istituzioni finanziarie UE	BEI: Municipal Loans	BEI: Deep Green	BEI: NCFE	BEI: EEEF	BEI: ELENA	BEI: JASPERS
Strumenti istituzioni finanziarie Italia	CDP: Prestito ordinario	CDP: Prestito riqualificazione periferie urbane	CDP: Prestito conto termico			
Prodotti finanziari sul mercato	Prestiti	Partenariati Pubblico Privati	Green Bonds	Contratti di Efficienza Energetica	On bill financing	

L'adattamento nel budget dell'Unione Europea

L'impegno profuso dall'Unione Europea nell'azione climatica in termini finanziari è imponente. Negli ultimi 7 anni, il programma di spesa dell'Unione (*multiannual financial framework* 2014-2020) ha previsto un significativo 20% di risorse dedicate all'azione per il clima, che ammontano a circa 206 miliardi di euro. Effettivamente questo obiettivo di spesa è stato quasi raggiunto, dato che l'UE stima che al 2020 siano stati spesi 200 miliardi di euro per il clima (il 18,8% del totale). Tuttavia, queste cifre si riferiscono all'azione climatica in generale e non fanno distinzione tra mitigazione e adattamento. Queste risorse sono state integrate in più voci spesa: sia nei programmi diretti come la **Politica Agricola Comune**, il **Fondo per lo Sviluppo Rurale**, il programma di ricerca **Orizzonte 2020** o quello sull'ambiente **Life+**, sia nei Fondi Strutturali e di Investimento Europei (FSIE).

Analizzando i soli **Fondi Strutturali e di Investimento Europei**⁴, si può notare che a livello europeo la voce di spesa "Adattamento ai cambiamenti climatici e prevenzione dei rischi" è la nona su quattordici per un ammontare totale di 41 miliardi di euro già spesi nel periodo 2014-2020 (circa il 6% del totale). Sulla stessa voce di spesa e nello stesso periodo, l'Italia ha speso 5 miliardi di euro (pari a circa il 7% del totale delle risorse a disposizione per l'Italia), seconda solo alla Francia che ha speso 5,3 miliardi di euro e ampiamente davanti alla Germania (terza classificata con 4,2 miliardi di euro) e all'Austria (quarta con 2,4 miliardi di euro). Da notare infine che la somma a disposizione dell'Italia contava un co-finanziamento nazionale pari a circa il 45% (2,2 miliardi di euro), nettamente superiore in termini assoluti e relativi al cofinanziamento di Francia (28%) e Germania (32%). Ciò indica un netto interesse per l'Italia nell'investire le risorse dei FSIE sul tema dell'adattamento.

La finanza pubblica per l'adattamento in Italia

In Italia la principale fonte di spesa pubblica a livello centrale resta la programmazione annuale che viene proposta dal Governo e approvata dal Parlamento (Do-

cumento di Economia e Finanza e Legge di Bilancio). Accanto a questo sistema, le stesse Leggi di Bilancio destinano una parte delle risorse ad una programmazione pluriennale che normalmente si affianca a quella europea. Per quanto concerne l'adattamento in senso lato, le ultime legislature non hanno riservato particolari risorse nella programmazione annuale, ma hanno destinato somme nella programmazione pluriennale 2014-2020. Non è ancora possibile conoscere quelle che saranno le priorità di spesa per il periodo 2021-2027, ma si può iniziare ad analizzare quanto è stato fatto nel periodo che si sta concludendo. Nell'arco di questi sette anni, il **Fondo per lo Sviluppo e la Coesione (FSC)** ha co-finanziato i vari Programmi Operativi Nazionali e altre iniziative quali i cosiddetti Piani Stralcio e i Patti per il Sud. L'altra parte del co-finanziamento è assicurata dall'Unione Europea, motivo per cui questi piani si inseriscono nel solco delle modalità, regolamenti e priorità definite in sede europea. Benché non sia ancora possibile fare una valutazione complessiva delle risorse finanziarie destinate all'adattamento in senso stretto, si possono individuare quei programmi dove potenzialmente il tema potesse essere integrato nella spesa.

Il FSC, la cui dotazione nel periodo 2014-2020 supera i 54 miliardi di euro, ha finanziato numerosi **Piani Stralcio** e alcuni di essi prevedono investimenti che possono ricomprendere il tema dell'adattamento: i piani per le bonifiche delle aree di Trieste, Piombino (65,4 milioni di euro complessivi); il piano per la mitigazione del rischio idrogeologico (450 milioni di euro cui si è aggiunto un ulteriore contributo di 100 milioni di euro dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare); il piano per la riqualificazione del patrimonio edilizio scolastico statale (60 milioni di euro). Inoltre il FSC ha finanziato i **Piani per il Sud**, che destinano oltre 13 miliardi di euro alle regioni ed enti locali del Mezzogiorno per finanziare opere pubbliche di infrastrutturazione viaria, protezione del territorio dal rischio idrogeologico e promozione del patrimonio turistico-culturale. In aggiunta a questi programmi speciali, il FSC finanzia i **Programmi**

Operativi Nazionali (PON), mobilitando complessivamente circa 6,8 miliardi di euro nei loro sette anni di programmazione. Il tema dell'adattamento è potenzialmente integrato nel PON Città Metropolitane, dedicato ai nuovi enti territoriali e dotato di 318 milioni di euro per sostenere spese nel campo dei trasporti pubblici sostenibili, investimenti che possono tenere conto dell'adattamento per offrire servizi di trasporto a "prova di clima". Un secondo esempio è il PON Cultura e Sviluppo (270 milioni di euro) che rappresenta una fonte di finanziamento per la tutela e l'adattamento del patrimonio culturale, particolarmente esposto ai rischi connessi ai cambiamenti climatici. Persino il PON Scuola, prevedendo la riqualificazione e la messa in sicurezza degli edifici scolastici, è una potenziale risorsa per l'adattamento del patrimonio immobiliare scolastico, specialmente considerando il lungo orizzonte di vita di simili investimenti. Il PON Infrastrutture e Reti è senza dubbio interessato dal tema dei cambiamenti climatici, dovendo necessariamente confrontarsi, nella pianificazione di opere pubbliche dal lunghissimo ciclo di vita, con il clima futuro e i rischi connessi. Infine il PON Sviluppo Rurale e il PON FEAMP (Fondo Europeo Affari Marittimi e Pesca), facendo proprie le indicazioni comunitarie, già considerano l'adattamento e finanziano misure che potremmo considerare adattive.

Per completare questo quadro sulla finanza pubblica, bisogna menzionare anche le risorse messe a disposizione a livello regionale dai vari **Piani Operativi Regionali (POR)** e **Piani di Sviluppo Rurale (PSR)**. Si tratta prevalentemente di risorse comunitarie amministrate e co-finanziate dalle Regioni. In questo caso, alcune di esse hanno persino selezionato l'adattamento (prevalentemente in termini di mitigazione del dissesto idrogeologico) tra i vari Obiettivi Tematici definiti in sede europea. Complessivamente i POR mobilitano oltre 36 miliardi di euro, mentre i PSR mobilitano oltre 20 miliardi di euro.

Infine, occorre segnalare che nel panorama di finanza pubblica si possono considerare anche le risorse della **Cassa Depositi e Prestiti (CDP)** che, investendo in

vari settori strategici del Paese come le infrastrutture e l'energia, possono essere interessate dal tema dell'adattamento.

Prodotti finanziari per il clima

Da qualche anno la transizione verso la sostenibilità ha coinvolto anche il settore finanziario, che si è progressivamente interessato delle opportunità offerte dalla mitigazione (soprattutto), ossia dalla riduzione delle emissioni di gas serra, e dall'adattamento ai cambiamenti climatici. D'altronde, le sole risorse pubbliche non sarebbero sufficienti a spingere il cambiamento dell'economia richiesto per raggiungere la neutralità di carbonio. Molte imprese nel settore assicurativo e bancario offrono ormai prodotti capaci di finanziare progetti per il clima, alcuni dei quali particolarmente innovativi.

In aggiunta alle sovvenzioni analizzate finora, un'opzione a disposizione delle pubbliche amministrazioni per finanziare un progetto può essere quella di rivolgersi direttamente al mercato finanziario. Oltre ai normali **prestiti**, per specifici progetti con lunghi tempi di ritorno sull'investimento (è il caso delle infrastrutture) le pubbliche amministrazioni possono raccogliere capitali attraverso la creazione di **partenariati pubblico-privati (PPP)**. Il soggetto pubblico si fa carico di una parte del rischio finanziario del progetto, permettendo l'ingresso di capitali privati. I PPP possono prendere forme molto diverse a seconda della forma legale del contratto e possono adottare differenti strumenti per la mitigazione e la riallocazione del rischio tra le parti: garanzie, prestiti a tasso agevolato etc.

Un'altra fonte di finanziamento offerta dal mercato sono le cosiddette obbligazioni verdi o **Green Bonds**. Le obbligazioni verdi sono forme di prestito in cui l'emittitore si impegna a restituire il denaro raccolto sul mercato delle obbligazioni finalizzandolo a specifici progetti di valenza ambientale. I **Green Bonds** possono essere emessi anche da pubbliche amministrazioni e rappresentano una nuova forma di finanziamento specifica per progetti di

rilievo climatico. Il mercato delle obbligazioni verdi è in crescita a livello globale. Complessivamente, il mercato ha superato i 257 miliardi di dollari di emissioni, in costante aumento fin dalla prima emissione di un green bond nel 2007 da parte della Banca Europea degli Investimenti (BEI). Le obbligazioni verdi sono emesse prevalentemente in Europa e finalizzate per lo più a finanziare progetti nel campo dell'energia e dell'efficientamento degli edifici. In Italia il primo *Green Bonds* è stato emesso nel 2014 dalla multi-utility HERA S.p.A., società di pubblica utilità quotata in borsa e partecipata dai comuni dell'Emilia-Romagna, Marche, Toscana, Veneto e Friuli-Venezia Giulia. L'ammontare complessivo di 500 milioni di euro è servito a finanziare investimenti nel campo della produzione di energia da fonti rinnovabili. Recentemente anche la Cassa Depositi e Prestiti ha emesso tre ordini di obbligazioni (*Social Bond*, *Green Bond* e *Sustainability Bond*) finalizzate a raccogliere capitali per finanziare progetti nei campi delle infrastrutture, dell'istruzione, dello sviluppo delle Piccole e Medie Imprese, dell'edilizia sociale e della sostenibilità energetica.

Esistono inoltre prodotti espressamente dedicati al finanziamento di iniziative di efficientamento energetico, quali i **contratti di prestazione energetica** (*Energy Performance Contract* - EPC) che possono permettere ad una pubblica amministrazione di appaltare ad un soggetto privato i lavori di efficientamento ad una specifica tariffa calcolata in base ai risparmi generati dal minor consumo di energia. Analogamente, ma più orientato verso i piccoli proprietari, esiste l'**on-bill financing**, che permette di ripagare l'investimento di efficientamento fatto da una società privata direttamente attraverso le utenze. Sebbene dedicati alla mitigazione, queste possibilità possono integrare il tema dell'adattamento finanziando l'ammmodernamento di edifici che siano "a prova di clima".

Infine un'ultima opportunità non legata al mercato finanziario, ma che inizia a prendere piede anche nel campo del finanziamento di progetti della pubblica amministrazione è il cosiddetto **crowdfunding**. In Italia l'esempio più rilevante è quello del Portico di San Luca a Bologna, dove il Comune è riuscito a raccogliere la somma neces-

saria al restauro del porticato dal contributo volontario di oltre 7000 sostenitori.

Naturalmente tutti questi schemi e prodotti finanziari possono essere combinati in varia maniera tra di loro e anche in aggiunta alle normali fonti di finanziamento pubbliche, nonché alle sovvenzioni disponibili a livello europeo e nazionale. Ciò richiede ovviamente un certo grado di creatività e soprattutto di competenza all'interno dell'amministrazione locale per poter gestire in maniera efficiente questa tipologia di progetti.

Il futuro del prossimo quadro finanziario

Il prossimo programma quadro di finanziamento 2021-2027 è attualmente in discussione tra Commissione, Parlamento e Consiglio Europeo. La situazione resta piuttosto incerta, anche a causa della pandemia internazionale e della conseguente crisi economica che potrebbe rimettere in discussione la destinazione delle risorse. Inizialmente le risorse a disposizione per l'azione climatica dovevano essere aumentate al 25% del totale (circa 320 miliardi di euro) con un significativo incremento, specialmente considerando l'uscita del Regno Unito dall'Unione Europea.

Pur in questo quadro di incertezza, senza dubbio la volontà della nuova Commissione Europea presieduta da Ursula von der Leyen è quella di dare grande rilievo al tema dei cambiamenti climatici. Infatti, nel novembre 2019, la Commissione ha deciso di rilanciare gli obiettivi per il clima continentali con il cosiddetto *Green Deal* europeo. Il piano rappresenta un cronoprogramma per i prossimi dieci anni, in modo da mettere l'Europa nelle condizioni di raggiungere la neutralità carbonica nel 2050. Il programma è composto da vari tasselli attualmente in discussione all'interno delle istituzioni europee e allo stato attuale aventi differente forza legislativa. Uno dei punti del documento, e l'unico a tema adattamento, è la creazione di una nuova Strategia di Adattamento che vada a sostituire e rilanciare quella del 2013. Il nuovo documento è atteso tra il 2020 e il 2021.

BOX 10. STANDARDIZZAZIONE E TASSONOMIA COMUNE EUROPEA PER LA FINANZA CLIMATICA

La finanza per il clima è un settore relativamente recente. Dopo una prima fase di grande innovazione, esso attraversa adesso un momento di sistemazione e strutturazione. Il presupposto di tutti questi prodotti “verdi” disponibili sul mercato è infatti la trasparenza circa la finalità (*use-of-proceed*) per cui i fondi sono raccolti e, ovviamente, il monitoraggio dei risultati. Inizialmente gli operatori si sono dotati di schemi volontari come la *Climate Bond Initiative*, ma da qualche anno la Commissione Europea ha avviato dei lavori per definire uno schema comune di livello europeo che sia coerente e omogeneo per tutti i prodotti di “finanza sostenibile”.

Nel marzo 2018, la Commissione dà mandato ad un gruppo di esperti (*Technical Expert Group – TEG*) che coinvolge esponenti sia del mondo privato sia di quello pubblico, di definire:

- una tassonomia europea, per definire se un’attività economica sia sostenibile dal punto di vista ambientale;
- uno standard europeo per le obbligazioni verdi;
- una metodologia europea per il benchmark climatico;
- delle linee guida per migliorare la qualità della divulgazione di informazioni aziendali relative al clima.

Dopo due anni di lavori, il TEG ha finalmente prodotto la tassonomia. Una ricca casistica di valutazioni della sostenibilità delle attività economiche basata su tre criteri: il misurabile contributo alla sostenibilità in uno di sei ambiti tematici, il fatto di non causare danni negli altri ambiti tematici e il fatto di rispettare minimi standard in fatto di sicurezza. La tassonomia funge da riferimento anche per lo standard delle obbligazioni verdi. Attualmente, la Commissione, il Parlamento e il Consiglio hanno raggiunto un accordo politico per l’adozione della tassonomia che ci si attende inizi ad entrare in funzione nel 2021. L’obiettivo della tassonomia e degli altri strumenti è quello di fornire una base unica e coerente per tutti quegli investimenti previsti nell’ambito del Green Deal europeo e, più recentemente, nel rilancio dell’economia continentale dopo la recessione dovuta alla pandemia di COVID-19.





5 Iniziative di adattamento

L'adattamento rappresenta un'opportunità per rispondere agli effetti generati dai cambiamenti climatici. Sebbene i fenomeni climatici siano generati alla scala globale, i loro effetti e le loro manifestazioni sono molto diversi nelle differenti aree geografiche, per cui l'adattamento si esplica alla scala locale per adeguare il territorio ad un fenomeno in rapida accelerazione e con manifestazioni gradualmente amplificate.

Il PNACC – Piano nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici – mira ad offrire un quadro comune e coerente per guidare l'azione a livello locale. Tuttavia, in attesa della sua approvazione, molti enti sotto-ordinati hanno già sviluppato piani di adattamento o intrapreso iniziative locali. Ad esempio, alcune regioni quali la Lombardia, la Sardegna e l'Emilia-Romagna hanno già approvato strategie di adattamento, mentre alcune delle principali città italiane, come Bologna, si sono dotate di strumenti per la pianificazione dell'adattamento.

Di seguito vengono riportati alcuni esempi di iniziative di adattamento.

Iniziative a livello urbano

Per quanto riguarda l'ambiente urbano, la sfida all'adattamento ai cambiamenti climatici ha importanti risvolti. In Italia, a differenza di quanto previsto a livello nazionale, non vi è ancora una disciplina cogente per guidare l'adattamento nelle nostre città. Tuttavia ciò non ostacola il sorgere e la diffusione di numerose iniziative da parte di un crescente numero di realtà locali che spesso si inseriscono in iniziative di respiro internazionale. Tra queste ultime si citano il Patto dei Sindaci (*Covenant of Mayors*) o il Patto dei Sindaci per il Clima e l'Energia, cui ad oggi (giugno 2020) aderiscono più di 10 mila amministrazioni locali, rappresentative di circa 319 milioni di cittadini, o la rete C40, il network mondiale delle città per la lotta ai cambiamenti climatici che vede attualmente la partecipazione di Roma, Milano e Venezia per l'Italia.

Il Patto dei Sindaci in Italia ha riscosso particolare successo. Si tratta di un programma volontario lanciato nel 2008 che mira a ridurre le emissioni climalteranti a livello

comunale, superando gli obiettivi assunti a livello continentale e che dal 2013 (proprio grazie a quanto previsto dalla Strategia Europea di Adattamento) include anche il tema dell'adattamento. La sottoscrizione del Patto dei Sindaci prevede la realizzazione di un Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile e il Clima (PAESC). In base agli obiettivi selezionati, questo può comprendere anche una sezione sull'adattamento rendendo di fatto il PAESC un vero e proprio piano per l'adattamento a livello comunale. L'Italia rappresenta il Paese con la maggiore partecipazione al Patto dei Sindaci: su 6455 comuni in Europa ben 3291 sono italiani. Questi rappresentano il 41% di tutti i Comuni italiani. Ad oggi, tra i 3291 Comuni italiani aderenti al patto, 560 hanno selezionato anche gli obiettivi di adattamento (il totale in Europa è 1305).

Gli insegnamenti da tali esperienze evidenziano che per ridurre rischio e vulnerabilità ai cambiamenti climatici nelle aree urbane:

- Molte azioni efficaci si possono intraprendere da subito e con costi nulli o comunque molto limitati, prima tra tutte un'applicazione estesa del principio di precauzione, evitando di urbanizzare aree potenzialmente a rischio dissesto e tutelando gli spazi liberi e le aree verdi (parchi, giardini, aree naturali protette etc.) soprattutto se ubicati in aree vulnerabili (fiumi, coste, etc.).
- Investire risorse nell'adattamento climatico non è "solo azione ambientale", ma coincide con il promuovere la qualità della vita dei cittadini e la sostenibilità dello sviluppo.
- Le visioni di lungo periodo hanno un ruolo fondamentale. Queste devono però essere supportate da strumenti conoscitivi adeguati. Da un lato è necessario uno sforzo da parte della comunità scientifica, che si sta adeguando in questo senso, per rendere via via più accessibile tale conoscenza agli amministratori, dall'altra parte è necessario investire risorse adeguate per costruire le premesse scientifiche, amministrative, sociali ed economiche necessarie al cambiamento verso una comunità consapevole.

Di seguito si riportano, a titolo di esempio, alcune iniziative di adattamento sviluppate, a livello locale, in ambiente urbano.

Formazione e sostegno per l'adattamento locale in Emilia-Romagna

Mancanza di conoscenze e di risorse sono tra gli impedimenti nominati più frequentemente da parte degli enti locali per la realizzazione di piani di adattamento ai cambiamenti climatici. La regione Emilia-Romagna ha attivato pertanto diverse forme di sostegno per i propri comuni e associazioni di comuni, per ovviare a queste due lacune. Le linee di intervento comprendono trasferimento di conoscenza, supporto finanziario e supporto organizzativo per la redazione di PAESC.

Nell'ambito dei laboratori REBUS® (Laboratorio sulla rigenerazione urbana e i cambiamenti climatici) la Regione ha organizzato, già dal 2015, percorsi formativi e progettuali indirizzati a tecnici (enti locali, università) e professionisti attivi nei contesti locali coinvolti (pianificatori, paesaggisti, agronomi e forestali, ingegneri etc.). L'obiettivo di questi percorsi era di diffondere le competenze tecniche sulle potenzialità di soluzioni basate sulla natura (*nature based*) nella progettazione di spazi pubblici urbani e come misure per l'adattamento climatico. Nei laboratori REBUS, i partecipanti prendevano parte a lezioni frontali, sopralluoghi e workshop, per poi progettare interventi simulati di rigenerazione urbana per quartieri delle città partecipanti quali Parma, Rimini, Modena e, successivamente, Ferrara, Ravenna e San Lazzaro di Savena (Bologna). Gli interventi spaziavano dalla trasformazione di spazi pubblici per migliorarne il comfort ambientale alla progettazione di eco-quartieri per la mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici. Le simulazioni affrontavano aspetti concreti di progettazione sulla base di strumenti legali e bandi fittizi, e venivano valutate sulla base, inter alia, dei miglioramenti microclimatici ottenuti rispetto alla situazione preesistente. Nell'ambito della Strategia regionale per il clima è stato creato, successivamente, l'Osservatorio sui cambiamenti climatici e relativi impatti in Emilia-Romagna. L'Osservatorio si è dotato di un Forum regionale, per pro-

muovere il dialogo con le Amministrazioni locali e i settori produttivi per confrontarsi sulle politiche di mitigazione e adattamento a livello locale e per informare i cittadini. Attraverso il Forum, le Amministrazioni pubbliche possono accedere a informazioni e strumenti per la pianificazione climatica, soprattutto per l'analisi di situazioni critiche, lo sviluppo di soluzioni e l'uso di infrastrutture verdi. Il servizio climatico dell'Agenzia regionale per la prevenzione, l'ambiente e l'energia dell'Emilia-Romagna fornisce le proiezioni climatiche e di impatto fino al 2050 – 2100 per Aree Omogenee, indicatori di vulnerabilità climatici, e organizza eventi di formazione per amministrazioni comunali o di unioni di comuni. La redazione dei piani nei comuni è inoltre supportata con finanziamenti specifici. Il Forum, infine, coinvolge anche aziende, promuovendo la redazione di piani di rischio climatico aziendali e servizi climatici, e sviluppa campagne di informazione per la cittadinanza.

Maggiori informazioni sono reperibili ai seguenti link:

- Rebus®: <https://territorio.regione.emilia-romagna.it/qualita-urbana/sostenibilita/rebus>.
- Forum: <https://energia.regione.emilia-romagna.it/bandi/contributo-per-redazione-del-piano-di-azione-per-il-clima-e-e-lenergia-sostenibile>.
- Bando: <https://energia.regione.emilia-romagna.it/bandi/contributo-per-redazione-del-piano-di-azione-per-il-clima-e-e-lenergia-sostenibile>.

Un percorso comune di adattamento contro le alluvioni urbane: dalla scala locale a quella transfrontaliera

Incrementi nei valori medi ed estremi delle temperature, dei periodi di siccità e della frequenza di eventi quali piogge improvvise e intense rappresentano alcune delle sfide climatiche a cui le nostre città sono soggette. Negli ultimi 5 anni, le alluvioni urbane hanno causato più di 1 miliardo di danni nella zona transfrontaliera dell'Alto Tirreno tra Italia e Francia, evidenziando l'urgenza di intervenire non solo per contrastare le cause dei cambiamenti climatici, ma anche per adattarsi alle conseguenze negative già in atto. Il progetto ADAPT (Assistere l'aDattamento ai cambia-

menti climatici dei sistemi urbani dello sPazio Transfrontaliero), cofinanziato dal Programma Interreg Italia-Francia Marittimo 2014-2020 per un totale di 3,7 milioni di euro, nasce proprio dall'esigenza di migliorare la capacità delle istituzioni pubbliche di prevenire e gestire, in forma congiunta, i rischi derivanti dai cambiamenti climatici e di rendere quindi le città, italiane e francesi, dell'Alto Tirreno maggiormente capaci di adattarsi agli eventi estremi più frequenti ed intensi causati dai cambiamenti climatici, quali le alluvioni urbane da acque meteoriche.

Il progetto è coordinato da Anci Toscana e coinvolge le città italiane di Alghero, La Spezia, Livorno, Rosignano Marittimo, Oristano, Sassari, Savona, Vado Ligure, il Comune di Ajaccio, la Comunità di agglomerazione di Bastia in Corsica, il Dipartimento del Var in Francia, l'associazione regionale di imprese di servizio pubblico CISPEL e l'ente di ricerca e sviluppo tecnologico Fondazione CIMA.

Le Azioni del Progetto ADAPT spaziano tra:

1. Migliorare conoscenze e competenze attraverso il coinvolgimento di cittadini, referenti tecnici e politici della pubblica amministrazione in eventi di sensibilizzazione sul tema dell'adattamento ai cambiamenti climatici, e attraverso percorsi di formazione per tecnici e dirigenti sulla pianificazione del territorio, per progettare spazi urbani 'resistenti' ai rischi posti dai cambiamenti climatici.
2. Sviluppare profili climatici e piani di adattamento locali per le città coinvolte nel progetto.
3. Sviluppare un piano congiunto transfrontaliero per l'adattamento sulla base delle conoscenze, degli strumenti e degli elementi comuni prodotti dal progetto, per identificare soluzioni per l'adattamento replicabili e trasferibili in altre città a rischio di alluvioni urbane causate da piogge forti e improvvise.
4. Sperimentazioni locali con azioni pilota in ogni città per un totale di:
 - 7 Infrastrutture drenanti in tratti di viabilità, aree verdi ed edifici pubblici per migliorare la capacità di drenaggio del tessuto urbano (Livorno, Oristano, Alghero, Sassari, Vado Ligure, Savona, La Spezia);
 - 3 Modelli di gestione di infrastrutture verdi per migliorarne la capacità di contenere le acque meteoriche (foresta dell'Estérel nel Var, reticolo idrografico del Comune di Carrara, ecosistemi acquatici dei cinque Comuni della Communauté d'Agglomération de Bastia);
 - 2 sistemi di monitoraggio per controllare il livello delle acque nei sottopassi e nel sistema fognario (Rosignano, CISPEL);
 - 1 sistema informativo per la gestione della viabilità in caso di alluvioni urbane (Ajaccio);
 - 1 modello di validazione degli interventi di adattamento, per valutarne la coerenza col piano

BOX 11. AZIONE PILOTA NEL COMUNE DI SASSARI (SARDEGNA)

Nell'ambito del Progetto Interreg ADAPT, il Comune di Sassari ha realizzato, all'interno di due aree verdi cittadine di proprietà comunale, viali pavimentati utilizzando sistemi drenanti e permeabili con l'obiettivo di attenuare il fenomeno dello scorrimento delle acque superficiali in occasione di eventi meteorici di particolare rilievo. Il posizionamento degli interventi all'interno di aree cittadine pubbliche ha risposto anche all'obiettivo di sensibilizzare cittadini, fruitori dei parchi, ma anche professionisti del settore, verso l'utilizzo di tecniche sostenibili più resilienti al clima per la progettazione di nuovi spazi verdi sia pubblici che privati.

Il Mainstreaming dell'adattamento a livello regionale e di aggregazioni di comuni.

L'adattamento ai cambiamenti climatici deve diventare un aspetto imprescindibile per una pianificazione sostenibile delle nostre città e, per poter essere applicato a larga scala, deve essere incorporato e integrato nell'apparato della politica dei governi, ovvero diventare *mainstream*. Nel contesto dei cambiamenti climatici, il concetto di "*mainstreaming*" si riferisce all'inclusione dell'aspetto climatico all'interno di piani e programmi di sviluppo, politiche o strategie di gestione, già in essere o in stato di attuazione.

Il Progetto MASTER ADAPT (MAInStreaming Experiences at Regional and local level for ADAPtation to climate change), finanziato nell'ambito del Programma LIFE, ha lavorato per rispondere alle esigenze degli enti locali, che stanno già sperimentando gli impatti negativi dei cambiamenti climatici, attraverso l'individuazione, la verifica e la diffusione di strumenti di governance multilivello per l'integrazione dell'adattamento ai cambiamenti climatici nelle politiche settoriali. Attraverso lo sviluppo di una metodologia operativa e integrata Regioni, Città Metropolitane e Gruppi di Municipalità delle Aree Target di progetto (riportate in Figura 30) hanno lavorato per:

- Individuare le principali vulnerabilità ai cambiamenti climatici dell'area.
- Individuare obiettivi, azioni di adattamento e priorità di intervento.
- Elaborare strategie per il governo dell'adattamento nelle aree urbane.

I principali risultati raggiunti:

- Strategia Regionale di Adattamento della Regione Autonoma della Sardegna.
- Piano di Azione Regionale per l'Adattamento della Regione Lombardia.
- Linee guida per effettuare l'analisi di vulnerabilità, attuare il *mainstreaming* a livello metropolitano e di aggregazione di comuni e per lo sviluppo di strategie

regionali di adattamento.

- Circa 90 misure regionali di adattamento su 16 settori diversi.
- 336 azioni locali di adattamento su isole di calore, esondazioni ed allagamenti urbani, rinaturalizzazione, risparmio idrico e riutilizzo delle acque.
- 1 Comune firmatario del Patto dei Sindaci per realizzare il PAESC – Piano d'Azione Sostenibile per l'Energia e il Clima.
- 53 Comuni coinvolti nel processo di *mainstreaming* per l'adattamento.
- 31 incontri regionali e locali.
- 314 amministratori, tecnici e professionisti coinvolti e formati.

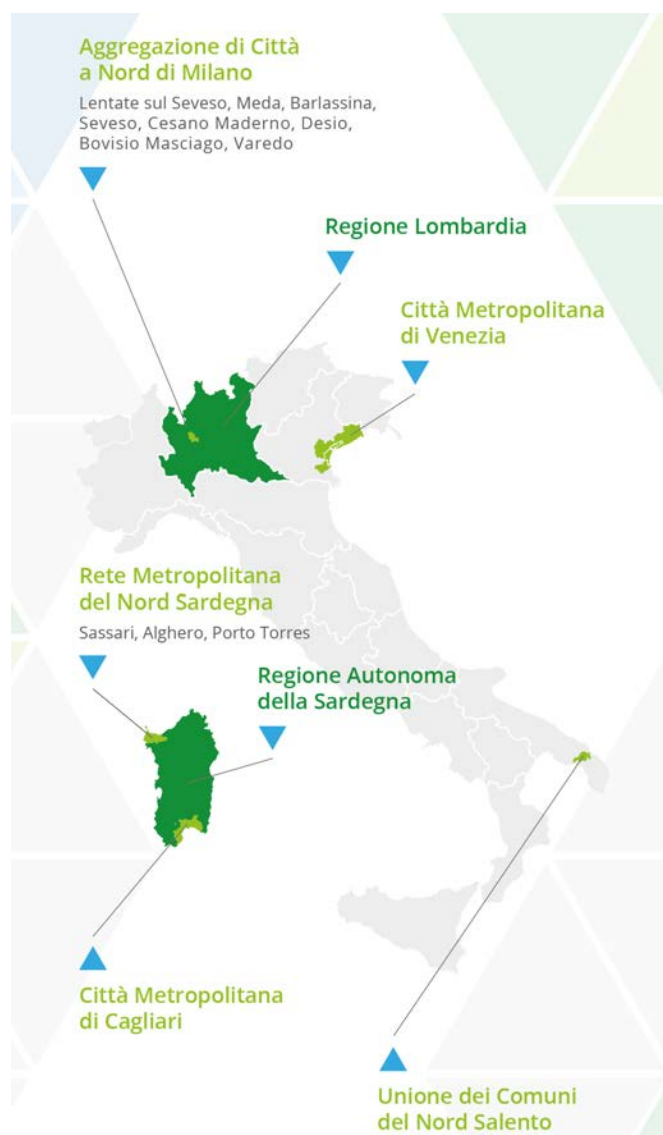


Figura 30. Aree target del Progetto LIFE MASTER ADAPT

BOX 12. ANALISI DI VULNERABILITÀ NELLA CITTÀ METROPOLITANA DI CAGLIARI

Nell'ambito del Progetto MASTER ADAPT, per la Città Metropolitana di Cagliari è stata effettuata l'analisi di vulnerabilità ai cambiamenti climatici attraverso (i) l'identificazione dei pericoli di natura climatica e dei potenziali impatti ad essi associati e (ii) l'individuazione, tramite opportuni indicatori, degli elementi potenzialmente esposti a tali pericoli (esposizione) e degli elementi costitutivi della vulnerabilità (sensibilità e capacità adattiva), secondo il framework concettuale IPCC (2014). È stata quindi valutata la vulnerabilità rispetto ai rischi principali derivanti dai cambiamenti climatici, quali incendi boschivi, siccità e ondate di calore, queste ultime responsabili della cosiddetta isola di calore urbana (*Urban Heat Island*, UHI). La Figura 31 riporta le mappe degli Indici sintetici di Esposizione, Sensibilità, Capacità Adattiva e dell'Indice sintetico di Vulnerabilità rispetto al rischio incendi, siccità e ondate di calore per la Città Metropolitana di Cagliari (Fonte: UNISS). L'analisi climatica ha evidenziato per quest'area un incremento delle temperature minime, massime e medie (da +1,3°C a 3,6°C, a seconda dello scenario RCP considerato per il periodo 2021-2050), un forte incremento degli estremi caldi, soprattutto nelle notti tropicali (+ 21-61 giorni) e nei giorni estivi (+ 22-53 giorni) ed una lieve riduzione generale delle precipitazioni totali. Sulla base dei risultati, si evidenzia un livello di criticità più elevato per il rischio siccità e di ondate di calore, in seguito ad una maggiore sensibilità del territorio e ad una bassa capacità adattiva. Le analisi effettuate e il percorso di *mainstreaming* realizzato hanno portato all'individuazione di obiettivi e opzioni di adattamento specifici per i rischi analizzati e alla predisposizione del Piano Strategico della Città Metropolitana.

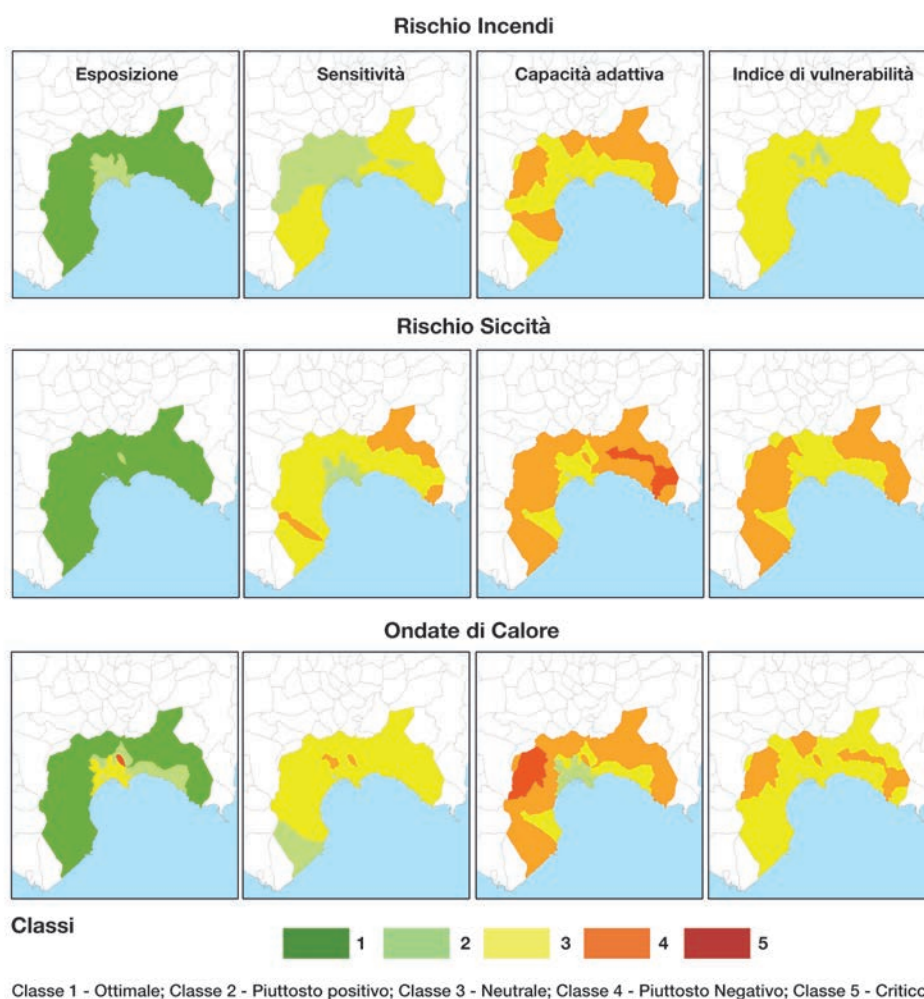


Figura 31. Indici sintetici di Esposizione, Sensibilità, Capacità Adattiva e dell'Indice sintetico di Vulnerabilità rispetto al rischio incendi, siccità e ondate di calore per la Città Metropolitana di Cagliari (Fonte: UNISS).

Iniziative a livello regionale

L'integrazione tra adattamento e sviluppo sostenibile: il percorso della Regione Sardegna

La Regione Sardegna ha recentemente elaborato la Strategia Regionale Adattamento ai Cambiamenti Climatici (SRACC, 2019), con l'intento di (i) individuare i principali rischi derivanti dai cambiamenti climatici per il contesto regionale, (ii) valutare la capacità di adattamento del territorio, (III) valutare gli impatti dei cambiamenti climatici futuri sui settori strategici per la Regione, (iv) selezionare strategie di adattamento prioritarie sulla base degli impatti dei cambiamenti climatici identificati; e (v) individuare il modello di governance specifica per il trasferimento delle strategie per l'adattamento nei processi di pianificazione e programmazione regionale e locale.

La SRACC è stata, inoltre, sviluppata con l'intento di integrarsi con la Strategia Regionale per lo Sviluppo Sostenibile (SRSvS), elaborata a partire da una Mappa di

Posizionamento rispetto ai 17 Sustainable Development Goals (SDG) dell'Agenda 2030 ed agli obiettivi della Strategia Nazionale per lo Sviluppo Sostenibile.

L'integrazione della SRACC con la SRSvS avviene su quattro livelli secondo il seguente schema:

- Livello I: la SRACC interviene direttamente come strategia di orientamento di piani e programmi settoriali di scala regionale e locale e l'individuazione in questi di obiettivi, azioni e strumenti per l'adattamento che concorrono ai SDG.
- Livello II: la SRACC come vettore per aumentare la consapevolezza sugli effetti dei cambiamenti climatici.
- Livello III: la SRACC come vettore per costruire un sistema di governance coordinato tra SRACC e SRSvS.
- Livello IV: la SRACC come strategia di orientamento per integrare gli effetti del cambiamento climatico nella SRSvS.



BOX 13. PREMIO PA SOSTENIBILE

La Strategia Regionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (SRACC) della Regione Sardegna ha vinto il “Premio PA sostenibile, 100 progetti per raggiungere gli obiettivi dell’Agenda 2030”, come miglior progetto nell’ambito “Ambiente, energia, capitale naturale”. Il Premio è un’iniziativa promossa da FPA (Forum Pa) in collaborazione con ASviS (Alleanza Italiana per lo Sviluppo Sostenibile) per individuare, far emergere e valorizzare i migliori progetti e prodotti che aiutano la PA nel percorso virtuoso verso il 2030. Il Premio intende dare visibilità alle migliori iniziative nate per aiutare l’Italia, e in particolare i singoli territori, ad affrontare le debolezze dell’attuale modello di sviluppo, scegliendo un sentiero sostenibile da percorrere fino e oltre il 2030. In virtù del lavoro d’integrazione delle tematiche dell’adattamento all’interno delle politiche e degli strumenti di pianificazione e programmazione, in un processo di *mainstreaming* in linea con gli obiettivi internazionali ed europei sullo sviluppo sostenibile contenuti nella SRACC, la Regione Sardegna si è aggiudicata nel 2019 questo importante risultato.

Iniziative per il settore agroforestale

Un “hub” mediterraneo per la resilienza

Il progetto Climate-KIC MedForHUB (Towards the development of an hub to catalyse sustainable forest management and resilience in the Mediterranean) si è occupato di valutare la fattibilità dello sviluppo di un hub permanente per la catalizzazione di pratiche innovative e soluzioni di adattamento nel settore forestale coinvolgendo direttamente dei portatori di interesse (locali e mediterranei) per l’individuazione/progettazione congiunta di servizi e soluzioni innovative. Uno dei primi obiettivi di progetto era rappresentato dalla costruzione di un background e un linguaggio comune legato ai concetti di gestione sostenibile e adattamento in ambito forestale. Gettate le basi, il progetto ha individuato e coinvolto gli stakeholder attraverso un approccio partecipativo in due tempi.

Durante un primo workshop svoltosi a Sassari (Sardegna) si è predisposto un ambiente fertile di dialogo e ascolto fra le istituzioni regionali e locali competenti in materia di gestione e tutela del bosco, il mondo scientifico, accademico e della ricerca, gli operatori e pro-

fessionisti del settore, il mondo associativo, no profit e ambientalista. I portatori di interesse sono stati quindi coinvolti nella co-progettazione dei possibili servizi che potrebbero essere attivati nel contesto dell’hub e nella sua possibile struttura di governance.

Nel secondo workshop, dopo il riepilogo delle esigenze e criticità del settore forestale individuate durante il primo incontro e la presentazione di esperienze locali di hub o Centri servizi che svolgono un ruolo catalizzatore in tema di gestione forestale sostenibile nel bacino del Mediterraneo, i partecipanti si sono confrontati sui passi necessari per lo sviluppo di un hub al servizio del bacino del Mediterraneo e per definire servizi e implementare soluzioni replicabili in altre aree del Mediterraneo che si trovano ad affrontare esigenze e sfide simili a causa dei cambiamenti climatici.

I risultati del processo partecipativo sono stati infine rielaborati con l’obiettivo di delineare uno studio preliminare di fattibilità dell’hub e illustrarne le possibili attività e servizi, redigendo ruoli e governance della struttura, analisi del quadro normativo e modello di business preliminare.

Adattare le foreste ai cambiamenti climatici

Lo stato di salute e l'accrescimento delle foreste sono fortemente influenzati dagli andamenti climatici, tuttavia la pianificazione forestale "classica" non prende in considerazione questo aspetto, assumendo un modello di crescita costante del bosco. Il progetto LIFE AForClimate (Adaption of FORest management to CLIMATE variability: an ecological approach - www.aforclimate.eu) mira a fornire soluzioni concrete per realizzare una selvicoltura e una pianificazione forestale innovative ed efficaci nell'adattamento ai cambiamenti climatici. AForClimate intende inoltre migliorare la base di conoscenze utile allo sviluppo di azioni adattative tramite la creazione di un modello previsionale che includa i cambiamenti climatici e la loro variabilità considerata ad elevato dettaglio geografico, necessaria per la realizzazione di calendari di interventi e pratiche selvicolturali sostenibili. Il Progetto si concentra sulle faggete di tre aree dimostrative, ubicate in Mugello (Toscana), Monti del Matese (Molise) e Monti Nebrodi (Sicilia). In queste aree sarà installata una rete di monitoraggio climatico e verranno programmati gli interventi sulla base di soglie derivanti da indagini dendroclimatologiche.

Fra le azioni di implementazione messe in campo dal progetto segnaliamo:

- Azione C1- Realizzazione di diverse tipologie di intervento selvicolturale finalizzate alla produzione forestale.
- Azione C2- Realizzazione di diverse tipologie di intervento selvicolturale finalizzate alla rinnovazione della foresta.
- Azione C3- Definizione di linee guida assestamentali attraverso la realizzazione di un tavolo tecnico nazionale con gli stakeholder sui temi dei cambiamenti climatici.
- Azione C4- Prototipo di DSS (Sistema di supporto alle decisioni) per la pianificazione e gestione forestale in applicazione delle linee guida.
- Azione C5- Implementazione dei modelli di pianificazione nel prototipo di gestione forestale.

Nell'ambito di queste azioni verranno realizzati inoltre ben 1.400 ettari di pianificazione forestale adattativa all'interno di faggete, secondo i principi del progetto: 700 ettari in Toscana, 400 ettari in Molise e 300 ettari in Sicilia. Saranno infine coinvolti gli stakeholder in un tavolo tecnico che discuterà e definirà linee guida assestamentali e sarà realizzato un sistema di supporto alle decisioni utile per replicare in altri contesti l'esperienza di AForClimate.

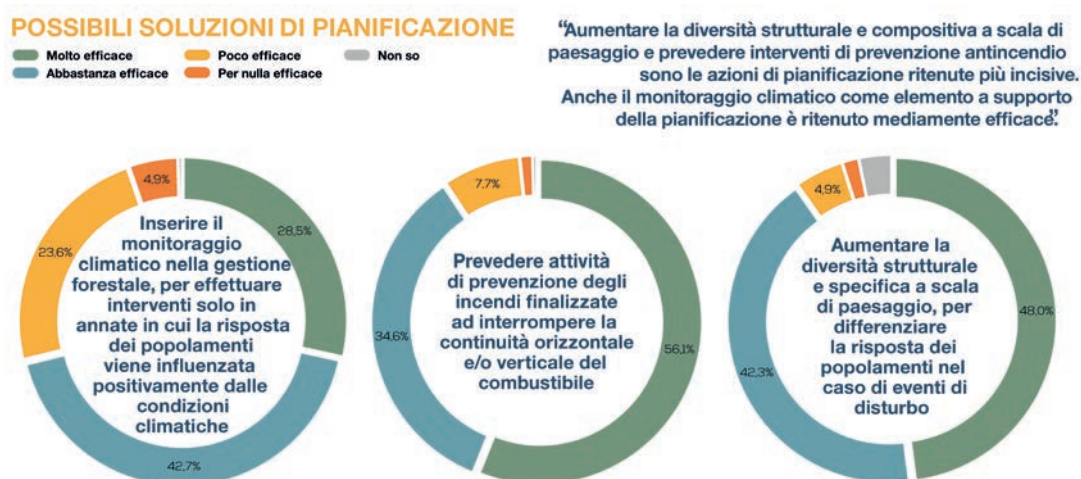


Figura 32. Uno dei risultati del questionario AForClimate, con l'obiettivo di comprendere la percezione degli addetti ai lavori del settore forestale a riguardo dell'impatto dei cambiamenti climatici sulle foreste e la loro opinione rispetto a possibili soluzioni per aumentarne l'adattamento. Maggiori informazioni al sito www.aforclimate.eu

Resilienza ai cambiamenti climatici delle foreste mediterranee

La cultura della programmazione e della pianificazione forestale è poco diffusa nell'ambito delle foreste mediterranee, basti pensare che in Sicilia meno dell'1% della superficie pubblica è oggetto di pianificazione. Gli ecosistemi forestali e pre-forestali della Regione Siciliana sono caratterizzati da semplificazione e fragilità strutturale, minacciati dal degrado risultante dall'azione singola o congiunta degli incendi, del pascolo, dei tagli e di attacchi parassitari.

In questo contesto, il progetto LIFE RESILFORMED (RESILienza al cambiamento climatico delle FOReste MEDiterranee - www.resilformed.eu) si propone di individuare e/o migliorare le pratiche forestali con l'obiettivo principale di preservare i sistemi forestali in ambiente mediterraneo dai rischi derivanti dai cambiamenti climatici tramite processi di rinaturalizzazione, aumento di biodiversità e migliorata reattività nei processi di recupero in seguito ad eventi destabilizzanti. L'obiettivo specifico del progetto è quello di implementare una politica forestale regionale in grado di aumentare la capacità di resilienza delle foreste siciliane, migliorandone l'efficienza ecosistemica e favorendo la tutela della biodiversità.

Il progetto ha sviluppato una serie di azioni ed interventi volti a migliorare la capacità di tutto il sistema di gestione delle foreste ai fini dell'applicazione di buone pratiche selvicolturali per l'aumento della resilienza ai cambiamenti climatici. I principali risultati raggiunti sono elencati di seguito:

Redazione della Carta delle aree forestali maggiormente sensibili ai cambiamenti climatici (in scala 1:25.000) e delle Carte tematiche in scala di dettaglio (1:10.000) per le 6 aree di intervento individuate.

- Implementazione delle indicazioni del progetto all'interno della documentazione tecnica a supporto della redazione del Piano Forestale Regionale per la Regione Sicilia.

- Realizzazione di schede di censimento per Pratiche di Gestione "tradizionali" e schede di "Valutazione della Resilienza Forestale" per migliorare la valutazione dell'intervento da parte del selvicoltore ai fini di una corretta applicazione delle pratiche di intervento per la resilienza forestale.
- Schede esemplificative con indicazione delle diverse tipologie di intervento per categoria forestale (faggete, cerrete, querceti di roverella, leccete, sugherete, macchie, pinete di pino laricio, eucalipteti, rimboschimenti di conifere).
- Linee guida per la valutazione della resilienza delle foreste mediterranee.

Un concentrato di buone pratiche

Negli oltre 25 anni del Programma LIFE, molti progetti hanno messo a punto strumenti utili alla tutela dell'ambiente e alla mitigazione ed adattamento ai cambiamenti climatici. Il progetto LIFE GoProFor (www.lifegoprofor.eu/it) mira a raccogliere, valorizzare e diffondere i risultati derivanti dai progetti LIFE relativi all'ambito forestale. In particolare, il progetto intende individuare buone pratiche per una corretta gestione del patrimonio forestale rivolta alla conservazione della biodiversità. Tra gli scopi vi è anche quello di fornire strumenti che indirizzino gli attori coinvolti nella gestione forestale della Rete Natura 2000 verso il raggiungimento di obiettivi comuni e condivisi. Gli obiettivi specifici del progetto sono:

- Favorire una gestione forestale attiva in grado di migliorare lo stato di conservazione di specie ed habitat.
- Incrementare la consapevolezza e la conoscenza di buone pratiche di gestione forestale, sviluppando un'azione di informazione e di formazione rivolta al settore forestale italiano, compreso quello operante nella rete Natura 2000.
- Incentivare l'impiego delle buone pratiche di gestione forestale anche nell'ambito della futura programmazione dello Sviluppo Rurale (2021-2027).
- Incrementare l'adozione delle buone pratiche negli strumenti di pianificazione forestale.

- Incrementare la consapevolezza dei cittadini dell'importanza di una gestione forestale corretta e del valore della rete Natura 2000.
- Realizzare un network nazionale delle buone pratiche forestali per diffonderle capillarmente sia all'interno che all'esterno della rete Natura 2000.

come obiettivo l'aumento della conoscenza sulla vulnerabilità ai cambiamenti climatici dell'agricoltura dei Paesi EU del Mediterraneo al fine di supportare un processo decisionale informato per la definizione di strategie di pianificazione e adattamento in agricoltura.

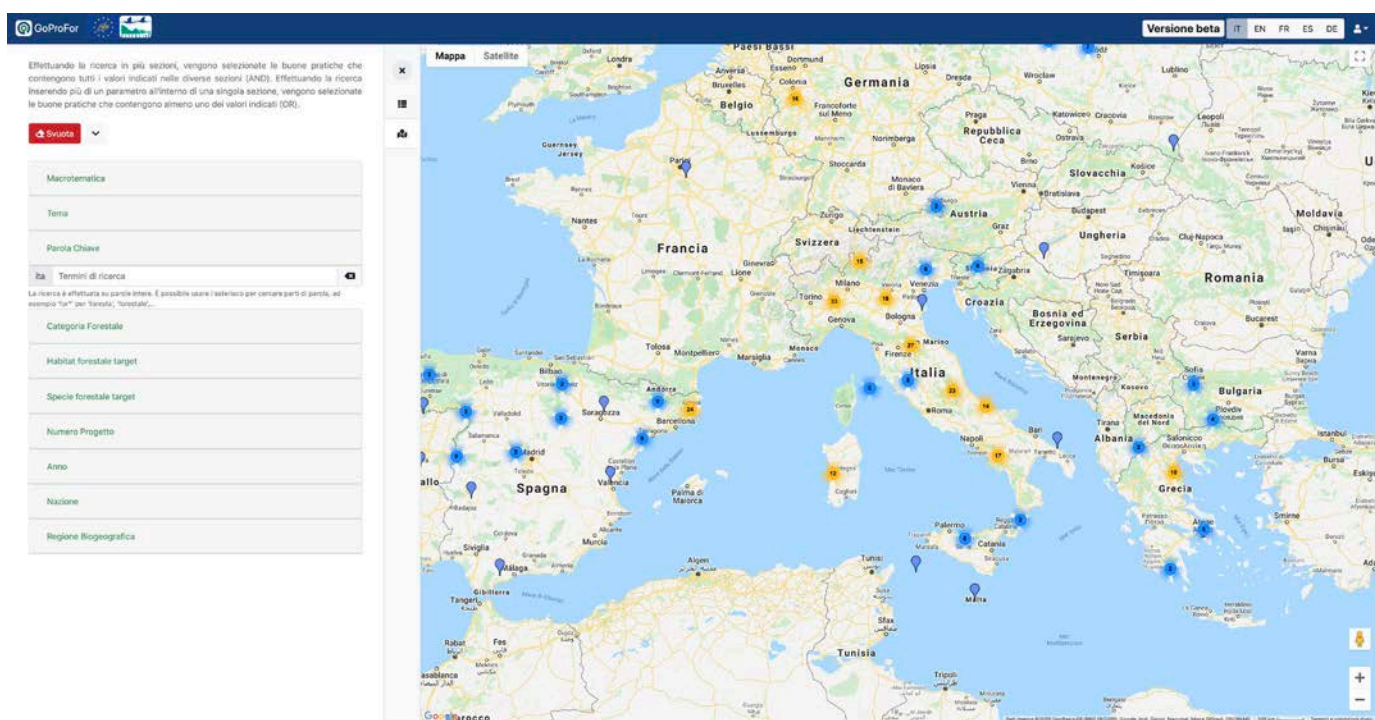


Figura 33. Schermata del database del progetto GoProFor e selezione delle buone pratiche forestali legate ai cambiamenti climatici.

Uno dei principali risultati del progetto è rappresentato dal database on line multilingue sulle buone pratiche. Ad oggi sono state raccolte già più di un terzo delle buone pratiche previste, di cui circa 80 italiane. Entro il 2020 si prevede di raccoglierne altrettante, prevalentemente provenienti da Francia, Spagna e Germania, i Paesi europei che contano il maggior numero di progetti LIFE. Il database è in italiano e in inglese e interrogabile attraverso chiavi di ricerca in: italiano, inglese, francese, spagnolo e tedesco (www.lifegoprofor-gp.eu).

Uno strumento di supporto alle decisioni in agricoltura

Il progetto ADAPT2CLIMA (Adattamento dell'agricoltura agli impatti dei cambiamenti climatici nelle isole del Mediterraneo) (<http://adapt2clima.eu/it>), cofinanziato dal programma LIFE per l'ambiente e l'azione per il clima, ha

Il progetto ha previsto tra i risultati lo sviluppo di uno strumento di supporto alle decisioni per l'identificazione di strategie di adattamento nel settore agricolo. Lo strumento ADAPT2CLIMA consente di visualizzare attraverso mappe e grafici interattivi gli impatti attesi dei cambiamenti climatici sulle colture, sulla disponibilità idrica e sul settore agricolo in generale. Lo strumento consente quindi di esplorare alcune opzioni di adattamento per affrontare gli impatti dei cambiamenti climatici e valutare la loro efficienza nell'aumentare la resilienza del settore agricolo. Attualmente applicato a Cipro, Creta (Grecia) e in Sicilia (Italia), questo strumento può essere utilizzato anche in altre aree dell'Italia, della Grecia e di Cipro, attraverso la configurazione "applica lo strumento alla tua area", fornendo così supporto a decisori politici che desiderano sviluppare una strategia di adattamento per il settore agricolo.

6

Considerazioni finali

Riduzione delle risorse idriche, instabilità dei suoli, incendi boschivi, consumo del suolo e desertificazione con conseguente perdita di produttività colturale ed ecosistemica: sono alcuni dei molteplici fattori di rischio che hanno interessato, negli ultimi decenni, l'intero bacino del Mediterraneo, con importanti impatti sulle attività socioeconomiche. A questi si aggiungono le pressioni determinate dai cambiamenti climatici in atto che, nei prossimi decenni, potranno essere ulteriormente inasprite qualora non si intraprenda un modello di sviluppo più sostenibile, orientato a stabilizzare le emissioni dei gas serra e a ridurre, quindi, gli impatti dei cambiamenti climatici sul territorio.

Studi recenti indicano per l'Italia, per il periodo 2021-2050, un incremento della temperatura fino a 2°C su scala stagionale, con aumenti più accentuati nella zona alpina e nella stagione estiva, una generalizzata diminuzione delle precipitazioni durante il periodo estivo per il Centro e Sud Italia e una tendenza all'aumento delle piogge stagionali, specie al Nord, nel periodo invernale.

Le proiezioni indicano anche un incremento in frequenza e durata di fenomeni climatici estremi – come ondate di calore, eventi di precipitazione intensa – che metteranno ulteriormente a rischio le aree urbanizzate, già fortemente vulnerabili in quanto caratterizzate dalla presenza di superfici impermeabili, ricoperte da cemento e asfalto, e da poche aree di carattere naturale (suolo e vegetazione). In questo contesto le fasce più fragili della popolazione (bambini, anziani, disabili) subiranno le maggiori ripercussioni: incrementi di mortalità per cardiopatie ischemiche, ictus, nefropatie e disturbi metabolici da stress termico e un incremento delle malattie respiratorie dovuto al legame tra concentrazioni di ozono e PM10 e temperatura.

Gli incrementi indotti dai cambiamenti climatici sulla frequenza e intensità di alcune tipologie di eventi atmosferici che regolano l'occorrenza dei fenomeni di dissesto, è atteso vadano ad aggravare una situazione già di per sé molto complessa, determinata dalle peculiarità del territorio italiano. L'incremento di temperatura, influen-

zando lo scioglimento della neve, del ghiaccio e del permafrost, ha un ruolo importante nell'esacerbare il rischio geo-idrologico, e quindi le aree alpine ed appenniniche potrebbero essere quelle interessate dalle maggiori variazioni in magnitudo e stagionalità dai fenomeni di dissesto geo-idrologico associati alle dinamiche di fusione nivale. Inoltre l'aumento degli eventi di precipitazione intensa localizzati nello spazio rappresenta un trend che potrebbe determinare un ulteriore aumento del rischio, in particolare di quello idraulico nei bacini con estensione più modesta e di quello associato ai fenomeni franosi superficiali nelle aree con suoli con maggior permeabilità.

I cambiamenti climatici stanno interessando anche l'ambiente marino, sia costiero che di mare aperto, determinando un aumento delle temperature superficiali e del livello del mare, oltre che dell'acidificazione delle acque marine e dell'erosione costiera. Tali cambiamenti necessitano di una particolare attenzione data l'importanza strategica, ambientale, economica e sociale delle nostre coste. Le conseguenze indotte dai cambiamenti climatici potranno avere un impatto sulla fornitura dei cosiddetti "beni e servizi ecosistemici" costieri che sostengono sistemi socioeconomici attraverso la fornitura di cibo (attraverso pesca e/o acquacoltura) e servizi di regolazione del clima (es. l'assorbimento/rilascio e la redistribuzione del calore e dei gas atmosferici, sequestro e rilascio di CO₂ in atmosfera).

A rischio risultano anche le produzioni agricole, già caratterizzate da una maggiore variabilità inter-annuale delle rese, anche in conseguenza di fenomeni estremi sempre più frequenti, con una tendenza alla riduzione per alcune specie coltivate e impatti negativi anche per il settore dell'allevamento. In termini generali si evidenzia una condizione di rischio più elevato per le aree del Sud Italia, con potenziale perdita di vocazionalità per produzioni attuali e maggiori costi legati alle coltivazioni irrigue, a causa di una possibile minore disponibilità idrica che aumenterà il conflitto tra diversi settori per l'utilizzo della risorsa, mettendo a rischio i processi produttivi soprattutto nelle aree a valle dei principali bacini idrici. Una riduzione della quantità, ma di conseguenza anche del-

la qualità, delle risorse idriche rinnovabili, con rischi più evidenti nei mesi estivi e nelle zone semi-aride, richiede necessariamente una programmazione e un coordinamento tra i settori per aumentare l'efficienza dell'uso delle risorse e garantire lo sviluppo sostenibile del territorio.

Viene inoltre evidenziato l'esacerbarsi di importanti rischi per il comparto forestale italiano, quali gli incendi boschivi, che rappresentano da sempre una delle principali minacce. La maggiore incidenza di fenomeni climatici estremi, assieme a cambiamenti di uso del suolo e socioeconomici - quali l'abbandono delle aree coltivate, dei pascoli e di quelle che un tempo erano foreste gestite, il forte esodo verso le città e le aree costiere - potranno aggravare specifiche componenti del rischio di incendi, con conseguenti impatti su persone, beni ed ecosistemi esposti nelle aree più vulnerabili, incrementando anche le emissioni in atmosfera di gas a effetto serra e particolarmente con specifiche conseguenze sulla salute.

La maggior parte dei settori dell'economia italiana deve confrontarsi con impatti negativi dovuti ai cambiamenti climatici, tuttavia le perdite maggiori si determinano nell'agricoltura, nel settore turistico (nei segmenti sia estivo che invernale), e nelle reti e nella dotazione infrastrutturale del Paese come conseguenza dell'intensificarsi dei fenomeni di dissesto idrogeologico.

In uno scenario in cui l'aumento della temperatura rimanesse al di sotto dei 2°C rispetto al periodo preindustriale, le perdite economiche per il Paese sarebbero ragionevolmente contenute, pur presentando costi comunque non trascurabili (circa lo 0,5% del PIL nazionale), mentre aumenterebbero in modo esponenziale in caso di livelli di temperatura più elevati, con perdite di PIL pro capite superiori al 2,5% nel 2050 e tra il 7-8% a fine secolo, considerando lo scenario climatico ad alte emissioni di gas serra e, di conseguenza, con cambiamenti climatici maggiori.

Inoltre i cambiamenti climatici aumentano la disuguaglianza economica tra le regioni, con valori degli indicatori di "uguaglianza" che peggiorano del 16% nel 2050 e del 61% nel 2080 con lo scenario più estre-

mo. Gli impatti economici negativi tendono ad essere più elevati nelle aree relativamente più povere.

Se il Sud Italia sembra essere l'area maggiormente a rischio sotto varie pressioni, c'è comunque da evidenziare che le regioni del Nord non sono immuni all'impatto dei cambiamenti climatici, né appaiono sufficientemente preparate ad affrontarli.

Di fronte a questi scenari, è assolutamente essenziale disporre di strumenti in grado di analizzare i rischi attesi in un determinato territorio e identificare le opportune misure di resilienza da promuovere e applicare. L'individuazione di efficaci soluzioni di adattamento, che consentano di ridurre la vulnerabilità territoriale e trasformare i rischi in nuove opportunità di sviluppo, deve necessariamente essere affrontata a livello locale poiché gli impatti dei cambiamenti climatici sono fortemente differenziati all'interno del territorio nazionale e le soluzioni devono essere adeguate ai differenti beni esposti e alle differenti traiettorie di sviluppo locale.

Molte azioni efficaci sono fattibili e opportune anche nell'immediato e con costi nulli, o comunque molto limitati. Un esempio è dato, in ambiente urbano, dall'applicazione estesa del principio di precauzione, evitando di urbanizzare aree potenzialmente a rischio di dissesto e tutelando gli spazi liberi e le aree verdi (parchi, giardini, aree naturali protette etc.), soprattutto se ubicati in aree vulnerabili (fiumi, coste, etc.). Investire risorse nell'adattamento climatico non è "solo azione ambientale", ma coincide con il promuovere la qualità di vita dei cittadini e la sostenibilità dello sviluppo.

La vera sfida per il futuro è integrare l'adattamento a diversi livelli nelle politiche pubbliche (*mainstreaming*) nelle fasi in cui si decidono gli indirizzi di pianificazione, si elaborano programmi di spesa o si sviluppano progetti di investimento, al fine di integrare l'adattamento con lo sviluppo sostenibile del territorio. Questo processo deve essere supportato da adeguati strumenti conoscitivi, che la comunità scientifica sta mettendo a disposizione e sta adeguando in termini di maggiore accessibilità e

comunicazione. D'altra parte è necessario investire risorse adeguate per costruire le premesse scientifiche, amministrative, sociali, ed economiche necessarie al cambiamento verso una comunità consapevole. Tali obiettivi possono essere raggiunti esclusivamente con la costruzione di una governance strutturata che coinvolga tutti i livelli di governo (nazionale, regionale e locale) e tutti i portatori d'interesse pubblici e privati, fino ai cittadini, al fine di intraprendere azioni coordinate e condivise con il territorio.

Investire in uno sviluppo sostenibile, che il Green Deal europeo riconosce come unico modello di sviluppo per il futuro, è un'opportunità che l'Italia non può perdere e neppure rimandare. La sfida è quella di sfruttare le risorse economiche disponibili con competenza e innovazione, attraverso nuovi modelli di produzione e di impresa e nuove modalità orientate ad una gestione sostenibile del territorio che devono necessariamente entrare a far parte del bagaglio di imprese ed enti pubblici, locali e nazionali.

Glossario

Adattamento: il processo di adeguamento al clima attuale o atteso e ai suoi effetti. Nei sistemi umani, l'adattamento cerca di limitare o evitare danni e/o sfruttare le opportunità favorevoli. In alcuni sistemi naturali, l'intervento umano può facilitare l'adattamento al clima previsto e ai suoi effetti (IPCC, 2014b).

Cambiamenti climatici: un cambiamento nello stato del clima che persiste per un periodo esteso, tipicamente decenni o più a lungo, e che può essere rilevato (ad esempio usando test statistici) da cambiamenti nella media e/o nella variabilità delle sue proprietà. I cambiamenti climatici possono avere origine da processi naturali interni o da forzanti esterne, quali modulazioni dei cicli solari, eruzioni vulcaniche e cambiamenti antropogenici persistenti della composizione dell'atmosfera o di uso del suolo. L'UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) definisce i cambiamenti climatici come: "un cambiamento del clima attribuibile direttamente o indirettamente all'attività umana, che altera la composizione dell'atmosfera globale e che si aggiunge alla variabilità naturale del clima osservata in periodi di tempo comparabili". L'UNFCCC fa quindi una distinzione tra i cambiamenti climatici imputabili alle attività umane che alterano la composizione dell'atmosfera e la variabilità del clima attribuibile a cause naturali (IPCC, 2013b).

Capacità di adattamento (agli impatti dei cambiamenti climatici): la capacità dei sistemi, delle istituzioni, degli esseri umani e degli altri organismi di adattarsi a potenziali danni, per sfruttare le opportunità o per rispondere alle conseguenze (IPCC, 2014b).

Disastro: insieme di gravi alterazioni del normale funzionamento di una comunità o di una società per effetto di eventi fisici rischiosi che agiscono su condizioni sociali vulnerabili, portando a conseguenze sfavorevoli e diffuse su risorse umane, materiali, economiche o ambientali, che richiedono una risposta d'emergenza immediata per soddisfare bisogni umani essenziali e che potrebbero necessitare di supporto esterno per la ripresa (IPCC 2014).

Esposizione: la presenza di persone, specie o ecosistemi, funzioni ambientali, servizi, risorse, infrastrutture, funzioni economiche, sociali, beni culturali in luoghi che potrebbero essere influenzati negativamente (IPCC, 2014b).

Evento meteorologico estremo: è un evento il cui verificarsi in un determinato luogo o periodo dell'anno è raro. Le definizioni della parola raro variano, ma un evento meteorologico estremo viene normalmente definito tale se è uguale o maggiore al decimo o novantesimo percentile di una funzione di densità di probabilità stimata sulla base delle osservazioni. Le caratteristiche quindi di un estremo meteorologico possono variare da un luogo all'altro in senso assoluto. Quando un andamento meteorologico estremo persiste per un certo periodo di tempo, come per esempio una stagione, può essere classificato come evento climatico estremo, specialmente se produce una media o un cumulo che è esso stesso estremo (per esempio, siccità o intense precipitazioni nel corso di una stagione) (IPCC, 2014b).

Forzante radiativo: è una variazione del flusso di energia causato da un driver, ed è calcolato nella tropopausa o negli strati più alti dell'atmosfera. Viene espresso in Wm^{-2} . Nel Quinto Rapporto IPCC, nei calcoli dei forzanti radiativi da miscele di gas serra e aerosol, le variabili fisiche, fatta eccezione per oceano e ghiaccio marino, possono rispondere alle perturbazioni con aggiustamenti rapidi. Il forzante risultante è denominato Forzante Radiativo Effettivo (ERF - *Effective Radiative Forcing*). Questo cambiamento riflette i progressi scientifici raggiunti dai precedenti rapporti e risulta in una migliore indicazione di un'eventuale risposta della temperatura a questi driver. Per tutti i driver diversi dal mix di gas serra e dagli aerosol, gli aggiustamenti rapidi sono meno ben caratterizzati e si presume siano piccoli, per cui viene utilizzato un RF tradizionale (IPCC, 2013b).

Impatti (dei cambiamenti climatici): effetti sui sistemi naturali e umani (es. effetti sulla vita, la salute, gli ecosistemi, l'economia, la società, i servizi, le infrastrutture, etc.) causati da eventi meteorologici e climatici estremi e dai cambiamenti climatici che si verificano entro un periodo di tempo specifico e vulnerabilità di una società o un sistema esposti ai cambiamenti climatici. Gli impatti sono anche indicati come conseguenze e risultati di questi effetti (IPCC, 2014b).

Incertezza: uno stato di conoscenza incompleto dovuto a carenza di informazione o al disaccordo su ciò che è conosciuto o conoscibile. Può avere molte fonti, da errori quantificabili nei dati a concetti o terminologia definiti in modo ambiguo, o a proiezioni ipotetiche del comportamento umano. L'incertezza può quindi essere rappresentata da misure quantitative (ad esempio,

una funzione di densità di probabilità) o da dichiarazioni qualitative (ad esempio, che riflettono il giudizio di un gruppo di esperti) (IPCC, 2014b).

Mitigazione (dei cambiamenti climatici): qualsiasi intervento umano che riduca le fonti di rilascio (*sources*) o rafforzi e potenzi le fonti di assorbimento (*sinks*) di gas serra (IPCC, 2014b).

Modelli climatici regionali (Downscaling dinamico): il downscaling dinamico è un metodo che ricava informazioni su scala locale o regionale (fino a 100 km) a partire dai modelli di circolazione globale (vedi voce modelli climatici). In particolare il downscaling dinamico si ottiene con i modelli climatici regionali opportunamente guidati dai modelli climatici globali. I modelli climatici regionali riguardano solo un'area limitata del globo e possono fornire informazioni su scale molto più piccole rispetto ai modelli globali, supportando così una valutazione e una pianificazione dell'impatto e dell'adattamento più dettagliate, che è vitale in molte regioni vulnerabili del mondo (WCRP CORDEX: <https://cordex.org/about/what-is-regional-downscaling>)

Modello climatico: rappresentazione numerica del sistema climatico basato sulle proprietà fisiche, chimiche e biologiche delle sue componenti, delle loro interazioni e dei processi di feedback, tenendo conto di alcune delle sue proprietà note. Il sistema climatico può essere rappresentato da modelli di diversa complessità; ossia per ciascuna componente o combinazione di componenti, possono essere identificati lo spettro o la gerarchia di modelli, che differiscono in aspetti come il numero di dimensioni spaziali, la misura in cui sono rappresentati esplicitamente i processi fisici, chimici o biologici, o il livello delle parametrizzazioni empiriche. I modelli di circolazione generale accoppiati atmosfera-oceano (AOGCM) forniscono una rappresentazione del sistema climatico che è vicino allo spettro attualmente disponibile. C'è un'evoluzione verso modelli più complessi con chimica interattiva e biologia. I modelli climatici vengono applicati come strumenti di ricerca per studiare e simulare il clima e per scopi operativi, incluse le previsioni mensili, stagionali e climatiche interannuali (IPCC, 2014b).

Pericolosità: il potenziale verificarsi di un evento fisico naturale o antropico o di un impatto fisico che può causare la perdita della vita, lesioni, o impatti sulla salute, così come danni e perdite a proprietà, infrastrutture, mezzi di sussistenza, fornitura di servizi, ecosistemi e risorse ambientali (IPCC, 2014b).

Proiezioni climatiche: la risposta simulata del sistema climatico ad uno scenario di future emissioni o di concentrazioni di gas serra e aerosol, generalmente

ricavata utilizzando i modelli climatici. Le proiezioni climatiche sono diverse dalle previsioni climatiche per la loro dipendenza dallo scenario di emissione/concentrazione/forzante radiativo utilizzato, a sua volta basato sulle ipotesi riguardanti, per esempio, i futuri sviluppi socioeconomici e tecnologici che potrebbero essere realizzati o meno (IPCC, 2014b).

Representative Concentration Pathways (RCPs): scenari che includono serie temporali di serie temporali di concentrazioni della suite completa di gas e aerosol a effetto serra, aerosol e gas chimicamente attivi, così come l'uso e la copertura del suolo. La parola *Representative* significa che ogni RCP fornisce solo uno dei tanti possibili scenari di uno specifico forzante radiativo. Il termine *Pathways* sottolinea che non è importante solo il livello di concentrazione a lungo termine ma anche la traiettoria seguita per arrivare a quel risultato. Gli RCPs generalmente si riferiscono alla porzione della traiettoria di concentrazione che si sviluppa fino al 2100, per la quale i Modelli di Valutazione Integrata (*Integrated Assessment Models*) forniscono i corrispondenti scenari di emissione. Quattro RCPs sono prodotti dai Modelli di Valutazione Integrata e usati nelle proiezioni del quinto rapporto IPCC. RCP2.6: un percorso dove il forzante radiativo raggiunge l'apice approssimativamente a 3 W m^{-2} prima del 2100 e poi si riduce; RCP4.5 e RCP6.0: due percorsi intermedi di stabilizzazione in cui i forzanti radiativi sono stabilizzati a circa $4,5 \text{ W m}^{-2}$ e $6,0 \text{ W m}^{-2}$ rispettivamente; RCP8.5: un percorso alto in cui si raggiunge un forzante radiativo superiore a $8,5 \text{ W m}^{-2}$ entro il 2100 e che continua a salire anche successivamente (IPCC, 2014b).

Resilienza: la capacità di un sistema sociale, economico o ambientale di far fronte a un evento pericoloso, o anomalie, rispondendo e riorganizzandosi in modo da preservare le sue funzioni essenziali, l'identità e la struttura, mantenendo tuttavia anche le capacità di adattamento, apprendimento trasformazione (IPCC, 2014b)

Rischio: le potenziali conseguenze in cui qualcosa di valore è in gioco e dove il risultato è incerto, riconoscendo la diversità dei valori. Il rischio è spesso rappresentato come la probabilità del verificarsi di eventi o andamenti pericolosi moltiplicata per gli impatti che si avrebbero se questi eventi o andamenti si verificassero. Il rischio deriva dall'interazione di vulnerabilità, l'esposizione, e pericolosità (IPCC, 2014b).

Rischio di disastri/riduzione del rischio di disastri: il rischio di disastri indica la probabilità di disastro in un periodo di tempo specificato (si veda disastro). Il concetto di riduzione del rischio di disastri indica un processo volto a progettare, implementare e valutare strategie, politiche e misure per migliorare la cono-

scenza del rischio di disastri, promuovere la riduzione del rischio e trasferire e promuovere un miglioramento continuo nella preparazione e nella risposta al rischio e in pratiche di recupero, con l'esplicito obiettivo di aumentare la sicurezza umana, il benessere, la qualità della vita e lo sviluppo sostenibile (IPCC, 2014b).

Scenari climatici: una rappresentazione plausibile e spesso semplificata del clima futuro, basata su un insieme coerente di relazioni climatologiche che è stato costruito per l'esplicito uso di indagare le possibili conseguenze dei cambiamenti climatici di origine antropica, spesso utilizzati come input per i modelli di impatto. Le proiezioni climatiche, che si ottengono selezionando un RCP (vedi definizione, ovvero di una possibile evoluzione delle concentrazioni di gas climalteranti), spesso servono come materiale di base per la costruzione degli scenari climatici, ma gli scenari climatici di solito richiedono ulteriori informazioni, come il clima attuale osservato. Uno scenario di cambiamento climatico è la differenza tra uno scenario climatico e il clima attuale (IPCC, 2013b).

Sensibilità: il grado con cui un sistema o una specie sono influenzati, negativamente o positivamente, dalla variabilità e dal cambiamento del clima. L'effetto può essere diretto (ad es. un cambiamento nella resa delle colture in risposta ad una variazione della temperatura) o indiretto (ad es. i danni causati da un aumento della frequenza di inondazioni costiere a causa dell'innalzamento del livello del mare) (IPCC, 2014b).

Servizi ecosistemici: processi o funzioni ecologici dotati di un valore (monetario o non monetario) per gli individui o in generale per la società. Sono frequentemente classificati come: (i) servizi di supporto, come per esempio la produttività o il mantenimento della biodiversità; (ii) servizi di fornitura o approvvigionamento, quali cibo, fibre, pesce; (iii) servizi di regolazione, come la regolazione del clima e il sequestro o stoccaggio del carbonio, e (iv) servizi culturali, come il turismo o l'arricchimento spirituale ed estetico (IPCC, 2014b).

Sistema climatico: il sistema altamente complesso costituito da cinque componenti principali: atmosfera, idrosfera, criosfera, litosfera, biosfera, e le interazioni fra loro. Il sistema climatico evolve nel tempo sotto l'influenza di proprie dinamiche interne e per effetto di forzanti esterni, come eruzioni vulcaniche, variabilità solare, e forzanti antropogenici come la variazione di composizione dell'atmosfera e il cambiamento di uso del suolo (IPCC, 2014b).

Sviluppo sostenibile: sviluppo che va incontro ai bisogni del presente senza compromettere la capacità delle future generazioni di soddisfare i propri bisogni [WCED,1987] (IPCC, 2014b).

Scenari di emissione: una rappresentazione plausibile del futuro sviluppo delle emissioni di sostanze che sono potenzialmente attive radiativamente (ad esempio, gas serra e aerosol), sulla base di un insieme coerente e internamente consistente di assunzioni sulle forze motrici (come il cambiamento tecnologico, lo sviluppo demografico e socioeconomico) e le loro relazioni fondamentali. Gli scenari di concentrazione, derivati dagli scenari di emissione, sono utilizzati come input per i modelli climatici per calcolare le proiezioni climatiche. Nel Rapporto Speciale dell'IPCC sugli Scenari di Emissione sono stati pubblicati gli scenari di emissione SRES (ad esempio, A1B, A1FI, A2, B1, B2) utilizzati come base per alcune proiezioni climatiche. Nuovi scenari di emissione per i cambiamenti climatici sono stati sviluppati e sono i 4 *Representative Concentration Pathways* (RCP) presentati nel quinto rapporto dell'IPCC (IPCC, 2014b).

Variabilità climatica: si riferisce alle variazioni di stato medio e di altre statistiche (come le deviazioni standard, il verificarsi di eventi estremi, etc.) del clima in tutte le scale spaziali e temporali al di là di quelle dei singoli eventi meteorologici. La variabilità può essere dovuta a processi naturali interni al sistema climatico (variabilità interna), o a variazioni dei forzanti esterni naturali o antropogenici (variabilità esterna) (IPCC, 2014b).

Vulnerabilità: la propensione o la predisposizione degli elementi esposti a essere influenzati negativamente. Il termine comprende una varietà di concetti ed elementi, tra cui la sensibilità o suscettibilità al danno e la mancanza di capacità di far fronte e di adattarsi (IPCC, 2014b).

Bibliografia

- Abegg B., Agrawala S., Crick F., de Montfalcon A. (2007) 'Climate change impacts and adaptations in winter tourism', In: S. Agrawala (ed) *Climate change in the European Alps: Adapting winter tourism and natural hazard management*. OECD Publishing, Paris, pp 25–60.
- Adetona O., Reinhardt T.E, Domitrovich J., Broyles G., Adetona A.M., Kleinman M.T., Ottmar R.D., Naeher L.P. (2016) 'Review of the health effects of wildland fire smoke on wildland firefighters and the public', *Inhalation Toxicology*, 28(3), pp. 95–139, doi:10.3109/08958378.2016.1145771.
- Agenzia Entrate (2013) 'Stock catastale', Available at: www.agenziaentrate.gov.it/portale/Schede/FabbricatiTerreni/omi/Banche+dati/Stock+catastale/?page=fabbricatiterreniimp (Accessed: 21 August 2018).
- Alfieri L. et al. (2015) 'Ensemble flood risk assessment in Europe under high end climate scenarios', *Global Environmental Change*, 35, pp. 199–212, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2015.09.004.
- Amanti M. et al. (2014) 'Eventi Estremi di Precipitazione e Criticità Geologico-Idrauliche nell'area Urbana della Capitale', *Focus sulle città e la sfida dei cambiamenti climatici*, (May 2019), p. 171.
- Amatulli G., Camia A., San-Miguel-Ayanz J. (2013) 'Estimating future burned areas under changing climate in the EU-Mediterranean countries', *Science of The Total Environment*, 450–451, pp. 209–222, doi:10.1016/j.scitotenv.2013.02.014.
- American Academy of Actuaries (2019) 'Actuaries Climate Index', Disponibile online da: <https://actuariesclimateindex.org/home/> (Accessed: 13 May 2020).
- Andersen H. E. et al. (2006) 'Climate-change impacts on hydrology and nutrients in a Danish lowland river basin', *Science of The Total Environment*, 365(1), pp. 223–237, doi: 10.1016/j.scitotenv.2006.02.036.
- Arca B., Pellizzaro G., Duce P., Salis M., Bacciu V., Spano D., Ager A., Scoccimarro, E. (2012) 'Potential changes in fire probability and severity under climate change scenarios in Mediterranean areas'. In: D. Spano, V. Bacciu, M. Salis, C. Sirca (ed) *Modelling Fire Behaviour and Risk*. Nuova Stampa Color: pp. 92–98. ISBN: 978-88-904409-7-7.
- Avolio E. et al. (2012) 'Assessment of the impact of climate change on the olive flowering in Calabria (southern Italy)', *Theoretical and Applied Climatology*, 107(3–4), pp. 531–540, doi: 10.1007/S00704-011-0500-2.
- Bacciu V., Spano D., Salis, M. (2015) 'Emissions from Forest Fires: Methods of Estimation and National Results'. R. Valentini and F. Miglietta (eds.), *The Greenhouse Gas Balance of Italy*, Environmental Science and Engineering, doi: 10.1007/978-3-642-32424-6_6.
- Bartolini G. et al. (2014) 'Recent trends in seasonal and annual precipitation indices in Tuscany (Italy)', *Theoretical and Applied Climatology*, 118(1), pp. 147–157, doi: 10.1007/s00704-013-1053-3.
- Beach R. H. et al. (2019) 'Combining the effects of increased atmospheric carbon dioxide on protein, iron, and zinc availability and projected climate change on global diets: a modelling study', *The Lancet. Planetary health. Netherlands*, 3(7), e307–e317, doi: 10.1016/S2542-5196(19)30094-4.
- Bedia J., Herrera S., Camia A., Moreno J.M., Gutierrez J.M. (2014) 'Forest fire danger projections in the Mediterranean using ENSEMBLES regional climate change scenarios'. *Climatic Change*, 122, doi:10.1007/s10584-013-1005-z.
- Benítez-Gilbert M., Alvarez-Cobelas M. and Angeler D. G. (2010) 'Effects of climatic change on stream water quality in Spain', *Climatic Change*, 103(3), pp. 339–352, doi: 10.1007/s10584-009-9778-9.
- Bertocchi L. et al. (2014) 'Seasonal variations in the composition of Holstein cow's milk and temperature-humidity index relationship', *Animal: an international journal of animal bioscience*, 8(4), pp. 667–674, doi: 10.1017/S1751731114000032.
- Blasi C. et al. (2007) 'Climate change and desertification vulnerability in Southern Italy', *Phytocoenologia*, 37(3–4), pp. 495–521, doi: 10.1127/0340-269X/2007/0037-0495.
- Bocchiola D. (2015) 'Impact of potential climate change on crop yield and water footprint of rice in the Po valley of Italy', *Agric Systems*, 139, pp. 223–237, doi: 10.1016/j.agry.2015.07.009.
- Bonte M. and Zwolsman J. J. G. (2010) 'Climate change induced salinisation of artificial lakes in the Netherlands and consequences for drinking water production', *Water Research*, 44(15), pp. 4411–4424, doi: 10.1016/j.watres.2010.06.004.
- Bovio G., Marchetti M., Tonarelli L., Salis M., Vacchiano G., Lovreglio R., Elia M., Fiorucci P., Ascoli D. (2017) 'Gli incendi boschivi stanno cambiando: cambiamo le strategie per governarli'. *Forest@*, 14, pp. 202–205.
- Bowes M. J. et al. (2012) 'Spatial and temporal changes in chlorophyll-a concentrations in the River Thames basin, UK: Are phosphorus concentrations beginning to limit phytoplankton biomass?', *Science of The Total Environment*, 426, pp. 45–55, doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.02.056.
- Boxall A. B. A. et al. (2009) 'Impacts of climate change on indirect human exposure to pathogens and chemicals from agriculture', *Environmental Health Perspectives. Environmental Health Perspectives*, pp. 508–514, doi: 10.1289/ehp.0800084.

- Brunetti M. et al. (2000) 'Precipitation intensity trends in northern Italy', *International Journal of Climatology*, 20(9), pp. 1017–1031, doi: 10.1002/1097-0088(200007)20:9<1017::AID-JOC515>3.0.CO;2-S.
- Brunetti M. (2004) 'Changes in daily precipitation frequency and distribution in Italy over the last 120 years', *J Geophys Res.*, doi: 10.1029/2003jd004296.
- Bucchignani E. et al. (2016) 'High-resolution climate simulations with COSMO-CLM over Italy: performance evaluation and climate projections for the 21st century', *International Journal of Climatology*, 36(2), pp. 735–756. doi: 10.1002/joc.4379.
- Bussi G. et al. (2016) 'Impacts of climate change, land-use change and phosphorus reduction on phytoplankton in the River Thames (UK)', *Science of The Total Environment*, 572, pp. 1507–1519. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.109.
- Bussotti F. et al. (2014) 'The challenge of Mediterranean sclerophyllous vegetation under climate change: From acclimation to adaptation', *Environmental and Experimental Botany*, 103, pp. 80–98. doi: 10.1016/j.envexpbot.2013.09.013.
- Butscher C. and Huggenberger P. (2009) 'Modeling the Temporal Variability of Karst Groundwater Vulnerability, with Implications for Climate Change', *Environmental Science & Technology*, 43(6), pp. 1665–1669. doi: 10.1021/es801613g.
- Carleton T. A. and Hsiang S. M. (2016) 'Social and economic impacts of climate', *Science*, 9837. doi: 10.1126/science.aad9837.
- Carraro C. (2009) 'Cambiamenti climatici e adattamento in Italia', Disponibile online da: www.mulino.it/isbn/9788815126481#
- Castellari S., S. Venturini, A. Ballarin Denti, A. Bigano, M. Bindi, F. Bosello, L. Carrera, M.V. Chiriacò, R. Danovaro, F. Desiato, A. Filpa, M. Gatto, D. Gaudioso, O. Giovanardi, C. Giupponi, S. Gualdi, F. Guzzetti, M. Lapi, A. Luise, G. Marino, J. Mysiak, A. Montanari, A. Ricchiuti, R. Rudari, C. Sabbioni, M. Sciortino, L. Sinisi, R. Valentini, P. Viaroli, M. Vurro and M. Zavatarelli, (Eds.), (2014): "Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità ed adattamento ai cambiamenti climatici in Italia" (in Italian). Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Roma..
- Chang H. (2004) 'Water Quality Impacts of Climate and Land Use Changes in Southeastern Pennsylvania', *The Professional Geographer*, 56(2), pp. 240–257.
- Chelli S. et al. (2017) 'Climate change response of vegetation across climatic zones in Italy', *Climate Research*, 71(3), pp. 249–262, Disponibile online da: www.int-res.com/abstracts/cr/v71/n3/p249-262/.
- Chen Y., Todd A. S., Murphy M. H. and Lomnický G. (2016) 'Anticipated Water Quality Changes in Response to Climate Change and Potential Consequences for Inland Fishes', *Fisheries*, 41(7), pp. 413–416, doi:10.1080/03632415.2016.1182509.
- Ciscar J. C. et al. (2018) 'Climate impacts in Europe: Final report of the JRC PESETA III project', doi: 10.2760/93257.
- Comegna L. et al. (2013) 'Potential effects of incoming climate changes on the behaviour of slow active landslides in clay', *Landslides*, 10(4), pp. 373–391. doi: 10.1007/s10346-012-0339-3.
- Confortola G., Soncini A. and Bocchiola D. (2013) 'Climate change will affect hydrological regimes in the Alps', *Revue de géographie alpine*, 101(3), doi: 10.4000/rga.2176.
- Conti S. et al. (2005) 'Epidemiologic study of mortality during the Summer 2003 heat wave in Italy', *Environmental Research*, 98(3), pp. 390–399, doi: 10.1016/j.envres.2004.10.009.
- Copernicus (2018) 'Green Linear Elements', Disponibile online da: <https://land.copernicus.eu/local/riparian-zones/green-linear-elements-gle-image?tab=mapview> (Accessed: 20 August 2018).
- Coppola E. et al. (2014) 'Changing hydrological conditions in the Po basin under global warming', *Science of The Total Environment*, 493, pp. 1183–1196, doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.03.003.
- Cutter S. L. et al. (2008) 'A place-based model for understanding community resilience to natural disasters', *Global Environmental Change*, 18(4), pp. 598–606, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2008.07.013.
- Cutter S. L., Ash K. D. and Emrich C. T. (2014) 'The geographies of community disaster resilience', *Global Environmental Change*, 29, pp. 65–77, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2014.08.005.
- D'Amato G. et al. (2010) 'Urban air pollution and climate change as environmental risk factors of respiratory allergy: an update', *Journal of investigational allergology & clinical immunology*, 20(2), pp. 95–102.
- de Panizza A., (2020) 'Rapporto sul Territorio 2020'. ISTAT. <http://doi.org/10.1481/Istat.RapportoTerritorio.2020>
- de Rigo D., Libertà G., Houston Durrant T., Artés Vivancos T., San-Miguel-Ayán J. (2017) 'Forest fire danger extremes in Europe under climate change: variability and uncertainty', *EUR 28926 EN*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017, doi:10.2760/13180
- Dipartimento delle Finanze (2018) 'Statistiche sulle dichiarazioni', Disponibile online da: www1.finanze.gov.it/finanze3/analisi_stat/index.php?search_class%5B0%5D=cCOMUNE&open-data=yes (Accessed: 20 August 2018).
- D'Oria M., Ferraresi M. and Tanda M. G. (2019) 'Quantifying the impacts of climate change on water resources in northern Tuscany, Italy, using high-resolution regional projections', *Hydrological Processes*, 33(6), pp. 978–993, doi:10.1002/hyp.13378.
- Ducharne A. (2008) 'Importance of stream temperature to climate change impact on water quality', *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(3), pp. 797–810, doi:10.5194/hess-12-797-2008.
- Dupuy J., Fargeon H., Martin-StPaul N. et al. (2020) 'Cli-

- mate change impact on future wildfire danger and activity in southern Europe: a review', *Annals of Forest Science*, 77(35), doi:10.1007/s13595-020-00933-5.
- EC (2012) 'Documento di lavoro dei servizi della Commissione, Stato membro: Italia, che accompagna il documento Relazione della Commissione al Parlamento Europeo e al Consiglio sull'attuazione della direttiva quadro sulle acque (2000/60/CE): Piani di gestione dei bacini'.
- Eccel E., Zollo A., Mercogliano P., Zorer R. (2016) 'Simulations of quantitative shift in bio-climatic indices in the viticultural areas of Trentino (Italian Alps) by an open source R package', *Comput Electron Agric*, 127, pp. 92–100, doi:10.1016/j.compag.2016.05.019.
- EEA (2009) 'Water resources across Europe — confronting water scarcity and drought', Report No. 2/2009, Copenhagen (Denmark): European Environment Agency.
- EEA (2013) 'Air quality in Europe', EEA Report No 9/2013.
- EEA (2017a) 'Nationally designated areas (CDDA)', European Environment Agency, Disponibile online da: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/nationally-designated-areas-national-cdda-12>.
- EEA (2017b) 'Natura 2000 data - the European network of protected sites, European Environment Agency', Disponibile online da: www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/natura-9.
- EEA (2018) 'Climate impacts on water resources', Disponibile online da: www.eea.europa.eu/ds-resolveuid/43219859a4e3300e09dbb2e65878b11e.
- EEA (2019) 'Climate change adaptation in the agriculture sector in Europe', EEA Report No 04/2019, Disponibile online da: www.eea.europa.eu/publications/cc-adaptation-agriculture.
- Elorenzo M. E. D. (2015) 'Impacts of climate change on the ecotoxicology of chemical contaminants in estuarine organisms', *Effects of Climate Stressors on Contaminant Toxicity*, 61(4), pp. 641–652.
- ESPON (2011) 'ESPON CLIMATE-Climate Change and Territorial Effects on Regions and Local Economies', Luxembourg.
- ESPON (2012) 'The Territorial Dimension of Poverty and Social Exclusion in Europe (TiPSE)'.
- Eurostat (2017) 'Eurostat Database', Disponibile online da: <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database> (Accessed: 22 October 2017).
- FAO (2013) 'Climate-smart agriculture', E-ISBN 978-92-5-107721-4, www.fao.org/docrep/018/i3325e/i3325e.pdf.
- Fernando N. (2015) 'Rising CO2 concentration altered wheat grain proteome and flour rheological characteristics', *Food Chemistry*, 170, pp. 448–454.
- Fondazione Sviluppo Sostenibile (2019), 'Relazione sullo stato della green economy 2019: focus sugli impatti economici dei cambiamenti climatici in Italia', Disponibile online da: www.statigenerali.org/cms/wp-content/uploads/2019/11/Relazione_sullo_stato_della_green_economy_2019.pdf
- Forzieri G. et al. (2014) 'Ensemble projections of future stream-flow droughts in Europe', *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(1), pp. 85–108, doi:10.5194/hess-18-85-2014.
- Forzieri G. et al. (2016) 'Multi-hazard assessment in Europe under climate change', *Climatic Change*, 137(1), pp. 105–119, doi:10.1007/s10584-016-1661-x.
- Fraga H., et al. (2016) 'Modelling climate change impacts on viticultural yield, phenology and stress conditions in Europe', *Global Change Biology*, 22, pp. 3774–3788.
- Gariano S. L. and Guzzetti F. (2016) 'Landslides in a changing climate', *Earth-Science Reviews*, 162, pp. 227–252, doi:10.1016/j.earscirev.2016.08.011.
- Gascuel-Oudoux C. et al. (2010) 'The role of climate on inter-annual variation in stream nitrate fluxes and concentrations', *The Science of the total environment*, 408(23), pp. 5657–5666, doi:10.1016/j.scitotenv.2009.05.003.
- Gasparrini A. and Armstrong B. (2011) 'The impact of heat waves on mortality.', *Epidemiology*, 22(1), pp. 68–73, doi:10.1097/EDE.0b013e3181fddcd99.
- Gaudioso D., Giordano F., Taurino E. S. M. (2014) 'Focus su Le città e la sfida ai cambiamenti climatici - Qualità dell'ambiente urbano', X Rapporto – Edizione 2014. ISPRA.
- Giordano F., Capriolo A., Mascolo R.A. (2013) 'Planning for Adaptation to Climate Change' Guidelines for Municipalities.
- Goodwin N. R. (2003) 'Five Kinds of Capital : Useful Concepts for Sustainable Development', *Global Development And Environment Institute, Working Pa(03–07)*, pp. 1–13, doi:10.1016/j.jcrysgro.2005.12.011.
- Grover V. I. (2015) 'Impact of Climate Change on the Water Cycle'. In S. Shrestha, K. A. Anal, A. P. Salam, & M. van der Valk (Eds.), *Managing Water Resources under Climate Uncertainty: Examples from Asia, Europe, Latin America, and Australia* (pp. 3–30), Cham: Springer International Publishing, doi:10.1007/978-3-319-10467-6_1.
- Gunawardhana L. N. and Kazama S. (2012) 'A water availability and low-flow analysis of the Tagliamento River discharge in Italy under changing climate conditions', *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(3), pp. 1033–1045, doi: 10.5194/hess-16-1033-2012.
- Hennemuth T. I., Jacob D., Keup-Thiel E., Kotlarski S., Nikulin G., Otto J. and Szépszó G. (2017) 'Guidance for EURO-CORDEX climate projections data use', Version1. 0-2017.08, Retrieved on, 6, 2019.
- Howden N. J. K. et al. (2010) 'Nitrate concentrations and fluxes in the River Thames over 140 years (1868–2008): are increases irreversible?', *Hydrological Processes*, 24(18), pp. 2657–2662, doi:10.1002/hyp.7835.

Högy et al. (2013) 'Grain quality characteristics of spring wheat (*Triticum aestivum*) as affected by free air CO₂ enrichment', *Environmental and Experimental Botany*, 88, pp. 11-18.

Hristov J., Toreti A., Pérez Domínguez I., Dentener F., Fellmann T., Elleby C., Ceglar A., Fumagalli D., Niemeyer S., Cerrani I., Panarello L., Bratu M. (2020) 'Analysis of climate change impacts on EU agriculture by 2050', EUR 30078EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. ISBN 978-92-76-10617-3, doi:10.2760/121115, JRC119632.

Huttunen I. et al. (2015) 'Effects of climate change and agricultural adaptation on nutrient loading from Finnish catchments to the Baltic Sea.', *The Science of the total environment*, 529, pp. 168-181, doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.05.055.

INFC (2005) 'III Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio', MiPAF - Ispettorato Generale del Corpo Forestale dello Stato, CRA-ISAFA, Trento, Disponibile online da: www.sian.it/inventarioforestale/.

IPCC (2013) 'Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change', Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC (2013b) 'Annex III: Glossary'. In: Stocker T, Qin D, Plattner G, et al. (eds) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

IPCC (2014) 'Climate Change 2014: Field, Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)', in C.B., B. and V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L. L. (Eds.). (eds). Cambridge, UK.

IPCC (2014b). Annex II: Glossary [Agard, J., E.L.F. Schipper, J. Birkmann, M. Campos, C. Dubeux, Y. Nojiri, L. Olsson, B. Osman-Elasha, M. Pelling, M.J. Prather, M.G. Rivera-Ferre, O.C. Ruppel, A. Sallenger, K.R. Smith, A.L. St. Clair, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, and . In: Barros VR, Field CB, Dokken DJ, et al. (eds) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp 1757-1776.

IPCC (2018) 'Summary for Policymakers', In: *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. World Me-

teorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.

IPCC (2019) 'Summary for Policymakers', In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R., Shukla, J., Skea, E., Calvo Buendia, V., Masson-Delmotte, H.- O., Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.

ISPRA: Fioravanti G., Piervitali E., Frascchetti P., Desiato F., Perconti W., Frascchetti P. (2013) 'Variazioni e tendenze degli estremi di temperatura e precipitazione in Italia', ISPRA, Stato dell'Ambiente, 37.

ISPRA (2015) 'Annuario dei Dati Ambientali - Edizione 2014-2015', Disponibile online da: www.isprambiente.gov.it/it/publicazioni/stato-dellambiente/annuario-dei-dati-ambientali-edizione-2014-2015.

ISPRA (2018) 'XIV Rapporto sulla qualità dell'ambiente urbano', Edizione 2018.

ISPRA (2020) 'Gli indicatori del clima in Italia nel 2019', Anno XV, Stato dell'Ambiente 94/2020.

ISTAT (2013) 'Atlante dell'agricoltura Italiana', Report Istituto Nazionale di Statistica.

ISTAT (2014a) '6° Censimento Generale dell'Agricoltura Utilizzo della risorsa idrica a fini irrigui in agricoltura'.

ISTAT (2014b) 'Censimento delle acque per uso civile', Disponibile online da: www.istat.it/it/files/2014/06/2014_06_26_Report_censimento_acqua.pdf?title=Censimento+delle+acque++30%2Fgiu%2F2014++Testo+integrale.pdf.

ISTAT (2014c) 'Censimento delle acque per uso civile', Report Istituto Nazionale di Statistica.

ISTAT (2015a) '8milaCensus', Available at: www.istat.it/it/archivio/160823 (Accessed: 20 August 2018).

ISTAT (2015b) 'Indicatori territoriali per le politiche di sviluppo', Disponibile online da: www.istat.it/it/archivio/16777 (Accessed: 15 September 2017).

ISTAT (2015c) 'Risorse idriche naturali', Disponibile online da: www.istat.it/it/archivio/153668.

ISTAT (2016) 'Giornata mondiale dell'acqua - le statistiche dell'Istat', Disponibile online da: www.istat.it/it/files/2016/03/Focus_acqua_2016.pdf?title=Le+statistiche+dell'Istat+sull'acqua++21%2Fmar%2F2016++Testo+integrale+e+nota+metodologica.pdf.

ISTAT (2017) 'ISTAT Database', Disponibile online da: <http://dati.istat.it/?lang=en> (Accessed: 23 October 2017).

ISTAT (2018) 'L'indice di vulnerabilità sociale e materiale', Disponibile online da: http://ottomilacensus.istat.it/fileadmin/download/Indice_di_vulnerabilita_sociale_e_materiale.pdf.

- ISTAT (2019) 'Utilizzo E Qualità Della Risorsa Idrica in Italia', Disponibile online da: www.istat.it/it/files//2019/10/Utilizzo-e-qualità-della-risorsa-idrica-in-Italia.pdf.
- Jacob D. et al. (2014) 'EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research', *Regional Environmental Change*, 14(2), pp. 563–578, doi:10.1007/s10113-013-0499-2.
- Jiménez Cisneros B. E. et al. (2014) 'Freshwater resources', Edited by C. B. Field VR; Dokken, DJ; Mach, KJ; Mastrandrea, MD; Bilir, TE; Chatterjee, M; Ebi, KL; Estrada, YO; Genova, RC; Girma, B; Kissel, ES; Levy, AN; MacCracken, S; Mastrandrea, PR; White, LL. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press. Disponibile online da: <http://ipcc-wg2.gov/AR5/report/full-report/>.
- Kahn M.E., Mohaddes K., Ng R.N.C., Pesaran M.H., Raissi M., Yang J-C. (2019) 'Long-Term Macroeconomic Effects of Climate Change: A Cross-Country Analysis', NBER Working Paper No. 26167. Cambridge Working Papers in Economics 1965, Faculty of Economics, University of Cambridge. Disponibile online da: www.nber.org/papers/w26167.
- Kalabokidis K., Palaiologou P., Gerasopoulos E., Giannakopoulos C., Kostopoulou E. and Zerefos C. (2015) 'Effect of Climate Change Projections on Forest Fire Behavior and Values-at-Risk in Southwestern Greece', *Forests*, 6, pp. 2214–2240.
- Kaushal S. S., Mayer P. M., Vidon P. G., Smith R. M., Pennino M. J., Newcomer T. A., Belt K. T. (2014) 'Land Use and Climate Variability Amplify Carbon, Nutrient, and Contaminant Pulses: A Review with Management Implications', *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 50(3), pp. 585–614, doi:10.1111/jawr.12204.
- Kipling R. P. et al. (2016) 'Modeling European ruminant production systems: Facing the challenges of climate change', *Agricultural Systems*, 147, pp. 24–37, doi:10.1016/j.agsy.2016.05.007.
- Knorr W., Dentener F., Hantson S., Jiang L., Klimont Z., Arneeth A. (2016) 'Air quality impacts of European wildfire emissions in a changing climate', *Atmos. Chem. Phys.*, 16, pp. 5685–5703, doi:10.5194/acp-16-5685-2016.
- Kundzewicz Z. W. and Krysanova V. (2010) 'Climate change and stream water quality in the multi-factor context', *Climatic Change*, 103(3), pp. 353–362. doi:10.1007/s10584-010-9822-9.
- Lacetera, N. et al. (2005) 'Lymphocyte functions in dairy cows in hot environment', *International Journal of Biometeorology*, 50(2), pp. 105–110. doi:10.1007/s00484-005-0273-3.
- Lacetera N. et al. (2006) 'Heat Stress Elicits Different Responses in Peripheral Blood Mononuclear Cells from Brown Swiss and Holstein Cows', *Journal of Dairy Science*, 89(12), pp. 4606–4612. doi:10.3168/jds.S0022-0302(06)72510-3.
- Langmead O., McQuatters-Gollop A., Mee L.D. (eds.) (2007) 'European Lifestyles and Marine Ecosystems: Exploring Challenges for Managing Europe's Seas', University of Plymouth Marine Institute, Plymouth, UK, 44 pp.
- Legambiente (2019) *Ecosistema urbano: Rapporto sulle performance ambientali delle città 2019*, Disponibile online da: www.legambiente.it/ecosistema-urbano-2019/.
- Lionello P. and Scarascia L. (2018) 'The relation between climate change in the Mediterranean region and global warming', *Regional Environmental Change*, 18, pp. 1481–1493.
- Liu W. C. and Chan W. T. (2016) 'Assessment of climate change impacts on water quality in a tidal estuarine system using a three-dimensional model', *Water (Switzerland)*, 8(2), doi:10.3390/w8020060.
- Longobardi A., Mautone M. and De Luca C. (2014) 'Reservoirs performances under climate variability: A case study. In *Evolving Water Resources Systems: Understanding, Predicting and Managing Water-Society Interactions*', Proceedings of the ICWRS 2014, Bologna, Italy, 4–6 June 2014; IAHS Publication: Oxford, UK, 2014; Volume 364.
- Loos S. et al. (2009) 'Large scale nutrient modelling using globally available datasets: A test for the Rhine basin', *Journal of Hydrology*, 369(3), pp. 403–415. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.02.019.
- Lovato T, Vichi M, Oddo P (2013) 'High-Resolution Simulations of Mediterranean Sea Physical Oceanography Under Current and Scenario Climate Conditions: Model Description, Assessment and Scenario Analysis', *C Res Pap* No 207.
- Lozano O.M., Salis M., Ager A.A., Arca B., Alcasena F.J., Monteiro A.T., Finney M.A., Del Giudice L., Scoccimarro E., Spano D. (2016) 'Assessing Climate Change Impacts on Wildfire Exposure in Mediterranean Areas', *Risk Analysis*, doi:10.1111/risa.12739.
- Lu Q. et al. (2015) 'The distribution of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the River Thames Catchment under the scenarios of climate change.', *The Science of the total environment*, 533, pp. 187–195, doi:10.1016/j.scitotenv.2015.06.084.
- Ludovisi A. and Gaino E. (2010) 'Meteorological and water quality changes in Lake Trasimeno (Umbria, Italy) during the last fifty years', *Journal of Limnology*, 69, pp. 174–188, doi:10.4081/jlimnol.2010.174.
- Macleod C. J. A. et al. (2012) 'Chapter Two - The Effects of Climate Change on the Mobilization of Diffuse Substances from Agricultural Systems', *Advances in Agronomy*. Edited by D. L. B. T.-A. in A. Sparks. Academic Press, 115, pp. 41–77. doi:10.1016/B978-0-12-394276-0.00002-0.
- Marchetti M., Ascoli D. (2018) 'Territorio, bioeconomia e gestione degli incendi: una sfida da raccogliere al più presto', *Forest@*, 15, pp. 71–74, doi:10.3832/efor0072-015.
- Marshall E. and Randhir T. (2008) 'Effect of climate change on watershed system: a regional analysis', *Climatic Change*, 89(3), pp. 263–280. doi:10.1007/s10584-007-9389-2.

- Marzi S., Mysiak J. and Santato S. (2018) 'Comparing adaptive capacity index across scales: The case of Italy', *Journal of Environmental Management*, 223, pp. 1023–1036, doi:10.1016/j.jenvman.2018.06.060.
- Marzi S. et al. (2019) 'Constructing a comprehensive disaster resilience index: The case of Italy', *PLOS ONE. Public Library of Science*, 14(9), p. e0221585, doi:10.1371/journal.pone.0221585.
- Masia S., Sušnik J., Marras S., Mereu S., Spano D., Trabucco A. (2018) 'Assessment of irrigated agriculture vulnerability under climate change in Southern Italy', *Water*, 10(2), 209.
- Masterton J. M., and Richardson F. A. (1979) 'Humidex ; a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity', Canada, *Atmospheric Environment*.
- MATTM (2017) 'Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC)', Allegato Tecnico-scientifico: impatti, vulnerabilità e azioni di adattamento settoriali.
- McCallum S., Dworak T., Prutsch A., Kent N., Mysiak J., Bosello F., Klostermann J., Dlugolecki A., Williams E., König M., Leitner M., Miller K., Harley M., Smithers R., Berglund M., Glas N., Romanovska L., van de Sandt K., Bachschmidt R. L. (2013) 'Support to the development of the EU Strategy for Adaptation to Climate Change: Background report to the Impact Assessment, Part I – Problem definition, policy context and assessment of policy options', Austria, Vienna.
- Mereu V., Iocola I., Spano D., et al (2008) 'Land suitability and potential yield variations of wheat and olive crops determined by climate change in Italy', *Ital J Agron*, 3, pp. 797–798.
- Mereu V., Gallo A., Spano D. (2019) 'Optimizing Genetic Parameters of CSM-CERES Wheat and CSM CERES Maize for Durum Wheat, Common Wheat, and Maize in Italy', *Agronomy*, 9(10), 665, doi:10.3390/agronomy9100665.
- Mereu V., Costa Saura J. M., Trabucco A., Spano D. (2020) 'Assessment of cereal production and food security under climate change in the Euro-Mediterranean Region', *EGU General Assembly Conference*, Disponibile online da: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020EGUGA..2221722M/abstract> (Accessed: 22 July 2020).
- Michelozzi P. et al. (2010) 'Surveillance of summer mortality and preparedness to reduce the health impact of heat waves in Italy', *International journal of environmental research and public health*, 7(5), pp. 2256–2273. doi: 10.3390/ijerph7052256.
- Migliavacca M., Dosio A., Camia A., Hobourg R., Houston-Durrant T., Kaiser J.W., et al. (2013) 'Modeling biomass burning and related carbon emissions during the 21st century in Europe', *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118(4), pp. 1732–1747.
- Miranda A.I., Marchi E., Ferretti M., Millán M.M. (2008) 'Chapter 9 Forest Fires and Air Quality Issues in Southern Europe', *Developments in environmental science*, 8(08), pp. 209–231, doi:10.1016/S1474-8177(08)00009-0.
- Miranda A.I., Amorim J.H., Valente J., Monteiro A., Ferreira J., Borrego C. (2014) 'Forest fires effects on the atmosphere: 20 years of research in Portugal', *Adv. For. Fire Res.*, pp. 1743–1748. Disponibile online da: <http://hdl.handle.net/10316.2/34140>.
- Mitsopoulos I., Mallinis G., Karali A. et al. (2016) 'Mapping fire behaviour under changing climate in a Mediterranean landscape in Greece', *Reg Environ Change*, 16, pp. 1929–1940, doi:10.1007/s10113-015-0884-0.
- Montanari A., Papalexiou S.M. (2016) 'Is climate change modifying precipitation extremes?', In: *Geophysical Research Abstracts EGU General Assembly*, 2016–3448.
- Morgan L. K., Bakker M. and Werner A. D. (2015) 'Occurrence of seawater intrusion overshoot', *Water Resources Research*, 51(4), pp. 1989–1999, doi:10.1002/2014WR016329.
- Moriondo M., Good P., Durao R., Bindi M., Giannakopoulos C., Corte-Real J. (2006) 'Potential impact of climate change on fire risk in the Mediterranean area', *Clim Res*, 31, pp. 85–95.
- Moriondo M., et al. (2013a) 'Olive trees as bio-indicators of climate evolution in the Mediterranean Basin', *Global Ecology and Biogeography*, 22, pp. 818–833, doi:10.1111/geb.12061.
- Moriondo M., et al. (2013b) 'Projected shifts of wine regions in response to climate change', *Climatic Change*, 119(3-4), pp. 825–839, doi:10.1007/s10584-013-0739-y.
- Mosello R. and Lami A. (2011) 'Climate Change and Related Effects on Water Quality: Examples from Lake Maggiore (Italy)', *Global Bioethics*, 24(1–4), pp. 95–98, doi:10.1080/11287462.2011.10800706.
- Moss R. et al. (2008) 'Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts and Response Strategies', *IPCC Expert Meeting Report*, Disponibile online da: www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=940991.
- Munafò, Michele (2019) "Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici." Report SNPA 08/19. Roma: Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA).
- Mysiak J., Carrera L. and Massarutto, A. (2013) 'Servizio idrico e l'approvvigionamento di acqua nel contesto dei cambiamenti climati'. In *Qualità dell'ambiente urbano. IX Rapporto*, Edizione 2013. Focus su acque e ambiente urbano (pp. 113–120). Roma.
- Mysiak J. et al. (2018) 'Climate risk index for Italy', *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376(2121), doi:10.1098/rsta.2017.0305.
- Nardone A. et al. (2010) 'Effects of climate changes on animal production and sustainability of livestock systems', *Livestock Science*, 130(1), pp. 57–69, doi:10.1016/j.livsci.2010.02.011.
- Nature Climate Change (2017) 'Spreading like wildfire', *Nature Climate Change*, 7, 755, doi:10.1038/nclimate3432.

- Noce S., Collalti A. and Santini M. (2017) 'Likelihood of changes in forest species suitability, distribution, and diversity under future climate: The case of Southern Europe', *Ecology and Evolution*, 7(22), pp. 9358–9375, doi: 10.1002/ece3.3427.
- Orlandi et al. (2020) 'Impact of Climate Change on Olive Crop Production in Italy', *Atmosphere*, 11 (595), doi:10.3390/atmos11060595.
- Ozaki N. et al. (2003) 'Statistical analyses on the effects of air temperature fluctuations on river water qualities', *Hydrological Processes*, 17(14), pp. 2837–2853, doi:10.1002/hyp.1437.
- Paerl H. W. et al. (2006) 'Assessing the effects of nutrient management in an estuary experiencing climatic change: the Neuse River Estuary, North Carolina', *Environmental management. United States*, 37(3), pp. 422–436. doi: 10.1007/s00267-004-0034-9.
- Paerl H. W. and Huisman J. (2009) 'Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms', *Environmental Microbiology Reports*, 1(1), pp. 27–37, doi:10.1111/j.1758-2229.2008.00004.x.
- Paranunzio R. et al. (2016) 'Climate anomalies associated with the occurrence of rockfalls at high-elevation in the Italian Alps', *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(9), pp. 2085–2106, doi:10.5194/nhess-16-2085-2016.
- Parsons M. et al. (2016) 'Top-down assessment of disaster resilience: A conceptual framework using coping and adaptive capacities', *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 19, pp. 1–11. doi:10.1016/j.ijdrr.2016.07.005.
- Pecchi M. et al. (2020) 'Potential impact of climate change on the spatial distribution of key forest tree species in Italy under RCP4.5 for 2050s', *Forest Ecosystems*, pp. 1–33, doi:10.21203/rs.3.rs-20281/v1.
- Pednekar A. M. et al. (2005) 'Influence of climate change, tidal mixing, and watershed urbanization on historical water quality in Newport Bay, a saltwater wetland and tidal embayment in southern California.', *Environmental science & technology, United States*, 39(23), pp. 9071–9082, doi:10.1021/es0504789.
- Pedro-Monzonis M., Del Longo M., Solera A., Pecora S. and Andreu, J. (2016) 'Water Accounting in the Po River Basin Applied to Climate Change Scenarios', In *Procedia Engineering*, 162, pp. 246–253, doi:10.1016/j.proeng.2016.11.051.
- Pellizzaro G., Dubrovsky M., Bortolu S., Ventura A., Arca B., Masia P., Duce P. (2014) 'Estimating live fuel status by drought indices: an approach for assessing local impact of climate change on fire danger', *Geophysical Research Abstracts*, 16, EGU2014-5795.
- PNAC (2017) 'Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici', Disponibile online da: www.minambiente.it/pagina/consultazione-su-piano-nazionale-adattamento-cambiamenti-climatici.
- Posch T. et al. (2012) 'Harmful filamentous cyanobacteria favoured by reduced water turnover with lake warming', *Nature Climate Change*, 2(11), pp. 809–813. doi:10.1038/nclimate1581.
- Preziosi E., Del Bon A., Romano E., Petrangeli A.B., Casadei S. (2013) 'Vulnerability to drought of a complex water supply system. The upper Tiber basin case study (Central Italy)', *Water Resour. Manag.*, 27, pp. 4655–4678.
- Pumo D. et al. (2016) 'Climate change effects on the hydrological regime of small non-perennial river basins.', *The Science of the total environment*, 542, pp. 76–92, doi:10.1016/j.scitotenv.2015.10.109.
- Qian B, Zhang X, Chen K, et al (2010) 'Observed long-term trends for agroclimatic conditions in Canada', *J Appl Meteorol Climatol*, 49, pp. 604–618, doi:10.1175/2009JAMC2275.1.
- Qin B. et al. (2010) 'A drinking water crisis in Lake Taihu, China: linkage to climatic variability and lake management.', *Environmental management. United States*, 45(1), pp. 105–112, doi:10.1007/s00267-009-9393-6.
- RaF Italia (2019) 'Rapporto sullo stato delle foreste e del settore forestale in Italia 2017-2018'. AA.VV. Ed: Compagnia delle Foreste S.r.l. Disponibile online da www.reterurale.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/19231
- Ravazzani G. et al. (2014) 'Investigation of Climate Change Impact on Water Resources for an Alpine Basin in Northern Italy: Implications for Evapotranspiration Modeling Complexity', *PLOS ONE*, 9(10), p. e109053, Disponibile online da: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0109053>.
- Rianna G. et al. (2014) 'Evaluation of the Effects of Climate Changes on Landslide Activity of Orvieto Clayey Slope', *Procedia Earth and Planetary Science*, 9, pp. 54–63, doi:10.1016/j.proeps.2014.06.017.
- Rogelj J., Meinshausen M. and Knutti R. (2012) 'Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates', *Nature Climate Change*, 2(4), pp. 248–253, doi:10.1038/nclimate1385.
- Romano E. and Preziosi E. (2013) 'Precipitation pattern analysis in the Tiber River basin (central Italy) using standardized indices', *International Journal of Climatology*, 33(7), pp. 1781–1792, doi:10.1002/joc.3549.
- Roudier P. et al. (2016) 'Projections of future floods and hydrological droughts in Europe under a +2°C global warming', *Climatic Change*, 135(2), pp. 341–355, doi:10.1007/s10584-015-1570-4.
- Rozemeijer J. C. et al. (2009) 'Weather-induced temporal variations in nitrate concentrations in shallow groundwater', *Journal of Hydrology*, 378(1), pp. 119–127. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.09.011.
- Ruffault J., Curt T., Martin-StPaul N. K., Moron V. and Trigo, R.M. (2018) 'Extreme wildfire events are linked to global-change-type droughts in the northern Mediterranean', *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, pp. 847–856, doi:10.5194/nhess-18-847-2018.

- Saadi S, Todorovic M, Tanasijevic L, et al (2015) 'Climate change and Mediterranean agriculture: Impacts on winter wheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield', *Agric Water Manag*, 147, pp. 103–115, doi:10.1016/j.agwat.2014.05.008.
- Sahoo G. B. et al. (2011) 'Effects of climate change on thermal properties of lakes and reservoirs, and possible implications', *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25(4), pp. 445–456, doi:10.1007/s00477-010-0414-z.
- Salinari F, Giosue S, Tubiello FN, et al (2006) 'Downy mildew (*Plasmopara viticola*) epidemics on grapevine under climate change', *Glob Chang Biol*, 12, pp. 1299–1307, doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01175.x
- Sanchez Martinez G. et al. (2016) 'Projected heat-related mortality under climate change in the metropolitan area of Skopje', *BMC public health*, 16, 407, doi:10.1186/s12889-016-3077-y.
- Santos et al (2020) 'A Review of the Potential Climate Change Impacts and Adaptation Options for European Viticulture', *Appl. Sci.*, 10, 3092, doi:10.3390/app10093092.
- Smiraglia C. and Diolaiuti G. (Eds.) (2015) 'Il Nuovo Catasto dei Ghiacciai Italiani', Bergamo: Ev-K2-CNR Ed.
- Snyder R.L., Geng S., Orang M., Sarreshteh S. (2012) 'Calculation and Simulation of Evapotranspiration of Applied Water', *J. Integr. Agric.*, 11, pp. 489–501.
- Spano D., Camia A., Bacciu V., Masala F., Duguy B., Trigo R., et al. (2014) 'Recent trends in forest fires in Mediterranean areas and associated changes in fire regimes'. In: Moreno J, editor. *Forest fires under climate, social and economic changes in Europe, the Mediterranean and other fire-affected areas of the world*. FUME. Lesson learned and outlook, p. 6–7.
- Sperotto A., Molina J. L., Torresan S., Critto A., Pulido-Velazquez M. and Marcomini A. (2019) 'Water quality sustainability evaluation under uncertainty: A multi-scenario analysis based on Bayesian networks', *Sustainability (Switzerland)*, 11(17), doi:10.3390/su11174764.
- Stakhiv V., Stewart B., (2010) 'Needs for Climate Information in Support of Decision-Making in the Water Sector', *Procedia Environ. Sci.*, 1, pp. 102–119.
- Tanasijevic L., Todorovic M., Pereira L.S., et al (2014) 'Impacts of climate change on olive crop evapotranspiration and irrigation requirements in the Mediterranean region', *Agric Water Manag*, 144, pp. 54–68, doi: 10.1016/j.agwat.2014.05.019.
- Teslić N., Vujadinović M., Ruml, M., Antolini, G., Vuković, A., Parpinello G.P., Ricci, A., Versari, A (2017) 'Climatic shifts in high quality wine production areas, Emilia Romagna, Italy', 1961–2015. *Clim. Res.*, 73, pp. 195–206.
- Thackeray S. J. et al. (2010) 'Trophic level asynchrony in rates of phenological change for marine, freshwater and terrestrial environments', *Global Change Biology*, 16(12), pp. 3304–3313, doi:10.1111/j.1365-2486.2010.02165.x.
- Tibby J. and Tiller D. (2007) 'Climate–water quality relationships in three Western Victorian (Australia) lakes 1984–2000', *Hydrobiologia*, 591(1), pp. 219–234, doi:10.1007/s10750-007-0804-5.
- Trigila A., Iadanza C., Bussetini M., Lastoria B. (2018) 'Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio', Edizione 2018. ISPRA, Rapporti 287/2018 (ISBN 978-88-448-0901-0).
- Turco M., Bedia J., Di Liberto F., Fiorucci P., von Hardenberg J., Koutsias N., et al. (2016) 'Decreasing Fires in Mediterranean Europe', *PLoS ONE*, 11(3): e0150663, doi:10.1371/journal.pone.0150663.
- Turco M., Rosa-Cánovas J.J., Bedia J. et al. (2018) 'Exacerbated fires in Mediterranean Europe due to anthropogenic warming projected with non-stationary climate-fire models', *Nat Commun*, 9, 3821, doi:10.1038/s41467-018-06358-z.
- UNDRR (2019) 'Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction', Geneva, Switzerland. Disponibile online da: https://gar.undrr.org/sites/default/files/reports/2019-05/full_gar_report.pdf.
- UNISDR (2015) 'Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030', Disponibile online da: www.unisdr.org/we/inform/publications/43291.
- Urbanski S.P., Hao W.M., Nordgren B. (2011) 'The wildland fire emission inventory: western United States emission estimates and an evaluation of uncertainty', *Atmos. Chem. Phys.*, 11, pp. 12973–13000, doi:10.5194/acp-11-12973-2011.
- Van Passel S., Massetti E., Mendelsohn R. (2016), 'A Ricardian analysis of the impact of climate change on the European agriculture', *Environmental and Resource Economics*, 67, pp. 725–760.
- Ventrella D., Charfeddine M., Moriondo M., et al (2012) 'Agricultural adaptation strategies under climate change for winter durum wheat and tomato in southern Italy: irrigation and nitrogen fertilization', *Reg Environ Change*, 12, pp. 407–419, doi:10.1007/s10113-011-0256-3.
- Vezzoli R. et al. (2015) 'Hydrological simulation of Po River (North Italy) discharge under climate change scenarios using the RCM COSMO-CLM', *The Science of the total environment*, 521–522, pp. 346–358, doi:10.1016/j.scitotenv.2015.03.096.
- Visconti A., Manca M. and De Bernardi R. (2008) 'Eutrophication-like response to climate warming: an analysis of Lago Maggiore (N. Italy) zooplankton in contrasting years', *Journal of Limnology*, 67, pp. 87–92, doi:10.4081/jlimnol.2008.87.
- Vitali A. et al. (2015) 'The effect of heat waves on dairy cow mortality', *Journal of Dairy Science*, 98(7), pp. 4572–4579, doi: 10.3168/jds.2015-9331.
- Vousdoukas M. I., Mentaschi L., Voukouvalas E., Verlaan M.,

Jevrejeva S., Jackson L. P. and Feyen L. (2018) 'Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard', *Nature Communications*, 9(1), 2360, doi:10.1038/s41467-018-04692-w.

Weatherhead E. K. and Howden N. J. K. (2009) 'The relationship between land use and surface water resources in the UK', *Land Use Policy*, 26, pp. S243–S250, doi:10.1016/j.landuse-pol.2009.08.007.

WCED (1987) 'Our Common Future', World Commission on Environment and Development (WCED), Oxford, 300 pp.

Webber H. et al. (2018) 'Diverging importance of drought stress for maize and winter wheat in Europe', *Nature Communication*, 9, 4249, doi:10.1038/s41467-018-06525-2.

Weedon G. P. et al. (2014) 'The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data', *Water Resources Research*, 50(9), pp. 7505–7514, doi:10.1002/2014WR015638.

Whitehead, P. G. et al. (2009) 'A review of the potential impacts of climate change on surface water quality', *Hydrological Sciences Journal*, pp. 101–123, doi:10.1623/hysj.54.1.101.

Whitehead P. G., Wade A. J. and Butterfield D. (2009) 'Potential impacts of climate change on water quality and ecology in six UK rivers', *Hydrology Research*, 40(2–3), pp. 113–122, doi:10.2166/nh.2009.078.

WHO (2018) 'Climate and health country profile –Italy', Disponibile online da: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/260380/WHO-FWC-PHE-EPE-15.52-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Xia R. et al. (2016) 'The potential impacts of climate change factors on freshwater eutrophication: Implications for research and countermeasures of water management in China', *Sustainability (Switzerland)*, 8(3), doi:10.3390/su8030229.

Zaharescu D. G. et al. (2016) 'Climate change enhances the mobilisation of naturally occurring metals in high altitude environments', *The Science of the total environment*, 560–561, pp. 73–81, doi:10.1016/j.scitotenv.2016.04.002.

Zhou et al. (2018) 'Projected changes of thermal growing season over Northern Eurasia in a 1.5 °C and 2 °C warming world', *Environmental Research Letters*, 13(3).

Zollo A. L. et al. (2016) 'Extreme temperature and precipitation events over Italy: Assessment of high-resolution simulations with COSMO-CLM and future scenarios', *International Journal of Climatology*, 36(2), pp. 987–1004. doi:10.1002/joc.4401.



CMCC Foundation

Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici

Via Augusto Imperatore 16
73100 Lecce, Italy

Phone: +39.0832.288.650
Fax: +39.0832.277.603
info@cmcc.it