

Capitolo 1. Introduzione

Carlo Carraro, Presidente della Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili” del Ministero delle Infrastrutture e Mobilità Sostenibili

L'importanza di analizzare gli impatti dei cambiamenti climatici su trasporti, mobilità e infrastrutture può sembrare ovvia, alla luce dell'evoluzione molto rapida dei cambiamenti climatici e il crescente impatto negativo sulle infrastrutture, in particolare a causa di eventi estremi – quali piogge eccezionali, trombe d'aria, alluvioni, ondate di calore, incendi, siccità - sempre più frequenti. Eventi che sono oramai oggetto di cronaca quasi quotidiana, non solo di analisi scientifiche. Così come sono ovvie, e dimostrate dai tanti casi di questi ultimi anni, le ripercussioni ambientali ed economiche di questi eventi meteorologici estremi e più in generale dei cambiamenti climatici già avvenuti. Purtroppo, un'analisi sistematica ed estesa degli effetti dei cambiamenti climatici su infrastrutture, trasporti e mobilità, una loro proiezione nel futuro, almeno fino a metà secolo, così come un'analisi di come si evolveranno di conseguenza i costi per i sistemi economici e sociali, non era stata fino ad ora fatta, almeno per l'Italia. Molto poche sono anche le analisi delle tecnologie, delle iniziative, degli investimenti, delle politiche – e dei relativi costi e benefici – sempre relative a trasporti e infrastrutture in Italia, in grado di far fronte ai cambiamenti climatici che verranno.¹

È quindi da apprezzare in modo particolare l'iniziativa del Ministro delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, che ha dato il via alla preparazione di questo rapporto istituendo una apposita Commissione – la Commissione “Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili” – con il compito di analizzare e valutare non solo gli impatti dei cambiamenti climatici su infrastrutture e trasporti, ma soprattutto con il compito di disegnare iniziative, misure, politiche in grado da un lato di proteggere le infrastrutture ed i servizi di mobilità dai cambiamenti climatici che verranno e dall'altro in grado di ridurre in modo sostanziale le emissioni di gas serra provenienti da infrastrutture e trasporti. Per comprendere i contenuti di questo rapporto, è quindi importante partire dai 6 obiettivi che il Ministro Giovannini avevo dato alla Commissione:

1. predisporre un quadro di analisi sistematico sulle sfide derivanti dai cambiamenti di medio-lungo periodo in ambito tecnologico, ambientale e climatico con riferimento ai settori delle infrastrutture e della mobilità, ivi incluse quelle legate alla logistica di merci e persone e alle diverse dimensioni dell'abitare;
2. individuare le potenziali azioni programmatiche necessarie per rendere coerenti i programmi di sviluppo e investimento promossi dal Ministero con le conseguenze e gli impatti di tali cambiamenti;
3. proporre schemi di indirizzo e potenziali iniziative diseguate con l'obiettivo di anticipare e mitigare i potenziali rischi a cui il sistema infrastrutturale, anche a

¹ Un studio molto interessante è “Elementi per una *roadmap* della mobilità sostenibile” realizzato da RSE nel 2016 per il Ministero dell'Ambiente e pubblicato da Editrice Alkes.

livello di singola città, è esposto, aumentandone la resilienza e la capacità di adattamento;

4. sviluppare modelli di valutazione e monitoraggio delle iniziative e degli investimenti che possano garantire nella fase di disegno ex-ante e nella fase realizzativa una corretta identificazione degli impatti attesi, anche al fine di creare un processo di programmazione coerente con le linee di indirizzo strategico a livello europeo e nazionale;
5. valutare strategie ed investimenti in infrastrutture in mobilità anche alla luce del loro contributo alla riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra ed al raggiungimento degli obiettivi climatici dell'Italia;
6. proporre un'evoluzione del quadro normativo di riferimento con l'obiettivo di incorporare le valutazioni puntuali e sistemiche sui rischi connessi al cambiamento climatico nei processi di programmazione e selezione dei progetti nei settori delle infrastrutture e della mobilità. Tali valutazioni dovranno includere anche il contributo dei progetti al percorso di decarbonizzazione e relativi obiettivi al 2030 e 2050, coerentemente con il rispetto della EU Climate Law.

In sintesi, non si tratta solo di valutare e quantificare l'importanza dei cambiamenti climatici, oggi e in futuro, per la tutela e lo sviluppo delle infrastrutture e della mobilità in Italia. Il Rapporto ha piuttosto un ruolo progettuale, con l'obiettivo di ridisegnare le infrastrutture in Italia alla luce dei cambiamenti climatici attesi: sia per renderle più resilienti ed adattarle ai cambiamenti climatici che verranno; sia perché contribuiscano alla indispensabile riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra. Il Rapporto vuole quindi essere uno strumento per indirizzare misure, politiche ed investimenti nella duplice direzione di proteggere infrastrutture e mobilità dai cambiamenti climatici ed allo stesso contribuire alla realizzazione dei piani di controllo dei cambiamenti climatici, in linea con gli obiettivi della EU Climate Law, che prevede una riduzione delle emissioni di gas serra del 55% al 2030 e il raggiungimento delle zero emissioni nette al 2050.

Il Rapporto evidenzia quindi il ruolo cruciale che una strategia di investimenti in infrastrutture e mobilità sostenibili - accompagnata dall'adozione di adeguate tecnologie, strumenti di policy e pratiche di *governance*, oltre che da una conseguente, mirata, politica industriale - può avere per lo sviluppo economico dell'Italia. Una sostenibilità raggiungibile attraverso l'attuazione simultanea di tre principali strategie:

- il rafforzamento della capacità di **adattamento** al cambiamento climatico delle infrastrutture e dei sistemi di mobilità esistenti;
- la **resilienza** delle nuove infrastrutture e sistemi di mobilità;
- l'adeguamento o la realizzazione di infrastrutture e sistemi di mobilità in grado di contribuire efficacemente alla **riduzione delle emissioni di gas serra (mitigazione)**.

Strategie che vanno tuttavia intese in modo ampio, non solo con un approccio ambientale, ma associate ad una **strategia di sviluppo e politica industriale** che accompagni il paese in

tutte le trasformazioni necessarie per divenire effettivamente sostenibile. Trasformazioni che riguardano numerosi settori industriali, ma anche il mondo dell'occupazione e quello della formazione e che associano, come correttamente fa l'EU Green New Deal, la trasformazione ecologica a quella digitale.

L'importanza di considerare il settore dei trasporti, mobilità e infrastrutture anche dal punto di vista della mitigazione emerge in modo molto chiaro da alcuni dati di partenza. Il settore dei trasporti in Italia rappresentava nel 2019 (ultimo anno pre-Covid) il 25,2% delle emissioni totali di gas ad effetto serra in Italia e il 30,7% delle emissioni totali di CO₂, una cifra all'incirca corrispondente alla percentuale di combustibili fossili consumati a livello nazionale. Il 92,6% di tali emissioni sono attribuibili al trasporto stradale (persone e merci), il 4,3% alla navigazione, lo 0,75% all'aviazione domestica, lo 0,65% alle condotte, lo 0,15% alle ferrovie ed il rimanente 1,52% circa ad altri sistemi. Se in Italia le emissioni si sono ridotte dal 1990 al 2019 del 19%, il settore dei trasporti nel 2019 rappresentava uno dei pochi settori in crescita di emissioni (+3.2% rispetto al 1990), assieme solo a quello residenziale/dei servizi e dei rifiuti. La grande importanza del settore dei trasporti nel quadro delle emissioni nazionali e la sua fortissima dipendenza dai combustibili fossili ne fanno quindi il settore cardine di ogni strategia di riduzione delle emissioni.

Allo stesso tempo, il settore delle infrastrutture e dei trasporti è tra i più vulnerabili ai cambiamenti climatici. Come evidenzia questo Rapporto, gli impatti dei cambiamenti climatici hanno e avranno effetti di vasta portata anche in Italia. La scarsità di acqua legata a lunghi periodi di siccità, ad esempio, ha interessato e interesserà attività economiche diverse tra loro, come l'agricoltura, l'acquacoltura, il turismo, il raffreddamento delle centrali elettriche e il trasporto merci sui fiumi. Le perdite economiche dovute alla maggiore frequenza di eventi estremi legati al clima sono in aumento ed i danni riguardano soprattutto le reti ed infrastrutture di trasporto, interne e costiere, di telecomunicazione e digitali. Il lento innalzamento del livello del mare è inoltre una fonte di crescente preoccupazione per le zone costiere ed i relativi insediamenti urbani, produttivi e portuali. Serve quindi una strategia che permetta di proteggere, adattare e rendere resilienti infrastrutture e trasporti ai cambiamenti climatici.

Va sottolineato come il settore delle infrastrutture, mobilità e trasporti sia allo stesso tempo causa maggiore e vittima importante dei cambiamenti climatici. Da qui la necessità di strutturare il Rapporto secondo una sequenza logica che parta dalla valutazione degli impatti - ambientali, sociali ed economici - dei cambiamenti climatici, per poi delineare le misure con cui il settore può da un lato contribuire alla riduzione delle emissioni di gas serra e dall'altro può essere reso resiliente alle emissioni di gas serra e alle loro conseguenze sul clima.

Le sfide della mitigazione e dell'adattamento richiedono uno sforzo collettivo che coinvolge soggetti pubblici e privati. È fondamentale che il settore privato e quello pubblico collaborino maggiormente, in particolare sul fronte del finanziamento delle misure necessarie (questo tema è oggetto del Rapporto della Commissione "Finanza per le Infrastrutture e la Mobilità Sostenibili" sempre istituita dal MIMS). L'auspicio è che questo Rapporto, grazie alle sue

analisi e alle sue proposte, possa aiutare il settore pubblico e quello privato ad individuare i rischi e ad orientare gli investimenti a favore di interventi in materia di adattamento, resilienza e mitigazione, offrendo soluzioni per contribuire a dare risposte alla crescente consapevolezza degli impatti climatici.

Prima di presentare più in dettaglio la struttura del Rapporto e dei suoi capitoli, credo sia utile delineare l'approccio metodologico adottato. Innanzitutto, alla luce degli obiettivi e delle strategie sopra descritti, è indispensabile adottare un approccio dinamico, intertemporale, che colga l'evoluzione del Paese anche indipendentemente dai cambiamenti climatici futuri. Per una corretta analisi degli impatti dei cambiamenti climatici su infrastrutture e mobilità, oltre che delle politiche per prevenirli ed affrontarli, è infatti necessario tener conto non solo dell'evoluzione attesa del clima, cosa che il rapporto fa utilizzando la miglior modellistica climatica oggi disponibile, ma anche dell'evoluzione economica, sociale e tecnologica del Paese. Gli impatti saranno infatti diversi, rispetto ad oggi, alla luce delle trasformazioni - in particolare tecnologiche e demografiche - in corso. Allo stesso tempo, effetti e costi delle politiche saranno diversi se si tiene conto, ad esempio, delle prospettive tecnologiche future - digitali soprattutto. E ci sono anche dinamiche economiche, come il posizionamento dell'Italia nelle catene globali del valore, che impattano sul fabbisogno di trasporti e infrastrutture, sulla loro tipologia e sulla loro "direzione geografica". Serve quindi un approccio dinamico ed allo stesso tempo olistico, che veda il cambiamento climatico all'interno di un cambiamento complessivo molto più ampio.

In particolare, oltre alle **dinamiche economiche** relative al posizionamento del nostro Paese nelle catene globali del valore, altri elementi importanti da considerare sono:

- a) le **dinamiche tecnologiche**, con particolare riferimento all'applicazione delle tecnologie digitali e ai loro impatti sull'organizzazione sociale, delle attività lavorative e produttive e al conseguente impatto territoriale;
- b) le **dinamiche demografiche** relative all'invecchiamento della popolazione, all'aumento della popolazione inattiva e all'incremento del lavoro a distanza accelerato dalla pandemia;
- c) **l'evoluzione delle tendenze agglomerative**, insediative e di organizzazione delle città e dei centri produttivi (la popolazione che vivrà nei centri urbani rispetto alla popolazione totale crescerà dal 54% di oggi al 68% nel 2050).

Le dinamiche tecnologiche possono favorire la resilienza del Paese e contribuire al processo di riduzione delle emissioni di gas-serra, se accompagnate da politiche volte ad allineare le opportunità economiche con la minimizzazione dell'impatto ambientale. Il digitale, ad esempio, può facilitare la riduzione di una buona parte delle emissioni complessive. Tendenze demografiche e agglomerative rendono invece il paese più vulnerabile e aumentano quindi le dimensioni e il valore dei danni da cambiamenti climatici attesi nei prossimi decenni, rendendo più rilevante e urgente una strategia di adattamento, resilienza e mitigazione.

Quel che è certo che senza questa visione d'insieme dell'evoluzione futura dell'assetto socio-economico dell'Italia - contenuta già nel Capitolo 2 di questo Rapporto - una valutazione degli impatti dei cambiamenti climatici rischierebbe di essere fuorviante. Questo è un errore spesso compiuto in molte analisi, anche recenti, dove gli impatti futuri dei cambiamenti climatici vengono valutati sull'Italia (o sull'Europa o sul mondo) come è oggi, non come probabilmente sarà quando questi impatti arriveranno tra dieci o trent'anni.

Questo Rapporto adotta un approccio olistico o sistemico anche da un altro punto di vista. Non è pensabile di ridisegnare il futuro delle infrastrutture e della mobilità del Paese senza tener conto delle conseguenze che questo ha su un ampio spettro di infrastrutture ad esse collegate, *in primis* quelle energetiche. Una decarbonizzazione del nostro sistema di mobilità, per esempio, passa necessariamente attraverso un fortissimo sviluppo della mobilità elettrica, che non è ottenibile senza un conseguente, parallelo, aumento della capacità di erogazione di energia elettrica con fonti rinnovabili. Ecco quindi, ma questo è solo un esempio, che il rapporto di concentra non solo sulle infrastrutture per la mobilità di persone e merci, ma anche sulle infrastrutture per la produzione e distribuzione di elettricità. Viceversa, la resilienza delle infrastrutture elettriche è fondamentale per la resilienza di quelle per la mobilità, soprattutto in un futuro in cui elettrico e digitale saranno dominanti. I danni che i cambiamenti climatici potrebbero avere sulla distribuzione di energia elettrica avrebbero infatti enormi effetti anche sulla mobilità, per cui l'analisi delle politiche di adattamento deve considerare in modo integrato, sistemico, queste infrastrutture. Lo stesso si dica per le infrastrutture di stoccaggio dell'energia o per le risorse idriche o per le reti di telecomunicazione. Ed infatti i vari capitoli del rapporto - in particolare il Capitolo 5 dedicato all'adattamento ed il Capitolo 6 dedicato alla decarbonizzazione - coprono tutti questi aspetti.

Ne consegue che il Rapporto è caratterizzato da una visione sistemica, che va al di là delle competenze di un singolo Ministero, e che coinvolge quindi tutte le infrastrutture, e tutte le ripercussioni sociali ed economiche di una loro evoluzione, poco importa che siano causate dai cambiamenti climatici stessi o dalle ripercussioni indirette di questi cambiamenti, o dalle politiche messe in campo per affrontarli.

Come già detto, l'obiettivo non è soltanto far fronte agli importanti effetti dei cambiamenti climatici sul nostro Paese, soprattutto sulle sue regioni meridionali. L'obiettivo più ampio è utilizzare investimenti, incentivi, standard e norme per guidare il Paese verso uno sviluppo più competitivo, sostenibile e meno diseguale, affrontando allo stesso tempo, grazie alle risorse messe in campo, le sfide del cambiamento climatico e quelle della globalizzazione e della trasformazione (digitale, demografica, ecc.) dell'economia italiana. Il Rapporto cercherà quindi di fornire, in ogni capitolo, sia informazioni di tipo ambientale, sia di tipo tecnologico, sia economiche e sociali, con una valutazione dell'impatto dei cambiamenti climatici e delle misure per affrontarli lungo tutte queste direttrici.

Il disegno e la realizzazione della strategia delineata in questo Rapporto riconosce inoltre che la progettazione e la gestione delle infrastrutture sono temi di natura complessivamente socio-tecnica e che gli impatti che hanno in termini di riduzione delle disuguaglianze e di

giustizia sociale possono generare molteplici dividendi (in aggiunta a quelli ambientali ed economici). Una strategia per le infrastrutture e la mobilità sostenibili dovrà quindi essere incentrata sui bisogni sociali ed economici dei cittadini. Gli interventi programmati dovranno tenere in considerazione il profondo dualismo regionale che caratterizza il Paese. Non solo risvolti ed impatti sulle disparità regionali dovranno essere oggetto di costante valutazione e monitoraggio: anche gli aspetti di disuguaglianza e polarizzazione intra-regionale dovranno essere attentamente valutati.

In sintesi: da un punto di vista metodologico, il Rapporto adotta un **approccio dinamico**, che tiene conto non solo delle trasformazioni tecnologiche, energetiche ed ambientali legate ai climatici, ma anche delle trasformazioni demografiche, economiche, sociali, digitali già in corso. Il Rapporto adotta un **approccio sistemico**, in quanto si concentra non solo sulle infrastrutture per la mobilità di persone e merci, ma anche sulle infrastrutture ad esse collegate: energetiche, idriche, digitali, logistiche, ecc. Ed infine adotta un **approccio integrato**, in cui l'analisi dei temi ambientali e tecnologici è collegata ad una valutazione delle loro ripercussioni sociali ed economiche.

Nel disegnare l'evoluzione dell'Italia nei prossimi 30 anni - evoluzione pensata soprattutto per prevenire un'eccessiva accentuazione dei cambiamenti climatici e dei loro impatti su scala nazionale e globale - il Rapporto si concentra su due scenari climatici. Lo **scenario obiettivo**, su cui si è impegnata anche l'Italia, che mira a mantenere l'incremento di temperatura sotto i 2 gradi rispetto ai livelli pre-industriali (lo scenario RCP (*Representative Concentration Pathway*) 2.6 nel linguaggio dell'IPCC - l'Intergovernmental Panel on Climate Change - per conseguire il quale serve in Europa una riduzione delle emissioni di gas-serra del 55% nel 2030, rispetto al 1990, e il raggiungimento delle zero emissioni nette nel 2050) e lo **scenario tendenziale**, coerente con le misure di policy già in atto, in grado di mantenere l'incremento della temperatura media globale poco sotto i 3 gradi (lo scenario RCP 4.5 dell'IPCC). Per il passaggio dallo scenario tendenziale allo scenario obiettivo sono necessarie misure e politiche di mitigazione, mentre misure di adattamento dovranno far fronte ai danni climatici che non potranno essere evitati. Infatti, anche nello scenario RCP 2.6, comunque caratterizzato da temperature medie più elevate rispetto ad oggi, sarà necessario far fronte al danno residuale generato dai cambiamenti climatici.

In più semplici parole, il Rapporto adotta una posizione "ottimista" o "non catastrofista" nella scelta dello scenario tendenziale, assumendo che tutti gli impegni presi alla COP 21 di Parigi (gli NDCs - *Nationally Determined Commitments*) saranno implementati. È invece "pessimista" o "realista" rispetto allo scenario obiettivo, poiché assume che contenere la temperatura entro 1,5 gradi rispetto ai livelli industriali sia oramai molto difficile e costoso e che sia invece più realistico rimanere a fine secolo entro un aumento di 1,8-2 gradi. Di conseguenza, il delta di emissioni da ridurre (il delta tra lo scenario tendenziale e lo scenario obiettivo) è più piccolo che non se si fosse ipotizzato lo scenario tendenziale a 4 gradi (RCP 7.0) e lo scenario l'obiettivo a 1,5 gradi (RCP 1.9). Essendo la quantità di emissioni da ridurre minore, i costi della transizione sono minori.

Va sottolineato come anche il delta in termini di danni da cambiamenti climatici stimati al 2030 e al 2050 sia minore, perché i vari scenari si differenziano molto dal 2050 in poi, quando gli impatti dei cambiamenti climatici diventeranno molto più rilevanti. Di conseguenza, sono meno evidenti i benefici economici delle politiche di mitigazione che verranno proposte, perché molti dei loro effetti e benefici, qualora fossero effettivamente adottate, si dispiegheranno dopo il 2050.

Un' ultima nota importante rispetto alle politiche. Come detto, le misure di adattamento e mitigazione analizzate e discusse nel Rapporto si inseriscono all'interno di quanto previsto dalla EU Climate Law e dal pacchetto Fit for 55 (in corso di negoziazione), che tra l'altro prevede la creazione di un mercato ETS parallelo per i combustibili per gli edifici e i mezzi di trasporto, e l'estensione del meccanismo ETS a aviazione e trasporto marittimo, garantendo che le risorse generate dalla vendita dei permessi di emissione siano effettivamente destinate a misure di adattamento, mitigazione e ricerca e sviluppo, oltre che a sostenere una **giusta transizione** (ad esempio, prevedendo misure compensative per le famiglie più penalizzate dall'incremento dei prezzi dell'energia o sostegno ai lavoratori che devono essere impiegati in nuovi settori). Il Rapporto delinea quindi azioni, misure, norme e politiche che dovrebbero consentire all'Italia di fare un grande passo avanti, vista la rilevanza in termini di emissioni del settore dei trasporti, verso gli obiettivi definiti dall' EU Climate Law. Per quanto riguarda invece l'adattamento di infrastrutture e trasporti al cambiamento climatico, le politiche sono coerenti con le indicazioni contenute nella EU Adaptation Strategy e allineate alla tassonomia indicata nell'Adaptation Support Tool della Commissione Europea.

Il Rapporto è organizzato in 7 capitoli. Oltre a questo capitolo di introduzione, il capitolo 2 introduce i concetti di infrastrutture e mobilità - mettendone in risalto i legami con l'economia e la sua crescita - discute i presupposti e le implicazioni socio-economiche associati a diverse politiche e strategie per le infrastrutture e la mobilità. Il capitolo espone dunque le basi concettuali ed empiriche per l'analisi e le proposte orientate alla mitigazione e all'adattamento al cambiamento climatico sviluppate nei capitoli successivi, raccordando politiche ed interventi per le infrastrutture e la mobilità sostenibili con altre aree di politica pubblica quali lo sviluppo economico, l'inclusione e l'innovazione. Il Capitolo 2 presenta inoltre le più recenti linee strategiche che emergono dal Piano Nazionale Ripresa e Resilienza come punto di partenza per ulteriori raccomandazioni di politica pubblica orientate allo sviluppo sostenibile ed inclusivo.

Il Capitolo 3 entra nel cuore del problema oggetto di questo Rapporto ed analizza gli effetti del cambiamento climatico attesi sul territorio italiano e sui principali elementi del sistema socio-economico nazionale. In particolare, vengono descritti i principali impatti attesi per effetto del verificarsi di *hazards* climatici (ovvero sorgenti di pericolo che, in questo contesto, sono da riferirsi ad eventi fisici associati al clima o a trend o ai loro impatti fisici), soffermando l'attenzione dapprima sugli effetti del cambiamento climatico sul regime termo-pluviometrico su scala stagionale e annuale, e successivamente analizzandone le conseguenze sul territorio per una serie di essi (e.g., ondate di calore, ondate di freddo, siccità, incendi, tempeste di vento, allagamenti, esondazioni fluviali, inondazioni costiere, frane o erosione del suolo). Le

tendenze messe in evidenza saranno utili a fornire indicazioni generali sull'incremento, sul decremento o sulla stazionarietà dei pericoli climatici (e di loro particolari caratteristiche quali intensità, persistenza e frequenza), e, di conseguenza, sui relativi effetti in termini di danni e rischi sulle infrastrutture di interesse.

Gli impatti dei cambiamenti climatici diretti ed indiretti sulle infrastrutture e la mobilità sono oggetto del Capitolo 4, che descrive i meccanismi di impatto generati da eventi climatici estremi, quali ondate di calore e freddo, siccità, incendi, esondazioni fluviali e inondazioni costiere, e tempeste di vento, con riferimento a differenti tipologie di infrastrutture critiche di trasporto, energia, informazione e comunicazione, logistica, distribuzione e gestione idrica e dei rifiuti. L'analisi si basa su una revisione esaustiva della letteratura scientifica relativa all'argomento. Utilizzando simulazioni condotte in precedenti studi ed esperimenti modellistici dedicati, vengono quantificati i possibili impatti economici diretti e indiretti sulle infrastrutture critiche del Paese conseguenti alle variazioni in frequenza e intensità degli eventi climatici estremi attese nei prossimi decenni, in accordo con uno scenario tendenziale di emissione di gas serra che, come detto, prevede un aumento della temperatura media globale di ~3°C entro la fine del secolo rispetto al 1990.

Il capitolo 4 evidenzia come, in generale, l'intero Paese sarà soggetto ad un sostanziale aumento degli impatti climatici, tuttavia la loro distribuzione non sarà omogenea sul territorio. In termini assoluti, i valori di rischio climatico saranno maggiori nelle regioni del Nord Italia e del versante tirrenico, caratterizzate da una più densa dotazione infrastrutturale potenzialmente esposta ai futuri eventi climatici estremi. Tuttavia, in termini relativi, l'aumento del rischio climatico appare più marcato nelle regioni del Sud Italia, in seguito a variazioni più pronunciate in queste zone degli eventi climatici estremi direttamente dipendenti da temperatura e precipitazione.

Il Capitolo 5 analizza come sia possibile gestire in modo ottimale le infrastrutture esistenti per renderle più resilienti ai cambiamenti climatici, alla luce delle proiezioni climatiche presentate nel Capitolo 3, e quali strategie di adattamento possano essere messe in campo tenendo conto degli impatti evidenziati nel Capitolo 4. L'obiettivo è non solo identificare le soluzioni tecnologiche o gestionali, ma anche delineare gli investimenti e le misure necessarie ed evidenziare i benefici sociali ed economici che essi possono portare. Tutto ciò è sviluppato partendo da quanto prospettato dalla EU Adaptation Strategy.

Proprio alla luce del fatto che il nostro Paese si muove in questo ambito - e coerentemente con gli obiettivi della EU Climate Law - il capitolo affronta il tema della resilienza in un'ottica di "*climate proofing*" delle diverse infrastrutture e vede l'adattamento al cambiamento climatico come "*transformative resilience*". Ciò al fine di inquadrare gli sforzi di adattamento come incipit di opere più significative e di possibile discontinuità rispetto allo *status quo*, a loro volta in stretta relazione con le attività di mitigazione, piuttosto che ipotizzare "micro-adattamenti" specifici che faticerebbero a integrarsi con la visione imposta dagli scenari europei.

Le diverse infrastrutture vengono considerate come interagenti e connesse, non solo per via della potenziale condivisione degli eventi climatici avversi, ma anche in vista degli impatti che su esse hanno le modifiche ai modelli di mobilità e dei requisiti che sulla loro interazione pongono i meccanismi necessari ad attuare le strategie di resilienza e adattamento (si pensi ad esempio all'impatto che le necessità di monitoraggio continuo delle infrastrutture terrestri impone su quelle informatiche e digitali).

Il capitolo 6 discute gli interventi relativi a infrastrutture e trasporti necessari a raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione del sistema Italia. Come prima sottolineato, in Italia, nel 2019, la categoria dei trasporti è stata responsabile del 25,2% delle emissioni complessive di gas serra nazionali, corrispondenti al 31,4% delle emissioni del settore dell'energia. Le emissioni dovute ai trasporti in Italia sono più del triplo di quelle dell'intero settore industriale, più di tre volte e mezzo rispetto a quelle dell'agricoltura e quasi sei volte più di quelle prodotte dai rifiuti. È quindi evidente che la decarbonizzazione del settore dei trasporti sia una priorità, sia nel breve che nel medio periodo. Nel Capitolo 6 gli interventi di decarbonizzazione del settore dei trasporti - e delle infrastrutture ad esso collegate - sono pertanto discussi in funzione della prossimità temporale in cui verosimilmente possono essere realizzati e possono produrre effetti.

Nella Fase I (o di breve termine) rientrano gli interventi necessari per raggiungere entro il 2030 l'obiettivo di riduzione delle emissioni attribuito al nostro Paese dal pacchetto Fitfor55, che per quanto riguarda i trasporti comporta una riduzione del 43,7% rispetto al 2005 (ovvero una riduzione tra il 30 e il 35% rispetto al periodo pre-Covid, che corrisponde alla rimozione dal sistema della mobilità di circa 10-12 Mtep di carburanti). Si tratta prevalentemente o di interventi già in fase di applicazione che richiedono potenziamento o interventi a cui si associa una migliore conoscenza delle caratteristiche di diverse tecnologie. Nella Fase II (o di medio termine) rientrano invece interventi che sono prioritari, ma le cui tempistiche sono da definire, in quanto ancora in fase di studio o la cui applicabilità dipende dallo sviluppo di nuove tecnologie. L'obiettivo di questi interventi è la riduzione, entro il 2050, delle emissioni di almeno il 90% rispetto al 1990 e quant'altro in più necessario per raggiungere complessivamente come Paese l'obiettivo di zero emissioni nette al 2050.

Gli interventi discussi nel Capitolo 6 riguardano prevalentemente il sistema di trasporto di persone e merci, ma sono discussi anche interventi di mitigazione per le emissioni legate alle reti di telecomunicazione, le reti idriche e opere idrauliche, alla progettazione e realizzazione delle infrastrutture di trasporto e a supporto della mobilità, oltre che interventi per lo sviluppo di infrastrutture per la produzione di energia a zero emissioni. Il Capitolo 6 include anche un'analisi delle implicazioni economiche della transizione climatica.

Il Capitolo 7 si occupa di identificare misure politiche, legali, sociali, gestionali e finanziarie, utili alla *governance* del processo di transizione ecologica e ad aumentare la consapevolezza sui problemi legati al cambiamento climatico nel settore del trasporto e delle mobilità sostenibili nelle diverse fasi di transizione. In particolare, nel capitolo sono descritte le modalità di intervento più idonee per favorire concretamente l'introduzione delle misure delineate nei capitoli precedenti, adattandole al sistema giuridico, istituzionale e di mercato italiano, sulla base delle linee guida e normative europee, con l'obiettivo di favorire una

transizione ordinata e giusta e garantire una coerenza di fondo, e quindi una sinergia, tra gli strumenti che si adottano.

Vengono, ad esempio, esaminati strumenti per favorire la riduzione dell'uso dei mezzi privati in seguito all'aumento dell'offerta di trasporto pubblico e allo sviluppo di forme di mobilità condivisa che non comporta soltanto il rinnovo delle flotte, ma anche l'introduzione di nuovi tipi di veicoli, il miglioramento dell'offerta complessiva di servizi e delle reti, un profondo cambio di mentalità sull'uso dell'auto e nuove forme di concepire la vita sociale.

Le politiche e gli incentivi per una mobilità sostenibile riguardano il trasporto delle persone e delle merci e sono orientate a modificare le modalità con cui la domanda utilizza i sistemi di trasporto con riferimento alle politiche di utilizzo del suolo, alle politiche economiche, amministrative e finanziarie distinguendo *strumenti onerosi* (road pricing, tariffazione della sosta, tasse sul possesso e l'acquisto dei veicoli) e *misure di carattere economico* (abbonamenti sovvenzionati, incentivi all'utilizzo di trasporto ad elevato coefficiente di occupazione, sovvenzioni al *car pooling* o all'uso di minibus, rimborsi sulla sosta e incentivi economici indiretti), ma anche campagne informative sui vantaggi della mobilità sostenibile.

Fanno da cornice l'analisi di standard e norme per la trasparenza in ambito climatico che sono già in uso presso grandi organizzazioni e che in alcuni casi stanno divenendo cogenti anche per aziende medie (ad esempio grazie alle recenti proposte della Banca Centrale Europea sui rischi bancari che includeranno anche quelli climatici). Tali logiche da estendersi anche ad enti, organizzazioni e aziende di minore dimensione ed enti pubblici, secondo principi di progressività e di materialità, hanno la finalità di innescare meccanismi incentivanti di carattere reputazionale, tanto nel settore privato quanto nel pubblico. L'integrazione nei vari processi decisionali e gestionali, di aziende ed enti, del clima, del rischio e delle opportunità da esso derivanti è condizione indispensabile per avviare percorsi virtuosi di riduzione delle emissioni, con potenziali benefici a tutti i livelli (strategici, manageriali e operativi).

A conclusione di questa breve presentazione dei contenuti del Rapporto, e rinviando alla lettura dei singoli capitoli per dati, analisi e proposte di dettaglio, credo sia importante evidenziare una raccomandazione frutto dell'esperienza molto positiva di questi mesi di lavoro della Commissione. Perché le analisi e le indicazioni contenute nel Rapporto divengano realmente efficaci, sarebbe molto importante che non fossero l'oggetto di un approfondimento *una tantum* da parte di una commissione di esperti esterna al Ministero. Una base dati adeguata e delle conseguenti analisi in tempo continuo, alla luce delle continue modifiche e trasformazioni in campo tecnologico, politico, economico ecc., costituirebbero un supporto essenziale al processo decisionale del Ministero delle Infrastrutture e Mobilità Sostenibili, così come di tutti i Ministeri. Le decisioni inerenti investimenti e strategie infrastrutturali conseguenti ai cambiamenti climatici dovrebbero quindi essere supportate da competenze e conoscenze adeguate da mettere a supporto dei decisori di politica pubblica, che possano elaborare le proprie proposte sulla base sia di dati raccolti in modo diretto, strutturato e ripetibile, anche attraverso apposite indagini, sia di studi di scenario da utilizzare nell'ambito di rigorose analisi costi-benefici. Il modello più rilevante in questo senso è quello della 'UK National Infrastructure Commission'. Tale Commissione si occupa in modo unitario, permanente ed indipendente della materia con un team permanente di ricercatori e

Commissari nominati su orizzonte quinquennale che si avvale di un centro studi e di una infrastruttura di raccolta dati.

Come detto all'inizio, questo Rapporto è il frutto del lavoro della Commissione "Cambiamenti Climatici, Infrastrutture e Mobilità Sostenibili" istituita con decreto del Ministro delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili del 7/4/2021, n. 131. Alla scrittura del Rapporto hanno partecipato non solo i membri della Commissione, ma anche molti altri colleghi il cui contributo è stato determinante per dare profondità e precisione alle analisi che verranno illustrate nei capitoli che seguiranno. A tutti sono grato per l'elevata qualità del lavoro svolto. E sono particolarmente grato al Ministro Giovannini - che ha ideato e dato il via a questo progetto - per la visione che ha trasmesso ed il continuo supporto nelle varie fasi della sua realizzazione. Ringrazio inoltre: Antonio Accetturo, Stefano Alvisi, Marta Arbinolo, Giuliana Barbato, Alessandra Bianchi, Francesco Bosello, Ilaria Bosticchi, Roberto Buizza, Giuseppe Cantisani, Andrea Castelletti, Pierpaolo Cazzola, Elisabetta Cherchi, Davide Ciferri, Andrea Cominola, Maria Vittoria Corazza, Laura Cozzi, Riccardo Crescenzi, Pietro Croce, Gino D'Ovidio, Shouro Dasgupta, Guido De Blasio, Paolo De Girolamo, Paola Di Mascio, Marianna Duca, Marta Ellena, Alessandra Ferone, Paolo Formichi, Giovanni Forzieri, Claudio Gandolfi, Patrizia Giangualano, Filippo Landi, Elisa Lanzi, Chiara Liti, Giuseppe Loprencipe, Luca Lotti, Paola Mercogliano, Alberto Montanari, Matteo Muratori, Roberta Padulano, Ivana Paniccia, Ramiro Parrado, Isabella Pecorini, Marco Percoco, Fabio Ricci Feliziani, Stefano Soriani, Gabriele Standardi, Mara Tanelli, Massimo Tavoni, Andrea Tilche, Massimo Tornatore, Enrico Zio. Sono tutti i colleghi che hanno dedicato le loro competenze alla scrittura, revisione e approfondimento dei vari capitoli e sezioni del Rapporto. Un grazie particolare a Davide Ciferri, ai coordinatori dei capitoli del Rapporto - Riccardo Crescenzi, Paola Mercogliano, Giovanni Forzieri, Mara Tanelli, Elisabetta Cherchi e Patrizia Giangualano - e ad Alessandra Santini che ne ha curato la segreteria tecnica.

Capitolo 2

Infrastrutture, economia e società in Italia

Autori

Coordinamento

R. Crescenzi

Mobilità sostenibile e accessibilità

A. Accetturo, I. Bosticchi, P. Cazzola, E. Cherchi, R. Crescenzi, G. de Blasio, M. Percoco

La situazione delle infrastrutture e della mobilità in Italia

Bosticchi, P. Cazzola, G. De Blasio, I. Paniccia, M. Percoco

Linee Evolutive

A. Accetturo, E. Cherchi, I. Paniccia, M. Tanelli

Dalla diagnosi alla cura

E. Cherchi, D. Ciferri, R. Crescenzi, M. Tanelli

Sintesi

Il Capitolo 2 si pone l'obiettivo di introdurre i concetti di infrastrutture e mobilità - mettendone in risalto i legami con l'economia e la sua crescita - e di discutere i presupposti e le implicazioni socio-economiche associati a diverse politiche e strategie per le infrastrutture e la mobilità. Il capitolo espone dunque le basi concettuali ed empiriche per l'analisi e le proposte orientate alla mitigazione e all'adattamento al cambiamento climatico sviluppate nei capitoli successivi, raccordando politiche ed interventi per le infrastrutture e la mobilità sostenibili con altre aree di politica pubblica quali lo sviluppo economico, l'inclusione e l'innovazione.

Il termine infrastrutture è usato per definire il sistema di opere pubbliche, tra cui strade, linee di servizio ed edifici pubblici di un paese, stato o regione (OECD, 2002). Nel settore dei trasporti le infrastrutture riguardano il complesso di opere che consentono i movimenti di passeggeri e merci. Il concetto di mobilità si riferisce alla "facilità" di realizzare gli spostamenti fisici, ed è quindi un concetto strettamente legato alla qualità (disponibilità, frequenza, velocità, comfort ecc.) dei modi di trasporto (autovetture private, trasporto pubblico, ciclabilità, pedonalità ecc.). Tuttavia, l'attenzione dovrebbe essere posta sul concetto di accessibilità, e per estensione di accessibilità sostenibile, che si riferisce alla "facilità" di raggiungere il luogo dove realizzare attività (definite anche "opportunità) necessarie/desiderate. L'accessibilità dipende dai livelli di mobilità, dalla disponibilità e qualità dei sistemi di trasporto, dalla loro connettività, oltre che dall'organizzazione dell'uso del suolo e dalla pianificazione urbana e disegno urbano.

I trasporti e le infrastrutture ad essi associate influenzano l'estensione e l'intensità delle interazioni tra individui e imprese. Se da un lato sistemi di trasporto efficienti garantiscono l'approvvigionamento di merci, la vendita di prodotti o la possibilità di viaggiare, dall'altro espongono le comunità a rischi di carattere economico, militare e, da sempre, sanitario.

Esiste una correlazione positiva tra accessibilità e produttività delle imprese, in particolar modo per le imprese che usufruiscono in maniera significativa di servizi di trasporto. Tuttavia a seguito di interventi di politica pubblica possono esserci, da un punto di vista territoriale, vincitori e vinti. Questo implica che non necessariamente l'espansione di capitale pubblico infrastrutturale nelle aree meno avanzate comporta una riduzione delle disparità spaziali, almeno in termini economici.

A livello urbano, gli incrementi di accessibilità e l'espansione dell'offerta di servizi di trasporto modificano i flussi di pendolarismo allargando di fatto la dimensione spaziale dei mercati locali del lavoro. Tuttavia, a questo si accompagna un processo di auto-selezione (sorting) per cui alcune categorie di lavoratori, tipicamente quelli più produttivi, si concentrano nei centri urbani con migliore accessibilità alle spese dei

lavoratori con produttività (e salari) meno elevati che sono spinti da prezzi sempre più elevati verso le aree periferiche.

Qualsiasi tentativo di definire una strategia per trasporti e mobilità deve prendere in considerazione l'insieme di condizioni che regolano la relazione tra accessibilità e dinamiche di crescita economica. Una vasta gamma di forze esercita un'influenza su come la performance economica può reagire a cambiamenti di accessibilità. Esse includono capitale umano, innovazione e fattori di governance e istituzionali che determinano il potenziale di qualsiasi territorio di trarre beneficio da cambiamenti nell'accessibilità che vanno quindi considerati in una prospettiva sistemica ed integrata.

Il contesto istituzionale locale in cui vengono effettuati influenza la portata e la natura dei nuovi investimenti infrastrutturali (e le opere complementari) e, di conseguenza, i loro rendimenti economici. Istituzioni di bassa qualità offrono opportunità per l'estrazione di rendite private, minando l'offerta di beni pubblici. In condizioni di scarsa qualità del governo, nuovi investimenti in infrastrutture possono rispondere maggiormente a interessi politici e individuali piuttosto che a giustificazioni economiche e di benessere collettivo. Queste evidenze suggeriscono che una strategia infrastrutturale e per la mobilità sostenibile del nostro Paese non può prescindere dal prendere in considerazione la qualità della governance locale che può influire drammaticamente sia sui tempi di realizzazione dei progetti (soprattutto quelli con una particolare attenzione alle transizioni ecologica e digitale) che sulla qualità dei progetti selezionati. Un forte antidoto per questo tipo di effetti è costituito da rigorose azioni di valutazione ex-ante, ex-post ed in-itinere che devono diventare parte integrante di un sistema di governance degli interventi su più livelli.

L'Italia presenta, in termini quantitativi, una dotazione infrastrutturale al di sotto di quella dei principali paesi europei ad essa paragonabili per dimensioni fisiche del territorio (Germania, Spagna, Francia, UK), sia per quanto riguarda le autostrade, sia per le ferrovie. Comparabile con gli altri paesi è invece la dotazione di aeroporti. Gran parte del divario tra l'Italia e gli altri paesi è ascrivibile al forte ritardo infrastrutturale delle regioni meridionali. La scelta di colmare questo ritardo attraverso una strategia di infrastrutture e mobilità sostenibili può costituire l'opportunità di realizzare infrastrutture resilienti ed in grado di contribuire alla riduzione delle emissioni di gas serra del Paese.

La globalizzazione e la frammentazione dei processi produttivi hanno coinvolto l'Italia al pari di altre economie europee. È possibile immaginare due possibili scenari, non mutualmente esclusivi, per il coinvolgimento del nostro Paese nelle catene globali del valore:

- Ulteriore aumento del peso dell'Asia e, in particolare, della Cina con lo spostamento ulteriore del baricentro dei flussi di commercio internazionale e investimenti esteri verso i paesi asiatici.

- Fenomeni di re-shoring e incremento della regionalizzazione delle catene produttive mondiali.

In entrambi i casi, anche qualora i due scenari dovessero verificarsi contemporaneamente, è plausibile che la geografia del commercio internazionale dell'Italia cambi in modo marginale almeno nel prossimo decennio. Il nostro Paese è inserito in catene produttive fondamentalmente Europee ed è integrato nella catene globali del valore per lo più attraverso la Germania che rappresenta il maggiore canale di accesso ai mercati internazionali più distanti. Un ulteriore spostamento dell'asse economico verso l'Asia avrebbe come effetto principale un incremento dei traffici commerciali verso la Germania. Il re-shoring accentuerebbe il carattere puramente regionale della partecipazione italiana alle Catene Globali del Valore. In sintesi, accessibilità e collegamenti infrastrutturali verso il Nord Europa resterebbero comunque più importanti rispetto a infrastrutture di lungo raggio.

Alle dinamiche relative al posizionamento del nostro Paese nelle Catene Globali del Valore si aggiungono ulteriori elementi di cambiamento interno che incidono sulla domanda di accessibilità e sui suoi impatti socio-economici. In particolare la definizione di una strategia per la mobilità sostenibile dovrebbe tenere conto di: a) dinamiche tecnologiche, con particolare riferimento all'applicazione delle tecnologie digitali e ai loro impatti sull'organizzazione sociale, delle attività lavorative e produttive (con particolare riferimento al lavoro a distanza) e sul conseguente impatto territoriale; b) dinamiche demografiche relative all'invecchiamento della popolazione, all'aumento della popolazione inattiva e all'incremento del lavoro a distanza accelerato dalla pandemia; c) evoluzione delle tendenze agglomerative, insediative e di organizzazione delle città e dei centri produttivi (la popolazione che vivrà nei centri urbani rispetto alla popolazione totale crescerà dal 54% di oggi al 68% nel 2050); d) nuove disuguaglianze ed inclusioni con particolare riferimento al divario di genere, al divario digitale, al mix culturale sempre più complesso e all'invecchiamento della popolazione.

Il punto di partenza per affrontare questi nodi è costituito dalle scelte programmatiche espresse nel Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) che definisce gli obiettivi prioritari del nostro Paese per l'utilizzo delle ingenti risorse del programma comunitario Next Generation EU (NGEU). La selezione degli investimenti da inserire nel PNRR è stata caratterizzata, sia a livello generale sia settoriale, da uno spazio di possibili opzioni delimitato dalle condizionalità espresse dalla Commissione Europea per l'accesso alle risorse.

Complessivamente circa il 60% degli investimenti di competenza del MIMS è destinato ad interventi di riqualificazione, potenziamento ed efficientamento della rete ferroviaria nazionale, regionale e urbana. Secondo elaborazioni RFI, al 2030, con l'entrata in esercizio di tutti gli interventi inclusi nel PNRR, dovrebbe produrre si stima un incremento di utilizzo del trasporto ferroviario del 66% a discapito del trasporto privato, che vedrà ridurre la propria quota modale del 6%.

Tenendo conto del complesso degli investimenti previsti nel quadro della politica nazionale dei trasporti oltre il PNRR, si osserva un tentativo di riduzione generalizzata dei tempi medi di viaggio ferroviario su tutto il territorio nazionale con un incremento di accessibilità più marcato nelle aree economicamente più deboli.

L'estensione e lo sviluppo degli interventi sinora programmati in linea con le raccomandazioni presentate in questo Rapporto dovrebbe riconoscere la natura socio-tecnica del progetto e della concezione di politiche per le infrastrutture e la mobilità sostenibili. Dovrebbe inoltre riconciliare ed integrare le strategie nazionali per economia, società ed ambiente, mettendo al centro il benessere dei cittadini in modo inclusivo e sostenibile.

Concetti, teorie ed evidenze di frontiera devono guidare ed informare l'azione pubblica. È inoltre necessaria la definizione di un momento di natura tecnica, che elabori sui dati e sull'evidenza disponibile circa gli effetti sia socio-economici che ambientali degli interventi, non solo attraverso Analisi Costi-Benefici ma anche rigorose valutazioni ex-ante ed ex-post, restringendo la discrezionalità delle decisioni politiche e limitando le distorsioni che riducono il benessere collettivo.

Le decisioni inerenti investimenti e strategie infrastrutturali devono essere supportate da competenze e conoscenze adeguate da mettere a supporto del decisore di politica pubblica sul modello della 'UK National Infrastructure Commission'. È inoltre necessario affrontare in modo radicale, con risorse idonee ed una prospettiva di lungo periodo il problema della scarsa competenza tecnica delle amministrazioni centrali, regionali e locali preposti alla progettazione e attuazione degli interventi sul campo.

Le azioni e gli investimenti per colmare il gap infrastrutturale tra il nostro Paese e le altre principali economie UE devono essere basati su scelte strategiche che riflettano in modo chiaro le priorità del Paese e dell'UE. Questo implica la crescita e il consolidamento di alcune specifiche infrastrutture (per esempio ben selezionati hub portuali).

Gli interventi programmati dovranno tenere in considerazione il profondo dualismo regionale che caratterizza il Paese. Non solo risvolti ed impatti sulle disparità regionali dovranno essere oggetto di costante valutazione e monitoraggio. Anche gli aspetti di disuguaglianza e polarizzazione intra-regionale dovranno essere attentamente valutati.

Sommario

Introduzione	7
2.1 Mobilità sostenibile e accessibilità	8
2.1.1 Infrastrutture, accessibilità e crescita economica	10
2.1.2 Political economy delle infrastrutture, qualità istituzionale e altre politiche pubbliche	13
2.1.2.1 <i>Gli incentivi dei decisori pubblici</i>	13
2.1.2.2 <i>La qualità delle istituzioni locali</i>	14
2.2 La situazione delle infrastrutture e della mobilità in Italia	15
2.2.1 Infrastruttura logistica	15
2.2.1.1 <i>Attori economici e valore del sistema logistico</i>	16
2.2.1.2 <i>La qualità del sistema infrastrutturale</i>	18
2.2.2 Mobilità di merci: la competitività sui mercati internazionali, divari territoriali e filiere produttive nazionali	21
2.2.3 Mobilità (privata, collettiva e pubblica) di persone	26
2.3 Le linee evolutive	29
2.3.1 Cambiamenti nella geografia economica del trasporto merci internazionale	30
2.3.2 Cambiamenti domanda di mobilità di passeggeri	31
2.3.4 Cambiamenti nell'offerta - Conseguenze su scelte di policy	33
2.3.5 Cambiamenti tendenze agglomerative, insediative, organizzazione delle città, urbanistica	34
2.3.6 Inclusione e nuove disuguaglianze	35
2.4 Dalla diagnosi alla cura	41
Bibliografia	49

Introduzione

Il termine infrastrutture è usato per definire il sistema di opere pubbliche, tra cui strade, linee di servizio ed edifici pubblici di un paese, stato o regione (OECD, 2002). Nel settore dei trasporti le infrastrutture riguardano il complesso di opere che consentono i movimenti di passeggeri e merci. È possibile distinguere infrastrutture di rete (strade, ferrovie, etc.) e puntuali (stazioni ferroviarie, porti, aeroporti). Sono infrastrutture anche le reti per il trasporto dei materiali energetici (oleodotti, gasdotti, elettrodotti), le reti di comunicazione (telefonica, televisiva, radiofonica, Internet), le reti di distribuzione e raccolta idrica (ad es. acquedotti e fognature).

Esiste un'associazione positiva tra infrastrutture e sviluppo socio-economico: nazioni e regioni ricche sono tipicamente caratterizzate da un'ampia dotazione infrastrutturale di elevata qualità. Come sarà discusso nel seguito di questo capitolo, il ruolo chiave è rappresentato dal concetto di accessibilità, che dipende dalla dotazione di infrastrutture fisiche ma anche dai servizi di trasporto che utilizzano tali infrastrutture.

La sostenibilità nel sistema dei trasporti richiede l'uso di materiali e processi capaci di abbattere le emissioni di inquinanti (inclusi ma non limitati ai gas climalteranti), ottimizzare l'uso di risorse non rinnovabili o integrabili in un contesto di economia circolare e rispondere ad altre sfide socio-economiche in modo tale da facilitare il raggiungimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile e inclusivo (SDGs) definiti dalle Nazioni Unite. Questo riguarda diverse parti del sistema, compresa la costruzione delle infrastrutture, la manifattura dei veicoli, la produzione e l'uso di energia che essi necessitano per permettere al sistema di fornire i servizi per cui è concepito. In particolare, si fa riferimento agli impatti relativi alle emissioni dirette, a quelle legate alla produzione di energia e a quelle associate all'uso di energia per gli attori economici che partecipano al sistema¹. Il termine "sostenibile" viene anche usato con riferimento al concetto di mobilità. Da questo punto di vista, infrastrutture per la mobilità sostenibile garantiscono un ridotto impatto sull'ambiente, ma anche servizi disponibili a tutti e rispettosi delle necessità delle generazioni future. Secondo l'Agenda ONU 2030 e gli obiettivi di G7 e G20, un sistema infrastrutturale sostenibile dovrebbe rispettare le caratteristiche individuali, migliorare la vita delle comunità sia in termini economici sia sociali e valorizzare i paesaggi interessati.

Questo capitolo si pone due obiettivi. Il primo è quello di **introdurre i concetti di infrastrutture e mobilità**, mettendone in risalto i legami con l'economia e la sua crescita. Il secondo è quello di discutere **i presupposti e le implicazioni socio-economiche associati a diverse politiche e strategie per le infrastrutture e la mobilità**. Il capitolo espone dunque le basi concettuali ed empiriche per l'analisi e le proposte orientate alla mitigazione e all'adattamento al cambiamento climatico sviluppate nei capitoli successivi, raccordando politiche ed interventi per le

¹ Si vedano ad esempio i criteri usati per il Greenhouse Gas Protocol (GHG): <https://ghgprotocol.org/>

infrastrutture e la mobilità sostenibili con altre aree di politica pubblica quali lo sviluppo economico, l'inclusione e l'innovazione.

Questo capitolo è strutturato in quattro sezioni principali. La prima sezione include alcune definizioni chiave utili per l'intero Rapporto ed illustra alcuni nessi significativi tra infrastrutture ed effetti socio-economici con particolare riferimento alla mobilità. La seconda sezione offre una panoramica dell'attuale situazione delle infrastrutture e della mobilità in Italia. La terza sezione discute le linee evolutive utili alla definizione di scenari per i capitoli seguenti. Infine, la quarta sezione conclude presentando le più recenti linee strategiche che emergono dal Piano Nazionale Ripresa e Resilienza come punto di partenza per ulteriori raccomandazioni di politica pubblica orientate allo sviluppo sostenibile ed inclusivo.

2.1 Mobilità sostenibile e accessibilità

Il tema della mobilità sostenibile rappresenta uno degli argomenti più dibattuti nell'ambito delle politiche ambientali locali, nazionali e internazionali volte a ridurre l'impatto ambientale derivante dalla mobilità delle persone e delle merci. La mobilità sostenibile, nella definizione riportata nella strategia europea approvata nel 2006 dal Consiglio Europeo, ha l'obiettivo di garantire che i sistemi di trasporto corrispondano ai bisogni economici, sociali e ambientali della società, minimizzando contemporaneamente le ripercussioni negative sull'economia, la società e l'ambiente.

Il concetto di **mobilità** si riferisce alla "facilità" di realizzare gli spostamenti fisici, ed è quindi un concetto strettamente legato alla qualità (disponibilità, frequenza, velocità, comfort ecc.) dei modi di trasporto (autovetture private, trasporto pubblico, ciclabilità, pedonalità ecc.). Secondo numerosi studi (Handy, 2021; Litman, 2021), tuttavia, l'attenzione dovrebbe essere posta sul concetto di accessibilità, e per estensione possiamo dire di accessibilità sostenibile, che si riferisce alla "facilità" di raggiungere il luogo dove realizzare attività (definite anche "opportunità) necessarie/desiderate.

Una delle definizioni di **accessibilità** più accreditate è quella di Hansen (1959) "*potential of opportunities for interactions*". Altre definizioni più recenti sono per esempio "la facilità con cui alcune attività possono essere raggiunte da un luogo di riferimento con un particolare sistema di trasporto" oppure "i benefici forniti da un sistema combinato di trasporto e uso del suolo" (Ben-Akiva & Lerman, 1979) e tante altre. L'accessibilità dipende dai livelli di mobilità, dalla disponibilità e qualità dei sistemi di trasporto, e loro connettività (quali per esempio la qualità delle connessioni tra sistemi di trasporto), ma anche dall'organizzazione dell'uso del suolo (disponibilità di destinazioni e loro attrattività) e dalla pianificazione urbana e disegno urbano (prossimità delle funzioni). Infine, il concetto di accessibilità fa anche riferimento al grado di inclusione che i sistemi di mobilità offrono, ovvero al loro essere utilizzabili e fruibili indipendentemente dalle caratteristiche socio-economiche degli utenti stessi.

I concetti di mobilità e accessibilità sono spesso usati in modo equivalente, ma hanno significato e conseguenze differenti. Una buona mobilità contribuisce a una buona accessibilità, ma una buona mobilità non è l'unico modo per garantire una buona accessibilità. La costruzione di nuove strade, per esempio, migliora la mobilità (anche se non necessariamente quella sostenibile) ma produce spesso effetti secondari che possono vanificarne gli effetti positivi iniziali di un aumento dell'accessibilità (come inquinamento locale, rumore e relativi effetti negativi sulla salute, effetti di segregazione di zone urbane ed incrementi di traffico in termini generali, incluso sulla rete viaria limitrofa). La differenza tra mobilità e accessibilità è ancora più marcata a livello urbano. Una buona accessibilità, per esempio, è spesso garantita in città compatte (dove le destinazioni sono a distanza pedonale o ciclabile). In questo caso l'accessibilità è garantita o ottenuta dalla prossimità delle attività piuttosto che dalla mobilità, e distanze brevi favoriscono la mobilità sostenibile.

Altri fattori sono importanti nel concetto di accessibilità: "affordability", che si riferisce al costo monetario di raggiungere le varie destinazioni in rapporto al reddito delle varie categorie sociali ed è legato al concetto di inclusione sociale a cui si accennerà di seguito; "convenienza", che si riferisce alla facilità di ottenere informazioni di viaggio, pagare i biglietti, trasportare valigie; e "accettabilità sociale" che si riferisce al fatto che la possibilità o la disponibilità ad usare un mezzo di trasporto non dipendano dallo stato sociale e dalla associazione tra mezzi di trasporto e stato sociale degli utenti (Litman, 2021).

Le tradizionali misure di prestazione dei sistemi di mobilità, quali per esempio il livello di servizio, sono intrinseche al processo di pianificazione dei trasporti e questo rende difficile spostare l'attenzione dal concetto di mobilità al concetto di accessibilità. Inoltre, non esiste una definizione univoca di accessibilità e misurare operativamente l'accessibilità è molto più complicato.

Le misure di accessibilità basate sulle infrastrutture analizzano il livello di servizio delle infrastrutture (Geurs & van Wee, 2004; Martens & Golub, 2012). Le misure basate sul tempo (quali Balancing Time, Gravity-based, Opportunità cumulate) invece fanno riferimento alle opportunità che sono raggiungibili in un certo periodo di tempo (Geurs & van Wee, 2004). Alcune misure di accessibilità sono basate sul concetto di utilità o livello di soddisfazione che l'utente riceve dal raggiungere la destinazione dove realizzare le attività necessarie desiderate (Ben-Akiva & Lerman, 1985). Altre misure si basano sul concetto spazio-temporale di accessibilità (Kwan, 1998; Martens & Golub, 2012).

Non ci sono misure corrette e sbagliate, dipende dall'obiettivo dell'analisi. È importante avere misure standard per l'accessibilità per assicurare la confrontabilità di diverse soluzioni. Le misure di accessibilità adottate influenzano il risultato delle politiche di trasporto, soprattutto se si considerano gli effetti ambientali (sostenibilità ambientale) e quelli distributivi (per esempio l'inclusione sociale, ovvero garantire a tutte le categorie

sociali la possibilità di partecipare alle attività a disposizione della società e gli impatti territoriali differenziati). L'efficacia delle politiche di trasporto dipende dalla coerenza tra le misure di accessibilità adottate e gli obiettivi politici (Boisjoly & El-Geneidy, 2016; Martens, 2017).

2.1.1 Infrastrutture, accessibilità e crescita economica

I trasporti e le infrastrutture ad essi associate influenzano l'estensione e l'intensità delle interazioni tra individui e imprese. Se da un lato sistemi di trasporto efficienti garantiscono l'approvvigionamento di merci, la vendita di prodotti o la possibilità di viaggiare, dall'altro espongono le comunità a rischi di carattere economico, militare e, da sempre, sanitario.

Sulle interazioni tra il sistema dei trasporti e i sistemi economici, è possibile considerare tre fatti stilizzati (Redding e Turner, 2015).

Fatto 1: La lunga ondata di globalizzazione commerciale che stiamo vivendo è stata innescata proprio da un'innovazione trasportistica tanto semplice, quanto dirompente: l'introduzione e la diffusione del container. Evidenze empiriche e aneddotiche indicano chiaramente come la standardizzazione del carico nei trasporti marittimi abbia comportato una caduta verticale dei costi di trasporto su scala globale, oltre che un abbattimento dei tempi di movimentazione delle merci (Rodrigue et al., 2017).

Fatto 2: L'incremento significativo del traffico aereo, l'estensione delle autostrade e, a livello intra urbano, la diffusione dei servizi pubblici di trasporto rapido di massa (le metropolitane in primis) sono state associate ad un'accresciuta mobilità delle persone. Il terziario a più alto valore aggiunto si avvantaggia oggi di interazioni alimentate da una maggiore facilità di movimento internazionale dei lavoratori, in parte dovuta alla liberalizzazione nel settore aereo che ne ha abbattuto significativamente le tariffe (Bowen e Rodrigue, 2017). La maggiore capillarità ed efficienza del trasporto pubblico come pure l'aumento della capacità delle autostrade ha allargato i confini dei mercati locali del lavoro, aumentando i flussi di pendolarismo attorno ai grandi agglomerati urbani.

Fatto 3: Se quelli descritti al Fatto 1 e al Fatto 2 sono gli effetti, in gran parte apparentemente positivi, dei sistemi di trasporto, è ora necessario richiamare come questi impongano alla collettività costi sociali, chiamati costi esterni, che minano la desiderabilità assoluta di progetti e politiche nel settore. Questo significa che la valutazione degli interventi è soggetta al trade-off tra i benefici socio-economici che derivano da interventi puntuali e costi che molto spesso sono di natura ambientale.

Le principali fonti di **costi esterni nel settore dei trasporti** sono: cambiamento climatico, inquinamento atmosferico locale (legato a ossidi di azoto, monossido di carbonio, particolato, composti organici volatili), inquinamento acustico, incidentalità, parte dei costi di approvvigionamento del carburante (come quelli legati alla sicurezza energetica, visto che altre componenti - come veicoli ed infrastrutture di trasporto,

estrazione, conversione - sono generalmente inclusi nella formazione dei prezzi al consumo), costi per il paesaggio ed infine la congestione. Secondo recenti stime, **i costi esterni della mobilità ammonterebbero a oltre 800 milioni di euro all'anno** (European Commission, 2019a).

Date queste premesse, è ora possibile affrontare in maggior dettaglio le interazioni tra trasporti e sistema economico, partendo dal presupposto che due sono i "momenti" che li caratterizzano: il *momento infrastrutturale* e il *momento del servizio*.

Per quanto riguarda il ***momento infrastrutturale***, va considerato come questo corrisponda alla fase di investimento e che, in quest'alveo, sia la costruzione dell'infrastruttura a generare un eventuale impatto sui territori. Da questo punto di vista, la tipologia di impatto, nelle sue componenti diretta, indiretta e indotta, è da riferirsi all'eventuale espansione della domanda aggregata e dai costi che si sostengono con il bilancio pubblico.

Per quanto riguarda invece il ***momento del servizio***, l'accresciuta accessibilità influenza (almeno in principio) i costi di interazione nello spazio per merci e persone, alterando dunque produttività e salari. È questo pure il momento che definisce in massima parte i rendimenti economici di un progetto infrastrutturale.

Le conseguenze della modifica dei costi di trasporto e dell'accessibilità dei territori possono essere così sintetizzate.

- a) Esisterebbe una **correlazione positiva tra accessibilità e produttività delle imprese**, in particolar modo per le imprese che usufruiscono in maniera significativa di servizi di trasporto. È necessario, però, operare alcune specificazioni al riguardo. Infatti, è stato dimostrato come territori e imprese che non abbiano ancora raggiunto un adeguato livello di competitività possano essere danneggiate dalla concorrenza di mercati più produttivi.
- b) L'effetto netto degli incrementi di produttività non è necessariamente un gioco a somma positiva. In altri termini, a seguito di interventi di politica pubblica possono esserci, da un punto di vista territoriale, vincitori e vinti. Questo implica che non necessariamente l'espansione di capitale pubblico infrastrutturale nelle aree meno avanzate comporta una riduzione delle disparità spaziali, almeno in termini economici.
- c) A livello urbano, gli incrementi di accessibilità e l'espansione dell'offerta di servizi di trasporto modificano i flussi di pendolarismo allargando di fatto la dimensione spaziale dei mercati locali del lavoro. A questi effetti potrebbe accompagnarsi un incremento dei salari dovuto all'aumento di produttività grazie alle economie di agglomerazione. Tuttavia, a questo si accompagna un processo di auto-selezione (*sorting*) per cui alcune categorie di lavoratori, tipicamente quelli più produttivi, si concentrano nei centri urbani con migliore accessibilità alle spese dei lavoratori con produttività (e

salari) meno elevati che sono spinti da prezzi sempre più elevati verso le aree periferiche.

- d) Un effetto collaterale dell'accresciuta importanza degli agglomerati urbani nelle economie moderne è stata sicuramente la congestione. Nel discorso pubblico è sempre alta la tentazione di gestire questa esternalità incrementando la capacità delle infrastrutture, ma è stato chiaramente dimostrato come l'espansione della capacità non risolva problemi di congestione nel lungo periodo (Litman, 2021).

Da quanto discusso in precedenza emerge che **una politica relativa alla mobilità e alle infrastrutture di trasporto debba tenere conto di una serie di trade-off la cui gestione implica a sua volta una chiara visione di politica economica**. Ci si riferisce qui sia al trade-off tra sviluppo economico e ambiente, con la relativa necessità di decarbonizzazione della mobilità, sia ai trade-off insiti nella tipologia di sviluppo economico che si intende imprimere ai territori, ovvero alla scelta del bilanciamento tra efficienza ed equità sociale e spaziale.

Un chiaro esempio delle difficoltà insite nella gestione di questi trade-off è fornito dalla politica delle infrastrutture di trasporto dell'Unione Europea: il mutamento nell'accessibilità indotto dallo sviluppo del TEN-T ha ampliato (piuttosto che ridurre) le disparità regionali all'interno dell'Unione per una serie di motivazioni che comprendono:

- a) fornire alle regioni centrali e periferiche un analogo grado di accessibilità può danneggiare le imprese nelle regioni in ritardo, a meno che non siano sviluppati al contempo altri vantaggi per tali zone (Puga, 2002);
- b) il problema delle regioni periferiche sembra da ricercarsi più nell'assenza di adeguati network intra-regionali per la dispersione del traffico intorno ai centri maggiori e l'allargamento del mercato locale che in una connettività interregionale sostenuta dai progetti TEN-T (Martin e Rogers 1995; Vickerman 1995).

Qualsiasi tentativo di valutare il pieno impatto della dotazione e del nuovo investimento in infrastrutture deve prendere in considerazione l'insieme di condizioni che regolano la relazione tra accessibilità e dinamiche di crescita economica regionale (Crescenzi & Rodriguez-Pose 2011). Una vasta gamma di forze esercita un'influenza su come la performance economica può reagire a cambiamenti di accessibilità. Esse includono capitale umano, innovazione e fattori di governance e istituzionali che determinano il potenziale di qualsiasi territorio di trarre beneficio da cambiamenti nell'accessibilità che vanno quindi considerati in una prospettiva sistemica ed integrata (Crescenzi, 2005; Crescenzi e Rodriguez-Pose 2012).

La crescita economica è un processo multiforme, influenzato non solo dalla dotazione infrastrutturale e dai cambiamenti di accessibilità, ma anche dal processo di

cambiamento tecnologico e di innovazione, dalla dotazione di capitale umano, dalla specializzazione della forza lavoro, dai flussi di mobilità e migrazione interregionale ed internazionale così come dalla connessione con flussi globali d'investimento e catene del valore (Cheshire & Magrini, 2002).

Mentre alcuni fattori economici (ad esempio il capitale e la tecnologia) sono più capaci di adattarsi in risposta alle sfide esterne – come per esempio le transizioni ecologica e digitale – in virtù della loro mobilità relativamente più elevata, le strutture sociali ed istituzionali tendono ad essere molto meno adattabili. Conseguentemente, specifiche condizioni socio-istituzionali a livello locale saranno associate con diversi livelli di performance economica. Solamente prestando attenzione alla complessa relazione nel tempo e nello spazio dei fattori che influenzano la crescita economica a livello locale sarà possibile massimizzare gli effetti positivi di una maggiore accessibilità e connettività di tutte le regioni, minimizzando nel contempo i rischi economici e di welfare per le regioni più deboli, spesso impreparate a competere in risposta a nuove sfide e in mercati più integrati.

2.1.2 Political economy delle infrastrutture, qualità istituzionale e altre politiche pubbliche

2.1.2.1 Gli incentivi dei decisori pubblici

Gli investimenti di tipo infrastrutturale vengono spesso decisi sulla base di processi di *political economy*, che hanno la stessa importanza di quelli che riguardano la definizione del *livello socialmente ottimale* delle infrastrutture per un'economia. Bisogna infatti chiedersi se i governi, almeno quelli democraticamente eletti, siano in grado di garantire un livello socialmente ottimale di infrastrutture, oppure se gli incentivi di tipo elettorale faranno sì che quel livello venga sistematicamente sorpassato (*overinvestment*) o invece non raggiunto (*underinvestment*).

Per valutare questi aspetti, è bene fare riferimento ad alcune possibili distorsioni del processo decisionale del settore pubblico.

In primo luogo, alcuni elettori potrebbero beneficiare in maniera molto accentuata di una certa infrastruttura. Si pensi ad esempio agli elettori di un'area remota che viene collegata attraverso un'autostrada oppure una linea ferroviaria con il centro economico di un paese. A questi benefici potrebbero corrispondere dei costi relativi al finanziamento dell'infrastruttura limitati, se, come accade spesso, essi vengono distribuiti tra i residenti del paese intero. In questo caso avremmo una tendenza all'*overinvestment*.

In realtà, modalità di finanziamento differenti potrebbero condurre ad una distorsione di tipo opposto: se il finanziamento fosse a carico dei soli residenti locali, allora potrebbe prevalere una tendenza all'*underinvestment*, perché questi non terrebbero in

considerazione le eventuali esternalità positive delle nuove modalità di trasporto per i residenti delle altre zone del paese.

Un altro aspetto riguarda i meccanismi conosciuti come NIMBY (Not In My Back Yard): le infrastrutture di trasporto producono *disamenities*, come ad esempio rumore e inquinamento. Il valore attribuito a queste *disamenities* è chiaramente molto più elevato per coloro che risiedono nelle vicinanze dell'infrastruttura, rispetto a coloro che semplicemente la utilizzano risiedendo altrove. Inoltre, l'importanza attribuita alle *disamenities* cresce tipicamente con il livello di reddito e di scolarizzazione dei residenti. I meccanismi di tipo NIMBY concorrono tipicamente a determinare un investimento inferiore a quello ottimale.

L'evidenza empirica mostra che le considerazioni di *political economy* sono molto rilevanti per spiegare la localizzazione delle infrastrutture di trasporto (es. Knight, 2005; Glaeser & Ponzetto, 2018). L'Italia è un paese dove, per via delle caratteristiche del sistema politico, gli aspetti relativi agli incentivi elettorali hanno avuto un ruolo molto rilevante per la localizzazione del network dei collegamenti (Golden & Picci 2008; Barone et al. 2020) e i meccanismi di *political economy* che hanno caratterizzato in maniera pregnante l'esperienza politica della Prima Repubblica hanno ancora un ruolo importante per gli anni più recenti (Carozzi & Repetto, 2016).

L'Italia ha già in passato dato prova di essere particolarmente esposta alle distorsioni dovute alle necessità di tipo elettorale. Da queste considerazioni discende la necessità di assicurare un momento di natura tecnica, che elabori sull'evidenza disponibile circa gli effetti socioeconomici e ambientali delle infrastrutture (si veda ad esempio Borsati & Percoco, 2021) che possa restringere la discrezionalità delle decisioni politiche e limitarne le distorsioni che riducono il benessere collettivo.

2.1.2.2 La qualità delle istituzioni locali

Regioni e comuni svolgono un ruolo decisivo sia nella selezione sia nella realizzazione di specifici progetti. Il contesto istituzionale locale in cui vengono effettuati influenza la portata e la natura dei nuovi investimenti infrastrutturali (e le opere complementari) e, di conseguenza, i loro rendimenti economici. Istituzioni di bassa qualità offrono opportunità per l'estrazione di rendite private, minando l'offerta di beni pubblici (Acemoglu & Dell, 2010). In condizioni di scarsa qualità del governo, nuovi investimenti in infrastrutture di trasporto possono rispondere maggiormente a interessi politici e individuali piuttosto che a giustificazioni economiche e di benessere collettivo (Crain & Oakley, 1995; Henisz, 2002).

Una scarsa qualità istituzionale è spesso associata alla propensione a finanziare progetti ad alta visibilità e di larga scala (ad es. autostrade, ferrovia ad alta velocità), a scapito di meno vistosi investimenti di trasporto "ordinari" (cioè strade secondarie, ferrovie merci etc.) che sono spesso più complessi da pianificare e selezionare. Istituzioni di scarsa qualità possono anche offrire spazi maggiori ai gruppi di pressione aziendali, con conseguente problemi quali collusione in fase di gara, falsa rappresentazione di costi e

benefici, e del tempo necessario per l'attuazione (World Bank, 2011). Sono invece le opere 'minori' e quelle legate alla eliminazione di specifici colli di bottiglia che – anche attraverso la riduzione della congestione locale – sono associate ad effetti positivi sulla crescita economica in particolare nelle aree a più alta qualità istituzionale ed amministrativa (Crescenzi, Di Cataldo e Rodriguez-Pose, 2016).

Queste evidenze suggeriscono che una strategia infrastrutturale e per la mobilità sostenibile del nostro Paese **non può prescindere dal prendere in considerazione la qualità della governance locale** che può influire drammaticamente sia sui tempi di realizzazione dei progetti (soprattutto quelli con una particolare attenzione alle transizioni ecologica e digitale) che sulla qualità dei progetti selezionati (Crescenzi, Giua, Sonzognò, 2021). La strategia deve prevedere, allo stesso tempo, idonei meccanismi per limitare le distorsioni e le potenziali inefficienze indotte dai diversi gruppi di pressione a tutti i livelli.

Un forte antidoto per questo tipo di effetti è costituito da rigorose azioni di valutazione ex-ante, ex-post ed in-itinere che devono diventare parte integrante di un sistema di governance degli interventi su più livelli. In questo senso il U.S. Transportation Research Board ha offerto importanti indicazioni su come istituire e gestire efficaci agenzie per il monitoraggio e la valutazione degli investimenti nelle infrastrutture per la mobilità che devono ricevere chiare indicazioni su come distinguere ed identificare i benefici di breve, di medio e di lungo periodo di ciascun investimento. Obiettivi di breve e di medio periodo possono essere associati a regole e criteri di attuazione differenti ma la cornice di valutazione deve essere definita in modo unitario e con una prospettiva di sistema (si veda per esempio TRB,2014).

2.2 La situazione delle infrastrutture e della mobilità in Italia

2.2.1 Infrastruttura logistica

Nel 2019, più di 550 mila imprese manifatturiere, localizzate principalmente nel Nord Italia, hanno utilizzato una rete nazionale di infrastrutture logistiche che include 58 porti, 24 interporti e 44 aeroporti (in aggiunta alla rete stradale, ferroviaria ed alle reti di comunicazione e distribuzione di energia) per la produzione ed il commercio di una larga varietà di prodotti.

In Europa, **l'Italia è seconda solo ai Paesi Bassi per la movimentazione di merci via mare e seconda solo al Regno Unito per il trasporto marittimo a corto raggio** (IT&IA, 2021). I porti hanno avuto un ruolo chiave come facilitatori di commercio internazionale, movimentando quasi 500 Mt (milioni di tonnellate) di merci nel 2019, principalmente su navi che trasportano liquidi (37%, in particolare petrolio e derivati), container (23%) e traghetti (22%) (IT&IA, 2021). Trieste e Genova sono i due porti con

il maggior movimento merci. Trieste, Genova, Ravenna, Taranto, Livorno e Gioia Tauro sono tra i primi 5 porti nel Mediterraneo per movimentazione merci in diverse categorie (Tabella 1).

Graduatoria	Categorie di prodotto				
	Rinfuse liquide	Rinfuse solide	Ro-Ro	Cargo senza container	Cargo con container
1	Marsiglia (FR)	Ravenna (IT)	Livorno (IT)	Valencia (ES)	Valencia (ES)
2	Trieste (IT)	Taranto (IT)	Genova (IT)	Barcellona (ES)	Pireo (GR)
3	Algeciras (ES)	Marsiglia (FR)	Trieste (IT)	Trieste (IT)	Algeciras (ES)
4	Agii Theodori (GR)	Tarragona (ES)	Palma di Maiorca (ES)	Algeciras (ES)	Gioia Tauro (IT)
5	Cartagena (ES)	Capodistria (SI)	Pireo (GR)	Marsiglia (FR)	Barcellona (ES)

Tabella 1. Principali porti del Mediterraneo per movimentazione merci per categoria di prodotto, 2018. Fonte: IT&IA, 2021

Gli interporti hanno movimentato 65 Mt di merci nel 2019 (circa il 13% rispetto al totale dei porti). Sei interporti italiani (Verona, Parma, Bologna, Padova, Campania e Torino) sono tra i 20 più rilevanti in Europa, tenendo conto di una serie di indicatori chiave che includono posizione strategica, mobilitazione di merci, efficienza, sostenibilità e servizi disponibili (IT&IA, 2021).

Il traffico merci negli aeroporti italiani ha raggiunto più di 1 Mt nel 2019, con più della metà del totale a Milano (Malpensa, che è settimo in Europa per volumi di merci) e un ulteriore 30% tra Roma (Fiumicino) e Bergamo (Orio al Serio) (IT&IA, 2021).

Combinata con le considerazioni fatte sugli aeroporti ed i volumi di merci mobilizzati nei porti di Trieste, Genova, Ravenna e Livorno, così come la distribuzione delle attività manifatturiere in Italia, **il sistema mostra una marcata concentrazione di operatori logistici al Nord**. Questo si spiega anche con l'integrazione di alcune di queste infrastrutture nei corridoi della rete di trasporto trans-Europea (TEN-T): Trieste è lo sbocco al mare del corridoio Baltico-Adriatico, Genova marca la fine del corridoio Reno-Alpino. Entrambi sono intersezioni del Corridoio Mediterraneo, così come Verona, nel caso degli interporti, che è anche all'intersezione con il corridoio Scandinavo-Mediterraneo.

2.2.1.1 Attori economici e valore del sistema logistico

Il sistema logistico coinvolge una varietà di agenti economici che svolgono funzioni ed attività differenti a cui si associa l'utilizzo di infrastrutture con diversi livelli d'intensità.

La Tabella 2 offre una sintesi degli attori coinvolti nel sistema e delle loro funzioni principali.

Attore	Funzione
Produttori di beni	Produzione di beni che richiedono l'approvvigionamento di materie prime ed altri prodotti e necessitano la distribuzione per consumi finali
Distributori e grossisti	Distribuzione di beni al consumatore finale
Fornitori di servizi logistici	Contrattati da società che esternalizzano le proprie operazioni logistiche, agiscono in coordinamento con spedizionieri e grossisti per packaging, scelta di modi e itinerari
Spedizionieri	Organizzazione del trasporto di beni da un punto ad un altro ed il loro stoccaggio, sono clienti dei fornitori di servizi logistici
Trasportatori	Trasporto fisico di prodotti via terra, mare ed aria. Generalmente contrattati dagli spedizionieri, sono operatori di veicoli e non ne sono necessariamente proprietari
Operatori delle infrastrutture fisiche	Operatività di infrastrutture fisiche necessarie (es. porti o interporti) alle attività logistiche; negli aeroporti, società di gestione scali spesso integrano la gestione del movimento delle merci
Proprietari di veicoli e/o edifici, terreni ed altre infrastrutture fisiche	Investimenti relativi a veicoli, edifici (per esempio magazzini) ed altre infrastrutture (porti, aeroporti) necessari alla facilitazione dei flussi fisici del sistema logistico
Fornitori di servizi di informazione e comunicazione	Erogazione dei servizi necessari alla preparazione, trasmissione ed assortimento di ordini ed il loro tracciamento
Operatori delle infrastrutture di comunicazione	Operatività di infrastrutture di comunicazione necessarie ai flussi di informazione e di cassa delle attività logistiche
Proprietari di infrastrutture di comunicazione	Investimenti relativi a veicoli ed edifici necessari alla facilitazione dei flussi di informazione del sistema logistico
Banche e altri operatori finanziari	Finanziamento delle attività dei diversi attori del sistema logistico

Tabella 2. Attori coinvolti nel sistema logistico

Il sistema logistico italiano conta tra 5400 ed 8600 (in relazione alla classificazione adottata) imprese nel settore, con poco più di 300 imprese con un fatturato oltre i 10 milioni di euro ed un numero elevato di piccoli operatori (IT&IA, 2021). Questo vale

anche per i porti, un largo numero di piccoli attori specializzati in funzioni specifiche e un numero limitato di imprese di maggiori dimensioni.

Le imprese con il fatturato maggiore sono quelle che offrono servizi a più alto valore aggiunto, come quelli legati all'informatizzazione della gestione e la preparazione degli ordini, la gestione dei magazzini, la distribuzione e gestione dei ritorni, e sono complementati da altre attività come la raccolta delle merci, packaging ed altri processi intermedi. Alcuni casi riguardano società logistiche integrate (third party logistics providers, 3PL and lead providers, 4PL) che coprono tutta la catena del valore. In parte si tratta del ramo italiano di grandi multinazionali del settore (IT&IA, 2021).

Il fatturato del settore, calcolato tenendo conto della sola parte relativa ai grandi operatori, è stato di 5,7 miliardi di Euro nel 2019 (IT&IA, 2021). Questo si può contestualizzare considerando che il valore globale della logistica è stimato a più di 5.500 miliardi di Euro, di cui 1.100 miliardi in Europa (IT&IA, 2021). Il valore stimato di tutte le merci scambiate a livello globale è stimato di 16 mila miliardi di Euro (WTO, 2020).

Il fatturato derivato dalla gestione delle infrastrutture portuali nel 2019 in Italia è stimato a 1.1 miliardi di Euro, poco più del triplo dei 335 milioni per gli interporti e poco meno del doppio dei 644 milioni della gestione di merci negli aeroporti (IT&IA, 2021), che include con tutta probabilità una parte importante relativa alla gestione dei bagagli per il trasporto passeggeri.

2.2.1.2 La qualità del sistema infrastrutturale

È possibile valutare la qualità del sistema infrastrutturale e di tutti i servizi ad esso associati utilizzando il Logistics Performance Index definito dalla Banca Mondiale per aiutare i paesi a identificare i punti deboli e le opportunità delle loro prestazioni in ambito logistico e per suggerire come migliorarsi. LPI deriva dalla comparazione di 160 paesi ed è basato su un questionario somministrato agli operatori del settore (spedizione merci internazionali e corrieri espressi), ai quali è stato richiesto di fornire un feedback sulla qualità logistica dei paesi con i quali operano e commerciano. I feedback degli operatori sono integrati con dati quantitativi sulla performance dei principali componenti della catena logistica nei paesi considerati. In definitiva, il LPI si compone di misure qualitative e quantitative e aiuta a valutare lo stato del sistema logistico.

Come mostra la Figura 1, **l'Italia si posiziona in coda al ranking delle economie più avanzate per quanto attiene alla soddisfazione delle imprese rispetto al sistema logistico nazionale.** L'Italia si posiziona stabilmente in coda a tale ranking su tutte le varie dimensioni che compongono il LPI, ovvero "customs", "infrastructure", "ease of arranging", "quality of logistics services", "tracking and tracing", "timeliness". Benché il nostro Paese mostri una ridotta qualità e quantità di infrastrutture rispetto alle altre economie avanzate, esso appare comunque nel migliore quartile a livello globale (Figura 2).

Dalla Tabella 3 emerge come **l'Italia abbia, in termini quantitativi, una dotazione infrastrutturale al di sotto di altri principali paesi europei paragonabili** per dimensioni fisiche del territorio (Germania, Spagna, Francia, UK), sia per quanto riguarda le autostrade, sia per le ferrovie. Pare invece adeguata la dotazione di aeroporti, se rapportata ai medesimi paesi. La Tabella 2 mostra inoltre, facendo ricorso a numeri indice di dotazione infrastrutturale, come **gran parte del divario tra l'Italia e gli altri paesi sia dovuto al forte ritardo infrastrutturale delle regioni meridionali**.

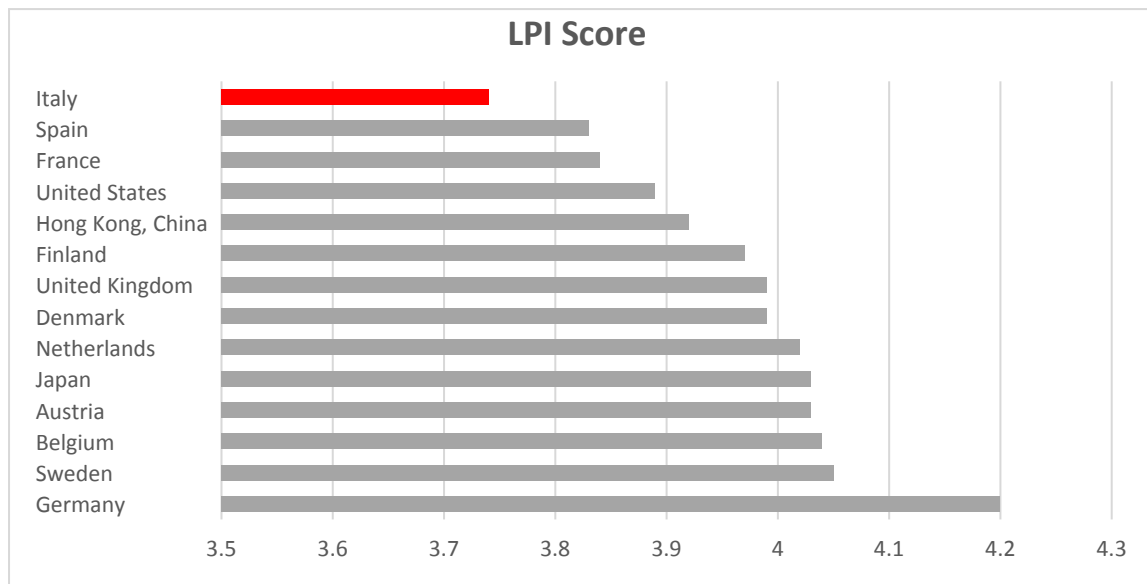


Figura 1: LPI 2019 su un campione di paesi

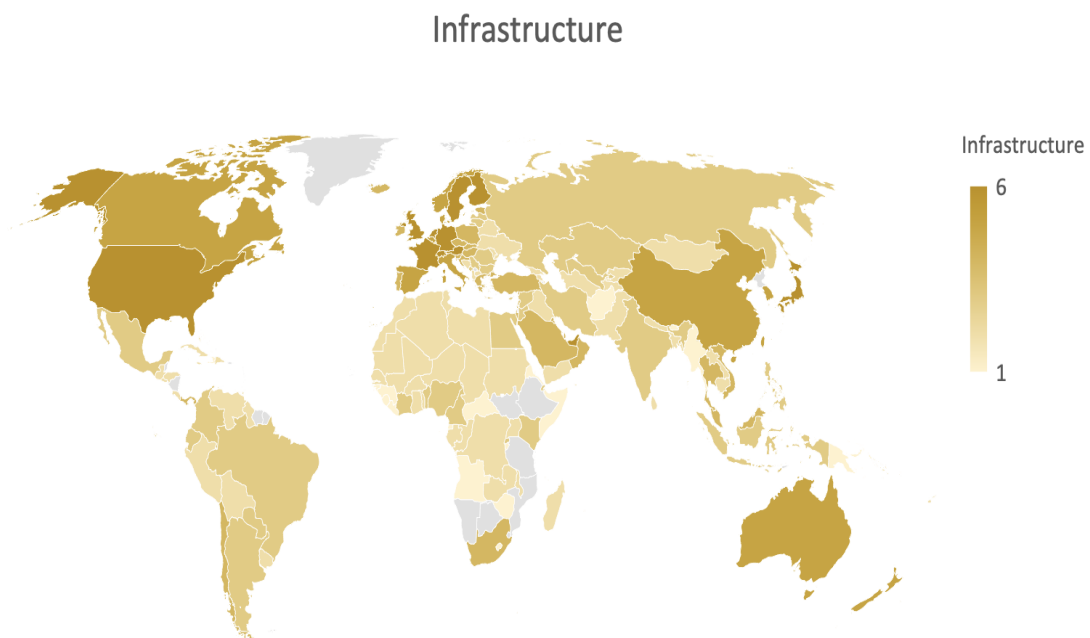


Figura 2: Dimensione "Infrastructure" del LPI

Paese	Aeroporti (N.)	Autostrade (km)	Ferrovie (km)
Germania	40	13.183	67.400
Spagna	39	15.585	21.988
Francia	62	11.671	27.483
Italia	46	6.966	24.500
Portogallo	20	3.065	3.224
Finlandia	21	926	8.552
Svezia	38	2.133	15.542
Norvegia	43	1.008	4.180
UK	48	3.838	31.780

Tabella 3: Dotazione infrastrutturale dell'Italia e di altri paesi europei Fonte: Eurostat

	Strade	Ferrovie	Aeroporti		Porti	
			Merci	Pass.	Merci	Pass.
Piemonte	111,5	144,0	194,4	130,2	116,0	84,6
Valle d'Aosta	111,6	55,5	167,0	108,5	89,2	64,2
Lombardia	100,5	101,4	202,4	145,5	119,1	84,1
Trentino-Alto Adige	97,8	57,0	132,0	106,9	94,7	63,5
Veneto	107,9	123,4	157,0	136,2	130,7	84,1
Friuli-V.G.	116,2	144,7	120,3	108,2	128,8	67,4
Liguria	106,5	133,9	155,0	120,1	135,9	108,5
Emilia-Romagna	107,8	116,4	166,9	147,1	141,6	106,4
Toscana	103,0	112,1	134,7	137,8	137,9	133,1
Umbria	102,3	93,6	117,8	135,0	116,1	124,0
Marche	109,4	88,8	116,6	123,8	113,1	104,4
Lazio	104,9	140,6	111,7	143,5	106,3	142,8
Abruzzo	111,1	101,4	101,8	126,9	102,8	120,1
Molise	100,3	102,4	78,6	107,7	93,1	121,9

Campania	99,7	106,6	65,7	100,0	94,6	138,7
Puglia	110,2	98,6	44,3	69,4	79,9	92,2
Basilicata	103,5	70,7	45,0	75,2	87,5	113,2
Calabria	98,6	91,9	25,6	53,1	81,3	108,9
Sicilia	85,2	76,4	8,1	35,9	59,0	101,2
Sardegna	63,5	56,1	4,3	15,5	34,1	43,5
<i>Nord</i>	<i>106,0</i>	<i>113,0</i>	<i>170,5</i>	<i>132,9</i>	<i>122,8</i>	<i>85,9</i>
<i>Centro</i>	<i>104,8</i>	<i>108,9</i>	<i>124,2</i>	<i>135,1</i>	<i>123,7</i>	<i>126,7</i>
<i>Sud e Isole</i>	<i>93,4</i>	<i>86,2</i>	<i>34,5</i>	<i>60,6</i>	<i>72,9</i>	<i>101,3</i>
Italia	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tabella 4: Indici di dotazione infrastrutturale delle regioni italiane. Fonte: Bucci, M., E. Gennari, G. Ivaldi, G. Messina, L. Moller (2021), I divari infrastrutturali in Italia: una misurazione caso per caso, Banca d'Italia, mimeo.

2.2.2 Mobilità di merci: la competitività sui mercati internazionali, divari territoriali e filiere produttive nazionali

L'economia italiana è caratterizzata da un'apertura internazionale elevata e in linea con i maggiori paesi europei. Il rapporto tra le esportazioni (di beni e servizi) e il PIL (in valore) era pari al 32% nel 2019, una percentuale simile a quella di Francia e Regno Unito e lievemente inferiore al corrispondente dato di Spagna e Germania. A partire dalla crisi economico-finanziaria del 2008-09, l'interscambio con l'estero ha fornito il principale contributo alla crescita del PIL; la competitività sui mercati internazionali resta quindi fondamentale per la crescita del prodotto italiano anche negli anni a venire.

L'interscambio commerciale dell'Italia nel 2019 in termini di volumi importati ed esportati avviene principalmente attraverso due modi di trasporto: marittimo (52% nel 2019) e stradale (27%). Il ruolo del trasporto ferroviario (12%) e aereo (0.1%) è invece nettamente più limitato. Tuttavia, in termini di valore, l'incidenza delle navi scende al 29% mentre la strada sale al 44% la ferrovia al 15% e l'aereo al 10% (Banca d'Italia, 2020) Tali modalità riflettono in misura rilevante la geografia del commercio internazionale italiano. Oltre la metà delle esportazioni ha come destinazione l'Unione Europea (UE) che viene raggiunta prevalentemente via terra; le destinazioni extra-UE – tendenzialmente più lontane e quindi più spesso raggiunte via nave – hanno progressivamente aumentato la loro incidenza negli ultimi due decenni, soprattutto a causa del forte incremento delle vendite verso l'Asia orientale e il Nord America.

I valichi alpini rappresentano i principali corridoi di transito per il commercio intra-UE. Nel 2017 circa un terzo dei transiti su gomma avvenivano attraverso il passo del Brennero; in generale, attraverso i valichi verso l'Austria (incluso il Tarvisio) passa circa la metà dei trasporti su gomma verso l'estero dell'Italia, una percentuale elevata che riflette sia il forte interscambio commerciale con la Germania sia i crescenti traffici di perfezionamento verso i Paesi dell'Europa centrale e orientale. Anche i collegamenti via terra con la Francia sono particolarmente intensi (quasi il 40% del totale), soprattutto attraverso la frontiera di Ventimiglia, il Frejus e il Monte Bianco. I trasporti verso la Svizzera hanno subito un rilevante ridimensionamento negli ultimi anni in seguito alle restrizioni che la Confederazione ha posto sul transito di merci via gomma destinate verso la Germania e il Nord Europa; verso questo Paese gli scambi, quantitativamente limitati, avvengono perlopiù via treno.

Guardando ai dati Assoport (Associazione dei Porti Italiani) sul trasporto marittimo per il 2018, dei primi 10 porti italiani per interscambio internazionale di beni (che pesano per quasi i tre quarti del totale), 6 solo localizzati al Nord (Trieste, Genova, Ravenna, Venezia, La Spezia e Savona), uno al Centro (Livorno) e tre nel Mezzogiorno (Porto Foxi, Augusta e Gioia Tauro). Attraverso i porti di Trieste e Genova passa oltre un quarto del traffico internazionale di merci via mare dell'Italia; dei tre porti dell'Italia meridionale, due (Porto Foxi e Augusta) hanno una forte specializzazione in idrocarburi in virtù della vicinanza a impianti di raffinazione; il terzo (Gioia Tauro) ha un ruolo abbastanza marginale per il complesso del Paese, pesando per circa il 4 per cento dell'interscambio nazionale. Indagini presso le imprese e gli operatori portuali indicano che l'utilizzo dei servizi portuali da parte delle imprese avviene prevalentemente per un criterio di prossimità geografica. Le imprese del Nord Ovest utilizzano soprattutto i porti liguri e, in misura minore, Livorno; quelle del Nord Est, Venezia e Trieste. Gli spostamenti verso i porti avvengono quasi esclusivamente via gomma, con un ruolo molto limitato per le ferrovie per ragioni legate ai costi (inferiori per il trasporto su gomma, in Italia, specie sulle brevi distanze) ed altri fattori, comprese limitazioni legate alle caratteristiche delle infrastrutture ferroviarie, nella misura in cui questo limita l'uso dei treni per il trasporto combinato strada-rotaia (Dionori et al., 2015).

Nel complesso la mobilità internazionale di merci dell'Italia si basa su poche direttrici che riflettono la geografia economica interna e quella del commercio internazionale. L'accesso ai mercati del Nord Europa e dell'Europa Centro Orientale si basa in misura preponderante sulla direttrice del Brennero; i trasporti in quella tratta, almeno fino all'apertura del Tunnel di Base del Brennero nel 2028, vengono effettuati perlopiù su gomma e, dovendo transitare per l'Austria, sono soggetti ai frequenti provvedimenti di chiusura per salvaguardia ambientale che sono stati adottati dal Governo austriaco nell'ultimo quinquennio. L'accesso ai mercati più distanti avviene attraverso principalmente attraverso i porti del Mar Ligure e dell'Alto Adriatico, più prossimi alle aree produttive della Valle Padana; il raggiungimento di tali porte contribuisce a congestionare la rete stradale e autostradale nel Nord Italia.

Nell'ultimo decennio sono cresciuti tutti i settori trasportistici sia in termini di traffico che di fatturato, nonostante una limitata crescita del PIL (cfr grafico seguente). Nel complesso, si è determinata una pressione sulle reti di trasporto, in particolare quelle dedicate all'import/export (valichi alpini, porti, aeroporti), non prevista sulla base degli scarsi incrementi di PIL registrati, con un concreto rischio di saturazione, e dunque di incapacità di sostenere ulteriori aumenti di traffico vitali per l'economia nazionale. Una possibile spiegazione va ricercata nell'allungamento delle catene logistiche e di trasporto conseguenti a nuovi modelli distributivi, all'e-commerce e ad una maggior penetrazione di mercato di grandi operatori di settore stranieri.

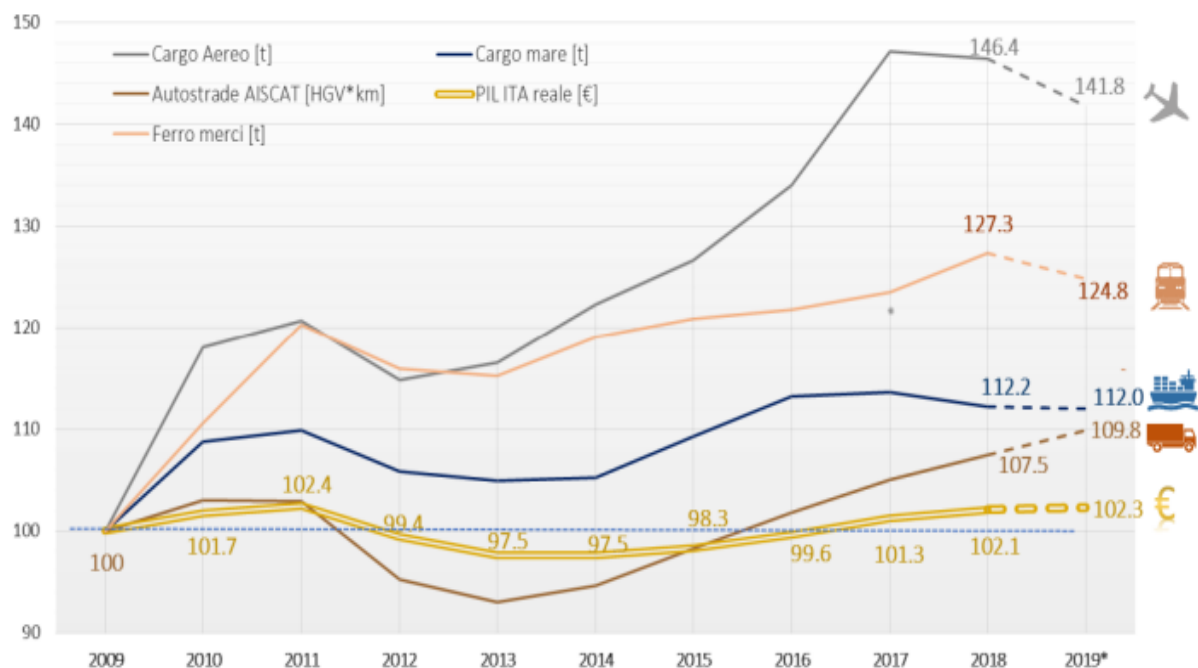


Figura 3: Crescita volumi per modo di trasporto (indice 2009 = 100). Fonte: Cascetta et al. (2020).
Elaborazione su dati ISTAT, AISCAT, Assoaeroporti, ENAC, RFI, FerCargo, Assoport, Autorità di Sistema Portuale, ANAS

BOX - Il trasporto merci su ferro in Italia

La produzione di trasporto merci su ferro negli ultimi 10 anni è aumentata, grazie anche a incentivi strutturali (ferrobonus), mentre la quota modale al 12% (anno 2017 - Conto Nazionale Trasporti) è pressoché invariata e lontana dai target europei, che si propongono di trasferire il 30% delle merci dalla strada alla ferrovia per distanze superiori a 300 chilometri entro il 2030 e il 50% entro il 2050.

Il trasporto ferroviario merci risulta competitivo su tratte superiori ai 500 km, ragione per cui il mercato di riferimento è quello europeo. La qualità dell'infrastruttura ferroviaria ha un impatto diretto sulle prestazioni e sulla competitività del trasporto ferroviario, ad esempio sulla lunghezza del modulo, sulla sagoma ammissibile e sul peso assiale dei treni, che consentono di abbattere l'incidenza dei costi fissi. Negli ultimi anni molte imprese ferroviarie merci hanno avuto risultati in perdita e la pressione della concorrenza sia intermodale che intramodale comprime i margini a tal punto da scoraggiare gli investimenti, anche su aspetti determinanti come l'innovazione.

La necessità di produrre adeguate economie di scala ha guidato un processo di concentrazione del settore (si è passati da 56 licenze nel 2008 a 23 nel 2019) con la presenza di grandi gruppi che sono spesso gli *incumbent* nazionali che operano in Italia direttamente o tramite società controllate registrate in Italia. Recentemente si sta affermando la duplice tendenza, da un lato le grandi compagnie di navigazione cargo, capaci di alimentare elevati volumi di traffico, si stanno dotando di una propria impresa ferroviaria², e dall'altro i fondi internazionali stanno investendo sull'integrazione verticale della catena logistica.

Aumento dei costi fissi. La diminuzione dei volumi trasportati aumenta l'incidenza dei costi fissi, e per limitarne l'incidenza si tenta di ridurre ulteriormente il reticolo, instaurando un circolo vizioso al ribasso, che porta a una minore capacità di soddisfare la domanda. I servizi soppressi non possono essere quasi mai ripresi, a causa dei costi di riposizionamento dei carri e della logistica del cliente, che renderebbe il prezzo non competitivo rispetto alla flessibilità del trasporto su gomma. Il trasporto ferroviario è un sistema a rete: se si riduce il numero dei punti di accesso, la prestazione del sistema diminuisce, diventa più difficile acquisire nuovi clienti e il sistema di trasporto nel complesso diventa meno attrattivo.

Reticolo³. In Italia esistono circa un centinaio di centri intermodali e quasi quattrocento scali merci, molti dei quali sottoutilizzati, con traffici concentrati sui principali (80% del traffico concentrato nel 20% degli impianti).

² Ad esempio l'impresa ferroviaria Medway è controllata da MSC, la ERS Railways è controllata dalla Maersk, la OceanRail Logistics è controllata dalla Cosco, oppure ci sono anche esempi di imprese ferroviarie controllate da operatori di Terminal marittimi come la Oceanogate controllata dalla Contship Italia.

³ Fonte: Piano commerciale RFI ed. 2020

Il **corridoio Baltico - Adriatico** è uno dei più importanti assi ferroviari con tre importanti aree logistiche su cui insistono i porti di Ravenna, Venezia (447 tr/mese) e Trieste (723 tr/mese), amministrati dalle rispettive Autorità di Sistema Portuale, nonché rilevanti impianti logistici: Padova Interporto (431 tr/mese) e Bologna Interporto (210 tr/mese).

Il **corridoio Mediterraneo** serve importanti impianti logistici ubicati nelle realtà industriali dei bacini dell'asse orizzontale del Nord Italia: Torino Orbassano (1.170 tr/mese), Milano Smistamento (1.400 tr/mese), Brescia (660 tr/mese), Verona Q.E. (1.600 tr/mese). Gode di una rete strategica perché permette l'interscambio con tutti i corridoi europei che percorrono la rete italiana. Il corridoio Mediterraneo attraversa interamente la Penisola fino ad arrivare a Palermo. I principali impianti del meridione hanno volumi più ridotti: Livorno (379 tr/mese), Maddaloni Marcianise (390 tr/mese), Bari Lamasinata (370 tr/mese) e Bicocca (190 tr/mese), nonostante la presenza di sistemi portuali potenzialmente strategici come Taranto e Gioia Tauro.

Il **corridoio Reno-Alpi** collega i più grandi porti del nord Europa alla pianura padana e al secondo porto italiano (Genova), potendo contare sul sistema dei nuovi tunnel di base appena messi in esercizio per l'attraversamento della Svizzera.

In Europa il 65% dell'intero volume di traffico merci su ferro è legato a soli cinque comparti industriali: Acciaio, Carbone, Legno e carta, Chimica, e Automotive. Si tratta di soggetti in grado di originare elevati volumi di traffico relativamente costanti, che possono essere trasportati con treni completi programmati e quindi sfruttando a pieno i vantaggi offerti dalla ferrovia.

Se in Italia il trasporto del carbone è praticamente assente già da prima della crisi, gli altri quattro comparti hanno seguito in generale la tendenza europea, che si può ricondurre a tre indirizzi:

1. diminuzione irreversibile della domanda legata a una riduzione strutturale dei consumi (per legno/carta con la diffusione della comunicazione immateriale);
2. specializzazione di prodotto e riduzione dei volumi trasportati (per la chimica, con la delocalizzazione fuori Europa delle produzioni dei materiali base);
3. delocalizzazione dei centri di produzione in unità più vicine ai mercati (per l'automotive, la creazione di centri di produzione fuori Europa da parte dei grandi produttori, che riduce i volumi dell'export attraverso i porti serviti da treni).

La localizzazione delle attività industriali è quasi sempre molto frammentata e la maggior parte della produzione è dovuta a piccole o medie imprese, che generano flussi di piccola entità ma molto frequenti, per i quali si cerca di evitare lunghi periodi di stoccaggio e si richiedono risposte immediate di avvio al trasporto, per le quali il mezzo stradale si presenta più flessibile e più immediato.

Anche l'autotrasporto in Italia è molto più frammentato che nel resto d'Europa, le

aziende iscritte all'Albo degli Autotrasportatori sono circa 150.000 e dalle statistiche emerge la forte presenza di trasportatori con un solo autocarro o piccolissime flotte. Questa situazione implica l'evidente interesse dei piccoli imprenditori a fare tutto da soli e a sfuggire a qualsiasi logica di sistema, costituendo un freno al trasporto intermodale.

2.2.3 Mobilità (privata, collettiva e pubblica) di persone

In riferimento alla mobilità di persone, il primo dato che appare importante sottolineare è quello sul tasso di motorizzazione. L'Italia, infatti, con 676 auto ogni mille abitanti, è il secondo paese in Europa per tasso di motorizzazione, dopo il Lussemburgo (fonte EUROSTAT). Il tasso di motorizzazione è ben al di sopra di 500 auto per mille abitanti in quasi tutti i paesi europei e continua a registrare un costante aumento che oscilla dal 2% al 8% a seconda dei paesi. Secondo i dati ACI, il parco autovetture è cresciuto anche nel 2020 e sfiora il 40 mln di veicoli, a fronte di meno di 100.000 autobus (in diminuzione rispetto al 2019), e di circa 7 mln di motocicli (in crescita)⁴.

In questo quadro non sorprende che l'utilizzo dell'automobile privata, con il 62% degli spostamenti totali, costituisca la modalità di spostamento più significativa nel nostro Paese. L'utilizzo dei trasporti collettivi resta a valori molto bassi e mostra nel lungo periodo un'endemica incapacità di crescere in misura apprezzabile. L'utilizzo è maggiore nei centri urbani di maggiori dimensioni, dove tuttavia l'utilizzo del mezzo privato rimane preponderante.

La ripartizione modale per gli spostamenti a breve (<10 km), media (<50 km) e lunga (>50 km) distanza può essere desunta dai dati Isfort- Osservatorio «Audimob»⁵

La Tabella 5 mostra la ripartizione modale degli spostamenti di persone con riferimento all'anno 2019 confrontato con l'anno 2008, al fine di cogliere le tendenze di lungo

⁴ Per completare il quadro degli autoveicoli circolanti, vi sono circa 7.8 mln di veicoli commerciali ed industriali sempre in crescita rispetto al 2019. Per quanto riguarda le alimentazioni, si registra un incremento particolarmente elevato dei veicoli ibridi (oltre 300%) ed in misura molto minore dei veicoli elettrici (+87%). Le quote di mercato sono comunque ancora molto basse, al 2020 i veicoli ibridi rappresentano l'1,4% degli autoveicoli circolanti in Italia, ed i veicoli elettrici lo 0,13%. Secondo l'Osservatorio della Shared Mobility, la quota di auto in sharing è attualmente molto bassa (12% al 2020), mentre risulta particolarmente elevata quella degli e-scooter (97% al 2020). Il bike sharing invece rappresenta il 30% del totale delle biciclette circolanti.

⁵ Dati basati su un'indagine campionaria annuale sulla mobilità della popolazione italiana tra 14 e 80 anni (metodo CATI e CAWI), con campione statisticamente rappresentativo (nel 2019 sono stati intervistati complessivamente 16.200 individui) con margine di errore inferiore all'1%. L'Osservatorio «Audimob» è inserito nel Piano Statistico Nazionale 2020-2022 dell'Istat.t SISTAN. Rispetto all'Indagine Multiscopo Istat sulle famiglie italiane "Aspetti della vita quotidiana", rileva anche gli spostamenti non sistematici, aspetto assai rilevante per cogliere le tendenze della mobilità in essere ed è focalizzata sul solo settore trasporti.

periodo e, comunque, precedentemente al periodo pandemico che ha profondamente alterato gli equilibri preesistenti.

Modalità	2008	2019	2019
		Totale	Di cui: Comuni oltre 250mila abitanti
Piedi	17,5	20,8	25,6
Bicicletta/micromobilità	3,6	3,3	3,1
Moto	4,5	2,6	4,6
Auto	63,9	62,5	47,7
Mezzi pubblici*	10,2	10,8	19,1
Totale	100,0	100,0	100,0

Tabella 5: Distribuzione percentuale degli spostamenti per mezzi di trasporto. Anni 2008, 2019 e 2020 Fonte, Osservatorio Audimob-Isfort, 2021.

* mezzi di trasporto collettivi, urbani (autobus urbano, metro, tram ecc.) ed extraurbani (autobus di lunga percorrenza, treno locale e di lunga percorrenza, aereo, traghetto/nave ecc.) nonché altri mezzi, anche individuali, ma a disponibilità pubblica (taxi, NCC, car sharing, piattaforme car pooling). Gli spostamenti si riferiscono sia al trasporto a compensazione economica (Tpl in generale), sia a quello interamente sul mercato (es. treni AV, segmenti del trasporto pubblico su gomma di lunga percorrenza).

Le statistiche Isfort riferite al 2019 pongono in evidenza anche una vigorosa crescita della intermobilità che negli ultimi 15 anni è triplicata, pur rappresentando tuttavia solo lo 7,2% del totale dei viaggi motorizzati. Anche se i recenti dati dell'ISFORT (2021) rilevano una "caduta verticale" al 1,7% della intermobilità. È anche da sottolineare che mentre diminuiscono gli spostamenti con trasbordo tra mezzi pubblici, tuttavia di gran lunga le prevalenti (55,2% del totale), guadagna spazio la "nicchia" rappresentata da combinazioni con l'uso della bicicletta (ormai al 10% del totale, tre volte in più rispetto a qualche anno fa).

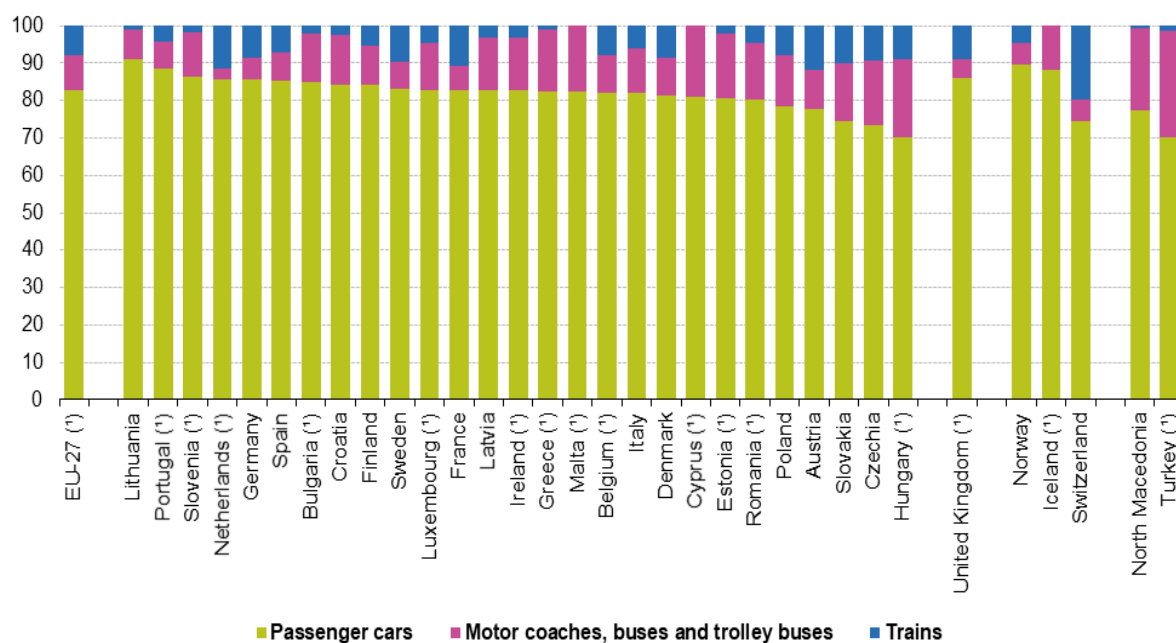
Come mostrato in Figura 4, la ripartizione modale osservata per gli spostamenti individuali in Italia riflette fondamentalmente la stessa struttura degli altri paesi dell'Unione Europea.

Sempre secondo dati ISFORT (2020 e 2021), è possibile anche osservare la distribuzione degli spostamenti per motivazione. La percentuale di spostamenti per

lavoro e studio (definiti “sistematici”) in Italia è passata dal 40% nel 2001 al 36% nel 2008, è leggermente risalita al 36.6% nel 2019 per scendere al 32% nel 2020. Per contro gli spostamenti per gestione familiare e tempo libero sono aumentati rispettivamente dal 28.7% e 31.2% nel 2001 al 34.3% e 33.9% nel 2020. La proporzione di spostamenti sistematici è leggermente superiore in ambito extraurbano (nel 2019 il 45% degli spostamenti extraurbani è stato realizzato per motivi sistematici, contro il 34% degli spostamenti in ambito urbano)⁶.

Modal split of inland passenger transport, 2017

(% share in passenger-kilometres)



Note: countries are ranked on passenger cars. Powered two-wheelers are excluded. Cyprus, Malta and Iceland: railways not applicable.

(*) Includes estimates.

Source: Eurostat (online data code: tran_hv_psmo)

eurostat

Figura 4: Distribuzione dei passeggeri/km per tipologia di mezzo impiegato motivazione, Anno 2017. Fonte: Eurostat, 2017

Occorre anche rilevare l’aumento generalizzato (fenomeno non solo italiano) degli spostamenti concatenati (*trip-chain*), che combinano spostamenti sistematici e non sistematici (circa il 50% degli spostamenti sistematici è realizzato in tour semplici casa-lavoro/studio-casa, ma il dato varia sensibilmente tra paesi, in funzione della dimensione urbana, della dotazione infrastrutturale, ecc.). Si segnala tuttavia che le statistiche disponibili in Italia non consentono di misurare tali fenomeni, una carenza

⁶ Per un raffronto a livello europeo, in Inghilterra nel 2019 la percentuale (urbana ed extraurbana) di spostamenti sistematici era il 18%, gli spostamenti per svago il 26% mentre gli spostamenti concatenati effettuati, per motivi sistematici non, erano oltre il 57% (Transport Statistics Great Britain 2020).

importante che non consente di avere una fotografia completa dello stato della mobilità nel paese.

Il sistema italiano di trasporto pubblico locale (TPL) offre servizi per oltre 2 miliardi di chilometri vettura annui, movimentando 5.4 miliardi di passeggeri l'anno. Il numero di mezzi complessivo è di oltre 49.000 unità che erogano circa 1.9 miliardi di vetture/km ed oltre 220 milioni di treni/km (11.5% del totale). In Italia il trasporto pubblico soddisfa poco più del 14.2% della domanda di mobilità, in linea con la media europea, così come evidenziato in Fig.4, ma con una percentuale relativa più importante per il trasporto su gomma.

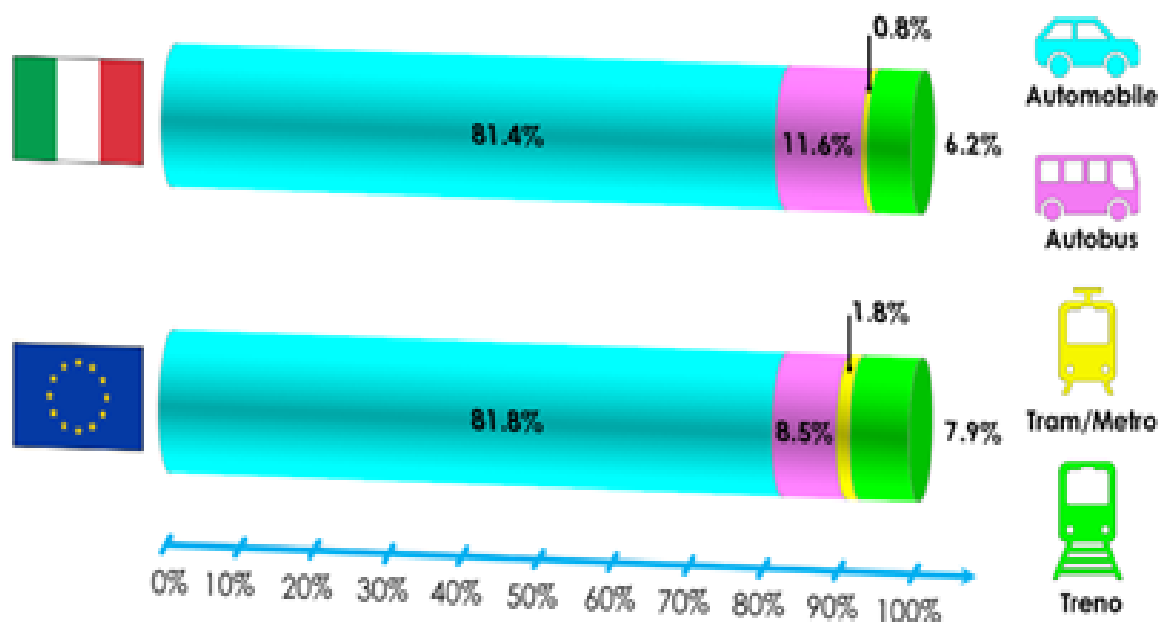


Figura 5 - Ripartizione modale del trasporto passeggeri su terra, in passeggeri/km %, 2018. Fonte: Elaborazione CIttraMS – UnivAQ su dati UE (EC, 2020a: EU transport in figures, Statistical pocketbook 2020, pp. 1-3).

2.3 Le linee evolutive

La relazione tra infrastrutture, mobilità e sviluppo economico non è statica e fissa nel tempo, ma soggetta a cambiamenti anche molto rapidi. Numerosi shock esterni la stanno influenzando. In un contesto di elevata incertezza è auspicabile una strategia di gradualità, che faccia tesoro dei risultati delle analisi di valutazione dell'impatto delle infrastrutture e della mobilità sull'economia e sul clima. È prioritario, infatti, collezionare informazioni quantitative oggettive ed affidabili che permettano di fare valutazione per orientare gli interventi del futuro anche in una dimensione di comparazione internazionale.

Le tendenze evolutive della mobilità di merci e persone sono influenzate dagli sviluppi e dalle linee tendenziali di tipo macro-economico e socio-economico del nostro Paese. Il settore trasporti e infrastrutture risente degli andamenti economico-sociali essendo peraltro la domanda di mobilità una domanda derivata, che deriva per le merci dalla domanda del bene che viene trasportato e, per le persone, dalle motivazioni di spostamento legate allo svolgimento delle attività economiche e sociali nello spazio.

Si ritiene possano incidere sugli scenari al 2030-2050 i seguenti fattori di cambiamento (o tendenze evolutive).

2.3.1 Cambiamenti nella geografia economica del trasporto merci internazionale

Come accennato in precedenza, le modalità del trasporto merci internazionale riflettono la geografia delle esportazioni italiane e la prossimità delle infrastrutture di trasporto ai principali siti produttivi del Paese. È possibile individuare **due possibili scenari evolutivi** alternativi allo status quo:

1. Ulteriore incremento del peso economico di economie geograficamente più distanti quali la Cina, l'India e altre economie dell'Asia Orientale;
2. Aumento della regionalizzazione delle catene del valore in risposta alle incertezze relative alle politiche commerciali e all'emersione dei colli di bottiglia nelle catene di fornitura a lungo raggio.

Il primo scenario presuppone una sostanziale accentuazione dei trend economici degli ultimi 20 anni che hanno visto un forte incremento dell'integrazione dell'Asia orientale nei flussi globali di commercio. In questo scenario crescerebbe il ruolo del commercio internazionale a lungo raggio e diverrebbero sempre più rilevanti le infrastrutture per raggiungerli. Il risultato immediato sarebbe quindi un incremento della domanda di servizi portuali, e un corrispondente aumento del traffico terrestre su gomma per raggiungerli. In sostanza, i porti del Nord Italia (in Liguria, Veneto e Friuli-Venezia Giulia), più prossimi ai siti produttivi, aumenterebbero i propri movimenti e le autostrade che li raggiungono incrementerebbero i propri attraversamenti.

Una parte della maggiore domanda verrebbe però anche convogliata attraverso i valichi alpini. La ricostruzione delle catene del valore internazionali ha infatti mostrato come i produttori italiani del Nord siano parte integrante delle filiere produttive tedesche che si caratterizzano per un'elevata esposizione soprattutto verso il mercato finale cinese. Un aumento della domanda da parte della Cina verrebbe quindi soddisfatta dai produttori tedeschi che a loro volta importano beni intermedi dall'Italia e si tradurrebbe in un'espansione dei traffici dei valichi alpini, soprattutto quelli verso l'Austria.

Il secondo scenario è basato su alcune recenti tendenze del commercio internazionale che hanno visto un rallentamento dei flussi di investimento estero e dei processi di integrazione commerciale partire dalla crisi del 2009/2010. Tale rallentamento si è accentuato ulteriormente nel corso della pandemia da Covid-19. I *lockdown* nazionali, asimmetrici e asincroni, uniti al forte aumento della domanda, soprattutto per alcuni beni (informatica e telecomunicazioni, materie prime), hanno comportato alcune interruzioni nei rapporti di fornitura internazionale, facendo supporre una possibile regionalizzazione di alcune filiere locali di particolare interesse strategico. La possibilità effettiva di un *reshoring* di attività estere a favore di una ri-localizzazione all'interno dei confini dell'Unione europea rimane una possibilità per alcuni specifici segmenti dell'economia. Tale fenomeno potrebbe comportare un aumento del traffico merci con i Paesi dell'Unione Europea, generando un aumento della pressione sui valichi alpini, sia verso l'Austria sia verso la Germania.

È opportuno inoltre rilevare come la composizione dei flussi commerciali potrà essere soggetta a processi evolutivi anche legati ai diversi scenari di decarbonizzazione discussi nei capitoli successivi. Ad esempio, i combustibili fossili al momento costituiscono una parte rilevante dei flussi ed è probabile che, in uno scenario di mitigazione, si osservi una riduzione della loro domanda. Uno scenario di mitigazione può anche essere associato ad un aumento della domanda di materiali necessari alla manifattura ed al movimento di batterie, dispositivi necessari alla produzione di elettricità rinnovabile, materiali richiesti per interventi di efficientamento energetico, e materiali necessari al rafforzamento del network elettrico. Questo vale soprattutto in relazione ai flussi – già discussi in precedenza - con la Germania e l'Europa centrale che utilizzano in modo intensivo i porti italiani sia per l'approvvigionamento di materie prime e prodotti finiti che per le esportazioni di questa tipologia di prodotti.

2.3.2 Cambiamenti domanda di mobilità di passeggeri

Dinamiche demografiche e impatti socio-economici della digitalizzazione sono i fattori che più possono incidere sulla domanda di mobilità complessiva di passeggeri nel medio-lungo termine, anche a seguito della pandemia da Covid-19. Per valutarne meglio l'incidenza, sia pure in forma schematica, è opportuno distinguere tra le componenti sistematiche e occasionali nelle quali è tradizionalmente suddivisa la domanda di mobilità, oltre a fare cenno alla differenza tra spostamenti di corto raggio (o su brevi distanze) e a lungo raggio (o su distanze/percorrenze medio-lunghe). Per quanto questa differenziazione non consenta di cogliere la tendenza crescente agli spostamenti concatenati (*supra*), il forte ridimensionamento della prima componente a vantaggio della seconda è comunque indicativo di possibili cambiamenti strutturali.

Con riguardo alla mobilità di tipo sistematico, si può intravedere una continuazione della tendenza - già in corso da circa un decennio in Italia e in altri paesi europei - alla sua contrazione, sia per il corto che per il lungo raggio, accentuata dai fattori legati

all'evento pandemico e alle politiche di digitalizzazione e mitigazione degli effetti climatici.

Detta riduzione dei flussi di mobilità di tipo sistematico può essere correlata, in maniera schematica ai seguenti fenomeni:

progressivo invecchiamento della popolazione (Fig. 8), posto che a fasce di popolazione più anziana si associa generalmente un numero di spostamenti sistematico assai ridotto;
aumento della popolazione inattiva (per riduzione del numero di persone occupate e dinamiche demografiche, tra cui l'invecchiamento);
(anche rispetto a ipotesi di numero di occupati invariati o in aumento)
eventuale riduzione degli spostamenti di lavoro e del pendolarismo lavorativo, in relazione ad un possibile incremento di flessibilità oraria ed alla diffusione del lavoro da remoto (e della didattica a distanza), accelerata dagli effetti del Covid-19. Sebbene ci sia ancora una forte incertezza sulla situazione post-pandemia, studi di settore stimano un ritorno (anche se non completo) alla situazione pre-Covid-19 in questo ambito.

Una componente significativa della mobilità sistematica è quella motivata da ragioni di studio e formazione. Anche in questo caso, soprattutto per effetto di fattori demografici (minore quota della popolazione in età scolare e dei giovani fino a 24 (35) anni), ma anche per una possibile diffusione di nuove forme di didattica e formazione a distanza, è possibile aspettarsi una qualche riduzione dei flussi attuali.

Per quanto invece riguarda la componente occasionale della domanda di mobilità, storicamente assai meno rilevante di quella sistematica, può evidenziarsi una tendenza alla sua riduzione connessa ai seguenti fattori:

diffusione del commercio elettronico, che riduce gli spostamenti motivati da compere e acquisti;
orientamento a stili di vita più sostenibili che potrebbero in generale ridurre gli spostamenti (o che potrebbero orientarsi verso la mobilità attiva, cfr. infra), per maggiore sensibilità a impatti ambientali di tale modalità e possibile diffusione del turismo responsabile e di prossimità, anche per effetti di medio termine del Covid-19;
riduzione degli spostamenti per grandi eventi, come anche dei viaggi legati a eventi aziendali.

Di segno opposto, possono invece menzionarsi tendenze che porterebbero a espandere tale componente, dovute appunto alla diffusione di nuovi lavori e attività (specularmente alla riduzione della mobilità sistematica, come si è verificato negli ultimi decenni), e maggiori livelli di ricchezza che generano una maggiore domanda di

spostamento per viaggi, fruizione di eventi culturali, musicali, artistici, sportivi, ecc., ancorché con modalità più sostenibili.

In ogni caso, può ritenersi attendibile uno scenario di ricomposizione delle due componenti della mobilità a vantaggio di quelle non sistematiche e a più corto raggio, oltre che un accentuarsi degli spostamenti concatenati. Assai incerti sono invece gli effetti sulle diverse forme di mobilità, perché i fattori legati al cambiamento climatico incidono sulle preferenze degli utenti e possono disincentivare l'uso delle autovetture private anche considerando la disponibilità sul mercato in futuro di mezzi sempre meno inquinanti), ma significativi cambiamenti a favore di modalità sostenibili richiedono anche forti interventi strutturali, organizzative e gestionali (come discusso nel capitolo 6).

2.3.4 Cambiamenti nell'offerta - Conseguenze su scelte di policy

Sul lato dell'offerta le principali trasformazioni in corso della mobilità implicano i seguenti cambiamenti paradigmatici fondamentali:

- **dal motore a combustione interna (ICE) ai veicoli elettrici a batteria (BEV):** i motori a combustione saranno gradualmente eliminati e sostituiti dai BEV entro (le ultime direttive europee vogliono aggiungerne 30 milioni a quelli già in circolazione entro il 2030, (EU Mobility Strategy and Action Plan (2020));
- **dalla proprietà all'utenza:** l'uso condiviso dei veicoli, che è già una realtà oggi per il trasporto merci (nella misura in cui è servito da operatori logistici) e per il trasporto passeggeri (specie in ambito urbano, non solo nel caso del trasporto pubblico, ma anche in quello di nuove forme di mobilità, come il "ride halining" o la micromobilità), e per cui si attende un incremento grazie alle tecnologie digitali (specie nel caso della nuova mobilità);
- **dalla guida umana alla guida autonoma,** a seguito di una transizione verso veicoli connessi tra loro e con l'infrastruttura circostante e capaci di muoversi autonomamente, con molte nuove opzioni che potranno rendersi disponibili per servizi di mobilità radicalmente nuovi, (Alcorn & Kockelman, 2015; Fagnant & Kockelman 2021). I veicoli interessati sono sia quelli su strada (possibilmente a cominciare dalle merci), sia quelli che viaggiano sull'acqua (roboats) o nell'aria (droni) ed hanno applicazioni che vanno ben al di là di quelle che sono già attualmente capaci di guida autonoma (come metropolitane e aerei di linea in condizione di crociera);
- **Dalla mobilità analogica a quella digitale (Mobility-as-a-service - MAAS),** che permette di integrare i servizi di trasporto esistenti con quelli

nuovi grazie a tecnologie digitali, uso intelligente dei dati e soluzioni informatiche innovative e integrate (Jittrapirom, 2017).

Un'adozione su larga scala di uno qualsiasi di questi quattro nuovi modelli, che a sua volta ha forti legami con la progettazione e la realizzazione delle relative infrastrutture, può avvenire solo con una forte discontinuità rispetto allo *status-quo*.

Vi è tuttavia una notevole incertezza per quanto riguarda i tempi di commercializzazione e il relativo peso nel mercato dei veicoli automatizzati.

Tenendo conto dell'elevato costo della completa automazione e dei relativi impatti a livello di sistema, è possibile che la transizione alla mobilità autonoma per applicazioni diverse da quelle già in uso (treni, aerei in crociera) non avvenga in maniera completa prima del prossimo decennio. Allo stesso tempo, è anche possibile che questo tipo di transizione si verifichi gradualmente, integrando diversi tipi di capacità di automazione per diversi tipi di applicazione (per esempio macchine agricole, veicoli merci e veicoli passeggeri), in tempi diversi. In ogni caso, l'introduzione nel mercato di innovazioni di prodotto dirompenti, come quella dei veicoli autonomi, accompagnerà inevitabilmente all'affermazione di nuovi operatori e nuovi modelli di business.

Tra questi ultimi, saranno da annoverare i soggetti che a vario titolo entreranno a far parte dei produttori e coordinatori della Mobility as a Service (MaaS) ovvero di un modello di distribuzione della mobilità che integra soluzioni multimodali di mobilità (diverse non solo per modalità di trasporto, ma anche per tipologia, andando a ricomprendere sia servizi di linea, sia servizi flessibili o a chiamata) (Paniccia, 2020).

Altra innovazione organizzativa già presente, destinata a perdurare o evolversi ulteriormente è la mobilità sharing, basata su modelli di condivisione dei veicoli (per esempio nel caso della micromobilità) o dei viaggi (come nel caso di servizi di minibus condivisi o di "pooling" per il "ride hailing") molto variegati tra loro. L'impatto ambientale e sociale di queste nuove forme di mobilità è controverso e dipende dall'effetto sostitutivo che essa determina. Già da ora si possono identificare effetti potenzialmente negativi, da un punto di vista ambientale, rispetto all'uso dei mezzi collettivi, ma anche opportunità per la sottrazione di utenti alla mobilità privata, con possibili effetti positivi (anche in termini di occupazione degli spazi pubblici, grazie alla ridotta necessità di spazio per il parcheggio) in termini di sostenibilità.

2.3.5 Cambiamenti tendenze agglomerative, insediative, organizzazione delle città, urbanistica

Le infrastrutture sono essenziali per collegare le regioni più periferiche e vulnerabili, per garantire un facile accesso ai servizi pubblici per i cittadini e, in generale, per migliorare la qualità della vita.

È previsto che l'urbanizzazione faccia crescere la quota del 54% della popolazione che viveva in una città nel 2014 al 68% previsto nel 2050, e megalopoli diventeranno il teatro sociale, economico e politico delle principali innovazioni, tra le quali la mobilità avrà un ruolo centrale, poiché è anche la chiave per un'efficace decarbonizzazione che non può più essere ritardata (European Commission, 2019b).

Per rispondere a queste esigenze, le infrastrutture, la mobilità e i trasporti nel loro insieme dovranno essere intelligenti, ovvero "(garantire) una connettività in paesi, città e territori diversi che sia accessibile, efficace, attraente e sostenibile", e soprattutto centrata sui cittadini e i loro bisogni (European Commission, 2019a). I paradigmi della mobilità odierna, in forte e rapido mutamento, rendono particolarmente impegnativo realizzare una mobilità davvero sostenibile e inclusiva, tanto più se si considera come le scelte legate ad essa siano intrecciate con il contesto sociale in cui ogni individuo vive e si sviluppa.

A questa tendenza di fondo si accompagnano alcuni fenomeni di ripopolazione di aree rurali collocate per lo più ai margini dei grandi centri urbani con fabbisogni di mobilità in uscita (connessioni ai nodi urbani nazionali e internazionali) intermittenti e di entità più limitata. Questa tendenza è stata in parte accentuata dalla pandemia e sostenuta dal ricorso a modalità di lavoro da remoto e flessibili, ma andrà valutata dopo il raggiungimento di un nuovo equilibrio post-pandemico.

Alla crescita e al rafforzamento dei grandi centri urbani si è accompagnata la richiesta da parte di alcuni gruppi di aumentare la qualità della vita e della fruizione dei servizi pubblici attraverso maggiore auto-contenimento delle funzioni di produzione e consumo delle comunità (lavoro a casa, acquisti e attività ricreative nel proprio quartiere), in una visione contigua a quella delle città multipolari, che presuppongono minori distanze per gli spostamenti (ci si riferisce anche al modello "15 minute-city concept", città dove tutti i servizi rilevanti per il cittadino sarebbero raggiungibili a piedi entro 15 minuti) e dunque la possibilità di meglio conciliare lavoro, tempo libero, gestione familiare. Si tratta di un approccio che alcune città europee stanno seguendo (Deloitte, 2020; DfT, 2021), ed in generale, le politiche urbane promosse a livello europeo tendono a enfatizzare una mutazione nell'organizzazione e nelle funzioni delle città che conduce a città più piccole, o organizzate su più centri attrattori, più green, smart, più sicure e vivibili (limiti di velocità a 30 km/h, anche per esigenze popolazione più anziana). Non è tuttavia facile prevedere quanto questo modello sia attuabile in grandi città con funzioni amministrative e direzionali complesse, oltre ad essere in parziale controtendenza con le implicazioni che lo sviluppo dell'e-commerce comporta sulla distribuzione degli insediamenti. Questo modello presenta inoltre rischi di segregazione e riduzione delle opportunità di interazione tra gruppi diversi all'interno della città con un aggravamento delle disuguaglianze e un arresto della funzione di 'ascensore sociale' svolto dai centri urbani (Glaeser 2021; O'Sullivan 2021).

2.3.6 Inclusione e nuove disuguaglianze

I singoli individui saranno gli attori fondamentali del cambiamento, con identità socio-economiche complesse che sono per lo più – se non del tutto – ad oggi trascurate nei modelli di progettazione dei servizi, (Sánchez de Madariaga & Roberts,2013). I fattori umani più rilevanti in gioco sono: **a) il divario di genere; b) il divario digitale; c) il mix culturale sempre più complesso; d) l'invecchiamento della popolazione**. Fino ad oggi, però, molte scelte politiche e i processi decisionali ad esse legati hanno modellato l'ambiente su cui agiscono primariamente sulla base dell'omofilia (e quindi dell'esperienza di vita dei decisori stessi), o al più con riferimento ad una sorta di "cittadino idealizzato", affatto rappresentativo della complessità socio-culturale dei nostri giorni.

I più recenti studi sociologici, infatti, concordano sul fatto che gli individui di oggi sono un mix di molti aspetti sociali diversi che stanno creando gruppi complessi di nuove identità sociali con *intersezionalità* rilevanti (cioè presenza, in uno stesso individuo, di più di una caratteristica di minoranza, ad esempio le donne immigrate), (Kaijser & Kronsell,2014), (L.C. Angeles 2019). Ignorarlo non solo rende più lenta l'adozione di nuove tecnologie, ma, peggio, genera una catena di dati/processi/decisioni distorte, (Criado Perez, 2019). Infatti, dati "*biased*" (cioè raccolti senza eguale rappresentazione sociale e letti senza disaggregazione sociale) non rappresentano la realtà sociale e portano ad analisi non veritiere falsate dalla presenza di stereotipi, (Criado Perez, 2019). Lavori recenti sulla governance della mobilità intelligente affermano che "il pensiero sulle innovazioni nella mobilità deve essere contestualizzato all'interno del lavoro sulla progressione di più ampie transizioni socio-tecniche", e anche che "lo Stato dovrebbe gestire attivamente il possibile divario digitale (e razziale), (Edelman et al,2015) la discriminazione che esso implica nelle offerte di servizi *smart*, (Edelman et al,2015).

Ad esempio, è noto che i percorsi di viaggio cambiano molto tra uomini e donne: i primi hanno schemi di viaggio abbastanza semplici (due percorsi giornalieri per i pendolari dentro e fuori la città sulle strade principali); le donne, invece, si spostano secondo il cosiddetto "trip chaining", (Criado Perez, 2019), a causa di molteplici compiti di accudimento e cura (spesso usando strade periferiche minori). Da un'analisi condotta nel Regno Unito, a Londra (si veda ancora Criado Perez, 2019) ed i riferimenti ivi contenuti), le donne hanno il 25% in più di probabilità rispetto agli uomini di fare trip-chaining, che salgono al 39% se in famiglia c'è un bambino di età superiore ai nove anni. Una donna che lavora con un bambino sotto i 5 anni aumenterà il proprio trip-chaining del 54%, mentre un uomo che lavora nelle stesse condizioni lo aumenterà del 19%. I sondaggi effettuati mostrano che le donne fanno più affidamento sui trasporti pubblici rispetto agli uomini e, poiché sono più spesso vittime di violenza, garantire la sicurezza e la protezione dei trasporti pubblici è fondamentale per il loro benessere e la partecipazione alla forza lavoro, (Wei-Shiuen Ng & Ashley Acker, 2018). Considerare le

esigenze delle donne e dei bambini nella pianificazione delle infrastrutture non solo determina gli effetti distributivi dei progetti infrastrutturali come l'uguaglianza nell'accessibilità, ma è anche un valido business case che può aiutare ad evitare di prendere decisioni e/o fare pianificazioni errate.

In una recente pubblicazione dell'Istituto Europeo sull'Uguaglianza di Genere (EIGE, 2020), che ha analizzato un'ampia indagine condotta nell'UE28 su donne e uomini rappresentativi di un ampio spettro della popolazione, il trasporto pubblico è emerso come il secondo servizio infrastrutturale più importante nell'abilitare la vita quotidiana delle persone, dopo i servizi sanitari e i centri medici. Il trasporto pubblico ha avuto un impatto positivo sulla partecipazione all'istruzione e all'occupazione, sia per le donne sia per gli uomini. I risultati mostrati nella Figura 6 dimostrano che le donne percepiscono i servizi di infrastrutture di trasporto pubblico come più utili per la propria vita quotidiana, in tutti i contesti considerati nell'indagine e riportati nella Figura 6.

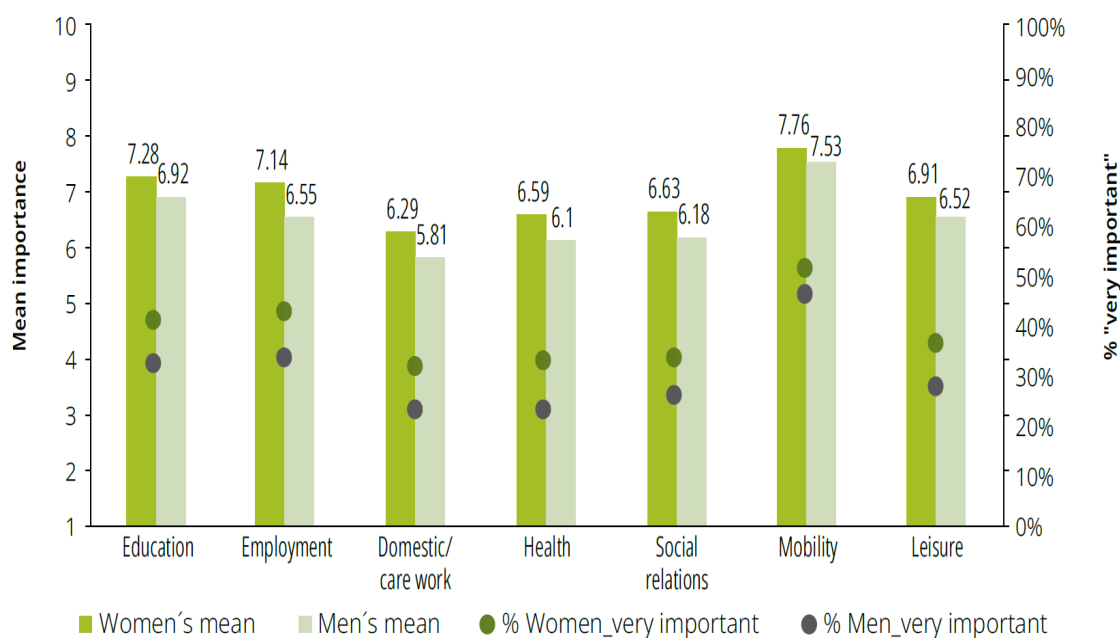
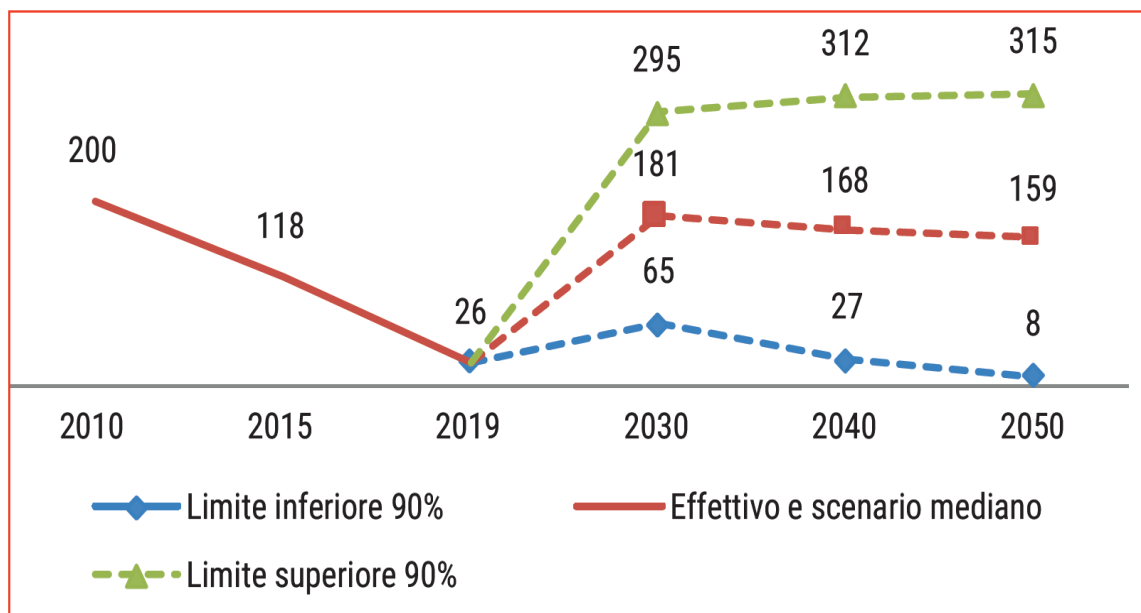


Figura 6 - L'importanza dei servizi di mobilità urbana nel consentire la partecipazione a diverse attività della vita (su una scala crescente da 1 a 10). Fonte: EIGE (2020)



(*) Dato pre-censimento per il 2019 e previsioni per gli anni 2030, 2040 e 2050

Fonte: elaborazione Censis su dati Istat

Figura 7 - Andamento e previsioni saldo migratorio totale, 2010-2050 (v.a. in migliaia).

Fonte: CENSIS, 2021

Se il genere è sicuramente la dimensione della diversità più studiata in relazione a trasporti, mobilità e infrastrutture, anche per le sue implicazioni maggioritarie (le donne costituiscono almeno il 50% della popolazione complessiva), non è l'unica dimensione sociale di interesse da prendere in considerazione. Per fare ciò in modo efficace, è consigliabile affrontare il problema multidimensionale che ne deriva all'interno di un quadro sociologico intersezionale, ovvero considerando come interagiscono questi diversi aspetti socio-economici quando più di uno è presente in un singolo individuo, (Kaijser & Kronsell, 2014). In questo contesto, avere una lente di genere significa semplicemente prendere la diversità tra uomini e donne come punto di partenza per parlare dei molteplici assi trasversali della disuguaglianza (cioè età, etnia, classe, località, alfabetizzazione digitale, ecc.), (Kaijser & Kronsell, 2014) (L.C. Angeles, 2019)

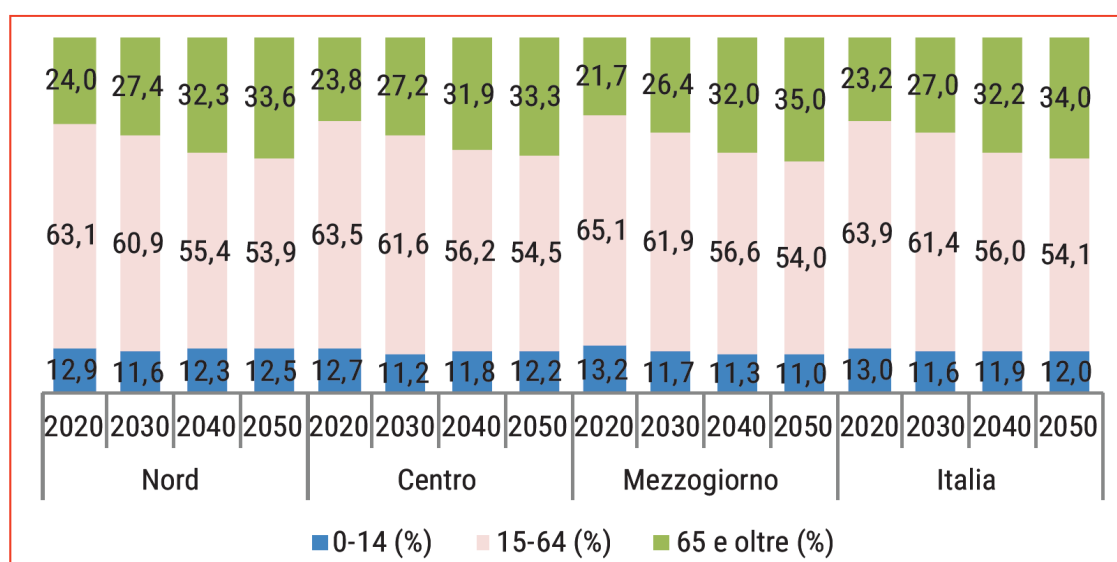
Nel contesto italiano, le principali dimensioni sociali, oltre al genere, di cui vale la pena prendere in considerazione sono sicuramente l'età, l'etnia e lo squilibrio geografico, che incidono pesantemente sull'alfabetizzazione digitale, (OECD, 2018a).

Un recente rapporto del CENSIS (CENSIS, 2021) mostra le proiezioni del saldo migratorio dal 2019 fino al 2050. I dati nella Figura 7 mostrano che le migrazioni con l'estero daranno un contributo importante all'andamento demografico, anche se le

previsioni presentano livelli di variabilità piuttosto ampi. Si tratta infatti di fenomeni fortemente condizionati anche da scelte di politica nazionale e dall'evoluzione dei contesti internazionali, il che implica la compresenza di ipotesi di incremento consistente dell'afflusso di immigrati dall'estero ma anche la possibilità che aumenti il numero di italiani che sceglie di trasferirsi all'estero.

Per questo, considerando lo scenario mediano, il saldo migratorio appare positivo in una prima fase, passando dal valore iniziale di +26.000 unità del 2019 al +181.000 del 2030, per scendere poi gradualmente a +168.000 del 2040 e a +159.000 nel 2050 (si veda ancora la Figura 7). Tuttavia, dal punto di vista del multiculturalismo, questo saldo implica senz'altro una maggiore diversità etnica degli abitanti sul territorio italiano, spesso provenienti da culture in cui la dimensione della uguaglianza di genere, o, spesso, della sua mancanza, è determinante nel definire il comportamento individuale e familiare.

Accanto a ciò, sempre il rapporto del CENSIS mostra proiezioni relative all'evoluzione dell'età media della popolazione, differenziandola anche geograficamente rispetto al territorio nazionale, con i dati mostrati in Figura 8, anche qui su un intervallo temporale che va dal 2020 al 2050. Come si vede dalla figura, in termini di composizione per classi d'età, proprio nel Mezzogiorno si prevede la riduzione più rilevante della classe d'età più giovane, che passerebbe dal 13,2% del 2020 all'11,0% del 2050. Allo stesso modo le previsioni mostrano un incremento atteso dell'incidenza degli anziani dal livello nazionale, attuale del 21,7% al 35,0% del 2050 (si veda ancora la Figura 8).



(*) Dati al 1° gennaio di ciascun anno, dati pre-censimento per il 2020 e previsioni basate sullo scenario mediano

Fonte: elaborazione Censis su dati Istat

Figura 8 - Fasce di età della popolazione residente e ripartizioni geografiche sul territorio italiano dal 2020 al 2050. Fonte: CENSIS,2021

La previsione è dunque quella di un Paese con un profilo prevalentemente maturo, contrassegnato da una rilevante presenza di over 65, in cui la forbice tra giovani e anziani si allargherà progressivamente.

Pertanto, il tentativo di ottenere il cambiamento dei paradigmi necessari per garantire una mobilità e un sistema di trasporto intelligenti e sostenibili con un approccio progettuale "piatto ed indistinto" sembra destinato a fallire.

Tuttavia, sia in contesti pubblici che privati, la mobilità e i fattori sociali evolvono solitamente su linee parallele: l'approccio progettuale esistente effettua scelte basate primariamente su questioni tecniche, eventualmente ambientali e sull'uso del suolo pubblico; le singole identità socio-economiche sono generalmente escluse, a volte in parte considerate solo in fase di marketing, quando però è troppo tardi per correggere gli effetti distorsivi di una progettazione non attenta alle diversità. Ciò si traduce in una scarsa diffusione dei nuovi paradigmi, con pochi strumenti per correggere in corso d'opera le traiettorie di adozione e diffusione degli stessi.

Ad esempio, si presume spesso che le donne trarranno automaticamente vantaggio dai nuovi progetti infrastrutturali allo stesso modo degli uomini, senza riconoscere possibili impatti distinti su donne e uomini in base alle loro esigenze e ruoli sociali. Il design urbano, ad esempio, svolge un ruolo importante nella vita delle persone, ma i rischi di urbanizzazione incontrollata, espansione urbana e baraccopoli sono spesso maggiori per le donne in quanto hanno maggiori probabilità di essere oggetto di aggressioni e molestie. Il miglioramento delle infrastrutture urbane con una prospettiva di genere richiederebbe illuminazione pubblica, spazi pubblici sicuri e trasporti pubblici sicuri per aiutare a mitigare i rischi legati alla sicurezza che le donne devono affrontare nella loro vita quotidiana, ma avrà anche un impatto positivo sulla sicurezza e sull'inclusione degli anziani, che diventano più deboli e vulnerabili con l'età, indipendentemente dal genere.

La rivoluzione tecnologica in corso e la relativa infrastruttura digitale richiedono inoltre di promuovere la parità di accesso ai servizi digitali e garantire opportunità di acquisizione di competenze tecnologiche. È inoltre necessario affrontare i rischi che emergono in un ambiente digitale, con ragazze, donne e in generale persone digitali non qualificate più esposte a frodi, cyberbullismo, molestie sessuali e altre forme di violenza agevolate dai servizi online.

Le donne, su cui pesa una proporzione ingente dei compiti di cura dei bambini e degli anziani, e che costituiscono la maggior parte della forza lavoro nelle professioni sanitarie e di cura, sono spesso anche gli utenti primari e i maggiori contribuenti di infrastrutture sociali come l'istruzione, la salute, i centri di assistenza all'infanzia e altri

servizi sociali, così come degli spazi pubblici come parchi e centri ricreativi. L'ubicazione di questi servizi, la progettazione delle reti di trasporto pubblico e la frequenza dei trasporti devono quindi essere pensati con una lente di genere e, di nuovo, di età, specie in un paese come l'Italia in cui la cura dei bambini è ancora largamente affidata ai nonni.

Tali considerazioni richiedono un approccio politico integrato allo sviluppo di infrastrutture sostenibili e di qualità con una lente intersezionale, tenendo conto allo stesso tempo di obiettivi sociali come la crescita economica, la creazione di posti di lavoro, la sostenibilità ambientale e il benessere. Tale approccio deve riconoscere la complessità delle caratteristiche individuali e gestire i compromessi e le sinergie intrinseci che possono sorgere tra i diversi obiettivi e le politiche atte a realizzarli.

I pilastri principali di un approccio integrato alla progettazione inclusiva e alla realizzazione di infrastrutture intelligenti sono i seguenti:

- **considerare gli aspetti socio-economici specifici delle strategie, delle politiche e dei progetti infrastrutturali.** Per fare ciò è necessario comprendere le diverse esigenze e preferenze, nonché le tendenze, quali l'urbanizzazione, i cambiamenti nella partecipazione delle donne alla forza lavoro, la crescita dell'occupazione a tempo parziale, la tendenza alle famiglie monoparentali e la migrazione;
- **garantire il coinvolgimento delle donne e delle minoranze nella progettazione di strategie e piani infrastrutturali e nella loro attuazione,** nonché la dovuta considerazione del benessere delle dipendenti donne lungo le catene di approvvigionamento delle infrastrutture. Ciò richiede di accrescere la presenza di soggetti portatori di elementi di diversità, a partire dalla partecipazione delle donne, nelle posizioni decisionali sia nel settore pubblico che in quello privato, nonché di rafforzare la presenza delle donne nei consigli di amministrazione e nelle posizioni apicali delle società di infrastrutture;
- **prendere in considerazione un'ampia partnership globale per accelerare questa agenda,** impegnandosi con organizzazioni internazionali, associazioni di paesi, società private e società civile per accelerare le necessarie trasformazioni atte allo sviluppo di una società e di processi economico/decisionali inclusivi e rispettosi delle caratteristiche individuali.

2.4 Dalla diagnosi alla cura

Il punto di partenza di qualunque strategia per le infrastrutture e la mobilità sostenibili deve tenere conto delle scelte programmatiche espresse nel Piano Nazionale di Ripresa

e Resilienza (PNRR) che definisce gli obiettivi prioritari del nostro Paese per l'utilizzo delle ingenti risorse del programma comunitario Next Generation EU (NGEU). La selezione degli investimenti da inserire nel PNRR è stata caratterizzata, sia a livello generale sia settoriale, da uno spazio di possibili opzioni delimitato dalle condizionalità espresse dalla Commissione Europea per l'accesso alle risorse.

Esiste in primo luogo un vincolo temporale. Gli investimenti (e le riforme che sono parte integrante del Piano) inclusi nel PNRR devono rispettare un cronoprogramma definito, che prevede la chiusura e messa in servizio delle opere entro il 2026. Così tutte le progettualità che - per mancanza di maturità ovvero perché contraddistinte da complessità realizzative - presentano orizzonti temporali più lunghi non sono state inserite nel Piano.

Al tempo stesso, la Commissione ha richiesto un impegno tangibile rispetto agli obiettivi strategici e programmatici europei espressi nel *Next Generation EU* e che trovano esplicito richiamo nel regolamento che istituisce il meccanismo di ripresa e resilienza (RRF) (Unione Europea, 2021) In particolare, è previsto che almeno il 37% delle risorse sia dedicato a interventi di contrasto al cambiamento climatico (sia in ambito di adattamento sia di mitigazione) e che il 20% siano dedicati alla transizione digitale.

Contestualmente, un ulteriore livello di condizionalità è definito in funzione della minimizzazione degli impatti ambientali degli investimenti. Il regolamento RRF e la relativa Comunicazione della Commissione (European Commission, 2021) impegna, infatti, gli Stati Membri a una verifica puntuale degli eventuali impatti negativi secondo il principio del "do no significant harm" (DNSH) definito nell'ambito del Regolamento Europeo sugli investimenti sostenibili (c.d. Tassonomia).

Questa verifica implica che ogni investimento e riforma deve poter dimostrare la mancanza di criticità, sia nella fase realizzativa sia nella fase di utilizzo, rispetto ad ognuno dei sei obiettivi ambientali definiti prioritari in ambito EU (mitigazione ai cambiamenti climatici, adattamento ai cambiamenti climatici, uso responsabile delle risorse idriche, economia circolare, inquinamento dell'aria e del suolo, tutela della biodiversità e degli ecosistemi). Ad esempio, l'impiego di tecnologia in ambito di mobilità non coerente con gli obiettivi di de-carbonizzazione dei trasporti previsti dalle strategie europee ed internazionali non può essere incluso nel PNRR⁷.

Questa struttura di condizionalità rappresenta una discontinuità significativa rispetto al passato. Per la prima volta, infatti, il quadro programmatico europeo, e i relativi impegni a livello nazionale, assumono la caratteristica di un vero e proprio piano di performance. La possibilità per gli Stati Membri di accedere alle risorse europee non

⁷ Coerentemente con questo principio, ad esempio, il contributo per la sostituzione della flotta di trasporto pubblico locale è previsto soltanto per veicolo a zero emissioni (elettrico e idrogeno).

dipenderà (o non dipenderà esclusivamente) dalla capacità e dall'efficienza della spesa, ma in maniera più importante dagli obiettivi raggiunti coerentemente con i traguardi e i target definiti nel documento inviato alla Commissione.

Complessivamente circa il 60% degli investimenti di competenza del MIMS è destinato ad interventi di riqualificazione, potenziamento ed efficientamento della rete ferroviaria nazionale, regionale e urbana. Nello specifico, sono previsti interventi su oltre 6.500 km di rete, tra cui, 500 km di linee ad alta velocità/capacità, 700 km di linee regionali potenziate (di cui oltre il 60% al Sud), implementazione del sistema tecnologico di sicurezza ERTMS su circa 3.400 km di rete (che, secondo le stime RFI, dovrebbe tradursi in una riduzione di circa 3.000 avarie all'anno), potenziamento dei nodi ferroviari e collegamenti nazionali strategici per circa 1.900 km.⁸ Oltre agli interventi sulle reti, ne sono previsti altri per lo sviluppo dei servizi di trasporto collettivo con, ad esempio, l'acquisto o il revamping della flotta, tra cui, l'acquisto di 50 nuovi treni completi passeggeri e 1.900 unità di materiale rotabile merci (es. locomotive, carri, mezzi intermodali). Si sottolinea tuttavia che la maggior parte di questi interventi non ha un impatto sulla scelta del modo di viaggio passeggeri e merci. Il Piano, per quanto riguarda i finanziamenti di competenza MIMS, si completa con interventi sulle altre modalità di trasporto tra cui: l'acquisto di 4.500 nuovi autobus (es. elettrici, idrogeno, metano), che non incide sulla scelta modale degli utenti, la manutenzione su 2.000 km di strade (che come indicato nel capitolo 6 dovrebbe dare priorità alle strade su cui transita il trasporto pubblico su gomma, in modo da migliorarne i tempi di viaggio ed il comfort dei passeggeri) e la realizzazione di circa 1.800 km di nuove piste ciclabili. Ci si dovrebbe quindi attendere un aumento della domanda di mobilità ciclabile (non presente in tabella 6, vedi sotto).

Secondo elaborazioni RFI (sintetizzate nella tabella 6), al 2030, l'entrata in esercizio di tutti gli interventi inclusi nel PNRR, dovrebbe produrre un incremento di utilizzo del trasporto ferroviario del 66% a discapito del trasporto privato, che vedrà ridurre la propria quota modale del 6%. La diversione modale a favore del trasporto ferroviario produrrà effetti positivi anche sull'incidentalità stradale che si stima in riduzione del 3,6% (fonte: MIMS su elaborazioni RFI) in termini di numero di incidenti (oltre 6.000 sinistri/anno risparmiati) e del 4,5% in termini di vittime e feriti prodotti (circa 150 vittime/anno e 11.000 feriti/anno). Lo *shift* modale gomma-ferro favorirà anche una riduzione delle emissioni di gas climalteranti nell'ordine di circa 3 milioni ton/anno CO₂ equivalente.

Se oltre agli interventi previsti nel PNRR si considerano anche tutti gli altri investimenti ferroviari previsti dell'Allegato Infrastrutture al DEF (2021) che completano il quadro della pianificazione nazionale per le infrastrutture di trasporto al 2030, è possibile apprezzare l'impatto (rispetto al 2019) di una politica nazionale dei trasporti di medio-

⁸ È prevista inoltre la riqualificazione di 55 stazioni nel Sud che si stima incrementerà l'accessibilità per circa 3 milioni di utenti potenziali.

lungo periodo in termini di riduzione dei tempi medi di viaggio ferroviario su tutto il territorio nazionale con un incremento di accessibilità piú marcato nelle aree economicamente piú deboli (es. Sud, asse adriatico, asse nord tirreno-Liguria).

Modalità di trasporto	Modal share 2019	Modal share 2030	Var.% 2019*-2030
Trasporto ferroviario	6%	10%	66%
Trasporti collettivi extraurbani	10%	11%	10%
Trasporti collettivi urbani	2%	2%	-
Autotrasporti privati	82%	77%	-6%

Tabella 6 - Ripartizione modale trasporto passeggeri 2019 e 2030 a seguito dell'implementazione del PNRR (valori %) Fonte: MIMS, Allegato al DEF 2021 (elaborazioni RFI su dati CNIT 2018-2019).

Modalità di trasporto	Modal share 2019	Modal share 2030	Var.% 2019*-2030
Trasporto ferroviario	10,7%	16,5%	+54%
Trasporto marittimo	29,3%	30%	+2%
Trasporto aereo	0,6%	0,6%	-
Autotrasporto (>50km)_	54,5%	47,7%	-13%

Oleodotti	4,8%	5,1%	+6%
-----------	------	------	-----

Tabella 7 - Ripartizione modale trasporto merci 2019 e 2030 a seguito dell'implementazione del PNRR (valori %)

Condizionalità e vincoli di natura regolamentare e tecnica hanno fortemente influenzato la predisposizione del PNRR. Inoltre, l'orizzonte temporale del piano rende le strategie in esso delineate intrinsecamente orientate al breve e medio-periodo, in contrasto con gli obiettivi di net-zero che si articolano su scala trentennale al 2050. Allo stesso modo, le dinamiche socio-economiche legate alle modifiche infrastrutturali sono, anch'esse, destinate ad esplicarsi oltre l'orizzonte del PNRR stesso. Alla luce di queste considerazioni, il PNRR deve essere considerato solo un primo elemento della "cura" che questo Rapporto ambisce a delineare per lo sviluppo ed il rafforzamento di infrastrutture e mobilità sostenibili in Italia. È necessaria pertanto una strategia di lungo periodo che, da una parte, affronti in modo pieno e sistematico deficienze e squilibri evidenziati in questo capitolo in riferimento agli impatti socio-economici delle infrastrutture e la mobilità e che, dall'altra, recepisca le raccomandazioni delineate nei capitoli seguenti in materia di mitigazione ed adattamento.

Gli aspetti e le raccomandazioni di natura socio-economica che tale strategia dovrebbe incorporare – prescindendo al momento dagli aspetti più specificamente tecnici e tecnologici legati agli impatti dovuti ai cambiamenti climatici affrontati nei capitoli seguenti - possono essere riassunti come segue.

- a) Riconoscimento della centralità dell'obiettivo di sviluppo sostenibile e inclusivo come definito dai Sustainable Development Goals delle Nazioni Unite. Da questo discende la natura socio-tecnica del progetto e della concezione di politiche per le infrastrutture e la mobilità sostenibili. Questi interventi – soprattutto nel lungo periodo – hanno effetti profondi sull'economia e sulla società rendendo necessario un approccio multidisciplinare e multi-dimensionale al disegno, attuazione e alla valutazione degli impatti e dei risultati (attesi e inattesi) degli interventi, unito allo sviluppo di competenze che consentano di considerare le variabili sociali all'interno del progetto delle soluzioni tecniche e della loro valutazione;
- b) Riconciliazione e integrazione delle strategie nazionali per economia, società ed ambiente, mettendo al centro il benessere dei cittadini in modo inclusivo e sostenibile, promuovendo anche innovativi strumenti di partecipazione attiva dei cittadini.

- c) Definizione di un momento di natura tecnica, che elabori sui dati e sull'evidenza disponibile circa gli effetti sia socio-economici che ambientali degli interventi, non solo attraverso Analisi Costi-Benefici ma anche rigorose valutazioni ex-ante ed ex-post, restringendo la discrezionalità delle decisioni politiche e limitando le distorsioni che riducono il benessere collettivo. La costituzione di una banca data centralizzata e di Open Government che offra accesso a tutti i dati finanziari e di avanzamento dei singoli progetti monitorati, sarebbe un primo passo fondamentale in questa direzione
- d) Concetti, teorie ed evidenze di frontiera devono guidare ed informare l'azione pubblica. La Commissione Europea ha chiarito la necessità di adottare un approccio 'human centred' alle azioni e alle politiche per lo sviluppo sostenibile a livello urbano (European Commission, 2019b). Per raggiungere l'obiettivo di città "climate-neutral and smart" la Commissione ha identificato una specifica 'missione' nell'ambito del programma europeo per la ricerca *Horizon Europe* con l'obiettivo di promuovere l'innovazione di tipo sistemico nella governance, nei trasporti, nell'energia, nella costruzione e nella gestione dei rifiuti con il supporto delle tecnologie digitali (si parla di innovazione in tutta la catena del valore degli investimenti urbani) (European Commission, 2020). Per quanto riguarda i trasporti e la mobilità (European Commission, 2017) l'agenda definita dalla Commissione è basata sull'integrazione di sette aree di ricerca in tema di trasporti e mobilità: *smart mobility and services; transport infrastructure; transport electrification; vehicle design and manufacturing; cooperative, connected and automated transport; network and traffic management systems; and low-emission alternative energy for transport*. Il "Transport Research and Innovation Monitoring and Information System (TRIMIS)" è lo strumento per definire ed attuare questa agenda, permettendo alla Commissione di individuare nuove dinamiche tecnologiche e rafforzare le capacità di Ricerca e Sviluppo nell'area di mobilità e trasporti. Tali approcci dovrebbero essere replicati e seguiti su scala nazionale e regionale in Italia.
- e) Le decisioni inerenti investimenti e strategie infrastrutturali devono essere supportate da competenze e conoscenze adeguate da mettere a supporto del decisore di politica pubblica, che possano elaborare le proprie proposte sulla base sia di dati raccolti in modo diretto, strutturato e ripetibile, anche attraverso apposite indagini, sia di studi di scenario. Il modello più rilevante in questo senso è quello della "UK National Infrastructure Commission". Tale Commissione si occupa in modo unitario della materia con un team permanente di ricercatori e Commissari nominati su orizzonte

quinquennale che si avvale di un centro studi e di una infrastruttura di raccolta dati solida e permanente.

- f) Affrontare in modo radicale, con risorse idonee ed una prospettiva di lungo periodo il problema della scarsa competenza tecnica delle amministrazioni centrali, regionali e locali preposti alla progettazione e attuazione degli interventi sul campo in modo da aumentare al contempo incisività, tempestività ed impatto. Nel breve periodo un approccio più centralizzato con una forte cabina di regia ministeriale potrebbe essere necessario per aggirare colli di bottiglia a livello locale
- g) Le azioni e gli investimenti per colmare il gap infrastrutturale tra il nostro Paese e le altre principali economie UE devono essere basati su scelte strategiche che riflettano in modo chiaro le priorità del Paese e dell'UE. Questo implica la crescita e il consolidamento di alcune specifiche infrastrutture (per esempio ben selezionati hub portuali) con un processo di coordinamento e specializzazione associato a diverse direttrici di traffico (merci e passeggeri) e alla loro evoluzione in linea con quanto discusso in precedenza in questo Capitolo.
- h) Per ridurre la quota di utilizzo dell'autovettura privata, occorre intervenire con un approccio di sistema su tutte le modalità di trasporto (ferro, gomma, ciclabilità, micromobilità e shared mobility e sulle lunghe distanze ovviamente anche il sistema aereo). Occorre inoltre garantire che il trasporto ferroviario, quello collettivo su gomma, ciclabilità e i sistemi di micro e shared mobility lavorino sinergicamente, in modo che miglioramenti sul sistema ferroviario non catturino domanda dal trasporto pubblico e dagli altri sistemi di trasporto sostenibile (come dimostrato da tutta la letteratura di settore), ma intercettino correttamente domanda dall'autovettura privata e sulle brevi distanze dal trasporto aereo.
- i) A livello urbano è essenziale adottare un modello di progettazione e governance degli interventi per la mobilità basato sulla quadrupla-elica: amministrazione locale, settore privato, università e centri di ricerca e cittadini devono essere sistematicamente coinvolti e mobilitati con modalità partecipative. Questo modello adotta una prospettiva place-based al problema degli interventi per la mobilità urbana in cui gli interventi sono adattati alle caratteristiche socio-istituzionali dell'economia e della società locale.
- j) Gli interventi programmati dovranno tenere in considerazione il profondo dualismo regionale che caratterizza il Paese. Non solo risvolti ed impatti sulle disparità regionali dovranno essere oggetto di costante valutazione e

monitoraggio. Anche gli aspetti di disuguaglianza e polarizzazione intra-regionale dovranno essere attentamente valutati.

- k) Una seria strategia per la mobilità e le infrastrutture non può trascurare il momento della manutenzione e dell'ammodernamento (presente e futuro) di tutte le tipologie infrastrutturali. Sia a livello urbano che extra-urbano questa componente attrae molta attenzione dal pubblico ma è costantemente trascurata. In quest'area l'integrazione con nuove tecnologie di comunicazione e nuovi apparati di monitoraggio (es. droni) possono offrire risultati interessanti.

Bibliografia

Acemoglu, Daron and Melissa Dell. (2010). "Productivity Differences between and within Countries," *American Economic Journal: Macroeconomics*, 2, 169–188

Alcorn L, e K Kockelman (2015). Automated vehicles and vehicles of the future. The Routledge Handbook of Public Transport, 535-550

Banca d'Italia (2020) Indagine sui trasporti internazionali di merci, Statistiche <https://www.bancaditalia.it/pubblicazioni/indagine-trasporti-internazionali/2020-indagine-trasporti-internazionali/statistiche-ITM-20200603.pdf>

Barone G, de Blasio G, & Gentili E (2020). Politically connected cities: Italy 1951-1991. Working paper, University of Bologna <http://amsacta.unibo.it/6595/>

Ben-Akiva, M. And Lerman, S.R. (1979). Disaggregate Travel and Mobility-Choice Models and Measures of Accessibility. In D. Hensher and P.R. Storper (Eds.), *Behavioural Travel Modeling*. London: Croom-Helm.

Ben-Akiva, M. E., & Lerman, S. R. (1985). *Discrete Choice Analysis Theory and Application to Travel Demand*. Cambridge, MA MIT Press

Boisjoly, G. and El-Geneidy, A. (2016). Daily fluctuations in transit and job availability: A comparative assessment of time-sensitive accessibility measures. *Journal of Transport Geography*, 52, 73–81.

Borsati M & Percoco M (2021). Trasporti in *Evidence-based Policy! Ovvero perché politiche pubbliche basate sull'evidenza empirica rendono migliore l'Italia*, a cura di de Blasio G, Nicita A & Pammolli F. Il Mulino, Bologna

Bowen J. and Rodrigue, J-P (2017), Air Transport, in J-P Rodrigue (ed), *The Geography of Transport Systems. The spatial organization of transportation and mobility*, New York: Routledge.

Carozzi F & Repetto L (2016). Sending the pork home: Birth town bias in transfers to Italian municipalities, *Journal of Public Economics*, 134: 42-52

Cascetta E., Marzano V., Aponte D., Arena M. (2020) *Alcune considerazioni sugli impatti dell'emergenza CoViD-19 per il trasporto merci e la logistica in Italia* (<https://www.shipmag.it/wp-content/uploads/2020/05/Analisi-merci-e-logistica-Covid-19-1.pdf>)

CENSIS - L'Italia e le dinamiche demografiche: Scenari e strumenti per affrontare il futuro (2021) https://www.censis.it/sites/default/files/downloads/Italiaele%20dinamichedemografiche_0.pdf

Cheshire PC and Magrini (2002). The distinctive determinants of European urban growth: does one size fit all? In *Research papers in environmental and spatial analysis n.73*, Department of Geography and Environment, London School of Economics.

Crain, Mark and Lisa K. Oakley. (1995). "The Politics of Infrastructure," *Journal of Law and Economics*, 38, 1–17

Crescenzi R. (2005). "Innovation and regional growth in the enlarged Europe: the role of local innovative capabilities, peripherality and education." *Growth and Change* 36(4), 471-507.

Crescenzi R. & Rodríguez-Pose A. (2011) *Innovation and Regional Growth in the European Union*, Berlin, Heidelberg and New York: Springer

Crescenzi R. & Rodríguez-Pose A. (2012) Infrastructure and regional growth in the European Union, *Papers in Regional Science*, 91(3), 487–513, 2012.

Crescenzi R., Di Cataldo M, Rodríguez-Pose A. (2016). Government quality and the economic returns of transport infrastructure investment in European regions, *Journal of Regional Science*, 56(4), 555-582.

Crescenzi, R., Giua, M., Sonzogno, G.V. (2021). [Mind the Covid-19 crisis: An evidence-based Implementation of Next Generation EU](#)", *Journal of Policy Modeling*, 43(2), 278–297.

Criado Perez, C. (2019) *Invisible Women: Data Bias in A World Designed for Men*. Harry N. Abrams). (Criado Perez, C. (2019) *Invisible Women: Data Bias in A World Designed for Men*. Harry N. Abrams).

Deloitte Insights, 2018, *Regulating the future of mobility*.

Deloitte (2020) *Urban Future with a purpose. 12 trends shaping the future of cities by 2030*. <https://www2.deloitte.com/global/en/pages/public-sector/articles/urban-future-with-a-purpose/15-minute-city.html>

DfT (2021), *Decarbonising Transport, A Better, Greener Britain*, Department for Transport, OGL, London.

Dionori, F.; Casullo, L.; Ellis, S.; Ranghetti, D.; Bablinski, K.; Vollath, C.; Soutra, C. (2015), *Freight in road: why EU shippers prefer truck to train*, [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/540338/IPOL_STU\(2015\)540338_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/540338/IPOL_STU(2015)540338_EN.pdf)

Edelman, B., Luca, M., 2015. *Digital discrimination: the case of Airbnb.com*. Harvard Business School NOM Unit, Working Paper No. 14-054). (Edelman, B., Luca, M., 2015. *Digital discrimination: the case of Airbnb.com*. Harvard Business School NOM Unit, Working Paper No. 14-054).

Edelman, B., Luca, M., Svirsky, D., 2016. *Racial discrimination in the sharing economy: evidence from a field experiment*. Harvard Business School NOM Unit, Working Paper No. 16-069

EIGE *Gender equality and urban mobility* (2020) ISBN: 978-92-9482-385-4 DOI: 10.2839/44663 <https://eige.europa.eu/publications/gender-equality-and-urban-mobility>

EU *Mobility Strategy and Action Plan* (2020) https://ec.europa.eu/transport/themes/mobilitystrategy_en

European Commission, EC (2017) *Strategic Transport Research and Innovation Agenda (STRIA) Roadmap Factsheets*, 2017.

European Commission, EC (2019a), *Handbook on external costs of transport*, DG Move

- European Commission, EC (2019b) *The Human-Centred City* Report of the High-Level Expert Group on Innovating Cities, Luxembourg: Publications Office of the European Union
- European Commission, EC (2020). Proposed Mission: 100 Climate-neutral Cities by 2030 – by and for the Citizens. Report of the Mission Board for climate-neutral and smart cities, Luxembourg: Publications Office of the European Union
- European Commission, EC (2020a): EU transport in figures, Statistical pocketbook 2020, pp. 1-3).
- European Commission, EC (2021), C(2021) 1054 Comunicazione della Commissione Orientamenti tecnici sull'applicazione del principio "non arrecare un danno significativo" a norma del regolamento sul dispositivo per la ripresa e la resilienza
- Fagnant, DJ e K Kockelman (2021) Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 77, 167-181
- Geurs, K.T., and van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: Review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 12(2), 127–140.
- Glaeser E L, Ponzetto G A M (2018). The political economy of transportation investment, *Economics of Transportation*, 13, 4-26
- Glaeser E L (2021). The 15-minute city is a dead end — cities must be places of opportunity for everyone, LSE COVID-19 Blog, May 2021. <https://blogs.lse.ac.uk/covid19/2021/05/28/the-15-minute-city-is-a-dead-end-cities-must-be-places-of-opportunity-for-everyone/>
- Golden M A & Picci L (2008). Pork-Barrel Politics in Postwar Italy, 1953-94, *American Journal of Political Science*, 52(2), 268-289
- Handy, S. (2021). Is accessibility an idea whose time has finally come? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 83, 102319.
- Hansen, W. (1959). How Accessibility Shapes Land Use. *Journal of the American Institute of Planners*, Vol. 35, No. 2, pp. 73-76.
- Hansen, W.G. (1959). How accessibility shapes land use. *Journal of the american institute of planners* 25 (2), 73-76.
- Henisz, Witold J. 2002. "The Institutional Environment for Infrastructure Investment," *Industrial and Corporate Change*, 11, 355–389
- Jittrapirom, P., Caiati, V., Feneri, A. M., Alonso-González, M. J., Ebrahimigharehbaghi, S., & Narayan, J. (2017). Mobility as a Service: a critical review of definitions, assessments of schemes, and key challenges. *Urban Planning*, 2(2), 13–25. <https://doi.org/10.17645/up.v2i2.931>
- Kaijser, A. & A. Kronsell (2014) Climate change through the lens of intersectionality, *Environmental Politics*, Vol. 23, n.3, pp. 417-433) DOI: [10.1080/09644016.2013.835203](https://doi.org/10.1080/09644016.2013.835203)
- Knight B (2005). Estimating the value of proposal power, *American Economic Review*, 95(5) (2005), 1639-1652
- Kwan, Mei-Po (1988). Space-Time and Integral Measures of Individual Accessibility: A Comparative Analysis Using a Point-based Framework Geographical Analysis. Vol. 30 Issue 3, pp. 191–216.

Isfort (2021) Osservatorio «Audimob»

IT&IA (2021), Logistics and infrastructure 2020, Italian Trade & Investment Agency, <https://www.ice.it/en/sites/default/files/2021-02/ita-logistics-and-infrastructure-2020.pdf>

L.C. Angeles (2019) Transporting Difference at Work: Taking gendered intersectionality seriously in climate change agendas. In: Climate Change and Gender in Rich Countries. Publisher: Routledge; Editors: Marjorie Griffin-Cohen, ISBN 9781315407906).

Litman, T. (2021). Evaluating Accessibility for Transport Planning. Measuring People's Ability to Reach Desired Services and Activities. Internal Report Victoria Transport Policy Institute, Canada.

Martens, Karel, Golub, Aaron (2012). "A Justice-Theoretic Exploration of Accessibility Measures." In Accessibility Analysis and Transport Planning: Challenges for Europe and North America, edited by Geurs, K. T., Krizek, K. J., Reggiani, A., 195–210. Cheltenham: Edward Elgar.

Martens, K. (2017). *Transport Justice: Designing Fair Transportation Systems*. Routledge.

Martin P. & Rogers CA (1995). Industrial Local and Public Infrastructure Journal of International Economics 39(3-4):335-351

OECD (2002) Glossary of Statistical Terms, <https://stats.oecd.org/glossary/index.htm>

OECD (2018a), "Bridging the Digital Gender Divide: Include, Upskill, Innovate", OECD, Paris. <http://www.oecd.org/going-digital/bridging-the-digital-gender-divide.pdf>.

O' Sullivan F. (2021) Where the '15-Minute City' Falls Short Bloomberg CityLab: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-03-02/the-downsides-of-a-15-minute-city>

Paniccia, I. (2020), Substitution or Integration between Traditional Public Transport and Platform-Based Forms of Mobility. Implications for Economic Regulation" in Network Industry Quarterly, vol. 22/3/September 2020.

Puga D. (2002). European Regional Policy in the light of recent location theories Journal of Economic Geography 2: 373-406

Redding, S. e M. Turner (2015), "Transportation Costs and the Spatial Organization of Economic Activity" in (eds) Gilles Duranton, J. Vernon Henderson and William Strange, Handbook of Urban and Regional Economics, Chapter 20, pages 1339-1398.

Rodrigue, J-P, T. Notteboom and B. Slack (2017), Maritime transport, in J-P Rodrigue (ed), The Geography of Transport Systems. The spatial organization of transportation and mobility, New York: Routledge.

Sánchez de Madariaga, I., and M. Roberts (2013). Fair shared cities: the impact of gender planning in Europe. Burlington: Ashgate Pub. Company)

Transportation Research Board. 2014. Transportation Investments in Response to Economic Downturns," Special Report No. 312, U.S. Transportation Research Board, Washington, D.C.

Unione Europea (2021). REGOLAMENTO (UE) 2021/241 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 12 febbraio 2021 - dispositivo per la ripresa e la resilienza.

Wei-Shiuen Ng and Ashley Acker (2018), Understanding Urban Travel Behaviour by Gender for Efficient and Equitable Transport Policies, International Transport Forum Discussion Paper No. 2018-01, <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/urban-travel-behaviour-gender.pdf>

World Bank. 2011. *Curbing Fraud, Corruption, and collusion in the Roads Sector*. Washington, D.C.: The World Bank Group

WTO (2020), World Trade Report 2020
https://www.wto.org/english/res_e/publications_e/wtr20_e.htm

Capitolo 3

Gli impatti dei cambiamenti climatici in Italia

Autori

Coordinamento	P. Mercogliano
Analisi e valutazione del pericolo climatico	P. Mercogliano, G. Barbato, R. Padulano, M. Ellena
Impatti sull'economia	F. Bosello; E. Lanzi
Impatti sulla società	F. Bosello; E. Lanzi
Conclusioni	G. Forzieri, P. Mercogliano, E. Lanzi,

Sintesi

Il Capitolo 3 analizza gli effetti del cambiamento climatico attesi sul territorio italiano e sui principali elementi del sistema socioeconomico. In particolare, vengono descritti i principali impatti attesi per effetto del verificarsi di *hazards* climatici (ovvero sorgenti di pericolo che, in questo contesto, sono da riferirsi ad eventi fisici associati al clima o a trend o ai loro impatti fisici, così come riportato nel rapporto IPCC WG2 AR5. Da qui in poi tale termine viene tradotto come “pericolo climatico”), soffermando l’attenzione dapprima sugli effetti del cambiamento climatico sul regime termo-pluviometrico su scala stagionale e annuale, e successivamente analizzandone le conseguenze sul territorio per una serie di essi (e.g., **ondate di calore, ondate di freddo, siccità, incendi, tempeste di vento, allagamenti, esondazioni fluviali, inondazioni costiere, frane o erosione del suolo**).

I pericoli climatici, in particolare, sono descritti da una serie di indicatori, per i quali viene analizzata l’evoluzione spazio-temporale nel caso di **due scenari di concentrazione** giudicati di particolare interesse (RCP 2.6, che corrisponde a livello globale ad un incremento di temperatura poco inferiore ai 2°C a fine secolo rispetto ai livelli pre-industriali, e RCP 4.5, che corrisponde a livello globale ad un +3°C a fine secolo, entrambi definiti nella letteratura IPCC) e per **due orizzonti futuri rilevanti** (breve termine, centrato intorno al 2030, e medio termine, centrato intorno al 2050).

Le tendenze messe in evidenza sono utili a fornire indicazioni generali sull’incremento, sul decremento o sulla stazionarietà dei pericoli climatici (e di loro particolari caratteristiche quali intensità, persistenza e frequenza), e, di conseguenza, sui relativi effetti in termini di danni e rischi sulle infrastrutture di interesse. Oltre alle variazioni ottenute a partire dalla media di un insieme di modelli climatici (risultato ritenuto maggiormente affidabile rispetto al valore basato su un singolo modello) è riportata anche una **stima dell’incertezza** (che si basa sull’accordo o meno tra i diversi modelli climatici utilizzati nella valutazione della variazione). Le variazioni sono riferite a cinque macro-zone in cui l’Italia è stata suddivisa: Nord Est, Nord Ovest, Centro, Sud e Isole.

L’analisi degli impatti sul regime termo-pluviometrico evidenzia un generale aumento delle temperature, piuttosto omogeneo sul territorio italiano, per entrambi gli scenari IPCC, più pronunciato nel medio futuro secondo lo scenario RCP4.5, **con un incremento medio di circa 2°C per la stagione estiva, e di circa 1.5°C per la stagione invernale**. Per quanto attiene invece la precipitazione stagionale, si notano comportamenti molto diversi al variare della zona geografica e della stagione, e caratterizzati da maggiore incertezza rispetto alle proiezioni di temperatura. In particolare, le proiezioni indicano **per il centro e sud Italia, in particolare per lo scenario RCP 4.5, una diminuzione delle precipitazioni complessive annue**, mentre per il nord Italia si riscontra generalmente un lieve aumento delle piogge invernali e una lieve diminuzione di quelle estive.

Sulla base dei summenzionati pericoli climatici, la valutazione dei conseguenti impatti sul territorio per effetto degli *hazard* naturali mostra risultati eterogenei. Coerentemente con i trend attesi sul regime termometrico, è da attendersi una generale riduzione dei fenomeni di ondata di freddo sull'intero territorio nazionale, mentre, all'opposto, è atteso un **aumento generalizzato dei pericoli legati alle ondate di calore**. Per entrambi i fenomeni le maggiori variazioni si riscontrano nel medio futuro (2050) nello scenario RCP 4.5.

Nello stesso periodo e stesso scenario, è inoltre atteso un significativo aumento del pericolo incendi. Le tempeste di vento mostrano un lieve aumento per entrambi gli scenari e periodi; tuttavia, tale segnale è affetto da notevole incertezza e richiede approfondimenti mediante modelli di dettaglio. Per quanto attiene le precipitazioni intense è atteso un generale incremento sia dei cumuli giornalieri sia **dell'intensità e frequenza degli eventi estremi di precipitazione**, specie per il periodo 2050 nello scenario RCP 4.5, ed in particolar modo per le aree del centro-nord nella stagione invernale. È inoltre atteso un incremento dei fenomeni di mareggiata più estremi, specie nell'alto adriatico, mar ligure ed alto tirreno.

Più eterogenei e variegati sul territorio sono i risultati dell'analisi degli effetti dei cambiamenti climatici sui fenomeni di esondazione fluviale e di erosione del suolo, a riprova della complessità dell'interazione tra i cambiamenti climatici, le precipitazioni estreme e il territorio con le sue specificità.

Le conseguenze economiche degli impatti fisici sopra descritti sono importanti soprattutto per settori quali il turismo, l'agricoltura, il settore energetico, il settore industriale e dei trasporti, il commercio internazionale (con evidenti ricadute su crescita ed occupazione complessive).

Il **settore del turismo** sarà quello più fortemente impattato dal generale aumento delle temperature (sia estive, sia invernali), con possibili perdite dirette di 17 MLD anche nello scenario RCP 2.6, in cui si riesce a contenere l'aumento di temperatura sotto i 2°C. I danni economici sono associati in larga parte alla contrazione della domanda nel periodo estivo a causa dell'atteso disagio termico (e si prospetta una analoga riduzione del turismo invernale per effetto della minore copertura nevosa).

Per quanto attiene il **settore dell'agricoltura**, le riduzioni attese nelle rese, per effetto dei cambiamenti nel regime termo-pluviometrico, sono stimate portare ad una riduzione del valore della produzione aggregata pari a 12.5 MLD di euro nel 2050 già nello scenario RCP 2.6. I danni sono ovviamente molto più elevati nello scenario RCP 4.5

Per effetto dell'incremento atteso di temperatura sia in estate che in inverno, non si prospetta un significativo aumento della spesa energetica, a causa del bilanciamento tra l'aumento delle necessità di condizionamento nella stagione estiva e la riduzione delle

necessità di riscaldamento in inverno. Al contrario, si stima che la spesa energetica pro-capite dovrebbe diminuire in media del 9.7% al 2050 nell'RCP 4.5.

Più complessa è la valutazione delle ripercussioni dei cambiamenti climatici sul settore della **produzione industriale**, che potrebbe essere negativamente impattato dall'aumento di temperatura attraverso gli effetti negativi sulla produttività del lavoro, dalla scarsità e variabilità nella disponibilità di risorse idriche, fondamentali in molti processi produttivi, e soggette a costante competizione di domanda. Per quanto riguarda, in particolare, i soli danni derivanti dallo stress infrastrutturale diretto o indiretto indotto da eventi meteorologici estremi, si stima che i danni annuali attesi da innalzamento del livello del mare potrebbero raggiungere i 50 MLD di euro nel 2050 nell'RCP 2.6. Quelli dovuti alle sole alluvioni fluviali potrebbero arrivare a 3 MLD di euro nell'RCP 2.6. Valori che rendono quindi essenziale disegnare misure di adattamento anche nel caso in cui si riuscisse a ridurre in modo rilevante le emissioni di gas serra.

Per quanto riguarda, infine, il dato relativo alla **crescita economica**, che aggrega tutti gli effetti diretti, quelli settoriali e quelli macroeconomici indiretti, si stimano perdite che oscillano tra lo **0.2% e il 2% del PIL nel 2050 nello scenario RCP 2.6. Ma che raggiungono il 2-2.5% del PIL nello scenario RCP 4.5 sempre nel 2050**, con possibili valori regionali ancora più elevati. Le perdite sono originate principalmente dagli impatti sull'attività produttiva e dalla perdita di asset di capitale associati all'innalzamento del livello del mare, all'intensificarsi degli eventi di dissesto idrogeologico e allo stress termico.

Per quanto attiene infine la dimensione sociale, gli aspetti analizzati sono la mortalità, l'immigrazione e le disuguaglianze. In tutti i casi, il cambiamento climatico presenta impatti negativi sulla società, con un generale aumento del tasso di mortalità e dei danni alla salute delle persone, soprattutto a causa di eventi climatici estremi.

Indice del capitolo

Introduzione	6
3.1 Analisi e valutazione del pericolo climatico	6
3.1.1. Contesto e metodi	6
3.1.2. Variazioni attese del pericolo climatico	15
3.1.3. Variazione negli estremi climatici	18
3.2 Gli impatti sull'economia	28
3.2.1 Introduzione	28
3.2.2 Il turismo	29
3.2.3 L'agricoltura	30
3.2.4 Il settore energetico	31
3.2.5 Il settore industriale e i trasporti	31
3.2.6 Commercio internazionale, crescita e occupazione	32
3.3 Gli impatti sulla società	36
3.3.1 Salute	36
3.3.2 Immigrazione	37
3.3.3 Povertà, disuguaglianza e distribuzione della ricchezza	38
3.4 Conclusioni	39
Bibliografia	43

Introduzione

Questo capitolo descrive l'evoluzione spaziale e temporale delle condizioni climatiche attese sull'area italiana utilizzando diversi scenari di cambiamento climatico. In particolare, a valle di un'introduzione sulla metodologia utilizzata, vengono valutati alcuni indicatori che descrivono specifiche caratteristiche del clima ritenute rilevanti per gli impatti che possono determinare danni e rischi sulle infrastrutture di interesse (Sezione 3.1). Danni e rischi che saranno poi esaminati in dettaglio nel capitolo 4 sulla base degli scenari identificati in questo capitolo.

Oltre agli impatti fisici dei cambiamenti climatici, il capitolo contiene anche una valutazione economica dei rischi associati a tali variazioni climatiche e degli impatti sui settori economici chiave per l'Italia (Sezione 3.2). La quantificazione degli impatti sulle infrastrutture e la loro valutazione economica verrà esaminata in modo specifico nel capitolo 4.

3.1 Analisi e valutazione del pericolo climatico

3.1.1. Contesto e metodi

Come riportato dall'ampia letteratura dell'IPCC, il cambiamento climatico di natura antropica induce variazioni complesse delle caratteristiche del clima su diverse scale spaziali e temporali. Infatti, esso è influenzato sia dalla frequenza, intensità, estensione spaziale, dal periodo temporale dei fenomeni atmosferici estremi localizzati nello spazio e nel tempo (meteorologici) sia, al contempo, da fenomeni, quali l'innalzamento del livello del mare, che interessano scale spazio-temporali più lunghe (climatici)¹. Quando tali variazioni delle diverse caratteristiche del clima assumono un'entità tale da poter causare degli impatti negativi sui sistemi ambientali e socioeconomici, vengono tipicamente definiti "pericoli climatici".

Pertanto, i pericoli climatici costituiscono un elemento fondamentale per lo studio e la valutazione del rischio climatico, dato dal prodotto complesso dell'interazione tra vulnerabilità (quanto un sistema umano e naturale è suscettibile a subire impatti negativi dei cambiamenti climatici), esposizione (ovvero la presenza di persone, ecosistemi, servizi, infrastrutture, attività socio-economiche e culturali, che possono essere esposti agli impatti negativi dei cambiamenti climatici), ed, infine, dal pericolo climatico stesso (Collin et al., 2019). In particolare, comprendere le

¹https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SREX-Chap3_FINAL-1.pdf

caratteristiche del pericolo climatico (che possono essere controintuitive e complesse) è fondamentale per una corretta e adeguata definizione delle strategie di adattamento².

Nel recente IPCC AR6 si afferma che è oramai un fatto accertato (*undisputable*) che le emissioni antropiche di gas serra causate dall'uomo abbiano portato ad un aumento della frequenza di alcuni eventi meteorologici e climatici estremi, come suggerito da diversi sistemi di osservazioni (Easterling et al., 2000). A causa degli ingenti impatti che tali estremi possono determinare, appare quindi necessario sviluppare una valutazione quantitativa della loro evoluzione nello spazio e nel tempo, così da poter effettuare accurate analisi di adattamento e di rischio (GIZ 2017; Collin et al., 2019; EEA 2021).

Nello specifico, per caratterizzare l'evoluzione spaziale e temporale dei pericoli climatici, vengono solitamente utilizzati una serie di indicatori climatici che sintetizzano alcuni delle caratteristiche degli eventi estremi (es. frequenza, intensità, durata) che si intendono monitorare anche sulla base di quanto approfondito da precedenti studi di letteratura osservando le caratteristiche degli eventi atmosferici estremi verificatisi che hanno prodotto importanti impatti sul territorio.

Di seguito sono analizzati alcuni indicatori di pericolo climatico selezionati sulla base di un'approfondita letteratura scientifica e che risultano particolarmente efficaci nel rappresentare eventi estremi di interesse; tra i quali, ad esempio, le ondate di caldo, gli incendi e le alluvioni. La loro valutazione rappresenta un primo passo per individuare priorità e strategie di intervento a livello di macroaree nazionali.

Gli impatti fisici ed economici che tali pericoli climatici possono causare sulle infrastrutture del Paese sono analizzati nel successivo capitolo 4. Il set di indicatori di estremi climatici analizzati è riportato in Tabella 1.

²<https://www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation/>

Pericolo	Acronimo, definizione indicatore climatico ed unità di misura della variazione climatica	Riferimenti
Ondate di freddo	CSDI (giorni): <i>Indice di durata dei periodi di freddo</i> - Media annuale del numero di giorni in cui la temperatura minima giornaliera è inferiore al 10° percentile* della temperatura minima giornaliera per almeno 6 giorni consecutivi.	ETCCDI
	TR100WETSNOW (giorni): <i>Eventi di neve umida</i> con un tempo di ritorno a 100 anni nella stagione invernale- Numero di giorni con temperatura massima giornaliera tra 0°C e 1.5°C e con precipitazione giornaliera maggiore di 10 mm.	Bonelli et al., 2011; Llasat et al., 2014
Ondate di caldo	WSDI (giorni): <i>Indice di durata dei periodi di caldo</i> - Media annuale del numero di giorni in cui la temperatura massima giornaliera è superiore al 90° percentile* della temperatura massima giornaliera per almeno 6 giorni consecutivi.	ETCCDI
Siccità	SPI3 (%): Indice standardizzato di precipitazione per periodi di 3 mesi - Percentuale dell'occorrenza delle classi (severamente asciutto, estremamente asciutto) nell'indice SPI3 calcolato per il periodo di accumulo più corto (3 mesi).	McKee et al. (1993)
Incendi	FWI(%): Indice di pericolo incendio (basato su velocità massima del vento, umidità relativa, precipitazione cumulata, temperatura). Tale indice prevede il calcolo di 5 sottoindici: tre sottoindici primari (FFMC, DMC, DC) che rappresentano l'umidità del combustibile; due sottoindici intermedi (ISI, BUI) che rappresentano il tasso di dispersione ed il consumo del combustibile disponibile.	Van Wagner, 1987
Tempeste di vento	EWS (%): 98° percentile della velocità massima giornaliera del vento giornaliera.	EEA, 2017
	TR50WSMAX (%): Percentile corrispondente a un tempo di ritorno di 50 anni per la velocità massima giornaliera del vento.	
Inondazioni costiere	TR10TWL (m): Percentile corrispondente a un tempo di ritorno di 10 anni per il livello idrico complessivo (che tiene conto di maree, mareggiate e innalzamento del livello del mare).	Water level change indicators for the European coast from 1977 to 2100 derived from climate projections (copernicus.eu)
	TR100TWL (m): Percentile corrispondente a un tempo di ritorno di 100 anni per il livello idrico complessivo (che tiene conto di maree, mareggiate e innalzamento del livello del mare).	Water level change indicators for the European coast from 1977 to 2100 derived from climate projections (copernicus.eu)
Allagamenti, esondazioni fluviali, frane ed erosione del suolo	TR20FD (%): Percentile corrispondente a un tempo di ritorno di 20 anni per il massimo annuale di portata giornaliera dei corsi d'acqua	https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-hydrology-variables-derived-projections?tab=form
	TR100FD (%): Percentile corrispondente a un tempo di ritorno di 100 anni per il massimo annuale di portata giornaliera dei corsi d'acqua	https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-hydrology-variables-derived-projections?tab=form
	SDII (%): Precipitazione media giornaliera nei giorni di precipitazione maggiore o uguale a 1mm.	ETCCDI
	RX1DAY (%): Media annuale della massima precipitazione in 1-giorno.	ETCCDI
	R20 (giorni): Numero di giorni con precipitazione superiore a 20 mm.	ETCCDI
	TR10PR (%): Percentile corrispondente a un tempo di ritorno di 10 anni per il massimo annuale di precipitazione giornaliera.	https://hypeweb.smhi.se/explore-water/climate-change-data/europe-climate-change/
	TR100PR (%): Percentile corrispondente a un tempo di ritorno di 100 anni per il massimo annuale di precipitazione giornaliera.	https://hypeweb.smhi.se/explore-water/climate-change-data/europe-climate-change/
R-factor (MJ·mm·ha⁻¹·h⁻¹·yr⁻¹): R-factor medio annuo (ovvero "Rainfall Erosivity Factor" dell'equazione RUSLE) ricavato dai modelli empirici in Padulano et al. (2021a) come funzione della precipitazione media annua.	Padulano et al., 2021a	

Tabella 1: Indicatori utilizzati per l'analisi pericoli climatici considerati

Tali indici sono stati calcolati in termini di variazione tra un periodo futuro ed un periodo di riferimento, sulla base di differenti scenari di concentrazione utilizzando molteplici modelli climatici. Le metodologie utilizzate sono illustrate brevemente nei paragrafi successivi.

Scenari di emissione e concentrazione³

Le variazioni climatiche sono state valutate per due diversi scenari di concentrazione definiti nell'ambito del quinto rapporto di valutazione dell'IPCC (IPCC AR5) e ripresi anche nel sesto rapporto (IPCC AR6):

- **RCP (Reference Concentration Pathway) 4.5.** È lo scenario che rappresenta l'evoluzione tendenziale sulla base delle politiche adottate negli ultimi anni in molti paesi e sulla base degli impegni (NDCs) sottomessi a Parigi nel 2015 dai paesi firmatari dell'accordo di Parigi. Questo scenario assume che vengano intraprese iniziative mirate per controllare il livello di emissioni presenti. È considerato uno scenario di stabilizzazione in base al quale si presume che la concentrazione atmosferica si stabilizzi entro la fine del secolo a circa il doppio dei livelli preindustriali. L'incremento di temperatura coerente con questo scenario è di circa 3 gradi a fine secolo (rispetto ai livelli pre-industriali, circa 2°C rispetto ad oggi).
- **RCP (Reference Concentration Pathway) 2.6.** È invece lo scenario obiettivo, che permetterebbe di contenere l'incremento di temperatura entro livelli compatibili con la sopravvivenza della specie umana e della maggior parte degli ecosistemi viventi sul pianeta. Questo scenario assume strategie di mitigazione "aggressive/immediate" ed ambiziose per cui le emissioni di gas serra si avvicinano allo zero più o meno in 50 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 (1°C rispetto ad oggi), realizzando quindi quanto concordato nell'accordo di Parigi.

Non è stato invece considerato lo scenario RCP 8.5, caratterizzato dal verificarsi di un consumo intensivo di combustibili fossili e dalla mancata adozione di qualsiasi politica di mitigazione con un conseguente innalzamento della temperatura globale pari a +4-5°C rispetto ai livelli preindustriali atteso per la fine del secolo. Secondo Hausfather & Peters (2020), tale scenario era stato inizialmente definito per studiare un improbabile futuro caratterizzato dalle peggiori condizioni possibili in termini di emissioni, utile per permettere agli studiosi di trarre conclusioni relative a condizioni estreme. Fortunatamente, questo scenario con il passare degli anni sta diventando sempre meno plausibile, come testimoniato da diversi fattori, tra i quali la diminuzione del costo delle energie "pulite" e la stabilizzazione del consumo di carbone. Al momento, sulla base delle politiche di mitigazione in atto, le stime disponibili suggeriscono che sia da attendersi un incremento, per fine secolo, di +2.7°C - 3°C rispetto ai livelli

³IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri, and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

preindustriali, coerente come detto con lo scenario RCP4.5 (intervallo atteso per questo scenario tra 1.7 e 3.2°C, vedi Fuss et al., 2014), comunque preoccupante, ma ben lontano dall'incremento di +5°C atteso secondo lo scenario RCP 8.5 (Hausfather & Peters, 2020). Gli impatti dei cambiamenti climatici nello scenario "business as usual" o "in assenza di ulteriori azioni" sono quindi calcolati nello scenario climatico RCP 4.5. Nel caso invece di adozioni di policy efficaci nel contenere l'incremento di temperatura tra 1.5°C e 2°C, lo scenario climatico di riferimento è l'RCP 2.6.

Va sottolineato che gli incrementi di temperatura sopra riportati, associati agli scenari RCP 2.6 e RCP 4.5, sono da intendersi valori di aumento medio a livello mondiale, mentre a livello europeo e italiano sono previsti essere leggermente superiori, come si evince dalle elaborazioni proposte in Figura 1 (che prendono come riferimento il periodo 1971-2000).

Modelli climatici regionali

Per il presente studio si sono utilizzate simulazioni di modelli climatici regionali che sono parte del programma EURO-CORDEX <https://www.euro-cordex.net/>; (Hennemuth et al., 2017; Jacob et al., 2020). L'utilizzo di modelli climatici regionali, caratterizzati da una risoluzione spaziale di circa 10 km, permette di rappresentare con maggiore accuratezza i processi climatici a scala locale rispetto a modelli di circolazione globale, caratterizzati invece da risoluzione dell'ordine di circa 50 km. È importante sottolineare che il diverso numero di modelli (9 per lo scenario RCP 2.6 e 18 per lo scenario RCP 4.5) porta talvolta a valutazioni che vedono lo scenario RCP 2.6 più estremo, in particolare su scala annuale. L'impiego di un insieme di modelli climatici regionali offre l'opportunità di valutare il valore medio (denominato spesso "ensemble mean"), ottenuto a partire dai valori dei singoli modelli che rappresentano l'ensemble, ma anche la dispersione dei singoli modelli intorno a questo valore medio. Conoscere tale dispersione è molto importante per una valutazione dell'accordo tra i modelli nella valutazione dell'indicatore e quindi stimarne l'incertezza che origina dal segnale climatico. Nel seguito, la dispersione verrà quantificata attraverso il calcolo della deviazione standard: in altre parole, per ogni punto del dominio, quanto più è basso il valore di deviazione standard tanto più sarà elevato il grado di accordo tra i modelli climatici dell'ensemble EURO-CORDEX, e viceversa (Von Trentini et al., 2019). Per ciascun indicatore analizzato, dunque, gli effetti del cambiamento climatico verranno rappresentati attraverso le variazioni medie attese in futuro e corredati dall'informazione relativa all'incertezza, per ciascun orizzonte temporale e per ciascuno scenario di concentrazione considerato.

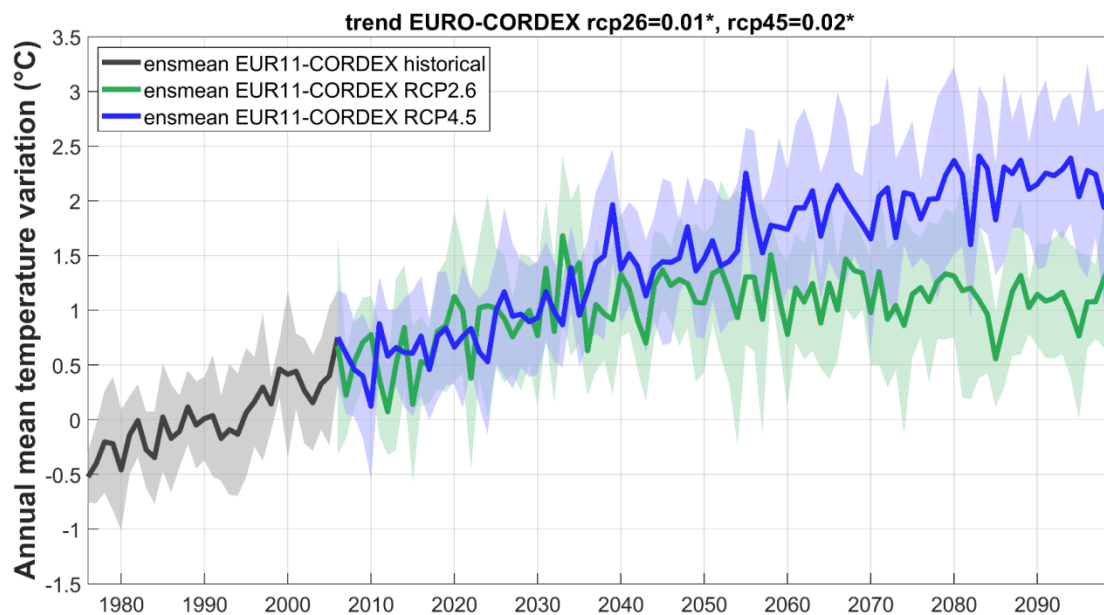


Figura 1: Anomalie annuali di temperatura media (°C) su scala nazionale ottenute a partire dai modelli EURO-CORDEX, considerando il periodo storico (in grigio) e gli scenari RCP4.5 (in blu) e RCP2.6 (in verde). Le anomalie annuali sono calcolate rispetto al valore medio del periodo di riferimento 1976-2005. La linea spessa scura indica la proiezione climatica media (ensemble mean), calcolata mediando i valori annuali di tutte le simulazioni considerate per ogni scenario di concentrazione; le aree ombreggiate rappresentano il range ottenuto sommando e sottraendo all'ensemble mean la deviazione standard dei valori simulati dai modelli e forniscono una misurazione dell'incertezza delle proiezioni.

Analisi delle variazioni climatiche

Le analisi delle variazioni climatiche fanno riferimento per la maggior parte a 2 differenti periodi: la finestra temporale centrata intorno al 2030⁴ (2016-2045) e quella centrata sul 2050⁵ (2036-2065). Le variazioni sono valutate rispetto al periodo di riferimento (1981-2010)⁶.

La valutazione delle variazioni di medie climatologiche e di estremi climatici, definiti in Tabella 1, è effettuata per questi due periodi, tramite l'utilizzo di modelli climatici regionali⁷. Lo studio del clima implica, per definizione, l'utilizzo di lunghe serie

⁴ tale finestra temporale di seguito è talvolta denominata 2030s per brevità

⁵ tale finestra temporale di seguito è talvolta denominata 2050s per brevità

⁶ L'utilizzo di finestre temporali di 30 anni è consistente con la letteratura di riferimento e considerata adeguata ad analisi statistiche sulle variazioni del clima (WMO,2007)

⁷ Con tale terminologia si intende che gli indicatori riportati in Tabella 1 sono valutati in ciascuno dei due trentenni futuri considerati, centrati intorno all'anno 2030 (2016-2045) e 2050 (2036-2065), in termini di valore medio sul trentennio. Per quanto riguarda invece gli indicatori basati sul tempo di ritorno, essi sono estrapolati da un'analisi statistica effettuata sul campione trentennale. Successivamente, il valore dell'indicatore così ottenuto viene confrontato con il valore corrispondente al clima di riferimento, calcolato sul periodo 1981-2010.

temporali; in particolare, il WMO (WMO, 2007) stabilisce in 30 anni la lunghezza minima su cui effettuare delle analisi statistiche che possano essere considerate rappresentative del clima. Per questo motivo, le variazioni del clima futuro rispetto al clima di riferimento sono ottenute confrontando periodi di 30 anni. Le variazioni climatiche sono state valutate per i due diversi scenari RCPs già descritti nella sezione (“scenari di emissione e concentrazione”).

È importante sottolineare in un contesto climatico complesso (quale quello italiano) spesso gli indicatori riportano andamenti di segno opposti sulle diverse stagioni: per questo motivo di seguito, laddove ritenuto necessario, sono state eseguite anche analisi su scala stagionale in modo da evidenziare tali andamenti che, compensandosi su scala annuale, possono portare ad errori di interpretazione. Va comunque sottolineato che su scala locale la complessità dei fenomeni considerati può portare talvolta a tali risultati non facilmente intuibili.

L’analisi degli indicatori rappresentativi dei fenomeni di inondazione costiera ed esondazione fluviale presenta alcuni elementi caratteristici, in termini di finestre temporali, modelli e scenari utilizzati. Gli indicatori climatici di inondazione costiera sono stati derivati dal dataset di variazioni di livello idrico disponibile all’interno della piattaforma Copernicus C3S⁸. In particolare, sulla base della disponibilità dei dati, vengono qui riportate le analisi climatiche per la finestra temporale 2071-2100 utilizzando lo scenario di concentrazione RCP 4.5.

Gli indicatori di esondazione fluviale (indicatori identificati dall’acronimo TR20FD e TR100FD) sono stati valutati a partire dalle proiezioni di portata fluviale media giornaliera ottenute dall’applicazione di due modelli idrologici che utilizzano in input proiezioni di precipitazione derivanti da un ristretto ensemble di modelli climatici, sui quali è stata effettuata una operazione di correzione dell’errore sistematico tramite il confronto con i dati osservati⁹. Le proiezioni di portata giornaliera sono disponibili sotto forma di dataset grigliato, alla risoluzione spaziale di 5 km.

Confronto con gli scenari di concentrazione aggiornati (AR6)

Recentemente sono state prodotte simulazioni di modelli globali di circolazione sulla base di alcuni dei nuovi scenari di concentrazione definiti nell’AR6 (Sesto rapporto di valutazione dei cambiamenti climatici prodotto dell’IPCC) e utilizzati nel progetto CMIP6 (Coupled Model Inter-comparison Project Phase 6)¹⁰. Questa nuova serie di scenari di emissione di gas climalteranti è guidata da diverse ipotesi socioeconomiche, i cosiddetti “Percorsi socioeconomici condivisi” (SSP), sulla cui base è ora possibile

⁸<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-water-level-change-indicators?tab=overview>

⁹Per maggiori dettagli sul dataset e sulla correzione apportata si veda <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-hydrology-variables-derived-projections?tab=overview>. Si specifica che tale operazione di correzione del bias non è stata effettuata per la valutazione di tutti gli altri indicatori riportati in questo lavoro.

¹⁰<https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6>

effettuare una valutazione dei cambiamenti climatici attesi per la fine del secolo. I principali scenari aggiornati sono chiamati SSP 1-2.6, SSP 2-4.5, SSP 4-6.0 e SSP 5-8.5. Gli SSP sono stati sviluppati per integrare gli scenari RCP definiti in AR5, e basati su cinque «narrazioni» che descrivono futuri alternativi socioeconomici. In particolare, nella Figura 2 vengono mostrati i risultati ottenuti confrontando lo scenario RCP 2.6 con SSP 1-2.6 (definito scenario di sviluppo sostenibile) e lo scenario RCP 8.5 con quello che prevede le emissioni maggiori in AR6, ovvero lo scenario SSP 5-8.5 (scenario che rappresenta un'economia mondiale in crescita fortemente dipendente dai combustibili fossili). Quest'ultimo scenario è altamente improbabile e viene qui considerato solo per mostrare la corrispondenza tra RCPs e SSPs.

Purtroppo, non sono ancora disponibili simulazioni di modelli climatici **regionali** con i nuovi scenari proposti nell'IPCC AR6. Pertanto, nel presente documento saranno mostrate analisi unicamente ottenute a partire dagli scenari definiti dall'AR5 (Quinto rapporto di valutazione dei cambiamenti climatici prodotto dell'IPCC) e utilizzati nel progetto CMIP5 (Coupled Model Inter-Comparison Project Phase 5)¹¹. Ma il margine di errore è molto piccolo, come evidenziato nella Figura 2 che confronta le traiettorie future di temperatura superficiale e precipitazione annuale valutate sul territorio nazionale utilizzando i modelli globali disponibili nei progetti CMIP5 e CMIP6, al variare dei diversi scenari.

¹¹<https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip5>

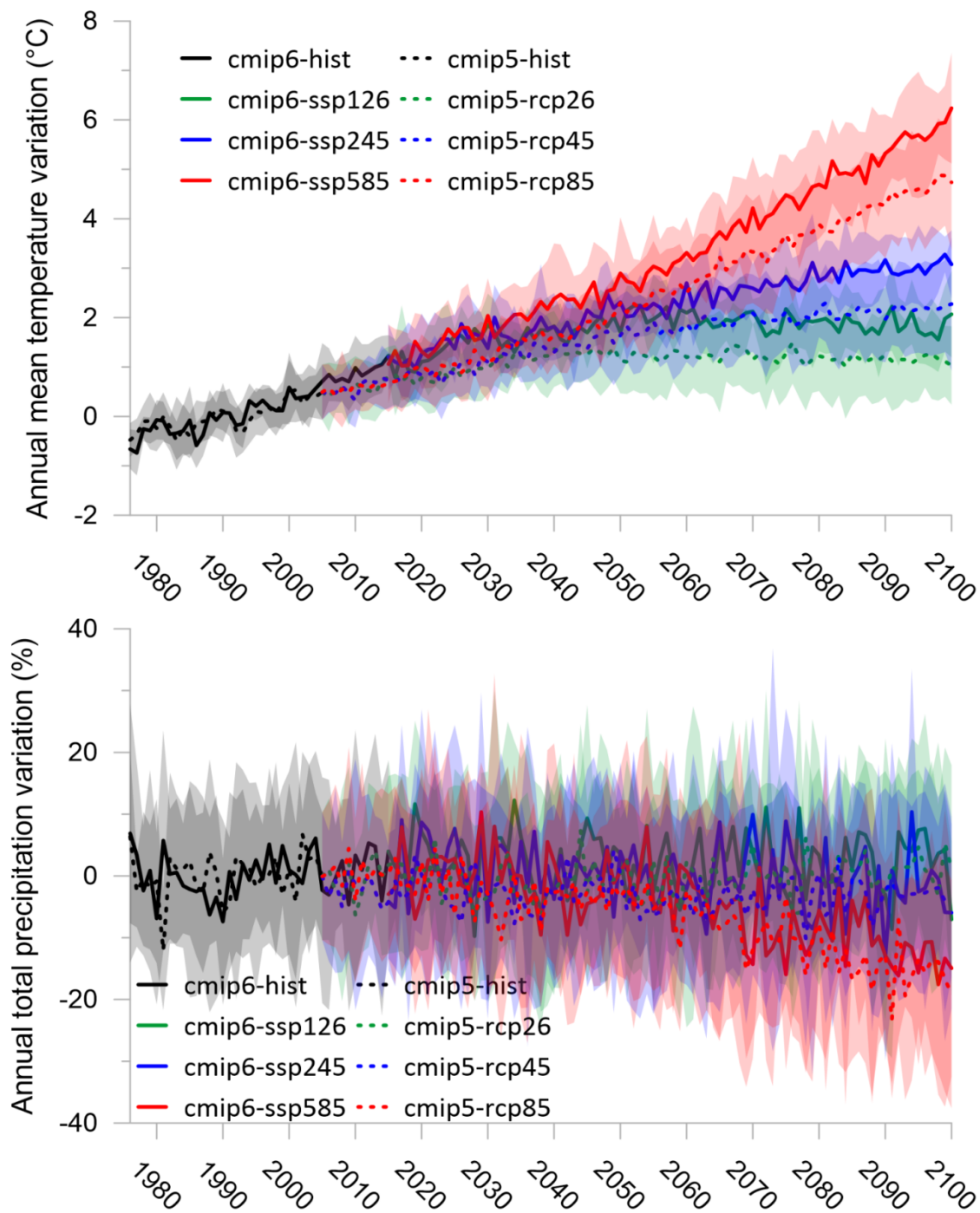


Figura 2: Anomalie annuali di temperatura superficiale e di precipitazione cumulata su scala nazionale ottenute a partire dai dati simulati dei modelli globali di circolazione elaborati nei progetti CMIP5 e CMIP6. Le anomalie annuali sono calcolate rispetto al valore medio del periodo di riferimento 1976-2005. La linea spessa scura (nel caso dei modelli CMIP5) e il tratteggio (nel caso dei modelli CMIP6) indicano la proiezione climatica media (ensemble mean), calcolata mediando i valori annuali di tutte le simulazioni considerate per ogni scenario di concentrazione; le aree ombreggiate rappresentano il range ottenuto sommando e sottraendo all'ensemble mean la deviazione standard dei valori simulati dai modelli e forniscono una misurazione dell'incertezza delle proiezioni.

3.1.2. Variazioni attese del pericolo climatico

La Figura 3 riporta le variazioni annuali per la precipitazione totale e la temperatura media su scala annuale. Tale analisi evidenzia **un generale aumento delle temperature per entrambi gli scenari considerati** (RCP 2.6 e RCP 4.5), più pronunciato nel periodo a medio termine (2050s) e, considerando lo scenario RCP 4.5, con un incremento fino a 2°C. Le variazioni in media e la dispersione dei modelli attorno al valore medio (maggior incertezza tra i modelli nella valutazione dell'indicatore) appaiono leggermente maggiori per le aree del nord Italia (Figura 3).

Per quanto riguarda le precipitazioni, invece, le proiezioni indicano per il sud Italia, in particolare per lo scenario RCP 4.5, una diminuzione delle precipitazioni complessive annue. Nello specifico, lo scenario RCP 4.5 proietta una generale riduzione nel sud Italia e in Sardegna (fino al 14% nel 2050s) e un leggero aumento nelle aree geografiche Nord-Ovest e Nord-Est (Figura 3). Lo scenario RCP 2.6, invece, proietta un aumento rilevante delle precipitazioni sul nord Italia e una lieve riduzione al sud. In generale, la stima delle variazioni di precipitazione, sia in senso spaziale che temporale, è più incerta di quella delle variazioni della temperatura essendo le precipitazioni già soggette a forti variazioni naturali (MATTM, SNACC, Rapporto sullo stato delle conoscenze, 2014). Come mostrato in Figura 3, si osserva infatti una maggiore dispersione (espressa in termini di deviazione standard) intorno ai valori medi per le variazioni di precipitazione rispetto a quelle di temperatura. Tali incertezze appaiono particolarmente pronunciate nel nord Italia, secondo lo scenario RCP 2.6.

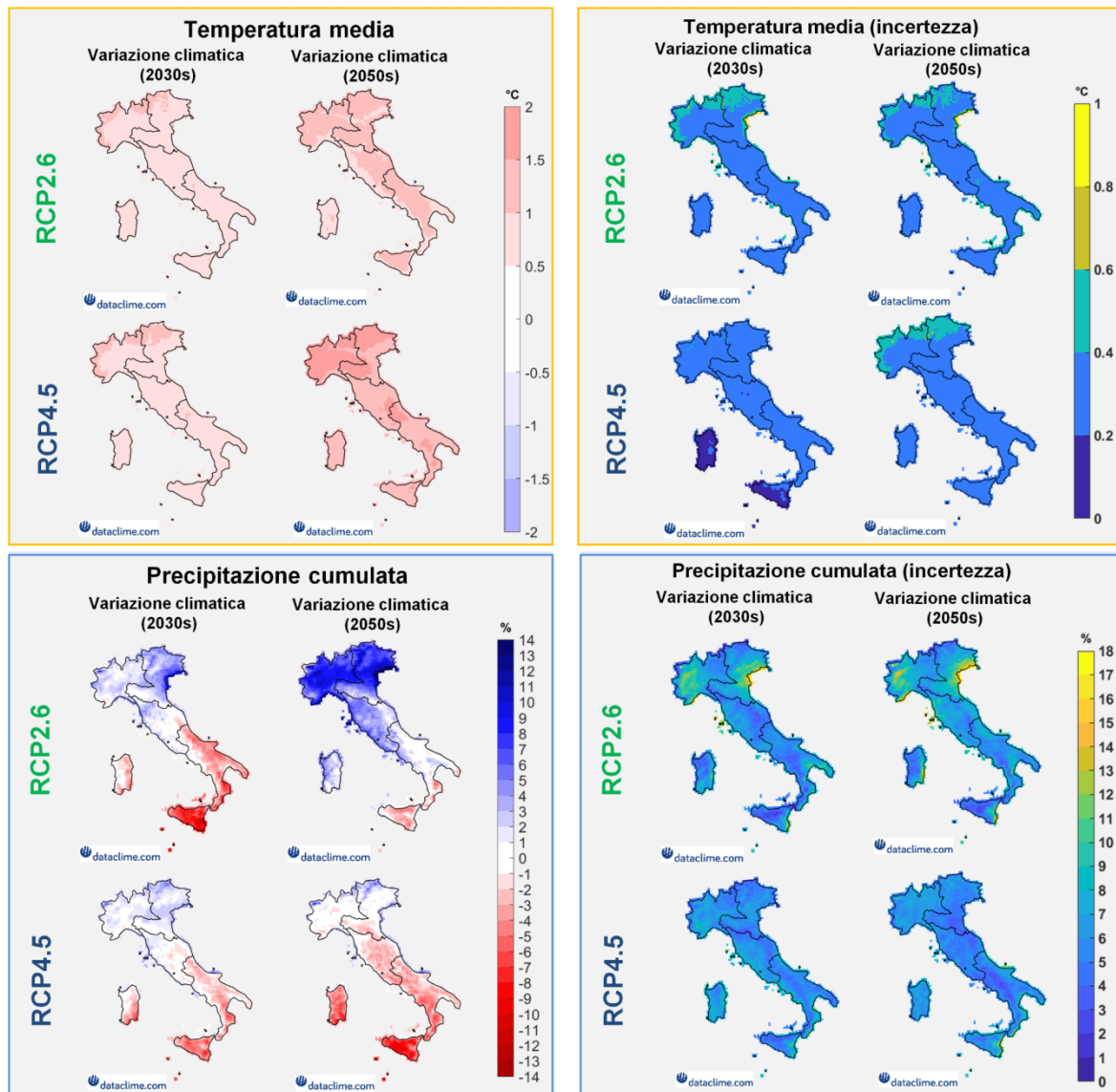


Figura 3: Variazioni climatiche annuali delle temperature medie e delle precipitazioni cumulate medie per i periodi 2016-2045 (2030s) e 2036-2065 (2050s), rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP 2.6 e RCP 4.5. I valori sono espressi in termini di media e deviazione standard (dispersione attorno al valore medio) calcolati sull'insieme dei modelli climatici regionali.

Variazione della precipitazione stagionale (%)

	RCP2.6				RCP4.5				
	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	
Nord-Ovest	1	2	-2	6	7	0	1	0	2030s
	9	1	3	3	12	-3	-6	0	2050s
Nord-Est	4	3	-5	9	6	0	-1	1	2030s
	8	2	1	3	8	-1	-7	2	2050s
Centro	0	-1	-7	8	4	-1	-7	2	2030s
	4	-1	-1	3	3	-5	-14	2	2050s
Sud	-4	-5	-7	4	-1	-3	-8	4	2030s
	0	-5	-2	4	-3	-6	-12	5	2050s
Isole	-6	-9	-1	3	-3	-7	-2	1	2030s
	0	-9	6	3	-5	-11	-10	0	2050s

Stima dell'incertezza per la precipitazione stagionale (%)

	RCP2.6				RCP4.5				
	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	
Nord-Ovest	9	5	7	10	9	8	6	9	2030s
	10	8	7	12	11	6	9	9	2050s
Nord-Est	8	6	10	10	10	6	7	8	2030s
	11	6	8	10	7	6	10	8	2050s
Centro	10	3	11	8	10	6	10	11	2030s
	10	5	13	9	6	7	12	9	2050s
Sud	8	3	15	4	6	7	13	10	2030s
	6	6	16	9	4	7	16	10	2050s
Isole	6	5	14	5	6	8	16	8	2030s
	6	8	22	8	4	9	17	8	2050s

Variazione della temperatura stagionale (°C)

	RCP2.6				RCP4.5				
	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	
Nord-Ovest	1	0.7	1.1	1	1.1	0.8	1.1	1	2030s
	1.1	0.8	1.1	1	1.6	1.2	1.9	1.5	2050s
Nord-Est	0.9	0.7	1.1	0.9	1	0.8	1.1	0.9	2030s
	1	0.8	1	1.4	1.6	1.2	1.9	1.4	2050s
Centro	0.7	0.7	1.1	1	0.9	0.7	1.2	0.9	2030s
	0.8	0.8	1.1	0.9	1.4	1.1	2	1.4	2050s
Sud	0.7	0.8	1.1	0.9	0.9	0.7	1.2	0.8	2030s
	0.8	0.8	1.1	0.9	1.4	1.2	2	1.3	2050s
Isole	0.6	0.7	1	0.9	0.8	0.7	1.2	0.8	2030s
	0.8	0.8	1.1	0.9	1.3	1.2	1.9	1.3	2050s

Stima dell'incertezza per la temperatura stagionale (°C)

	RCP2.6				RCP4.5				
	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	
Nord-Ovest	0.4	0.4	0.4	0.5	0.3	0.3	0.2	0.4	2030s
	0.3	0.3	0.3	0.4	0.5	0.3	0.5	0.4	2050s
Nord-Est	0.3	0.4	0.4	0.5	0.3	0.3	0.2	0.4	2030s
	0.3	0.3	0.2	0.4	0.5	0.3	0.5	0.4	2050s
Centro	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.4	2030s
	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	2050s
Sud	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	2030s
	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	2050s
Isole	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	2030s
	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	2050s

Tabella 2: Nelle tabelle nella prima colonna è riportata la variazione per le diverse macroaree identificate delle variazioni di temperatura media e precipitazione su scala stagionale (DJF: inverno; MAM: primavera; JJA: estate; SON: autunno) per il periodo centrato su 2050 (2036-2065) e 2030 (2016-2045); nella seconda colonna viene invece riportata una stima dell'incertezza (tramite il calcolo della deviazione standard) per la temperatura media e precipitazione stagionale riportate nella prima colonna. I colori della tabella sono da intendersi in modo qualitativo: per variazione di precipitazione il colore dal blu chiaro indica variazioni basse di segno positivo fino ad arrivare al blu intenso che indica le variazioni maggiori con segno positivo. Per la variazione di temperatura media il rosa indica le variazioni minori mentre il colore rosso quelle di intensità maggiore. Per l'incertezza il verde indica valori bassi incertezza mentre rispettivamente arancione e rosso valori medi e più elevati di incertezza.

In termini di variazioni stagionali (come riportato in tabella 2) per la precipitazione, è atteso per le aree geografiche centro-nord un aumento delle precipitazioni invernali in entrambi gli scenari considerati, e in maniera più pronunciata per lo scenario RCP 4.5 (+10% rispetto al periodo di riferimento).

Al contrario, è attesa una riduzione generale delle precipitazioni primaverili ed estive in particolare per le aree del centro-sud e, specificatamente per lo scenario RCP 4.5 nel 2050. In termini di temperatura, è atteso un generale aumento con intensità crescente nel 2050 (2036-2065) e maggiore se si considera lo scenario RCP 4.5. Considerando entrambi gli scenari, l'incremento maggiore è atteso in estate per tutte le aree geografiche; in particolare con lo scenario RCP 4.5 nel 2050 (2036-2065), si raggiunge mediamente un aumento dei valori di temperatura anche superiore a 2°C in estate, per le aree del centro-sud.

3.1.3. Variazione negli estremi climatici

Il cambiamento climatico ha effetti alteranti sul regime idrometeorologico e, dunque, sulla disponibilità idrica per i sistemi di approvvigionamento e le reti di distribuzione agricole, urbane e industriali. Le proiezioni climatiche restituiscono andamenti crescenti per la temperatura e decrescenti per le precipitazioni (in particolare per il sud Italia).

Le proiezioni climatiche indicano anche un aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi atmosferici estremi (piene, siccità, e ondate di caldo) a cui corrisponderà un'accelerazione del ciclo idrologico con l'aumento delle portate invernali, la diminuzione di quelle estive, e, nei bacini alpini e subalpini, l'anticipo dello scioglimento nivale e quindi del picco estivo e un parziale sostegno delle portate estive tramite fusione glaciale fino a poco oltre metà secolo (Gobiet et al., 2014).

Tra questi fenomeni, quelli con un maggiore impatto potenziale sulle risorse idriche e sulle infrastrutture che le trasportano possono essere individuati tra quelli considerati in letteratura per la formulazione di indici di estremi climatici (Mysiak et al., 2018): (i) ondate di caldo e siccità (periodi con prolungati picchi di temperatura e carenza di pioggia) (Coppola et al., 2018), (ii) ondate di freddo e di gelo (Coppola et al., 2018), (iii) eventi estremi di precipitazione, con conseguenti piene e allagamenti (Diodato et al., 2019), e (iv) frane e colate detritiche (Libertino et al., 2019).

L'evoluzione attesa per questi fenomeni in relazione ai cambiamenti climatici determinerà un aumento della componente di pericolosità del rischio legato ai diversi tipi di infrastrutture. A tal scopo, le analisi dei cambiamenti climatologici attesi in precipitazione e temperatura sono state integrate con una valutazione delle variazioni di indicatori di estremi climatici, presentati nella Tabella 1 e tipicamente utilizzati per comprendere l'evoluzione di specifici pericoli climatici. Di seguito viene riportata una sintesi dei risultati restituiti da tale analisi.

Ondate di caldo e incendi

In particolare, le proiezioni climatiche riportano su tutto il territorio nazionale una riduzione generale delle ondate di freddo, con variazioni più pronunciate nelle regioni del nord Italia. Al contrario, per le ondate di caldo è invece atteso un aumento generale che interessa tutta la penisola, con variazioni più sostanziali sul versante tirrenico e nell'area alpina (WSDI, Figura 4). Sia per le ondate di freddo che per quelle di caldo, le variazioni maggiori si registrano per l'orizzonte temporale 2050 nello scenario RCP4.5. Per quanto attiene l'indicatore utilizzato per le siccità esso presenta un lieve aumento su buona parte del territorio con limitate differenze nel segnale climatico per le differenti finestre temporali e scenari di concentrazione considerati (SPI-3, Figura 4).

Per quanto attiene gli impatti del cambiamento climatico sul regime degli incendi, si vede un incremento su tutta l'area nazionale (FWI, Figura 4) con un forte aumento previsto nel 2050 nello scenario RCP 4.5.

Tempeste di vento

Le tempeste di vento mostrano un lieve aumento (fino al 16% per lo scenario RCP 4.5 e il periodo centrato sul 2050) per entrambi gli scenari e periodi futuri considerati su tutte le aree considerate; tuttavia, il segnale è caratterizzato da un'elevata incertezza (risultati non mostrati). Questo suggerisce la necessità di approfondimenti con analisi a scala locale anche supportate dall'utilizzo di dati osservati che possano individuare eventuali errori sistematici dei modelli climatici.

Precipitazioni intense

L'analisi delle variazioni attese per quanto attiene diverse caratteristiche delle precipitazioni intense è di grande interesse per lo studio di pericoli quali le esondazioni fluviali, gli allagamenti urbani e i dissesti geo-idrologici. Dall'analisi dei diversi indicatori considerati emerge come i modelli climatici mostrino un generale incremento dei valori massimi di pioggia giornaliera (RX1DAY) e degli eventi estremi di precipitazione (TR100PR) su tutto il territorio nazionale e in maniera più evidente per periodo 2050s nello scenario RCP4.5 (TR100PR e RX1DAY, Figura 4). Tali variazioni appaiono maggiori nel periodo invernale specialmente per le aree geografiche del centro-nord (Figura 5).

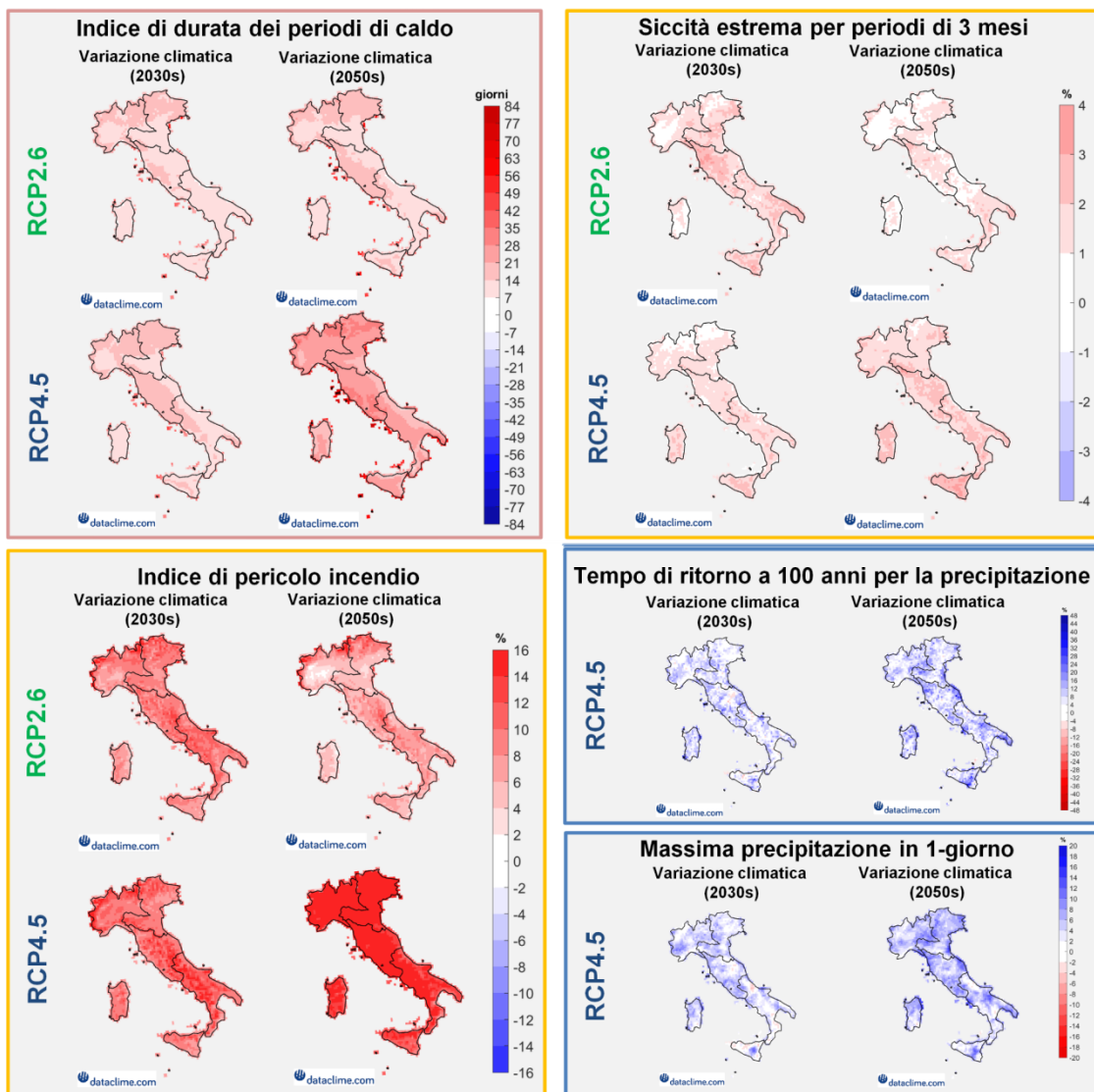


Figura 4: Variazioni climatiche annuali per alcuni degli indicatori climatici riportati in Tabella 1 per i periodi 2016-2045 (2030s) e 2036-2065 (2050s), rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP 2.6 e RCP 4.5.

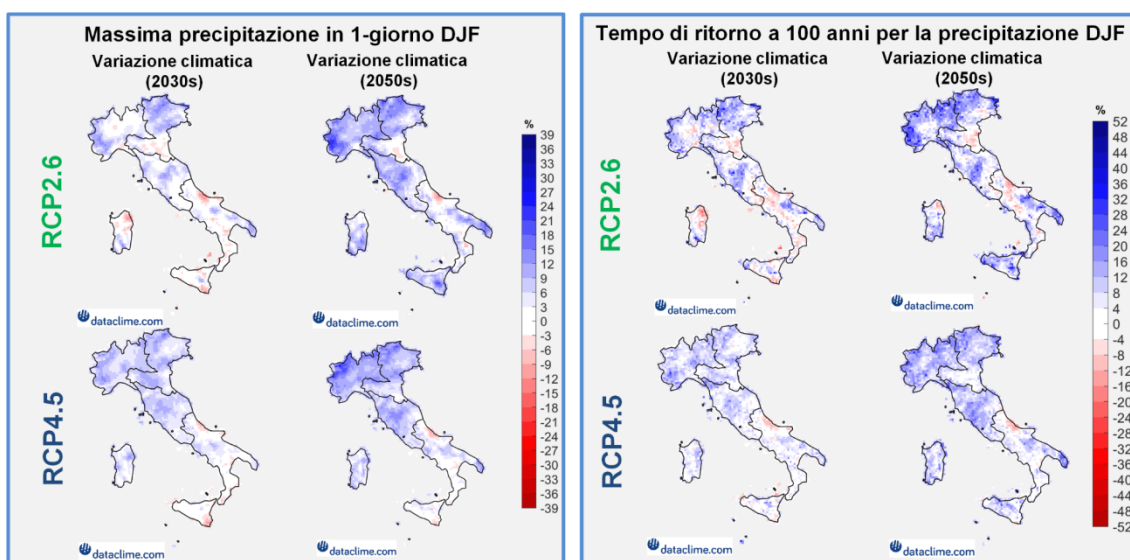


Figura 5: Variazioni climatiche su scala invernale degli indicatori climatici RX1DAY e TR100PR per i periodi 2016-2045 (2030s) e 2036-2065 (2050s), rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP 2.6 e RCP 4.5.

Indice di durata dei periodi di caldo

	Variazione climatica (giorni)		
	RCP2.6	RCP4.5	
Nord-Ovest	15	15	2030s
	15	28	2050s
Nord-Est	14	15	2030s
	13	28	2050s
Centro	14	15	2030s
	15	27	2050s
Sud	11	13	2030s
	13	23	2050s
Isole	11	13	2030s
	13	23	2050s

Siccità estrema per periodi di 3 mesi

	Stima dell'incertezza (giorni)		
	RCP2.6	RCP4.5	
Nord-Ovest	7	5	2030s
	6	10	2050s
Nord-Est	7	5	2030s
	6	9	2050s
Centro	6	5	2030s
	6	8	2050s
Sud	5	4	2030s
	5	6	2050s
Isole	4	3	2030s
	4	7	2050s

	Variazione climatica (%)		
	RCP2.6	RCP4.5	
Nord-Ovest	1	1	2030s
	1	2	2050s
Nord-Est	2	1	2030s
	1	2	2050s
Centro	2	1	2030s
	1	2	2050s
Sud	2	1	2030s
	1	2	2050s
Isole	1	2	2030s
	2	2	2050s

	Stima dell'incertezza (%)		
	RCP2.6	RCP4.5	
Nord-Ovest	2	1	2030s
	1	2	2050s
Nord-Est	2	1	2030s
	1	2	2050s
Centro	2	1	2030s
	1	2	2050s
Sud	1	1	2030s
	1	1	2050s
Isole	1	1	2030s
	1	1	2050s

Indice di pericolo incendio

	Variazione climatica (%)		
	RCP2.6	RCP4.5	
Nord-Ovest	9	10	2030s
	8	19	2050s
Nord-Est	9	10	2030s
	8	18	2050s
Centro	9	11	2030s
	8	18	2050s
Sud	9	11	2030s
	8	15	2050s
Isole	7	9	2030s
	6	13	2050s

	Stima dell'incertezza (%)		
	RCP2.6	RCP4.5	
Nord-Ovest	4	2	2030s
	5	3	2050s
Nord-Est	4	3	2030s
	5	3	2050s
Centro	5	2	2030s
	7	4	2050s
Sud	5	3	2030s
	7	3	2050s
Isole	4	2	2030s
	7	4	2050s

Tempo di ritorno a 100 anni per la precipitazione

	Variazione climatica (%)		
	RCP2.6	RCP4.5	
Nord-Ovest	6	6	2030s
	8	8	2050s
Nord-Est	8	6	2030s
	7	8	2050s
Centro	11	7	2030s
	10	10	2050s
Sud	5	6	2030s
	8	9	2050s
Isole	5	6	2030s
	9	10	2050s

	Stima dell'incertezza (%)		
	RCP2.6	RCP4.5	
Nord-Ovest	7	4	2030s
	5	5	2050s
Nord-Est	8	6	2030s
	6	7	2050s
Centro	9	6	2030s
	9	7	2050s
Sud	10	7	2030s
	8	9	2050s
Isole	9	7	2030s
	7	9	2050s

Tabella 3: Nelle diverse tabelle sono riportate le variazioni annuali per alcuni degli indicatori analizzati e sulle diverse macroaree identificate per il periodo centrato su 2050 (2036-2065) e 2030 (2016-2045); nella seconda colonna di ogni tabella viene invece riportata una stima dell'incertezza (tramite il calcolo della deviazione standard) per la temperatura media e precipitazione stagionale riportate nella prima colonna. I colori della tabella sono da interpretarsi in modo qualitativo: colori più intensi indicano variazioni maggiori mentre colori tenui indicano variazioni di intensità minore. Per la scala dell'incertezza si faccia riferimento alla tabella 2.

Inondazioni costiere

Per quanto concerne le inondazioni costiere, gli effetti del cambiamento climatico sono stati valutati considerando l'innalzamento atteso del livello del mare, tenendo inoltre conto dei fenomeni di mareggiata con periodo di ritorno pari a dieci e a cento anni. Tale indicatore (denominato con l'acronimo TR10TWL e TR100TWL) è messo a disposizione, in via semplificata, all'interno della piattaforma Copernicus C3S¹².

In questo caso, in base alla disponibilità del dato, è stato possibile valutare la variazione climatica solo per il percorso RCP 4.5 e per il periodo futuro 2071-2100 rispetto al periodo di riferimento 1977-2005. Come mostrato in Figura 6, le variazioni dei percentili corrispondenti ai tempi di ritorno di 10 e 100 anni per il livello idrico complessivo indicano un aumento generale. Nello specifico, la variazione dell'indice che tiene in conto fenomeni di mareggiata con periodo di ritorno pari a 10 anni (TR10TWL) rispetto alla condizione climatica attuale risulta di circa 50 cm nel Mar Tirreno e nell'alto Adriatico mentre risulta di circa 40 cm nel resto del mar Adriatico.

¹²Dataset "Water level change indicators for the European coast from 1977 to 2100 derived from climate projections" (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-water-level-change-indicators?tab=overview>)

Nel caso invece dei fenomeni di mareggiata più estremi (valutati tramite l'indice TR100TWL che tiene in conto i fenomeni di mareggiata con periodo di ritorno pari a 100 anni), si osserva un incremento generale rispetto alla condizione climatica attuale dell'ordine di 50 cm fino a 80 cm specialmente nell'alto Adriatico, nel Mar Ligure e nell'alto Tirreno e sulle coste settentrionali della Sardegna.

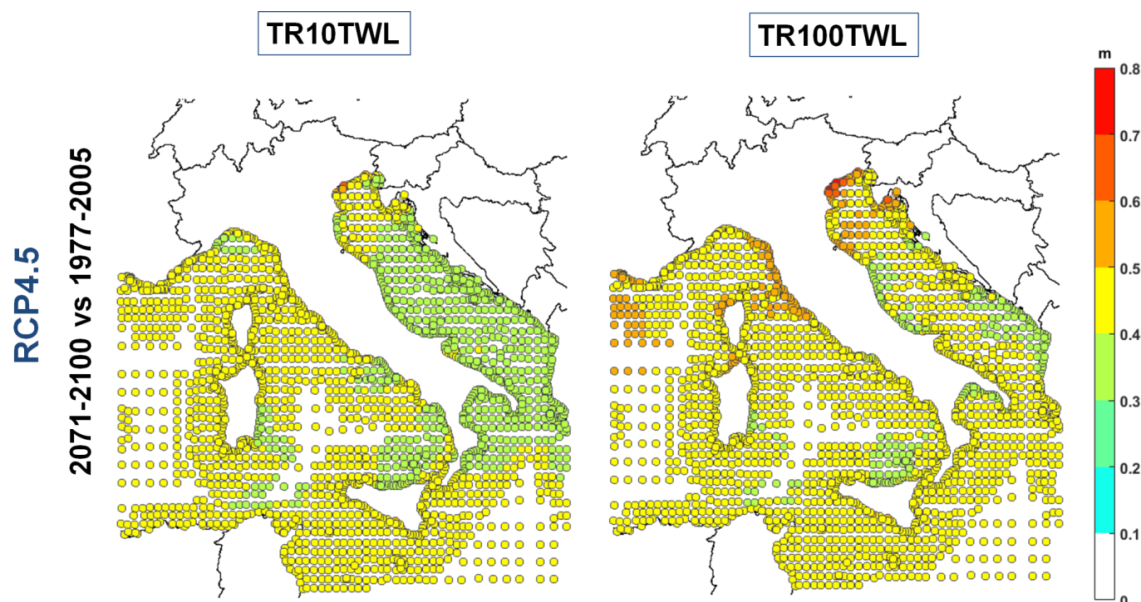


Figura 6: Variazioni degli indicatori relativi alle inondazioni costiere TR10TWL e TR100TWL valutati per il periodo 2071-2100 rispetto al periodo di riferimento 1977-2005 per lo scenario RCP4.5 attraverso il dataset "Water level change indicators for the European coast from 1977 to 2100 derived from climate projections" disponibile all'interno della piattaforma Copernicus C3S.

Esondazioni fluviali

Per quanto attiene gli impatti sui fenomeni di esondazione fluviale, essi sono stati esplorati analizzando le variazioni delle portate giornaliere massime annuali con tempo di ritorno pari a 100 anni (TR100FD) in $[m^3/s]$, fornite all'interno della piattaforma Copernicus C3S¹³ per il periodo di riferimento 1981-2010. L'analisi in frequenza di tale indicatore, valutato sul periodo di riferimento e per i due orizzonti temporali 2030s e 2050s sull'intero territorio nazionale, sotto lo scenario di concentrazione RCP 4.5, mostra che mediamente sul territorio non sono attesi significativi cambiamenti nel valore dell'indicatore, a riprova della complessa interazione tra i diversi termini del bilancio idrologico e dell'effetto diversificato su di

¹³Dataset "Hydrology related climate impact indicators from 1970 to 2100 derived from bias adjusted European climate projections" (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-hydrology-variables-derived-projections?tab=overview>)

essi del cambiamento climatico. Tuttavia, a livello locale, le stesse analisi mostrano che sono da attendersi in futuro maggiori porzioni di territorio, rispetto alle condizioni attuali, caratterizzate da valori di variazione delle portate giornaliere massime annuali con tempo di ritorno pari a 100 anni (valutati tramite TR100FD) particolarmente elevati. Le aree in cui è previsto un aumento futuro nei valori di tale indicatore sono per lo più concentrate sul versante adriatico. Non sono attese invece particolari differenze tra le anomalie relative al trentennio 2030s e quelle relative al trentennio 2050s.

Dissesto geologico, idrologico ed idraulico

Per quanto attiene infine la tematica del dissesto geologico, idrologico ed idraulico, la Figura 7 mostra gli scenari di erosività della pioggia attesi per l'orizzonte temporale 2021-2050 sotto lo scenario di concentrazione RCP 4.5. L'erosività della pioggia, o R-factor, è una delle variabili principali che concorrono alla perdita di suolo per effetto dell'erosione in occasione di eventi di pioggia intensi. Essa può dare quindi indicazioni su larga scala legate ai pericoli di dissesto geo-idrologico che possono insistere sulle infrastrutture, in particolare per le reti stradali e ferroviarie, che presentano ampi tratti insistenti su aree non urbanizzate. I dati rappresentati in Figura 7 sono disponibili nella piattaforma Copernicus C3S¹⁴. In tale dataset, l'erosività viene valutata attraverso modelli empirici semplificati (Padulano et al., 2021a) attraverso i quali essa risulta direttamente proporzionale alla precipitazione media annua. Tale dipendenza è riconosciuta da molti autori (Benavidez et al., 2018) ed è largamente impiegata per la stima dei valori medi annui di erosività, vista la generale indisponibilità di dati di precipitazione ad alta risoluzione temporale sul territorio nazionale. Come mostrato in Figura 7, l'erosività tende a diminuire per lo scenario considerato in coerenza con la diminuzione attesa della precipitazione media annua. Va comunque considerato che altri fattori, trascurati dai modelli empirici, potrebbero esercitare un'influenza sull'erosività su una scala più locale, come ad esempio gli eventi estremi di pioggia. Inoltre, la diminuzione complessiva di R-factor su base annua potrebbe celare un aumento locale su base stagionale.

¹⁴Dataset "Soil erosion indicators for Italy from 1981 to 2080"
(<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-soil-erosion?tab=overview>)

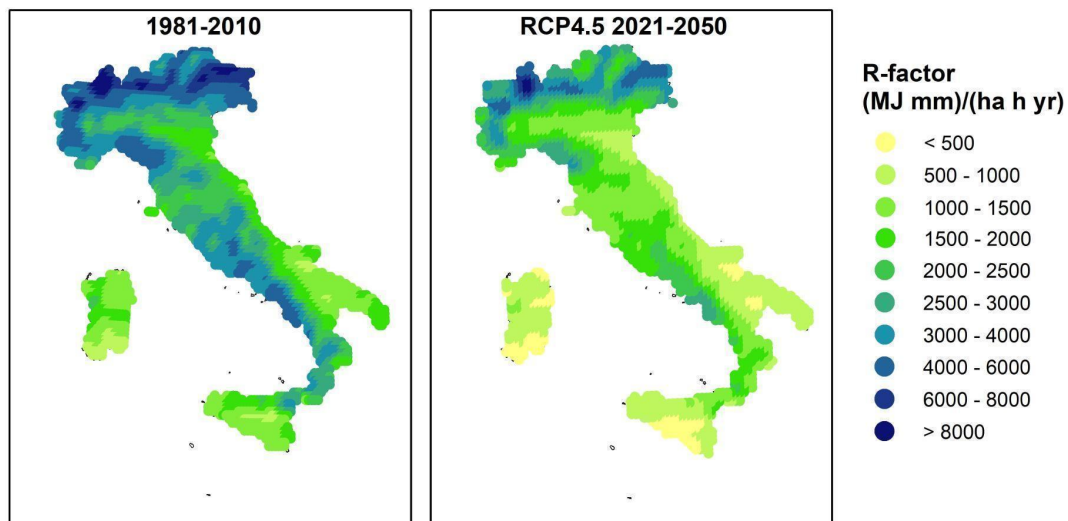


Figura 7. Distribuzione dell'erosività della pioggia (*R-factor*) sul territorio italiano per il periodo di riferimento 1981-2010 e per l'orizzonte temporale 2021-2050 sotto lo scenario RCP4.5 (ensemble di modelli climatici). *R-factor* è ottenuto a partire da modelli empirici (Padulano et al., 2021a)

Gli impatti dei cambiamenti climatici sulle città. Due “case study”

Box 1. L'impatto del cambiamento climatico sui fenomeni di allagamento urbano: il caso di Napoli

Gli ambienti urbani sono particolarmente esposti a rischi climatici elevati, poiché, in tali contesti, si hanno tipicamente una più alta densità di beni economici (e.g. infrastrutture, attività lavorative) e di popolazione potenzialmente esposti a pericoli climatici. Nelle aree urbane, inoltre, certi pericoli climatici, come le ondate di calore e gli allagamenti, tendono ad amplificarsi particolarmente a causa dell'effetto di isola urbana di calore e dell'elevata estensione delle superfici impermeabili. Gli allagamenti urbani si verificano quando, in seguito a intense precipitazioni, la rete di drenaggio urbana non riesce a far defluire l'afflusso meteorico, anche a seguito di possibili ostruzioni o sovraccarichi del sistema fognario cittadino. I fenomeni di allagamento possono mettere in serio rischio le zone urbanizzate e le infrastrutture insistenti sul territorio cittadino, e sono al contempo tra gli eventi più complessi da modellare data la forte incertezza che caratterizza le precipitazioni intense e la rapidità con cui si sviluppano i processi di allagamento (spesso denominati *flash floods*).

Uno studio pilota sull'area di Napoli ha dimostrato che le proiezioni climatiche al 2100, fornite da un ensemble di circa 20 modelli climatici regionali inclusi nell'iniziativa EURO-CORDEX, prevedono un aumento della frequenza delle piogge estreme per tutte le durate inferiori al giorno (Padulano et al., 2019). Ad esempio, nello scenario di concentrazione RCP4.5, eventi orari di precipitazione che, secondo il clima corrente, si verificano in media una volta ogni 10 anni, potrebbero verificarsi in media una volta

ogni 5 anni entro la fine del secolo. Analogamente, eventi che hanno una frequenza attuale di 200 anni probabilmente aumenteranno in frequenza verificandosi in media una volta ogni 50 anni circa.

Valutare come eventi di precipitazione più intensa o più frequente si traducono in fenomeni di allagamento è un'operazione particolarmente complessa, poiché la modellazione di tali processi richiede scale spaziali e temporali estremamente fini per riuscire a rappresentare ad un livello di dettaglio adeguato elementi determinanti quali la morfologia del contesto urbano e le infrastrutture di drenaggio. Negli ultimi anni, l'incremento delle capacità di calcolo a disposizione, e la conseguente possibilità di usufruire di modelli climatici con risoluzioni sufficientemente alte per studi di dettaglio dei fenomeni di allagamento urbano, stanno offrendo nuove e promettenti strumenti per l'analisi di questi fenomeni in un contesto di cambiamento climatico. Un esempio alla scala europea è fornito da un dataset disponibile all'interno della piattaforma Copernicus C3S¹⁵, che mette a disposizione, per 20 città europee, valutazioni sui rischi originati da eventi estremi di pioggia.

Un'analisi relativa ad un quartiere densamente popolato della Città di Napoli mostra i risultati dell'applicazione di un modello semplificato di allagamento superficiale, ad alta risoluzione spaziale (2m × 2m), relativo ad un evento di pioggia di durata oraria associato ad una frequenza media, secondo il clima corrente, di 10 anni. Come mostrato in Figura 8, questo tipo di analisi può avere molteplici applicazioni, tra cui la valutazione delle condizioni di pericolosità (di solito distinta in alta, media e bassa) per la stima dei rischi (Padulano et al., 2021b).

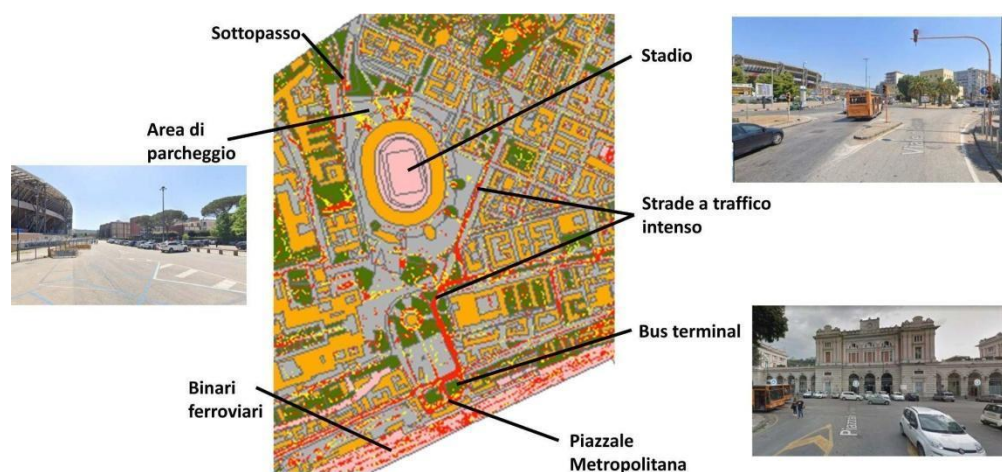


Figura 8. Analisi di allagamento del quartiere Fuorigrotta (Napoli) per un evento piovoso di durata oraria e periodo di ritorno 10 anni (pericolosità elevata in rosso, pericolosità media in giallo, pericolosità bassa non mostrata in figura; il verde indica le aree verdi, il grigio le aree impermeabili e in arancione gli edifici) mediante il modello di allagamento

¹⁵Dataset "Pluvial Flood Risk Assessment in Urban Areas" (<https://climate.copernicus.eu/pluvial-flood-risk-assessment-urban-areas>)

CADDIES Caflood (Ghimire et al., 2013). Immagine presentata in occasione della on-line conference ClimRisk2020 (<https://www.sisclima.it/wp-content/uploads/2020/10/Final-programme-2020.pdf>).

Tale tipo di analisi è particolarmente indicato per la quantificazione degli impatti del cambiamento climatico sulle infrastrutture urbane, quali ad esempio la rete stradale e ferroviaria. Per quanto attiene le reti drenaggio, studi di dettaglio possono essere utili a verificare il funzionamento del sistema in un contesto di cambiamento climatico e la eventuale necessità di aumentarne l'efficacia attraverso, ad esempio, l'inserimento di misure di adattamento quali infrastrutture verdi e soluzioni basate sulla natura (*nature based solutions*).

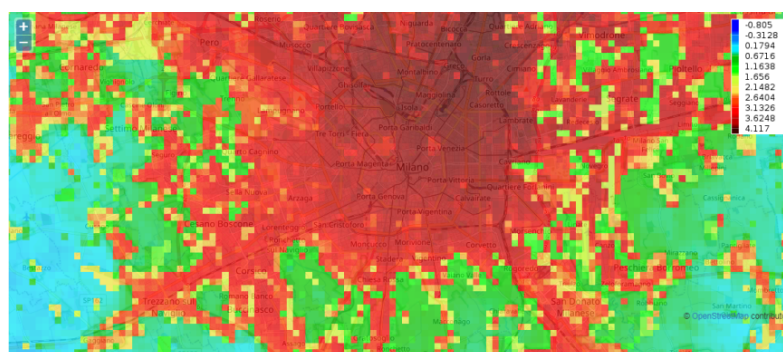
Box 2. Eventi di temperatura estrema in relazione ai sistemi infrastrutturali: il caso di Milano e Roma

Durante l'ultimo decennio (2011-2020), le temperature hanno superato quelle del più recente periodo caldo plurisecolare (circa 6500 anni fa): da 0,2°C a 1°C rispetto al 1850-1900 (IPCC, 2021). L'aumento nella frequenza e della gravità degli eventi di temperatura estrema è diventato sempre più evidente. Tali variazioni climatiche comportano impatti negativi non solo sui sistemi naturali, ma anche sui sistemi antropici (Scorzini et al., 2018), portando ad un incremento significativo dei danni in una molteplicità di sistemi urbani. In Italia, la probabilità di riscontrare danni per effetto degli eventi estremi derivanti dal cambiamento climatico è aumentata del 9% negli ultimi vent'anni (Spano et al., 2020). Per questi motivi, la comunità scientifica presta ormai sempre più attenzione all'analisi degli impatti degli eventi estremi anche sui sistemi infrastrutturali e alla loro resilienza operativa, che è ad oggi una delle sfide più impegnative sia per il governo sia per la società. I malfunzionamenti e le interruzioni delle infrastrutture, così come i costi dello sviluppo e della manutenzione, sono infatti considerati di rilevanza economica e sociale primaria (Kiel et al., 2016).

In questo contesto, gli eventi di temperatura estrema sono una minaccia da considerare *in primis*. In contesti infrastrutturali, l'aumento della frequenza di eventi estremi di temperatura può causare: (i) l'erosione e lo scioglimento dell'asfalto, con conseguenti problemi nodali (i.e., strade e ponti chiusi o bloccati e velocità/capacità stradali ridotte); (ii) interruzioni/malfunzionamenti legati alla trasmissione e alla distribuzione dell'elettricità; (iii) un aumento dei tassi di rottura delle tubazioni a causa dell'alterazione delle proprietà del suolo; (iv) un aumento della richiesta d'acqua, con conseguente calo di efficienza nel funzionamento della rete idrica, e infine (v) una possibile riduzione di qualità dell'acqua per effetto del riscaldamento di quest'ultima (Bollinger et al., 2014). Maggiori dettagli dei possibili effetti delle ondate di caldo su infrastrutture critiche urbane sono riportati nel successivo Capitolo 4. Tuttavia, una valutazione di come tali fenomeni si traducano in danni concreti è un'operazione ancora

particolarmente complessa, in quanto include la valutazione di diverse variabili, con particolare riferimento alle possibili interconnessioni tra i diversi sistemi infrastrutturali.

Nonostante ciò, grazie al potenziamento delle capacità di calcolo e all'utilizzo di tecniche matematiche-statistiche avanzate (i.e., operazioni di *downscaling*), è ad oggi possibile fornire delle stime più precise per quanto concerne la distribuzione della temperatura osservata e futura su scala locale. Ad esempio, un progetto finanziato con il fine di aumentare la resilienza all'interno dei principali centri urbani in Europa - RAMSES project¹⁶ - ha permesso la stima della distribuzione spaziale delle temperature ad una risoluzione spaziale di 100 m. La conoscenza ad una così alta risoluzione di tale pericolo è un elemento cruciale per sviluppare analisi di rischio che consentano di evidenziare le vulnerabilità connesse ai diversi sistemi infrastrutturali, evidenziando maggiori rischi laddove le infrastrutture insistono in aree caratterizzate da una più marcata criticità dei fenomeni estremi di temperatura. La Figura 9 mostra la distribuzione delle cosiddette Isole di Calore Urbano (= *Urban Heat Island (UHI)*) nei contesti urbani delle città di Milano e di Roma. Con tale termine si intende la comparazione delle temperature elevate (in °C) nelle aree urbanizzate rispetto ai dintorni rurali (Oke, 1973) e come si evince dalla distribuzione spaziale delle UHI all'interno dei due contesti urbani, queste ultime caratterizzano i centri storici delle città, favorendo delle condizioni più sfavorevoli per i sistemi infrastrutturali concentrati all'interno di queste zone, rispetto alle aree della città più periferiche. Grazie a dati presenti sulla piattaforma Copernicus C3S¹⁷, è ad oggi possibile svolgere queste analisi con riferimento alle condizioni climatiche attualmente osservate, ma anche con riferimento agli scenari climatici attesi in futuro.



¹⁶ Ramses Project - [RAMSES: HOME \(ramses-cities.eu\)](https://www.ramses-cities.eu)

¹⁷ <https://www.copernicus.eu/en>

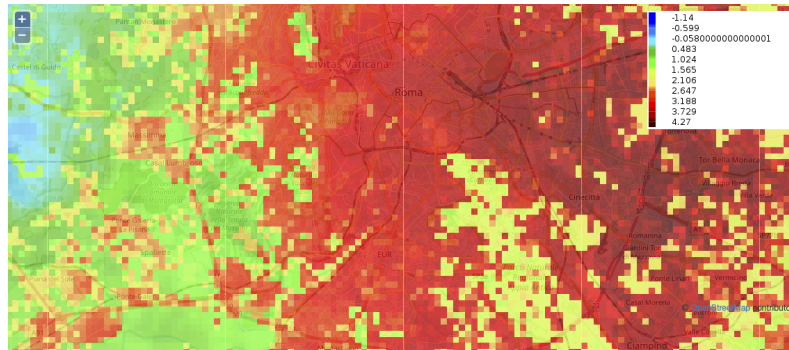


Figura 9. Distribuzione dell'intensità delle isole di calore all'interno della Città di Milano e di Roma (da: https://www.urban-climate.eu/services/eu_cities/), rilasciate dall'Urban Climate Service Centre (De Ridder et al;2015). Le colorazioni dell'immagine sono qui date dalla comparazione delle temperature elevate (°C) nelle aree urbanizzate rispetto ai dintorni più rurali (Lauwaet et al. 2015; Oke 1973).

3.2 Gli impatti sull'economia

3.2.1 Introduzione

I pericoli climatici descritti nella sezione 3.1 si traducono in costi elevati sull'economia italiana. I settori più direttamente esposti sono quelli la cui attività è più sensibile al clima. Gli esempi principali sono costituiti dal turismo, l'agricoltura e l'energia, quest'ultima sia dal lato della domanda che dell'offerta. **Gli impatti degli eventi estremi sulle reti energetiche e di trasporto, sulla dotazione di capitale fisico, sulla disponibilità di risorse idriche o sulla produttività del lavoro colpiscono però tutti i settori causando interazioni ed effetti a cascata su produzione, occupazione, competitività internazionale fino ad influenzare crescita e benessere.**

Questa sezione presenta una panoramica delle stime esistenti sugli impatti economici dei cambiamenti climatici nei settori più rilevanti dell'economia italiana: turismo, agricoltura, energia, industria e trasporti.

I dati presentati derivano da studi condotti con metodologie diverse, e spesso relativi a scenari di sviluppo socioeconomico e di cambiamento climatico diversi. Ciò è da tenere in considerazione nel momento in cui si volesse confrontarne i risultati. Soprattutto, le stime di danno economico non dovrebbero essere considerate come semplicemente additive. Infatti, i costi di impatti stimati separatamente, non tengono in considerazione interazioni che possono sia amplificare che ridurre gli effetti aggregati.

Altro elemento da tenere in considerazione è l'incertezza relativa alla valutazione economica degli impatti dei cambiamenti climatici. Oltre all'incertezza sull'evoluzione

climatica (relazione tra emissioni, concentrazioni di gas ad effetto serra e i cambiamenti di temperatura) e sugli impatti fisici derivanti (per esempio relazione tra cambiamento climatico e rese agricole) interviene, a valle, anche l'incertezza nelle proiezioni economiche (sia in termini di dinamiche tecnologiche, sia per quanto riguarda l'evoluzione delle principali variabili macroeconomiche) di medio-lungo termine

Per questo motivo è bene ricordare che le stime dei costi economici dei cambiamenti climatici non sono predizioni, ma piuttosto proiezioni coerenti con specifiche narrative di uno o più scenari di sviluppo futuro.

3.2.2 Il turismo

Il turismo in Italia è uno dei più importanti settori del terziario. Nel 2019 ha contribuito per il 10.4% alla produzione del PIL del Paese (WTCC, 2021). È però anche un settore particolarmente sensibile alle caratteristiche meteorologiche e di comfort climatico. Queste, assieme alla qualità dei servizi ricettivi e alla ricchezza dell'offerta ricreativa-culturale, concorrono in modo rilevante a determinare la capacità attrattiva delle destinazioni. Gli impatti principali del cambiamento climatico sul turismo in Italia sono collegabili ad una possibile perdita di attrattiva del clima mediterraneo che diverrebbe "troppo caldo" o instabile (ondate di caldo, eventi estremi), alla riduzione dei giorni di copertura nevosa nelle tipiche destinazioni del turismo invernale, all'erosione delle coste ed eventi meteorologici estremi che mettono a rischio le infrastrutture turistiche balneari e non (Ronchi 2019).

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 (RCP 2.6), si stima una riduzione del 15% degli arrivi internazionali**, del 21,6% in uno scenario di aumento di 4°C.¹⁸ Tenendo conto anche del comportamento dei turisti nazionali **l'impatto netto sulla domanda totale italiana presenta 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 rispetto ai valori attuali), risulterebbe difficile garantire una copertura nevosa naturale sufficiente per la stagione invernale in Friuli-Venezia Giulia. Lo stesso accadrebbe per circa un terzo delle stazioni in Lombardia, Trentino e Piemonte. Con un aumento di 4°C, solo il 18% di tutte

¹⁸ In mancanza di dati su uno scenario RCP 4.5, questa sezione sugli impatti economici presenta risultati per scenari più pessimisti e in particolare RCP 8.5 o equivalente ad un aumento della temperatura di 4 gradi. Pur essendo poco realistico, presentare risultati per questi scenari permette di dare un'idea del possibile intervallo nei risultati sugli impatti economici.

le stazioni operanti nel complesso dell'arco alpino italiano avrebbe una copertura nevosa naturale idonea a garantire la stagione invernale.

3.2.3 L'agricoltura

Impatti economici negativi rilevanti possono derivare dagli effetti del cambiamento climatico sulle rese e sulla produzione agricola (Ronchi 2019). La letteratura (EEA,2016; Dominguez & Fellman 2018; PNACC, 2017; Boere et al., 2019; Hristov et al., 2020) evidenzia un'alta variabilità nelle proiezioni delle rese dovuta sia alla diversa caratterizzazione delle precipitazioni nei modelli climatici che alle risposte dei modelli agrologici alle forzanti climatiche. Tuttavia, esistono chiare indicazioni di un deterioramento delle condizioni agro-climatiche in termini sia di aumento dello stress idrico che di riduzione della stagione di crescita in Europa centrale e del sud (Trnka Olesen et al., 2011; Hristov et al., 2020). Questo risultato viene ribadito per le colture cerealicole italiane (soprattutto frumento tenero e mais) dalle simulazioni proposte in ambito di Piano Nazionale di Adattamento in entrambi gli scenari RCP 4.5 e RCP 8.5 in cui ampie e diffuse zone della Penisola sono caratterizzate da riduzioni di resa superiori al 20%. Altro fenomeno identificato è la potenziale perdita della vocazione di molti suoli alla coltivazione di prodotti ad alto o altissimo valore aggiunto, primi tra tutti quelli vitivinicoli con spostamento degli areali attuali verso nord o ad altitudini maggiori.

Le riduzioni attese nelle rese sono stimate portare ad una riduzione del valore della produzione aggregata pari a 12.5 miliardi di euro nel 2050 in uno scenario compatibile con l'RCP 2.6 che potrebbero aumentare fino a 30 miliardi nell'RCP 8.5 (McCallum et al., 2013). Il danno, soprattutto alle produzioni pregiate, potrebbe inoltre portare ad una progressiva perdita di valore fondiario dei terreni agricoli. Le stime variano tra un deprezzamento dell'1-11% nell'RCP 4.5, al 4-16% nell'RCP 8.5 a fine secolo (Bozzola et al. 2018). Van Passel et al. (2017) riportano stime ancora più pessimistiche di una perdita di valore del 10% dei valori fondiari per grado di aumento della temperatura.

Anche attività quali l'allevamento, l'acquacoltura e la pesca subiranno l'effetto dei cambiamenti climatici. Secondo stime prodotte da due progetti UE (SESAME2 del 6PQ e VECTORS del 7PQ), nello scenario A1B dell'IPCC, assimilabile ad un RCP 4.5 almeno fino al 2050, il settore ittico italiano potrebbe vedere una riduzione di produzione dell'8-9% entro il 2030 (Spano et al., 2020).¹⁹

Non esistono stime precise riguardo l'acquacoltura, tuttavia la si può ritenere a rischio in quanto sviluppata principalmente in aree vulnerabili ai cambiamenti climatici come le coste dell'alto Adriatico. Bovini e suini sono anch'esse specie particolarmente sensibili alle alte temperature e alla siccità (Spano et al., 2020).

¹⁹Stima relativa alle principali specie commerciali.

3.2.4 Il settore energetico

Il cambiamento climatico, nei Paesi mediterranei come l'Italia, comporterà un sostanziale aumento della domanda di energia concentrata soprattutto nella stagione estiva, per rispondere alle maggiori esigenze di condizionamento. Allo stesso tempo la domanda di energia per il riscaldamento durante i mesi più freddi dovrebbe diminuire. L'effetto netto di questi due effetti contrastanti varia da regione a regione. A livello aggregato per il Paese, Campagnolo e De Cian (2021) stimano comunque che **le spese energetiche pro-capite (per adulto) dovrebbero diminuire in media del 9.7% nell' RCP 4.5 e del 14.7% nell' RCP8.5**. Ciò equivarrebbe ad un risparmio della spesa per consumi energetici tra i 3 e i 4 euro mensili.

In seguito al cambiamento climatico la produzione di energia potrebbe essere limitata da siccità e scarsa disponibilità di risorse idriche, e interrotta a causa di eventi estremi, con impatti negativi su impianti, reti elettriche e fonti di energia rinnovabile. Si rimanda direttamente al Capitolo 4 che fornisce stime economiche più dettagliate degli impatti dei cambiamenti climatici sulle infrastrutture, incluse quelle energetiche.

3.2.5 Il settore industriale e i trasporti

L'attività del settore industriale può essere impattata negativamente dal cambiamento climatico attraverso lo stress infrastrutturale diretto o indiretto indotto da eventi estremi (vedere Capitolo 4), dall'aumento di temperatura attraverso gli effetti negativi sulla produttività del lavoro, dalla scarsità e variabilità nella disponibilità di risorse idriche, fondamentali in molti processi produttivi, e soggette a costante competizione di domanda da parte di altri settori. Riguardo gli effetti relativi agli impatti sulle infrastrutture industriali, necessitano una particolare attenzione le attività che utilizzano processi e sostanze classificate come "pericolose" (come in alcuni comparti della chimica), che, in caso di danni a seguito di eventi estremi, potrebbero causare significativi impatti negativi sulla salute e sull'ambiente. Particolarmente soggetto allo stress infrastrutturale è anche il settore trasporti in tutte le sue branche.

Rimandando ancora una volta al capitolo 4 per un'analisi più approfondita, si riportano di seguito alcune stime relative agli impatti diretti connessi ai danni alla dotazione infrastrutturale del Paese conseguente l'innalzamento del livello del mare, l'intensificarsi delle tempeste costiere e delle inondazioni fluviali.

La rilevanza di questi fenomeni per l'attività socioeconomica dell'Italia è facilmente intuibile. Da un lato l'Italia è un "paese costiero". Si classifica 14a al mondo per estensione delle coste che ospitano il 30% della popolazione (ISPRA,2019) sono ricche di infrastrutture e attività economiche, prima tra tutte il turismo. Dall'altro, per le particolari caratteristiche oro-geografiche, già oggi, il 91% dei suoi comuni è classificato a rischio idro-geologico (Trigila et al., 2018).

In mancanza di adeguamento delle opere di protezione costiera i danni annuali attesi da innalzamento del livello del mare potrebbero raggiungere i 50 miliardi e gli 81 miliardi di euro nel 2050 nell’RCP 2.6 e 8.5 rispettivamente (nostra elaborazione da: Vousdoukas et al., 2020; Lincke et al., 2020). Quelli dovuti alle sole alluvioni fluviali potrebbero oscillare tra i 3 miliardi di euro nell’RCP 2.6 e i 4 miliardi dell’RCP 8.5 a metà secolo (nostra elaborazione da: Dottori et al., 2020; Lincke et al., 2020).

Schleypen et al. (2019) riportano invece le stime degli impatti sulla produttività del lavoro nel settore industriale italiano dovuto ad un aumento dello stress termico. Si stima che in uno scenario RCP 2.6 nel 2050 questa possa ridursi in media dell’1% e dell’1.8% nell’RCP 4.5. Questo a sua volta causerebbe una potenziale contrazione del PIL nel 2050 dello 0.24% nell’RCP 2.6 e dello 0.41% nell’RCP 4.5 (Bosello et al. 2021).²⁰

3.2.6 Commercio internazionale, crescita e occupazione

Gli effetti settoriali ed i costi diretti descritti nelle precedenti sezioni hanno delle conseguenze a cascata sulla capacità del Paese di produrre ricchezza con impatti sistemici sulle sue prospettive di crescita e sulle principali variabili macroeconomiche.

Anche in uno scenario di cambiamento climatico contenuto, coerente con gli obiettivi di Parigi, gli impatti economici sul PIL, pur gestibili, rimangono tutt’altro che trascurabili. Il più ottimista tra gli studi disponibili è Kahn et al. (2019) che riporta per il 2050 un impatto sul PIL pro-capite pressoché nullo per l’Italia nell’RCP 2.6. Valutazioni diverse condotte con tecniche modellistiche (Carraro et al., 2009; MacCallum et al., 2013; Bosello et al., 2021; Guo et al., 2021) riportano invece perdite più consistenti che oscillano tra lo 0.2% e il 2% del PIL nel 2050 sempre nello scenario RCP 2.6.

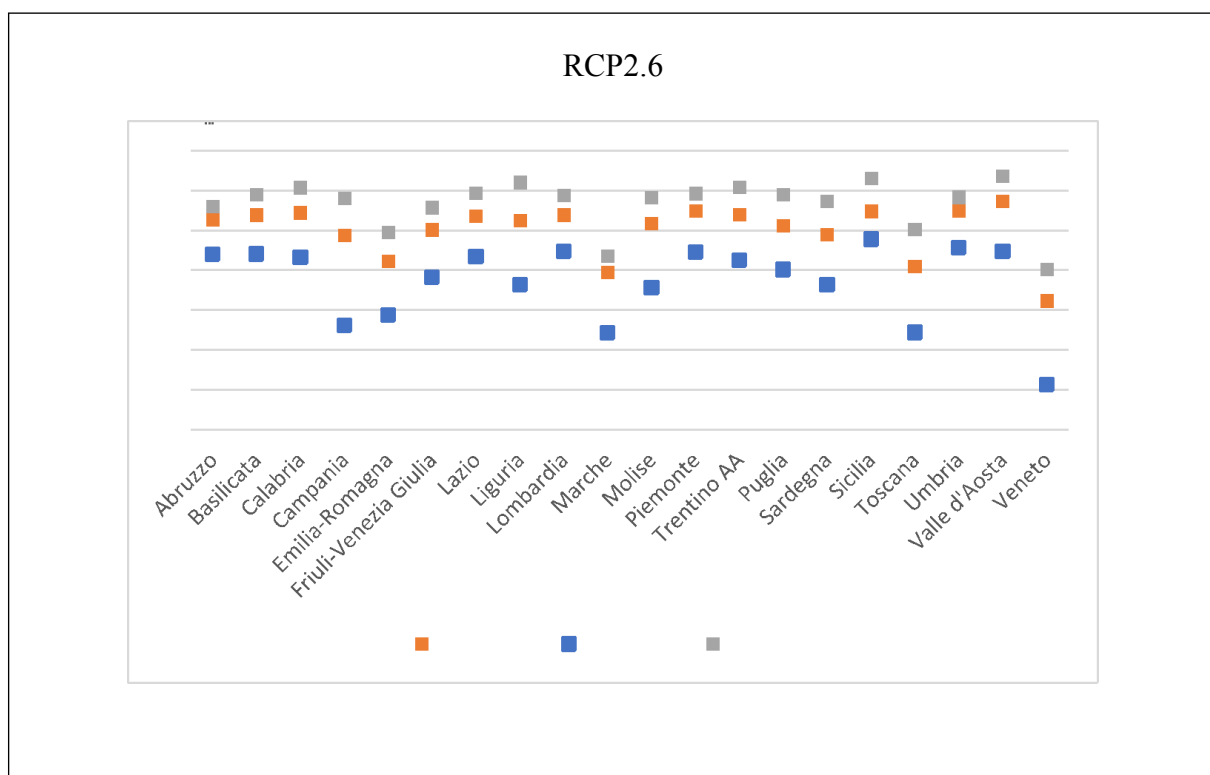
A scenari di cambiamento climatico con temperature medie attese più elevate corrispondono perdite macroeconomiche più accentuate. Ad esempio, Bosello et al. (2020) **riportano perdite pari al 2.5% del PIL nello scenario RCP 4.5 nel 2050.** Sempre in riferimento a metà secolo, ma nell’ improbabile scenario RCP 8.5, Kahn et al. (2019), Ronchi (2019), e Guo et al. (2021), stimano contrazioni del PIL nazionale pari rispettivamente al 2.5%, 3.7%, 1.7%.²¹

²⁰ Il dato si riferisce agli effetti sul PIL della perdita di produttività del lavoro nel settore industriale e in quello agricolo. In Bosello et al. (2021) i due effetti non sono riportati separatamente. Tuttavia, data la rilevanza del settore industriale rispetto a quello agricolo in termini di produzione di valore aggiunto, è ragionevole imputare il risultato sul PIL soprattutto al primo.

²¹ La Commissione Europea, nel suo “European Missions. Adaptation to Climate Change” del luglio 2021, stima che il danno complessivo da cambiamento climatico nello scenario RCP 4.5 (3 gradi di incremento della temperatura rispetto ai livelli pre industriali) sia circa 1,4% del PIL Europeo, ma l’Italia, come visto, è uno dei paesi più vulnerabili (“Conservative, lower bound estimates show that exposing today’s EU economy to global warming of 3°C above pre-industrial levels would result in an annual loss of at least EUR 170 billion (1.36% of EU GDP). These estimates do not account for the risks associated with tipping points and low-probability/high-impact events, the outcomes of which could be much more devastating.”

Bosello et al. (2021) e Ronchi (2019) propongono anche delle stime di impatto regionale e provinciale. Il primo dei due studi riporta la valutazione di impatto economico complessivo relativa agli effetti del cambiamento climatico su agricoltura, infrastrutture e trasporti, domanda e offerta di energia, produttività del lavoro in diverse combinazioni di scenario socioeconomico e climatico. L'analisi è condotta applicando in modo integrato modelli di impatto fisico ed economico. Va evidenziato innanzitutto come fino alla prima metà del secolo, gli impatti economici tra scenari climatici, in particolar modo l'RCP 2.6 e l'RCP 4.5 siano piuttosto simili, seppur più alti nel secondo (Figura 10).

Questo elemento sottolinea la presenza di forti inerzie climatiche in grado di generare impatti negativi anche in scenari di contenimento delle emissioni e rafforza la necessità di pianificare delle infrastrutture (e più in generale sistemi economici) resilienti. Riferendosi ai valori centrali delle stime, Campania, Emilia-Romagna, Marche, Sardegna e Veneto fanno registrare perdite di prodotto superiori al dato aggregato nazionale (-2% del PIL nell'RCP 2.6 e -2.5% nell'RCP 4.5). L'intervallo di variabilità delle stime riporta però come egualmente probabili perdite considerevolmente più elevate, **superiori per quasi tutte le regioni al 3% del prodotto regionale con un picco del -6% in Veneto**. Le perdite sono originate principalmente (con un contributo che varia da circa il 40% al 65% a seconda degli scenari considerati) dagli impatti sull'attività produttiva e dalla perdita di asset di capitale associati all'innalzamento del livello del mare e all'intensificarsi degli eventi di dissesto idrogeologico. La terza causa di perdita economica è la ridotta produttività del lavoro associata allo stress termico.



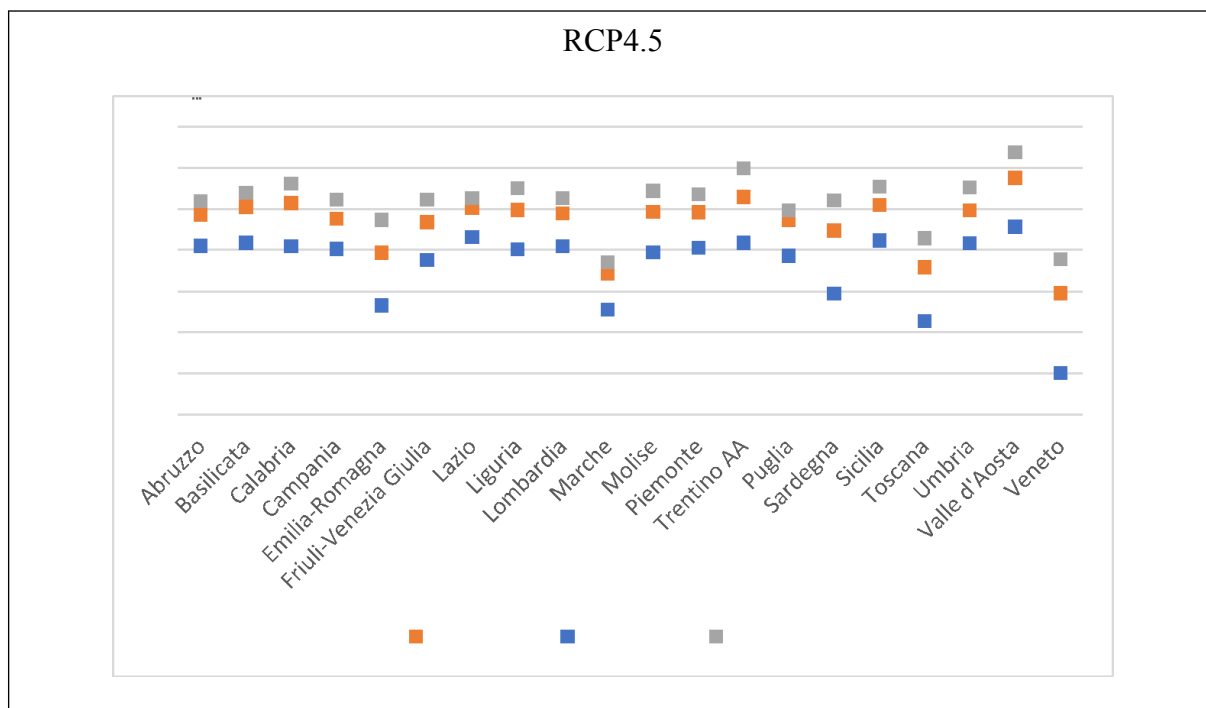


Figura 10. Impatti del cambiamento climatico sul prodotto regionale italiano nel 2050, RCP 2.6, sopra, RCP 4.5 sotto (variazione % rispetto al caso a clima corrente) (Nostra elaborazione da Bosello et al., 2021)

L'analisi riportata in Ronchi (2019), purtroppo riferita al solo scenario RCP8.5, pur utilizzando una metodologia di indagine completamente diversa, basata su regressioni econometriche piuttosto che sull'uso integrato di modelli economici e di impatto, giunge a conclusioni simili (Figura 11). Si conferma, per il 2050, la particolare vulnerabilità economica delle regioni costiere del Veneto (provincia di Venezia), di Sardegna, Campania e più in generale delle isole maggiori e della zona Tirrenica. L'asse appenninico e l'arco alpino appaiono invece non colpiti, effetto dovuto alle interazioni tra temperatura e precipitazioni quali variabili esplicative della performance economica.

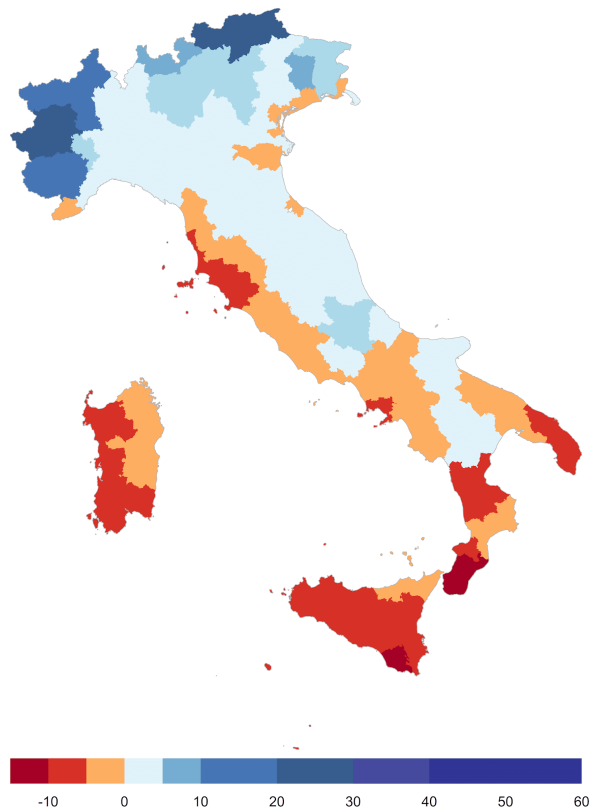


Figura 11. Impatti dell'aumento di temperatura sulla performance economica (var. % PIL pro-capite rispetto alle condizioni climatiche correnti) per provincia italiana, scenario RCP 8.5 al 2050 (fonte: Ronchi 2019).

Due altri aspetti del cambiamento climatico possono essere rilevanti a livello macroeconomico per l'Italia. Il primo è relativo alla dimensione "fiscale" del fenomeno. Gli impatti fisici comportano distruzione di capitale, aumento della spesa pubblica, possibile riduzione delle entrate e peggioramento dei rapporti deficit e debito sul PIL. Se, come conseguenza, il rischio paese fosse percepito in aumento, anche la capacità di approvvigionarsi sui mercati internazionali potrebbe deteriorarsi con maggiore difficoltà a servire il debito causa interessi più elevati.

Il secondo aspetto è relativo alle relazioni di commercio internazionale e alla supply chain. L'Italia non è infatti l'unico paese a subire effetti negativi dei cambiamenti climatici. Pertanto, il risultato economico finale dipende non solo dagli effetti nazionali, ma anche dagli impatti dei cambiamenti climatici su altri Paesi, soprattutto quelli con cui l'Italia ha forti legami commerciali (Dellink et al., 2017).

3.3 Gli impatti sulla società

3.3.1 Salute

Il cambiamento climatico è una delle principali minacce globali alla salute umana del XXI secolo (Watts et al., 2021). La sua pericolosità è soprattutto connessa agli eventi climatici estremi (Rahmstorf et al., 2011; Pall et al., 2011; Stott et al., 2004) più frequenti e intensi (Easterling et al., 2000). Da questi discendono effetti diretti, come morte e lesioni quando l'evento estremo colpisce la persona e/o la comunità, ed effetti ritardati o indiretti, come malattie legate a vettori (e.g. zanzara), effetti sulla salute mentale o associati alla distruzione di infrastrutture critiche (Watts et al., 2015; Patz et al., 2005).

In Italia particolare criticità è rappresentata dalle temperature estreme e dalle ondate di calore anche a seguito dell'alta percentuale di popolazione di età superiore ai 65 anni. Eitati di caldo estremo, come quella del 2015, hanno ad esempio fatto registrare un aumento del 13% della mortalità associata alle ondate di calore nella fascia di popolazione sopra i 65 anni (Sanchez & de'Donato, 2021; WHO, 2018).

Altre categorie particolarmente vulnerabili includono i bambini e i pazienti con patologie in corso (tra cui per esempio diabete e malattie polmonari, cardiovascolari o neurologiche). Queste categorie sono molto vulnerabili anche alle cosiddette "notti tropicali" (notti in cui la temperatura minima non scende sotto i 20°C), poiché tale temperatura non permette al corpo umano di rinfrescarsi a sufficienza dopo una giornata di caldo intenso, facilitando così la mortalità (Spano et al., 2020). Inoltre, sono sensibili alle ondate di calore le persone in condizioni di disagio socioeconomico - che spesso non dispongono di mezzi e abitazioni capaci di ripararle dal calore estremo - e i lavoratori che svolgono attività all'aperto, esposti per tempi prolungati ad alte temperature (WHO, 2018; Spano et al., 2020; Sanchez & de' Donato, 2021). Le ondate di calore tendono a colpire in modo particolare città come Torino, Milano, Bologna, Firenze, Roma e Napoli (WHO, 2018).

Dal 2004 è attivo il Sistema Nazionale di allarme per la prevenzione degli effetti delle ondate di calore sulla salute (HHWWS), gestito centralmente dal DEP in collaborazione con il Ministero della Salute e il Dipartimento della Protezione Civile. Il sistema operativo in 34 città italiane distribuite su tutte le regioni e con una copertura del 93% della popolazione urbana nazionale sopra i 65 anni (WHO, 2018), consente di individuare le condizioni meteo-climatiche che possono avere un impatto significativo sulla salute dei soggetti vulnerabili, e diramare conseguentemente dei bollettini di allerta. In base alla letteratura ad oggi disponibile, gli episodi di mortalità legata a calore estremo sembra siano andati diminuendo, soprattutto nelle città che hanno attivato il protocollo di allerta e prevenzione previsto dal piano (WHO, 2018).

Ciò detto, l'Italia rimane uno dei Paesi in Europa con i più alti tassi di mortalità sia per temperature elevate che, più specificamente, per le temperature estive (WHO, 2018, Martínez-Solanas et al., 2021). **Il costo della mortalità da stress termico come**

proporzione del Prodotto Nazionale Lordo è aumentato dallo 0.64% del 2000 all'1.03% nel 2017 (Watts et al., 2020). Seppur solo indirettamente connesso al cambiamento climatico, l'Italia presenta anche il più alto costo in Europa da impatti sulla salute per inquinamento dell'aria.

In seguito all'aumento delle temperature medie ed estreme lo stress da caldo sulla popolazione è previsto in decisa crescita. Secondo Naumann et al. (2020) il numero di persone esposte ad episodi di caldo particolarmente intenso (ondate di calore con periodo di ritorno di 50 anni) nella Penisola aumenterebbe, rispetto alla situazione attuale, da 10 a 15 volte in uno scenario RCP 2.6 e da 15 a 20 volte in uno scenario RCP 4.5. Questo a sua volta comporterebbe un aumento della morbilità e mortalità associate. **Nello scenario RCP 4.5 si stima un aumento della mortalità tra l'86 e il 137% con un impatto sul PIL che salirebbe da circa l'1% attuale al 2%** (si veda anche la sezione finale del Capitolo 5).

Forzieri et al. (2017) stimano che in Italia il numero di morti associate a fenomeni climatici estremi (soprattutto ondate di calore) potrebbe crescere fino a 60 volte rispetto al presente entro la fine del secolo in uno scenario assimilabile al RCP 6.0/ RCP 4.5. **Tale aumento porterebbe il tasso di mortalità prematuro causato da eventi climatici estremi a superare quello dovuto all'inquinamento atmosferico** (Lelieveld et al., 2015) e a diventare il più grande rischio ambientale per l'Italia (Lim et al., 2012).

Oltre al caldo estremo, l'Italia si trova ad affrontare crescenti problemi di crisi idrica, con impatti negativi sulla qualità dell'acqua, e quindi sulla salute. La scarsità d'acqua colpisce prevalentemente le regioni del Sud e dell'interno, con picchi particolari nella stagione estiva. Tuttavia, interessa anche le regioni del Centro e del Nord, complice la progressiva scomparsa dei ghiacciai alpini. I modelli climatici suggeriscono che siccità e scarsità d'acqua andranno aumentando in diverse regioni, generando seri problemi di accesso all'acqua potabile, in modo simile a quanto accaduto nell'estate del 2017, quando 6 regioni italiane si sono trovate a dover dichiarare lo Stato di Emergenza (WHO, 2018).

3.3.2 Immigrazione

Secondo l'Organizzazione Mondiale per la Sanità, è probabile che il cambiamento climatico alimenti i flussi migratori verso l'Europa, l'area mediterranea e l'Italia in particolare, con provenienza principalmente dall'Africa Sub-Sahariana (WHO, 2018). Tuttavia, la scarsità di dati disponibili e la complessa natura dei flussi migratori non rendono ad oggi possibile una stima della portata di questi flussi. Il cambiamento climatico potrebbe anche causare flussi migratori interni dovuti a dislocamento da perdita di aree costiere.

3.3.3 Povertà, disuguaglianza e distribuzione della ricchezza

Esiste una consolidata letteratura che sottolinea come uno degli effetti del cambiamento climatico sia quello di aumentare la disuguaglianza (Ronchi, 2019). Questo si verifica sia in senso geografico-territoriale, per cui le regioni “più povere” tendono a subire perdite economiche proporzionalmente maggiori rispetto alle regioni “più ricche” (Spano et al., 2020), che per gruppi sociali, per cui quelli più “deboli”, ad esempio per livello di reddito o istruzione, vengono maggiormente danneggiati. In entrambi i casi si tratta di una combinazione tra esposizione, sensibilità e capacità adattiva che determina una maggiore vulnerabilità e soggezione al rischio climatico dei soggetti o aree, più svantaggiate. Questo fenomeno, con intensità diverse, è comune a tutti i paesi, sviluppati e no.

La vulnerabilità agli impatti del cambiamento climatico varia notevolmente anche tra zone urbane e zone rurali. Le città risultano particolarmente esposte e vulnerabili a causa dell’alta densità demografica, della maggiore complessità istituzionale e dell’alto tasso di antropizzazione e sviluppo del suolo²² (Spano et al., 2020). La vulnerabilità delle città italiane al cambiamento climatico è molto eterogenea: le caratteristiche della popolazione residente - che possono variare fortemente anche all’interno di una stessa città -, così come la distribuzione della popolazione sul territorio, sono infatti due fattori determinanti. Allo stesso tempo, l’alta concentrazione in alcune zone urbane e suburbane di costruzioni e insediamenti non a norma o di qualità non ottimale, e di una popolazione più vulnerabile aumenta notevolmente la vulnerabilità della popolazione esposta. In molti casi, questi due fattori di rischio si sovrappongono e amplificano a vicenda, generando in alcuni casi dei veri e propri “hot spot” di rischio.

Nonostante l’alta esposizione delle zone urbane a rischi climatici di varia natura, si nota un significativo ritardo nell’adozione di misure di adattamento al cambiamento climatico da parte delle città italiane (Fondazione Sviluppo Sostenibile, 2019). Ad oggi, circa un quarto delle città italiane ha completato una valutazione dei rischi e delle vulnerabilità climatiche, e solo il 12% ha un Piano di Adattamento al Cambiamento Climatico (CDP, 2019), il che rende l’adeguata valutazione e gestione dei rischi a livello nazionale ancora particolarmente complessa.

3.4 Conclusioni

Questo capitolo ha descritto le variazioni attese di alcuni pericoli climatici di interesse per lo studio dell’impatto del cambiamento climatico sulle infrastrutture. In particolare,

²²L’alto tasso di sviluppo del suolo comprende pratiche quali lo sviluppo urbano e edilizio, la costruzione reti infrastrutturali, la riduzione della permeabilità dei suoli e l’artificializzazione della rete idrografica.

le analisi si sono concentrate prevalentemente sulla valutazione dei seguenti pericoli: ondate di caldo, ondate di freddo, siccità, incendi, tempeste di vento, inondazioni costiere, allagamenti, esondazioni fluviali, frane ed erosione dei suoli.

Per caratterizzare l'evoluzione spaziale e temporale dei pericoli climatici ora menzionati, sono stati selezionati una serie di indicatori climatici che sintetizzano alcune delle caratteristiche degli eventi estremi (es. frequenza, intensità, durata), ampiamente consolidati in letteratura. Tali indici sono stati calcolati in termini di variazione tra un periodo futuro ed un periodo di riferimento, utilizzando due diversi scenari e diversi modelli climatici del progetto EURO-CORDEX. Tali indicatori, in particolare, descrivono importanti variazioni dei pericoli legati all'aumento delle temperature, ma anche legati all'incremento degli eventi intensi di precipitazione così come dell'innalzamento del livello del mare (associato a mareggiate più intense).

Ci si attende che, in questo contesto, **l'Italia dovrà affrontare un progressivo aumento in relazione ai diversi pericoli climatici**, ad eccezione delle ondate di freddo che tenderanno invece a diminuire. Tuttavia, frequenza, intensità e persistenza degli eventi climatici estremi dipendono anche dalle aree geografiche (come riportato nella Figura 12). Ad esempio, le regioni sud-occidentali riportano incrementi maggiori per quanto attiene le ondate di calore e la siccità.

Aree particolarmente esposte emergono anche lungo le coste e nelle pianure alluvionali, spesso altamente popolate ed economicamente cruciali, dove inondazioni e tempeste di vento potrebbero essere critiche in combinazione con altri pericoli climatici.

Le analisi chiaramente mostrano che l'adozione di uno scenario di mitigazione rapida ed ambiziosa (lo scenario RCP 2.6) per l'Italia possa comportare un sostanziale minore incremento dei pericoli climatici rispetto a scenari di stabilizzazione con concentrazioni maggiori (lo scenario tendenziale RCP 4.5). Pertanto, da un lato strategie di adattamento più efficaci potrebbero riuscire a ridurre gli impatti climatici sulla società associati a scenari a bassa concentrazione di gas serra in atmosfera (si veda il Capitolo 5). Dall'altro, strategie di mitigazione rapide ed ambiziose, riducendo l'entità del danno, renderebbero meno costose e più efficaci le strategie di adattamento

VARIAZIONI NEGLI ESTREMI CLIMATICI

Periodo 2050s (rispetto al periodo 1981-2010)

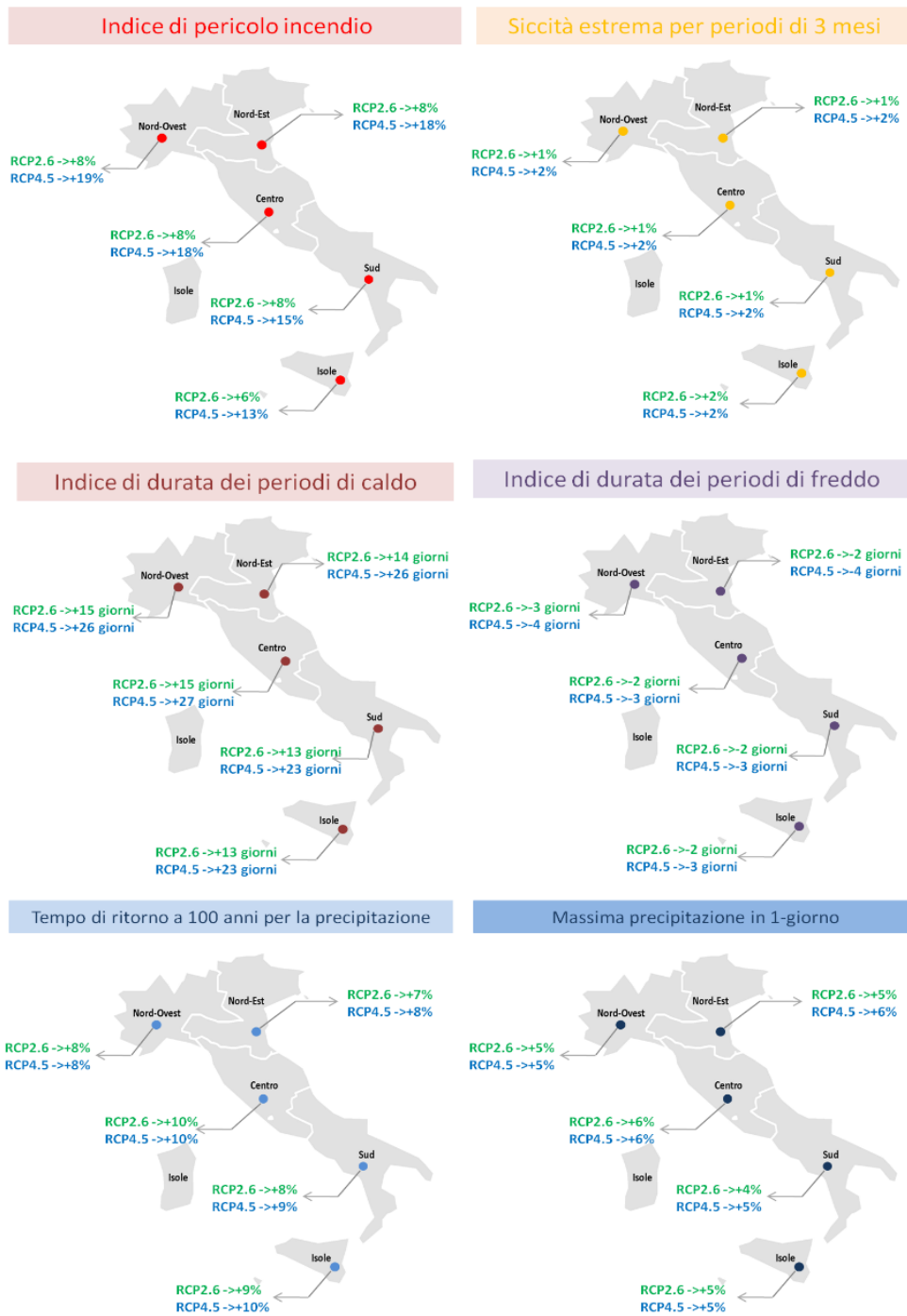


Figura 12. Variazioni climatiche annuali per aree geografiche, considerando alcuni degli indicatori climatici riportati in Tabella 1, per il periodo 2036-2065 (2050s), rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP2.6 e RCP4.5.

Giusto per dare degli ordini di grandezze, in assenza di mitigazione, **il danno complessivo da cambiamento climatico è atteso essere il 2.5% del PIL nel 2050 (scenario RCP 4.5). Con mitigazione (scenario RCP 2.6), il danno più che dimezza: 0.2-2% del PIL al 2050. Lo sforzo e gli investimenti in adattamento sarebbero di conseguenza molto inferiori.**

Nel successivo Capitolo 4 analizzeremo più in dettaglio l'esposizione delle infrastrutture critiche e la loro vulnerabilità al pericolo climatico stesso, al fine di quantificare gli impatti dei cambiamenti climatici in modo specifico sulle infrastrutture.

Sebbene le analisi presentate in questo capitolo siano state condotte utilizzando metodologie e modelli consolidati in letteratura, rimangono ancora margini importanti di incertezza. In particolare, non si sono considerati eventi climatici estremi composti. In altre parole, le analisi hanno descritto le dinamiche di pericoli climatici indipendenti, senza considerare le loro possibili interazioni. Tali fenomeni sono caratterizzati da una più rapida crescita nelle prossime decadi rispetto a quanto previsto per i singoli pericoli climatici (Tilloy et al., 2019; Zscheischler & Seneviratne, 2017; Zscheischler et al., 2018, 2020) e probabilmente tenderanno a causare impatti maggiori dei singoli pericoli climatici. Un forte miglioramento della capacità dei modelli climatici di rappresentare valori estremi localizzati, quindi anche a supporto della valutazione del pericolo climatico sulle infrastrutture, è atteso, ad esempio, dai cosiddetti modelli "*convection permitting*" (ovvero con la rappresentazione esplicita della convezione profonda) con risoluzione di circa 2 km che includono anche parametrizzazioni specifiche, come le dinamiche atmosferiche urbane e modelli accoppiati ad alta risoluzione (ad esempio modelli integrati per atmosfera, suolo e oceano).

Il capitolo sottolinea inoltre come queste variazioni climatiche avranno rilevanti conseguenze sull'economia e sulla società italiana. Importanti settori economici nella produzione di valore aggiunto come turismo e industria, ma anche la dotazione infrastrutturale e l'agricoltura, sperimenteranno perdite di produzione, produttività o un calo della domanda. A queste perdite settoriali consegue un rallentamento della crescita e un calo del prodotto interno lordo. Questo tende a concentrarsi nelle regioni più vulnerabili ai cambiamenti climatici, come le isole maggiori, la Toscana e molte regioni del Sud Italia.

Alle perdite economiche si sommano impatti sulla società che possono aggravare problemi già esistenti e difficili da risolvere, quali la povertà e la disuguaglianza sociale. I cambiamenti climatici, ed in particolare le variazioni di temperatura, porteranno inoltre a conseguenze negative sulla salute della popolazione.

Questi impatti socioeconomici possono essere ridotti attraverso l'adozione di politiche volte ad aumentare la resilienza delle infrastrutture al cambiamento climatico

(adattamento), oltre che attraverso una minore crescita delle emissioni di gas serra e della temperatura (mitigazione), come discusso nei Capitoli 5 e 6.

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

Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, D., & Norton, K. (2018). A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R) USLE): With a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 6059-6086. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6059-2018>

Boere, E., Valin, H., Bodirsky, B. Baier, F., Balkovic, J., Batka, M., Folberth, C., Karstens, K., Kindermann, G., Krasovskii, A., Leclere, D., Wang, X., Weindl, I., Havlik, P., Lotze-Campen, H. 2019. D2.2 Impacts on agriculture including forestry & fishery. Deliverable of the H2020 COACCH project

Bollinger, L. A., Bogmans, C. W. J., Chappin, E. J. L., Dijkema, G. P., Huibregtse, J. N., Maas, N., ... & Tavasszy, L. A. (2014). Climate adaptation of interconnected infrastructures: a framework for supporting governance. *Regional environmental change*, 14(3), 919-931.

Bosello F., Standardi G., Parrado R., Dasgupta S., Guastella G., Rizzati M., Pareglio S., Schleyen J., Boere E., Batka M., Valin H., Bodirsky B., Lincke D., Tiggeloven T., van Ginkel K. (2021). D2.7. Macroeconomic, spatially resolved impact assessment. Deliverable of the H2020 COACCH project.

Bozzola, M., Massetti, E., Mendelsohn R., and Capitanio F. (2018). A Ricardian analysis of the impact of climate change on Italian agriculture. *European Review of Agricultural Economics* 45(1): 57-79. <https://doi.org/10.1093/erae/jbx023>.

Campagnolo, L. e E. De Cian (2021), Distributional consequences of climate change impacts on energy demand across Italian households, Working Paper 21-04 RFF CMCC.

Carraro, (ed.) (2009), Cambiamenti climatici e strategie di adattamento in Italia. Una valutazione economica, Bologna: Il Mulino. [ISBN: 8815126481 – ISBN-13: 9788815126481]

CDP (2019), CDP Italy Report: Climate insights among Italian businesses and local governments. Available at https://6fefcbb86e61af1b2fc4-c70d8ead6ced550b4d987d7c03fcdd1d.ssl.cf3.rackcdn.com/cms/reports/documents/000/004/749/original/CDP_Italy_Report.pdf?1576065225

Collins M., M. Sutherland, L. Bouwer, S.-M. Cheong, T. Frölicher, H. Jacot Des Combes, M. Koll Roxy, I. Losada, K. McInnes, B. Ratter, E. Rivera-Arriaga, R.D. Susanto, D. Swingedouw, and L. Tibig, (2019). Extremes, Abrupt Changes and Managing Risk. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.

Coppola, E., Raffaele, F., & Giorgi, F. (2018). Impact of climate change on snow melt driven runoff timing over the Alpine region. *Climate Dynamics*, 51(3), 1259-1273.

De Ridder, K., Lauwaet, D., & Maiheu, B. (2015). UrbClim–A fast urban boundary layer climate model. *Urban Climate*, 12, 21-48.

Dellink, R. et al. (2017). “International trade consequences of climate change”, OECD Trade and Environment Working Papers, 2017/01, OECD Publishing, Paris. <http://dx.doi.org/10.1787/9f446180-en>

Diodato, N., Ljungqvist, F.C. & Bellocchi, G. (2019). A millennium-long reconstruction of damaging hydrological events across Italy. *Sci Rep* 9, 9963. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46207-7>

Domínguez, I. and Fellmann, T. (2018). PESETA III: Agro-economic analysis of climate change impacts in Europe Final Report. 10.2760/179780.

Dottori F, Mentaschi L, Bianchi A, Alfieri L and Feyen L. Adapting to rising river flood risk in the EU under climate change, EUR 29955 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-12946-2, doi:10.2760/14505, JRC118425

Easterling, D. R. *et al.* (2000). Climate Extremes: Observations, Modeling, and Impacts. *Science***289**, 2068–2074.

European Environmental Agency (2021). Nature-based solutions in Europe: Policy, knowledge and practice for climate change adaptation and disaster risk reduction. EEA Report No 01/2021. Web site: <https://www.eea.europa.eu/publications/nature-based-solutions-in-europe>

European Environment Agency (EEA) (2016). Climate change impacts and vulnerability in Europe 2016: An indicator-based report. Luxembourg. doi: 10.2800/534806

Fondazione per lo Sviluppo Sostenibile (2019), Relazione sullo stato della green economy 2019: focus sugli impatti economici dei cambiamenti climatici in Italia, disponibile online da: http://italyforclimate.org/wp-content/uploads/2019/12/Relazione_sullo_stato_della_green_economy_2019.pdf

Forzieri, G., Cescatti, A., Silva, F. B. e & Feyen, L. Increasing risk over time of weather-related hazards to the European population: a data-driven prognostic study. *Lancet Planet. Health***1**, e200–e208 (2017).

Fuss S et al. (2014) Betting on negative emissions *Nat. Clim. Change* 4 850–3

Ghimire, B., Chen, A. S., Guidolin, M., Keedwell, E. C., Djordjević, S. & Savić, D. A. (2013). Formulation of a fast 2D urban pluvial flood model using a cellular automata approach. *Journal of Hydroinformatics* 15(3), 676-686.

GIZ (2017) Risk supplement to the vulnerability sourcebook. Guidance on How to Apply the Vulnerability Sourcebook’s Approach with the New IPCC AR5 Concept of Climate Risk

Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., Stoffel M., (2014). 21st century climate change in the European Alps—A review, *Science of The Total Environment*, Volume 493, Pages 1138-1151, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050>.

Guo, J., Kubli, D and Saner P. (2021), “The economics of climate change: no action not an option”, Swiss Re (pubs.), Zurich

Hausfather, Zeke & Peters, Glen. (2020). Emissions – the ‘business as usual’ story is misleading. *Nature*. 577. 618-620. 10.1038/d41586-020-00177-3.

ISPRA Annuario dati ambientali 2019. Disponibile presso: <https://annuario.isprambiente.it/ada/downreport/html/4940>

Jacob, D., et al. (2020): Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO-CORDEX community, *Reg. Environ. Change*, 20, 51, <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01606-9>, 2020.

Hausfather, Z., & Peters, G. P. (2020). Emissions—the ‘business as usual’ story is misleading. *Nature* 577, 618-620. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-00177-3>

Hennemuth TI, Jacob D, Keup-Thiel E, Kotlarski S, Nikulin G, Otto et al J (2017) Guidance for EUROCORDEX climate projections data use. Version1.0 - 2017.08. Link: <https://euro-cordex.net/imperia/md/content/csc/cordex/euro-cordex-guidelines-version1.0-2017.08.pdf>

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., Analysis of climate change impacts on EU agriculture by 2050, EUR 30078 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-10617-3, doi:10.2760/121115, JRC119632.

IPCC (2021). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press

IPCC (2014a). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Kahn, M.E., Mohaddes K., Ryan N. C. Ng., Pesaran M.H., Raissi, M., Yang J.C. (2019), ‘Long-term Macroeconomic Effects of Climate Change’, NBER working paper.

Kiel, J., Petiet, P., Nieuwenhuis, A., Peters, T., & Van Ruiten, K. (2016). A decision support system for the resilience of critical transport infrastructure to extreme weather events. *Transportation research procedia*, 14, 68-77.

Lauwaet, D., Hooyberghs, H., Maiheu, B., Lefebvre, W., Driesen, G., Van Looy, S., & De Ridder, K. (2015). Detailed urban heat island projections for cities worldwide: dynamical downscaling CMIP5 global climate models. *Climate*, 3(2), 391-415.

Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D. & Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature* 525, 367–371.

Libertino, A., Ganora, D. & Claps, P. (2019). Evidence for increasing rainfall extremes remains elusive at large spatial scales: The case of Italy. *Geophys. Res. Lett.* 46, 7437–7446.

Lim, S. S. *et al.*(2012). A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *Lancet Lond. Engl.***380**, 2224–2260.

Lincke, D., Hinkel, H., van Ginkel, K., Jeuken, A., Botzen, W., Tessellar, M., Scoccimarro, E., Ignjacevic, P. (2018). D2.3 Impacts on infrastructure, built environment, and transport Deliverable of the H2020 COACCH project

Martínez-Solanas, È., Quijal-Zamorano, M., Achebak, H., Petrova, D., Robine, J. M., Herrmann, F. R., ... & Ballester, J. (2021). Projections of temperature-attributable mortality in Europe: a time series analysis of 147 contiguous regions in 16 countries. *The Lancet Planetary Health*, 5(7), e446-e454.

McCallum, S., Dworak, T., Prutsch, A., Kent, N., Mysiak, J., Bosello, F., Klostermann, J., Dlugolecki, A., Williams, E., Konig, M., Leitner, M., Miller, K., Harley, M., Smithers, R., Berglund, M., Glas, N., Romanovska, L., van de Sandt, K., Bachschmidt, R., Voller, S., Horrocks, L. (2013). Support to the development of the EU Strategy for Adaptation to Climate Change: Background to the Impact Assessment, Part I – Problem definition, policy context and assessment of policy options. Environment Agency Austria, Vienna.

Mysiak, J., Torresan, S., Bosello, F., Mistry, M., Amadio, M., Marzi, S., ... & Sperotto, A. (2018). Climate risk index for Italy. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376(2121), 20170305.

Naumann G., Russo S.(a), Formetta G.(b), Ibarreta D., Forzieri G., Girardello M., and Feyen L., (2020). Global warming and human impacts of heat and cold extremes in the EU, EUR 29959 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92- 76-12954-7, doi:10.2760/47878, JRC118540.

Oke, T. R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* (1967), 7(8), 769-779.

Padulano, R., Reder, A., & Rianna, G. (2019). An ensemble approach for the analysis of extreme rainfall under climate change in Naples (Italy). *Hydrological Processes*, 33(14), 2020-2036.

Padulano, R., Rianna, G., & Santini, M. (2021a). Datasets and approaches for the estimation of rainfall erosivity over Italy: A comprehensive comparison study and a new method. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 34, 100788.

Padulano, R., Rianna, G., Costabile, P., Costanzo, C., Del Giudice, G. & Mercogliano, P. (2021b). Propagation of variability in climate projections within urban flood modelling: a multipurpose impact analysis. *Journal of Hydrology*, 602, 126756.

Pall, P. *et al.* Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000. *Nature***470**, 382–385 (2011).

Patz, J. A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T. & Foley, J. A. Impact of regional climate change on human health. *Nature***438**, 310–317 (2005).

PNACC (2017). Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici, versione per la verifica di assoggettabilità a VAS. Ministero dell’ambiente e della tutela del territorio e del mare.

Ronchi, E. (a cura di) (2019), “Relazione sullo stato della green economy 2019, focus sugli impatti dei cambiamenti climatici in Italia”, Fondazione per lo Sviluppo Sostenibile REPORT.

- Rahmstorf, S. & Coumou, D. (2011). Increase of extreme events in a warming world. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **108**, 17905–17909.
- Sanchez MG, de'Donato F K V. (2021). Heat and health in the WHO European Region: updated evidence for effective prevention. WHO Reg Off Eur.
- Schleypen, J.R., Dasgupta, S., Borsky, S., Jury, M., Ščasný, M., Bezhanishvili, L. (2019). D2.4 Impacts on Industry, Energy, Services, and Trade. Deliverable of the H2020 COACCH project.
- Scorzini, A. R., Di Bacco, M. and Leopardi, M. (2018) 'Recent trends in daily temperature extremes over the central Adriatic region of Italy in a Mediterranean climatic context', *International Journal of Climatology*, 38(January), pp. e741–e757. doi: 10.1002/joc.5403.
- 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
- Spinoni, J., Vogt, J. and Barbosa, P., (2015) 'European degree-day climatologies and trends for the period 1951–2011', *International Journal of Climatology* 35(1), 25–36 (DOI: 10.1002/joc.3959)
- Spinoni, J., et al., (2018) 'Changes of heating and cooling degree-days in Europe from 1981 to 2100', *International Journal of Climatology* 38, pp. e191–e208 (DOI: 10.1002/joc.5362).
- Stott, P. A., Stone, D. A. & Allen, M. R. (2004). Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature* **432**, 610–614.
- Tilloy, A., Malamud, B. D., Winter, H. & Joly-Laugel, (2019). A review of quantification methodologies for multi-hazard interrelationships. *Earth-Sci. Rev.* **196**, 102881.
- Trigila A., Iadanza C., Bussetini M., Lastoria B. (2018) Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio - Edizione 2018. ISPRA, Rapporti 287/2018
- Trnka M, Olesen JE, Kersebaum KC, Skjelvåg AO, Eitzinger J, Seguin B, et al. (2011). Agroclimatic conditions in Europe under climate change. *Glob. Change Biol.* 17, pp. 2298–2318.
- Van Passel, S., Massetti, E., Mendelsohn R. (2017), “A Ricardian analysis of the impact of climate change on the European agriculture”, *Environmental and Resource Economics*, 67: 725-760.
- Von Trentini, F., Leduc, M. & Ludwig, R. (2019). Assessing natural variability in RCM signals: comparison of a multi model EURO-CORDEX ensemble with a 50-member single model large ensemble. *Clim Dyn* 53, 1963–1979 <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04755-8>
- Vousdoukas M., Mentaschi L., Mongelli I., Ciscar J-C, Hinkel J., Ward P., Gosling S., and Feyen L., (2020). Adapting to rising coastal flood risk in the EU under climate change, EUR 29969 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. ISBN 978-92-76-12990-5, doi:10.2760/456870, JRC118512
- Watts, N. *et al.* (2015). Health and climate change: policy responses to protect public health. *The Lancet* **386**, 1861–1914.

Watts, N., Amann, M., Arnell, N., Ayeb-Karlsson, S., Beagley, J., Belesova, K., ... & Costello, A. (2021). The 2020 report of the Lancet Countdown on health and climate change: responding to converging crises. *The Lancet*, 397(10269), 129-170.

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

WMO (2007). The Role of Climatological Normals in a Changing Climate. WCDMP-No. 61, WMO.TD No. 1377. Zscheischler, J. & Seneviratne, S. I. Dependence of drivers affects risks associated with compound events. *Sci. Adv.* **3**, e1700263 (2017).

WTCC (2021). Italy 2021, Annual Research, Key Highlights, available at: <https://wtcc.org/Research/Economic-Impact>

Zscheischler, J. *et al.* (2018) Future climate risk from compound events. *Nat. Clim. Change* **8**, 469–477.

Zscheischler, J. *et al.* (2020) A typology of compound weather and climate events. *Nat. Rev. Earth Environ.* **1**, 333–347.

Capitolo 4

Impatti dei cambiamenti climatici sulle infrastrutture

Autori

Coordinamento	G. Forzieri
Modellistica climatica	P. Mercogliano, R. Buizza
Impatti climatici sulle infrastrutture di trasporto	M. Corazza (Pubblico locale); F. Ricci Feliziani, C. Liti, M. Duca, G. Loprencipe, A. Ferone, L. Lotti, P. Croce, P. Formichi, F. Landi (Terrestre); P. Di Mascio (Aereo); P. De Girolamo (Marittimo); A. Montanari (Fluviale)
Impatti climatici sulle infrastrutture di energia	E. Zio
Impatti climatici sulle infrastrutture di informatica e telecomunicazioni	M. Tornatore
Impatti climatici sulle infrastrutture di logistica	P. Cazzola
Impatti climatici sulle infrastrutture per la gestione delle risorse idriche	A. Castelletti, A. Cominola, C. Gandolfi, S. Alvisi
Impatti climatici sulle infrastrutture per la gestione dei rifiuti urbani e speciali	I. Pecorini
Valutazione dei futuri impatti economici diretti	G. Forzieri
Valutazione dei futuri impatti	F. Bosello, R. Parrado, G. Standardi, S. Dasgupta

economici indiretti

Visualizzazione

A. Bianchi

Sintesi

Le infrastrutture critiche sono componenti essenziali per il mantenimento delle funzioni vitali della società, della salute, della sicurezza e del benessere economico e sociale dei cittadini. Le principali minacce causate dai cambiamenti climatici a queste infrastrutture includono danni, distruzioni e conseguenti perdite di funzionalità causati da eventi estremi che il cambiamento climatico potrebbe esacerbare. Comprendere e quantificare questi rischi è fondamentale per pianificare misure di adattamento adeguate e garantire il buon funzionamento della società.

Il capitolo 4 descrive i meccanismi di impatto generati da eventi climatici estremi, quali ondate di calore e freddo, siccità, incendi, esondazioni fluviali e inondazioni costiere, e tempeste di vento, con riferimento a differenti tipologie di infrastrutture critiche di trasporto, energia, informazione e comunicazione, logistica, distribuzione e gestione idrica e dei rifiuti.

L'analisi si basa su una revisione esaustiva della letteratura scientifica relativa all'argomento. Utilizzando simulazioni condotte in precedenti studi ed esperimenti modellistici dedicati, vengono quantificati i possibili impatti economici diretti e indiretti sulle infrastrutture critiche del Paese conseguenti alle variazioni in frequenza e intensità degli eventi climatici estremi attese nei prossimi decenni, in accordo con uno scenario di emissione di gas serra "business-as-usual" che prevede un aumento della temperatura media globale di $\sim 3^{\circ}\text{C}$ entro la fine del secolo rispetto al 1990.

Sulla base di tali analisi si valuta che **l'impatto economico diretto sulle infrastrutture in Italia potrebbe crescere nel periodo 2040-2070 fino a 5.17 ± 0.46 miliardi di euro l'anno, corrispondente ad un aumento di circa 12 volte il valore del danno odierno.**

Mentre gli attuali danni originati dai rischi climatici sono associati principalmente alle esondazioni fluviali (58%), **le proporzioni dei danni causati da siccità e ondate di calore potrebbero aumentare fortemente, fino a rappresentare circa il 92% dei danni climatici nel periodo 2040-2070 (vs 31% nel periodo 1981-2010 di riferimento).**

Ciò suggerisce che, in assenza di adeguate strategie di adattamento, gli impatti degli eventi climatici estremi potrebbero cambiare non solo in termini di entità dei danni, ma anche nelle loro tipologie. Ad esempio, **la produzione di energia potrebbe ridursi in maniera sostanziale** in seguito alla diminuzione dell'efficienza dei sistemi di raffreddamento delle centrali, a causa dell'aumento della temperatura dell'acqua e dell'aria, con conseguenti effetti su molte delle infrastrutture da essa fortemente dipendenti, quali informazione e telecomunicazione e sistemi logistici. **Per il settore energia si stima che l'attuale impatto economico diretto associato agli eventi climatici estremi (0.04 miliardi di euro l'anno) potrebbe aumentare del 1325% entro il 2040-2070.**

Il trasporto terrestre e pubblico urbano potrebbero subire importanti danni per la **deformazione delle rotaie e il deterioramento del manto stradale** a causa delle elevate temperature; mentre la navigabilità delle vie interne potrebbe ridursi in conseguenza dei decrescenti deflussi fluviali attesi. **Per il settore dei trasporti si stima che l'attuale impatto economico diretto associato agli eventi climatici estremi (0.15 miliardi di euro all'anno) potrebbe aumentare del 1916% entro il 2040-2070.**

I sistemi di gestione idrica e dei rifiuti probabilmente dovranno affrontare con maggiore frequenza problematiche legate ad un crescente degrado delle sostanze da trattare. **Per tale settore industriale si stima che l'attuale impatto economico diretto associato agli eventi climatici estremi (0.23 miliardi di euro all'anno) potrebbe aumentare del 678% entro il 2040-2070.**

Anche le **inondazioni costiere, in larga misura controllate dal progressivo innalzamento del mare, manifesteranno probabilmente un incremento molto rilevante con conseguenti impatti sostanziali sulle infrastrutture** critiche in prossimità della costa ed in particolare per il trasporto marittimo. I rischi di esondazioni fluviali e di incendi tenderanno ad aumentare, anche se le proiezioni suggeriscono che i loro effetti complessivi saranno più ridotti rispetto ai fenomeni climatici sopra menzionati. Gli impatti legati alle tempeste di vento, anche se probabilmente mostreranno variazioni limitate, rimangono un pericolo climatico potenzialmente molto dannoso per il trasporto aereo e la rete di trasmissione e distribuzione di energia mediante cavi aerei. Gli impatti originati dalle ondate di freddo scompariranno progressivamente in seguito al riscaldamento globale.

In totale, nello scenario "*business as usual*", si stima che **il danno complessivo (diretto e indiretto) causato dalla perdita o danneggiamento di infrastrutture per il Paese possa variare tra lo 0.1-0.4% del PIL medio nel decennio 2020-2030 e lo 0.33-0.55% del PIL nel 2050. Ad oggi, si tratterebbe di mancata capacità di produrre beni e servizi per un valore di circa 2.3 - 8.7 miliardi di euro. Proiettata al 2050, la perdita ammonterebbe a circa 11.5 - 18 miliardi di euro.** Più del doppio, quindi, rispetto al danno diretto da cambiamento climatico sulle infrastrutture.

In generale, l'intero Paese sarà soggetto ad un **sostanziale aumento degli impatti climatici**, tuttavia la loro distribuzione non sarà omogenea sul territorio. In termini assoluti, i valori di rischio climatico saranno maggiori nelle regioni del Nord Italia e del versante tirrenico, caratterizzate da una più densa dotazione infrastrutturale potenzialmente esposta ai futuri eventi climatici estremi. Tuttavia, **in termini relativi, l'aumento del rischio climatico appare più marcato nelle regioni del Sud Italia, in seguito a variazioni più pronunciate in queste zone degli eventi climatici estremi direttamente dipendenti da temperatura e precipitazione.**

Sebbene le evidenze scientifiche presentate e discusse nel capitolo dimostrino crescenti e inequivocabili impatti climatici sulle infrastrutture del nostro Paese, le valutazioni rimangono soggette ad incertezze, alcune di difficile valutazione in base agli strumenti e dati attualmente disponibili. A tale proposito si propongono possibili indirizzi di ricerca e di programmazione da sviluppare per affinare le stime di rischio e favorire lo sviluppo di strategie di adattamento appropriate.

Sommario

Introduzione	6
4.1 Impatti originati da eventi climatici estremi sulle infrastrutture critiche	9
4.1.1 Infrastrutture di trasporto	11
4.1.1.1 <i>Trasporto terrestre</i>	11
4.1.1.2 <i>Trasporto Pubblico Locale</i>	14
4.1.1.3 <i>Trasporto Aereo</i>	18
4.1.1.4 <i>Trasporto Marittimo</i>	21
4.1.1.5 <i>Trasporto Fluviale</i>	24
4.1.2 Infrastrutture per l'energia	27
4.1.3. Infrastrutture informatiche e per le telecomunicazioni	30
4.1.4. Infrastrutture logistiche	33
4.1.5. Infrastrutture per la gestione delle risorse idriche	34
4.1.6. Infrastrutture per la gestione dei rifiuti urbani e speciali	39
4.1.7. Effetti delle interdipendenze settoriali	42
4.2. Proiezioni degli impatti economici associati ai cambiamenti negli eventi climatici estremi	45
4.2.1 Impatti economici diretti	47
4.2.1.1 <i>Rischi multi-settoriali multi-pericolo</i>	47
4.2.1.2 <i>Rischi a livello di settore e infrastruttura</i>	49
4.2.1.3 <i>Variazione spazio-temporale dei rischi</i>	53
4.2.2. Impatti economici indiretti	55
4.2.3. Valutazione delle incertezze	59
4.3. Dinamiche socio-economiche e rischi di transizione	61
4.4 Conclusioni e proposte	62
Bibliografia	66

Introduzione

Le infrastrutture critiche sono componenti essenziali per il mantenimento delle funzioni vitali della società, della salute, della sicurezza e del benessere economico e sociale dei cittadini. Le principali minacce causate dal clima a queste infrastrutture includono danni o distruzione da eventi estremi (Handmer et al., 2012) che il cambiamento climatico tenderà probabilmente a esacerbare (Fisher et Knutti, 2015) (Pall, 2011).

Evidenze di tali effetti emergono in maniera incontrovertibile dal crescente numero di eventi climatici estremi a scala globale (Coumou et Rahmstorf, 2012) (AghaKouchak et al, 2020) e dei conseguenti impatti osservati negli ultimi decenni (Figura 1).

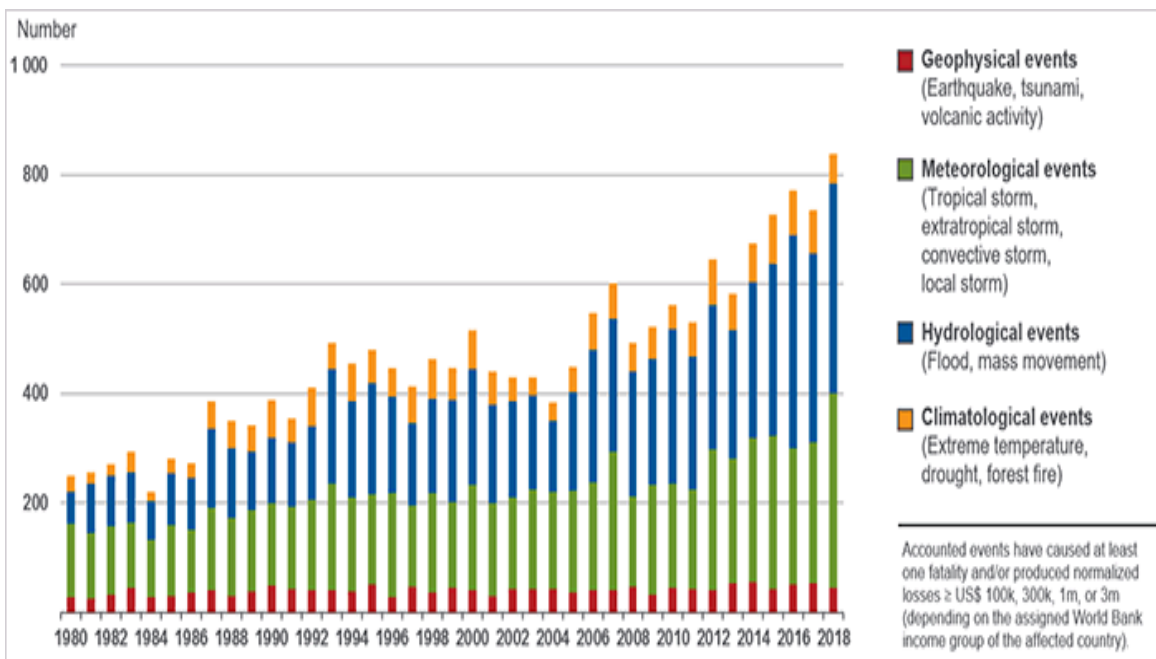


Figura 1. Serie storica di eventi climatici estremi che hanno generato impatti negativi sulla società aggregati a livello globale per il periodo 1980-2018. Fonte: Munich Re NatCatSERVICE.

Comprendere e quantificare i rischi associati a questi eventi risulta necessario per poter pianificare adeguate misure di prevenzione, mitigazione e adattamento, a salvaguardia e garanzia del funzionamento delle infrastrutture e, quindi, della società che esse supportano.

Pericoli, vulnerabilità, esposizione e conseguenti rischi del cambiamento climatico

Secondo la metodologia proposta dall'IPCC (IPCC, 2014), gli impatti (rischi) dei cambiamenti climatici sulle infrastrutture originano dalle interazioni dinamiche tra i pericoli generati da fenomeni climatici, l'esposizione delle infrastrutture e la loro vulnerabilità al pericolo climatico a cui sono esposte (Figura 2). Il **pericolo climatico** rappresenta il potenziale verificarsi di un evento climatico che può causare danni e perdite a proprietà, infrastrutture e più in generale alla fornitura di servizi. L'**esposizione** si riferisce a

per
esp

te a
ondo

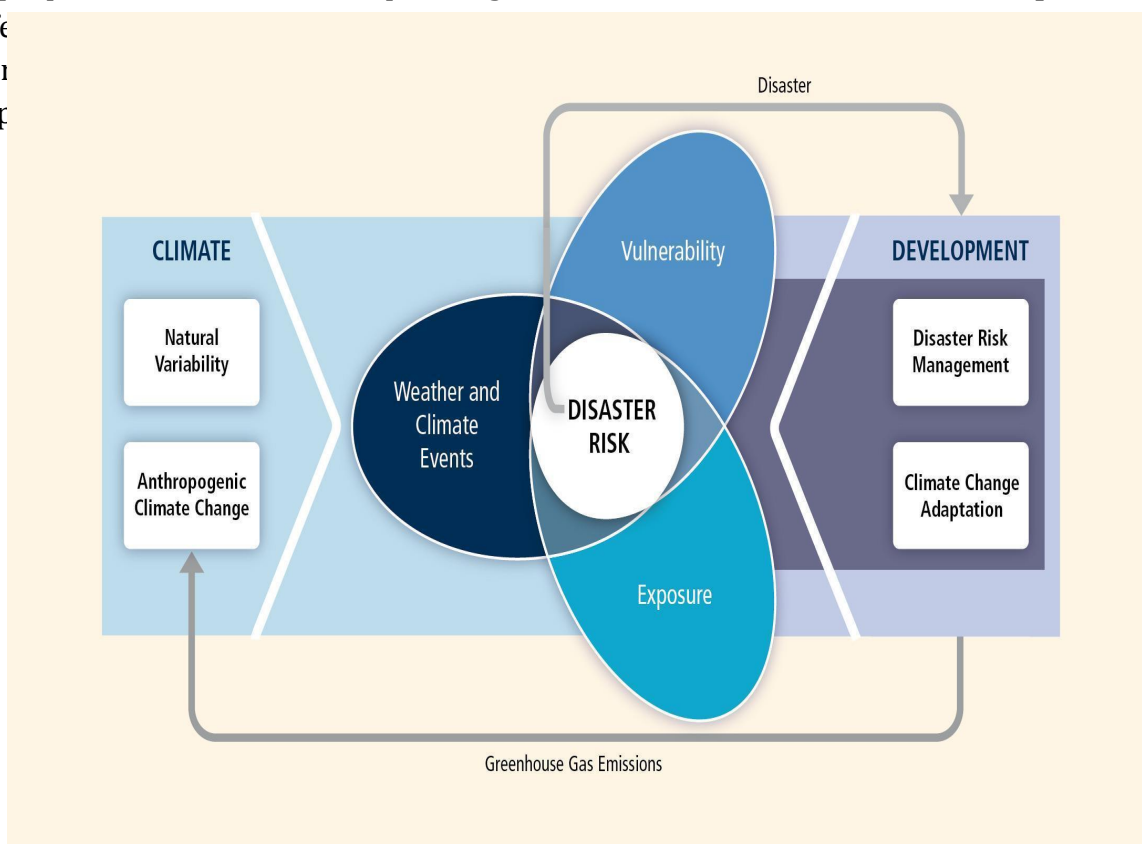


Figura 2. Illustrazione del concetto di rischio come integrazione di pericolo, esposizione e vulnerabilità. Fonte: IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

La quantificazione dei pericoli, dell'esposizione e della vulnerabilità è soggetta a incertezza sia in termini di grandezza che di probabilità di accadimento, e ciascun elemento è variabile nel tempo e nello spazio in funzione dei cambiamenti climatici e socio-economici futuri.

Ovviamente, tipologie differenti di infrastrutture sono caratterizzate da differenti livelli di vulnerabilità ai cambiamenti climatici (Forzieri et al., 2018). Inoltre, poiché gli impatti dei cambiamenti climatici si manifestano localmente, le singole infrastrutture hanno anche diverse esposizioni ai pericoli climatici a seconda della loro posizione geografica.

Come sopra detto, i processi climatici e socio-economici influenzano il pericolo, l'esposizione e la vulnerabilità e, di conseguenza, i risultanti impatti. Ad esempio, la crescente instabilità del sistema climatico in conseguenza di pressioni di origine naturale e antropica, quali le emissioni di gas serra, amplifica la variabilità climatica e, in ultima analisi, aumenta la frequenza e la severità degli eventi climatici estremi (Fisher et Knutti, 2015; Diffenbaugh et al., 2017).

Gli sviluppi economici e sociali di un paese, discussi nel capitolo 2, possono a loro volta influenzare gli impatti climatici, ad esempio promuovendo la realizzazione di opere infrastrutturali o la loro espansione in determinate aree, quindi controllando la distribuzione spaziale e temporale delle infrastrutture sul territorio, varando politiche di adattamento che incentivino l'utilizzo di tecnologie più o meno vulnerabili ai pericoli climatici (Formetta et Feyen, 2019) (Jongman et al., 2015), o di mitigazione attraverso tecnologie e politiche di riduzione di emissione di gas serra in atmosfera (Fawzy et al., 2020).

Le dinamiche socio-economiche legate al processo di aggiustamento verso un'economia a basse emissioni di carbonio e più sostenibile sotto il profilo ambientale¹ possono generare inoltre rischi di transizione, specie in assenza di processi analitici capaci di valutare l'esposizione del sistema socio-economico a questi rischi, e quindi di strategie per anticiparli e convertirli in opportunità di sviluppo.

L'impatto di un evento climatico estremo su una infrastruttura si manifesta in termini di danno fisico ai componenti che costituiscono l'infrastruttura e, di conseguenza, in termini di costi necessari per la messa in sicurezza e per gli interventi di ripristino/sostituzione/ricostruzione (impatti diretti). Inoltre, la distruzione parziale o completa dell'infrastruttura può causare perdite economiche associate alle eventuali riduzioni di fornitura di servizio dovute alla ridotta funzionalità dell'infrastruttura o di altre ad essa interconnesse (impatti indiretti) (Kreibich et al., 2014).

Struttura del capitolo

¹ Recommendations. *Task Force on Climate-Related Financial Disclosures* <https://www.fsb-tcfd.org/recommendations/>.

Nelle sezioni successive, si descrive qualitativamente la tipologia degli impatti di eventi climatici estremi su varie infrastrutture critiche, sulla base di una estesa revisione della letteratura scientifica relativa all'argomento, strutturando la presentazione per tipologie di infrastruttura (sezione 4.1). Successivamente si fornisce una stima quantitativa, aggregata per settori economici e infrastrutture, degli impatti economici diretti e indiretti attesi sul territorio nazionale (sezione 4.2) alla luce dei cambiamenti climatici attesi nei prossimi decenni in base ad uno scenario di emissione di gas serra "business-as-usual" consistente con quanto presentato nel precedente capitolo 3. La descrizione preliminare degli impatti è funzionale a comprendere i canali attraverso cui i danni economici principalmente si svilupperanno. Si conclude con una breve analisi dei possibili effetti associati alle dinamiche socio-economiche e ai rischi di transizione (sezione 4.3), e con una sintesi dei possibili ulteriori sviluppi di ricerca e di programmazione necessari per affinare le metodologie di stima degli impatti dei cambiamenti climatici (sezione 4.4). La disamina fornita nel presente capitolo è utilizzata come base informativa per proporre appropriate strategie di adattamento e mitigazione, descritte nei successivi capitoli 5 e 6.

4.1 Impatti originati da eventi climatici estremi sulle infrastrutture critiche

La progettazione delle infrastrutture critiche deve considerare la valutazione dei pericoli climatici che queste dovranno essere in grado di sostenere nel corso del loro ciclo di vita (Croce et al., 2018). La definizione delle mappe dei pericoli climatici utilizzate per la progettazione è generalmente basata su elaborazioni statistiche dei valori estremi annuali, condotte nell'ipotesi di stazionarietà del clima. Poiché il cambiamento climatico modifica l'intensità e la frequenza degli eventi climatici, in particolare di quelli estremi, l'ipotesi di stazionarietà del clima viene meno; conseguentemente i pericoli climatici da considerare per la progettazione debbono essere adeguatamente rivalutati, sì da garantire che le strutture conservino il richiesto grado di affidabilità nel corso del tempo. Ad esempio, le recenti simulazioni numeriche generate per stimare l'evoluzione del clima futuro (IPCC, 2021) possono venire utilizzate per stimare l'evoluzione temporale delle statistiche degli eventi estremi. Se da un lato le future progettazioni potranno incorporare le conoscenze aggiornate sui fattori di rischio, si pone il problema delle strutture esistenti progettate secondo normative che trascuravano gli effetti dei rapidi cambiamenti climatici (Croce et al., 2019).

Impatti diretti e indiretti dei cambiamenti climatici sulle infrastrutture

Gli impatti sulle infrastrutture originati da eventi climatici estremi possono presentare tipologie molto diverse a seconda del processo climatico considerato e delle caratteristiche dell'infrastruttura stessa esposta al pericolo climatico. Nella presente sezione, si descrivono gli impatti originati da ondate di calore e di freddo, siccità, incendi, esondazioni fluviali e inondazioni costiere, allagamenti, frane e tempeste di vento, descrivendone le caratteristiche per differenti tipologie di infrastrutture di trasporto, energia, informazione e comunicazione (ICT), logistica e per la distribuzione e gestione idrica e dei rifiuti. Impatti relativi alle variazioni climatologiche sono stati inclusi per le infrastrutture particolarmente sensibili (ad esempio energia). L'analisi presentata si basa su un'estesa revisione della letteratura scientifica sull'argomento e considera due categorie di impatto: diretto e indiretto. Gli impatti diretti sono quelli che un determinato fenomeno climatico può esercitare sulle infrastrutture fisiche, ad esempio rotture di condotte, guasti agli organi di regolazione, collassi o cedimenti strutturali dei manufatti. Gli impatti indiretti riguardano l'alterazione delle funzioni svolte dalle infrastrutture e un loro decrescente livello di servizio. Tali impatti si traducono tipicamente in costi necessari per gli interventi di messa in sicurezza e ripristino/sostituzione/ricostruzione delle componenti infrastrutturali colpite, o in perdite economiche dovute alla riduzione di funzionalità dell'infrastruttura, e quindi della fornitura del relativo servizio (Kreibich et al., 2014).

Interdipendenze fra pericoli climatici e infrastrutture

La descrizione degli impatti nelle sezioni 4.1.1 – 4.1.6, organizzata separatamente per singoli pericoli climatici e per singole tipologie infrastrutturali, necessariamente rappresenta una fotografia parziale dei possibili effetti del cambiamento climatico. Infatti, come anticipato nel precedente capitolo 3, i fattori e i processi che controllano i pericoli climatici spesso interagiscono e possono esacerbarsi nello spazio e nel tempo (Tilloy et al., 2019)(Zscheischler & Seneviratne, 2017). Per esempio, tempeste di vento e incremento di precipitazioni possono verificarsi congiuntamente determinando incrementi della velocità di corrosione degli acciai, o un aumento della velocità di carbonatazione del calcestruzzo, con conseguente amplificazione dei fenomeni di degrado (Stewart et al., 2011). Le implicazioni economiche di tali effetti possono essere accentuate ulteriormente a causa delle forti interconnessioni esistenti fra molteplici settori infrastrutturali, ovvero impatti su una determinata infrastruttura possono propagarsi repentinamente su altre infrastrutture (Chopra & Khanna, 2015) (Buldyrev et al., 2010). Ad esempio, fenomeni di tempeste di vento possono generare danni alla rete elettrica con conseguente perdita di distribuzione di corrente elettrica, che a sua volta può avere effetti su molte delle infrastrutture da essa fortemente dipendenti (Bompard et al., 2013) (Sieber, 2013). Tali interdipendenze settoriali sono brevemente descritte nella sezione 4.1.7 che riporta alcuni

esempi di interazioni fra molteplici infrastrutture e dei possibili effetti a cascata che possono originare in caso di danneggiamento o riduzione di operatività di una singola infrastruttura. Pertanto, la descrizione proposta nelle sezioni seguenti rappresenta solo un primo passo necessario per comprendere la varietà di meccanismi attraverso cui gli eventi climatici estremi possono generare impatti economici sulle infrastrutture. Per una comprensione più approfondita delle dipendenze di ogni singola infrastruttura dalle pressioni climatiche o da altre infrastrutture si rimanda il lettore ai riferimenti bibliografici citati nel testo.

4.1.1 Infrastrutture di trasporto

4.1.1.1 Trasporto terrestre

Le infrastrutture di trasporto terrestre comprendono le opere stradali e ferroviarie. Per quanto riguarda l'infrastruttura ferroviaria sono state considerate: la sede che include il corpo stradale (opere civili quali rilevati, trincee, opere civili minori e opere d'arte come ponti, viadotti e gallerie) e la sovrastruttura ferroviaria (insieme di elementi atti a realizzare il piano di rotolamento e guida del veicolo ferroviario); gli impianti ferroviari (impianti di trazione elettrica, di sicurezza e di segnalamento, sistemi di telecomunicazione); stazioni e fabbricati ferroviari. Per quanto concerne l'infrastruttura stradale sono stati considerati: il corpo stradale (che include anche tutte le opere d'arte stradali come ponti, viadotti e gallerie); la pavimentazione stradale; e i sistemi di segnaletica. Di seguito si descrivono gli impatti climatici sulle infrastrutture di trasporto terrestre, sintetizzati in Tabella 1.

Ondate di calore

Le ondate di calore tendono ad acuire i fenomeni di rottura e degradazione della pavimentazione stradale con conseguente aumento degli interventi – e associati costi – di manutenzione e ripristino necessari (Nemry & Demirel, 2012) (UNECE, 2020). Per quanto concerne l'infrastruttura ferroviaria tra i principali impatti ascrivibili alle ondate di calore è possibile annoverare i fenomeni di deformazione dei binari causati dalla dilatazione termica (ovvero i fenomeni di *buckling*) (Nemry & Demirel, 2012) (UNECE, 2020). Tali deformazioni compromettono il livello del servizio ferroviario: in tali circostanze, infatti, si registrano spesso aumenti dei tempi di percorrenza delle linee dovuti alla riduzione delle velocità di esercizio (Nemry & Demirel, 2012) e/o interruzioni di servizio. In casi più estremi si potrebbe arrivare a compromettere la sicurezza della marcia del treno. Altri impatti ascrivibili all'aumento delle temperature sono l'eccessivo surriscaldamento delle componenti di segnalamento e di telecomunicazione che potrebbe ridurre l'affidabilità e generare malfunzionamenti (Ferranti et al., 2016). Particolarmente significativi potrebbero

risultare gli incrementi degli spostamenti richiesti ai dispositivi mobili di vincolo e ai giunti di dilatazione dei ponti stradali e ferroviari; ne possono derivare riduzioni inaccettabili del comfort di marcia o la percolazione di acque aggressive, quali quelle ricche di sali antigelo, provenienti dall'impalcato con esaltazione dei fenomeni di degrado. Tali impatti fisici si traducono in conseguenti costi di ripristino/sostituzione/ricostruzione delle componenti infrastrutturali danneggiate e in una possibile riduzione di operatività.

Ondate di freddo

Le ondate di freddo tendono a danneggiare la pavimentazione stradale (fenomeni di rottura e degradazione del manto stradale) e tali impatti richiedono interventi di manutenzione e possibili blocchi o disagi alla circolazione. Tali effetti risultano particolarmente accentuati dall'amplificarsi dei cicli di gelo-disgelo (OECD, 2016). Eventi nevosi e gelate richiedono inoltre interventi di rimozione di neve e ghiaccio con conseguenti simili impatti sulla circolazione nonché un aumento dei costi di manutenzione/ripristino. Una riduzione eccessiva delle temperature può compromettere il funzionamento dei sistemi di segnalamento, comunicazione e instradamento treni, ad esempio a causa del loro congelamento, nonché la funzionalità della linea di contatto che non permette l'accoppiamento pantografo-fune.

Siccità

Prolungati periodi di siccità possono acuire i fenomeni di subsidenza del terreno causando degradazione e deformazione del manto stradale con conseguente necessità di interventi di manutenzione (OECD, 2016).

Incendi

La propagazione di incendi in prossimità delle infrastrutture terrestri generalmente causa una temporanea chiusura delle strade e ferrovie. In presenza di eventi particolarmente severi, il calore sprigionato da un incendio può compromettere parti dell'infrastruttura interessata (es., danni materiali a ponti stradali e ferroviari) e causare guasti ai sistemi di controllo e di monitoraggio o danneggiare la segnaletica stradale aumentando i costi di manutenzione necessari per gli interventi di ripristino/sostituzione/ricostruzione delle componenti infrastrutturali colpite (Fraser et al., 2020)

Esondazioni fluviali e inondazioni costiere/Allagamenti

Esondazioni/inondazioni e allagamenti generano importanti impatti sulle infrastrutture di trasporto terrestre. In particolare, possiamo distinguere due fenomenologie principali di impatto: a) erosioni fluviali che possono portare a danni strutturali dovuti, per esempio, all'incremento delle spinte sulle opere geotecniche e sulle spalle dei ponti, b) scalzamento

delle fondazioni di opere geotecniche e delle pile dei ponti. Esondazioni e intense precipitazioni possono inoltre causare l'allagamento temporaneo delle sedi stradali e ferroviarie e/o il loro danneggiamento dovuto allo scorrimento delle acque e il malfunzionamento/collasso dei sistemi di drenaggio (Nemry & Demirel, 2012) (UNECE, 2020). Inoltre, precipitazioni intense localizzate su piccoli bacini possono generare impatti importanti sulle infrastrutture di trasporto a causa dell'elevato trasporto solido che può ostruire la sede stradale e ferroviaria. Tutti questi impatti fisici si traducono in conseguenti costi di ripristino/sostituzione/ricostruzione delle componenti infrastrutturali danneggiate/distrette.

Frane

L'instabilità dei versanti, spesso generata da intense precipitazioni, rappresenta un ulteriore importante pericolo di origine climatica per le infrastrutture di trasporto terrestre. Fango, detriti e massi possono invadere le sedi, sia stradali che ferroviarie, interrompendo la circolazione (Klose et al., 2015). In presenza di eventi particolarmente severi, le frane possono generare danni a varie componenti dell'infrastruttura o addirittura distruggerle come nel caso del crollo di ponti e viadotti (OECD, 2016). Tutti questi impatti fisici si traducono in conseguenti costi di ripristino/sostituzione/ricostruzione delle componenti infrastrutturali danneggiate/distrette. La penisola italiana, per le sue particolarità geologiche, morfologiche e climatiche è costituita da un territorio particolarmente soggetto a fenomeni di dissesto idrogeologico (Mysiak et al., 2013).

Tempeste di vento

A seguito di forti raffiche di vento sia le carreggiate stradali che le sedi ferroviarie possono essere temporaneamente inutilizzabili per la presenza di rami e alberi caduti o di detriti trasportati dal vento. Inoltre, gli alberi abbattuti dal vento potrebbero colpire, cadendo, le linee aeree di contatto interrompendo così il servizio ferroviario in modo prolungato (UNECE, 2020). In presenza di venti particolarmente forti si possono registrare danni strutturali alle componenti dell'infrastruttura sia ferroviaria che stradale in seguito all'impatto diretto con detriti trasportati dal vento o alla pressione esercitata dallo stesso (es., danni a ponti e viadotti strallati, agli stabilimenti) (Nemry & Demirel, 2012) (UNECE, 2020). Tali fenomeni possono richiedere l'intervento di interventi di manutenzione straordinaria con eventuali aumentati costi di ripristino/sostituzione/ricostruzione delle componenti infrastrutturali colpite.

Pericolo climatico	Impatti	
	Strade	Ferrovie
Ondate di calore	Deterioramento del manto stradale Danni a ponti e viadotti legati all'espansione termica	Deformazione dei binari causata dalla dilatazione termica Limitazioni delle velocità di percorrenza e/o interruzioni di servizio Eccessivo surriscaldamento dei materiali rotabili Malfunzionamento delle componenti di segnalamento e di telecomunicazione Danni a ponti e viadotti legati all'espansione termica
Ondate di freddo	Deterioramento del manto stradale	Danneggiamento o distruzione di vari componenti dell'infrastruttura ferroviaria (es. congelamento componenti segnalamento, comunicazione e istradamento treni)
Siccità	Deterioramento del manto stradale, danni strutturali alla sede stradale a causa di fenomeni di subsidenza	Danni strutturali alla sede ferroviaria a causa di fenomeni di subsidenza
Incendi	Danni causati dall'esposizione a fuoco e alte temperature	Danni causati dall'esposizione a fuoco e alte temperature
Esondazioni fluviali e inondazioni costiere Allagamenti	Danni strutturali a causa dell'impatto diretto con i flutti, in particolare ponti e viadotti; fenomeni di cedimento della sede stradale; erosione alla base delle pile e delle spalle dei ponti Deterioramento del manto stradale Allagamento della sede stradale con conseguente riduzione di operatività Malfunzionamento dei sistemi di drenaggio	Danni strutturali a causa dell'impatto diretto con i flutti, in particolare ponti e viadotti; fenomeni di cedimento della sede ferroviaria; erosione alla base delle pile e delle spalle dei ponti; Allagamento della sede ferroviaria con conseguente riduzione di operatività Malfunzionamento dei sistemi di drenaggio
Frane	Possibile ostruzione della sede stradale Danni strutturali causati dall'impatto diretto di movimenti di massa	Possibile ostruzione della sede ferroviaria Danni strutturali causati dall'impatto diretto di movimenti di massa
Tempeste di vento	Possibile ostruzione della sede stradale a seguito della caduta di alberi Danni strutturali in seguito alla pressione del vento o dell'impatto con detriti, in particolare ponti e viadotti	Possibile ostruzione della sede ferroviaria a seguito della caduta di alberi Maggiori sollecitazioni ai sistemi di elettrificazione Danni strutturali in seguito alla pressione del vento o dell'impatto con detriti, in particolare ponti e viadotti

Tabella 1. Impatti climatici sulle infrastrutture di trasporto terrestre.

4.1.1.2. Trasporto Pubblico Locale

La natura multi-modale del Trasporto Pubblico Locale (TPL) e l'esercizio integrato comportano la compresenza di più tipi di infrastrutture in ambito urbano: viarie per la circolazione di modi motorizzati e non, i primi sia su gomma che su ferro, di superficie e/o sotterranee (strade, ponti, tunnel, ecc.); di interscambio, sosta e ricovero (fermate, terminali, stazioni, depositi, parcheggi), anche queste in superficie (areali o in elevato) o interrate; di servizio, aeree, di superficie o interrate (ad esempio, per captazione elettrica, approvvigionamenti di carburante e materiali, smaltimento delle acque meteoriche, reti telematiche, ecc.). Sebbene gli impatti dei fenomeni climatici estremi su queste infrastrutture possano essere in parte simili a quelli riportati nella sezione precedente 4.1.1.1 relativa al trasporto terrestre, la peculiarità del TPL risiede nella contemporaneità dei diversi modi interessati, con conseguente amplificazione degli effetti a scala urbana che si ripercuotono sulla domanda, con alterazioni delle abitudini e modalità di spostamento. Di seguito si descrivono gli impatti climatici sulle infrastrutture di cui si avvale il trasporto pubblico locale, con riferimento alle sue specificità rispetto al trasporto terrestre precedentemente discusso. Le valutazioni sono sintetizzate in Tabella 2.

Ondate di calore/Aumento di temperatura media

Temperatura e radiazione solare sono due dei tre fattori (unitamente al vento) che definiscono il regime termico all'interno della pavimentazione poiché determinano la trasmissione di calore tra l'aria e la superficie stradale. Per quello che riguarda la sede stradale, e in particolare i marciapiedi, la variazione del regime termico influenza normalmente il comportamento delle pavimentazioni; se tale variazione si associa a temperature molto elevate (unitamente a irraggiamenti prolungati, tipici del periodo estivo) le pavimentazioni a base bituminosa in quanto termo-suscettibili vedono le proprie caratteristiche meccaniche risentirne fortemente e le deformazioni viscosi dei manti di usura si inaspriscono, contribuendo ulteriormente a fenomeni di deterioramento. Nelle pavimentazioni legate a cemento le dilatazioni si esaltano e se tali deformazioni sono impedito si può generare uno stato di sollecitazione incompatibile con la resistenza della pavimentazione stessa (Corazza et al.,2014). Pertanto, condizioni di eccessivo e prolungato calore e irraggiamento contribuiscono al deterioramento del manto stradale con aggravio delle operazioni di manutenzione.

Inoltre, per i veicoli su gomma, tali deformazioni si associano ad un aumento moderato della resistenza al rotolamento con conseguente possibile incremento nei consumi spesso ulteriormente amplificati dal maggiore uso di ausiliari a bordo per migliorare il confort di viaggio. Deterioramenti di questo tipo influiscono anche nel confort di pedoni e passeggeri

che, oltre al disagio e alla scarsa sicurezza nel camminare su superfici discontinue, si possono anche trovare ad attendere l'autobus presso fermate prive di protezione dall'irraggiamento e senza possibilità di raffrescamento. La percezione di mancato o scarso comfort a bordo e a terra può divenire fattore di diversione modale a favore dell'auto privata, con evidenti problemi di aumento delle esternalità negative.

Per i modi su ferro, e in particolare per i tram, le ondate di calore possono comportare stati di tensione/compressione nell'armamento, fenomeni in genere ben controllati dalle maggiori dimensioni delle rotaie tramviarie rispetto a quelle ferroviarie. Al limite, i casi di avaria possono tradursi in una deformazione dei binari causati dalla dilatazione termica (ovvero i fenomeni di *buckling*), fenomeno peraltro raro ma che comunque comporta lo svio. Le ondate di calore possono peggiorare la regolarità di contatto sulla linea aerea delle tramvie a causa di una maggiore ondulazione dei cavi, salvo l'intervento di dispositivi tensori. Da considerare anche la verifica dei comportamenti dei giunti di collegamento tra la piena via e le opere d'arte (ponti e rilevati) qualora il tracciato lo preveda, come ulteriore attività manutentiva (Anderson et al., 2015). Per i tram valgono le stesse notazioni sul comfort dei passeggeri già espresse a proposito dei modi su gomma. Si riscontra uno scarso comfort anche nell'esercizio delle metropolitane, con aggravio nell'uso dei sistemi di aerazione e condizionamento. Vi è da notare che molti dei problemi sopraesposti, soprattutto inerenti al comfort di viaggio e l'aumento nel ricorso agli ausiliari di bordo, sono riscontrabili anche in caso di fenomeni meno estremi, come l'isola di calore.

Ondate di freddo

Il prolungarsi di temperature molto rigide comporta l'inversione dei fenomeni sopra riportati, con esiti legati in questo caso alla contrazione dei materiali, contribuendo al deterioramento del manto stradale fino alla possibile rottura. Tipici deterioramenti, come ad esempio i cretti per le pavimentazioni stradali, comportano egualmente problemi di manutenzione. Fenomeni associati quali gelo e nevicate oltre a generare tale fragilizzazione dello strato superficiale dell'asfalto, possono incidere sulla qualità di guida del veicolo su gomma a causa della perdita di aderenza tra pneumatico e superficie stradale con problemi di sicurezza stradale, rallentamenti alla circolazione e irregolarità del servizio erogato (Qiu & Nixon, 2008). Interventi mitigatori come quelli legati alla rimozione della neve e del ghiaccio possono rientrare nell'ambito della ordinaria manutenzione in aree con regimi climatici freddi, ma comportano un aggravio economico in quelle zone ove nevicate e gelate risultano episodiche (Markhof et al., 2019). Durante l'esercizio temperature troppo rigide influiscono sui consumi dei veicoli per l'utilizzo prolungato degli ausiliari di bordo, soprattutto per la dispersione del calore durante l'apertura delle porte alle fermate. Per i tram valgono gli stessi problemi di irregolarità del servizio sopra citati e, per quel che riguarda l'armamento, le criticità legate ad un eccesso di freddo possono portare alla rottura della rotaia. Le ondate di freddo sono particolarmente critiche per le conseguenze

sulla domanda che, in caso di scelta, tende ad orientarsi verso il modo privato, percepito come più confortevole e senza l'obbligo di attese alle fermate. L'infrastruttura di interscambio (la fermata costituita da palina semplice o pensilina) svolge, in questo, un ruolo fondamentale in quanto non attrezzata a fornire condizioni confortevoli di attesa. L'esito in termini di aumento delle esternalità è analogo a quanto già riportato per le ondate di calore. In tali situazioni la metropolitana rimane il servizio urbano più efficiente ed anzi può svolgere una funzione aggiuntiva, ormai sperimentata in molte città, di rifugio per i senzatetto nelle stazioni che rimangono aperte ed attrezzate allo scopo durante le ore notturne; tale esercizio prolungato comporta, comunque, un aggravio dei costi di esercizio.

Incendi

Per qualsiasi tipo di infrastruttura viaria l'incendio è un evento distruttivo che comporta l'interruzione del servizio, il danneggiamento o la compromissione totale di attrezzature, veicoli e sedi, con conseguenti elevati costi di ripristino e/o ricostruzione. Per il TPL la sede più sensibile è quella della metropolitana ma, al riguardo, va detto che la progettazione odierna si basa su criteri di sicurezza consolidati in grado di prevenire e/o mitigare l'evento e i danni causati, con particolare attenzione all'esigenza di evacuazione in galleria (Gravit et al., 2016).

Esondazioni fluviali e inondazioni costiere/Allagamenti

I problemi di esondazione/inondazioni, nella loro temporaneità, influiscono sulle infrastrutture viarie di trasporto pubblico, dal punto di vista fisico, molto limitatamente; tuttavia, le criticità principali sono l'interruzione del servizio e l'evacuazione in luogo sicuro dei passeggeri, sia all'aperto che in sotterranea (Thieken et al., 2009) Allagamenti originati da intense precipitazioni e spesso favoriti anche dalla scarsa manutenzione di chiusini e caditoie possono similmente causare l'interruzione del servizio e un aggravio nei costi di ripristino e manutenzione.

Frane

Analogamente a quanto riportato a proposito degli impatti collegati agli incendi i fenomeni franosi comportano possibili danni strutturali alla via, a attrezzature, veicoli e sedi con conseguenti elevati costi di ripristino e/o ricostruzione e riduzione di esercizio (Klose et al., 2015). Vi è da notare che i fenomeni franosi in aree urbane sono, tuttavia, poco frequenti.

Tempeste di vento

Le tempeste di vento possono causare danni alla via a causa di corpi estranei caduti che invadono l'area di sedime, quali alberature, pali, arredi urbani, con conseguenti costi di rimozione e ripristino, interruzione dell'esercizio e disagi alla circolazione. Forti raffiche di vento possono inoltre causare il ribaltamento di veicoli su gomma.

Pericolo climatico	Impatti
Ondate di calore Aumento di temperatura media	Deterioramento del manto stradale Aumento dei consumi dei veicoli dovuto ad una maggiore resistenza al rotolamento e ad un maggiore uso degli ausiliari di bordo Deformazione dei binari causata dalla dilatazione termica Peggioramento del contatto sulla linea aerea per i tram con conseguente irregolarità e/o sospensione del servizio Riduzione del comfort di viaggio (attesa e percorrenza) che genera la diversione della domanda verso l'auto privata, con conseguente aumento delle esternalità
Ondate di freddo	Deterioramento del manto stradale Perdita di aderenza tra pneumatico e superficie stradale dovuta al gelo, con problemi di sicurezza stradale, rallentamenti alla circolazione e irregolarità del servizio Maggiore uso degli ausiliari di bordo Rottura della rotaia nell'armamento Riduzione del comfort di viaggio (attesa e percorrenza) che genera la diversione della domanda verso l'auto privata, con conseguente aumento delle esternalità Aumento dei costi di esercizio per le stazioni della metropolitana quando fungono da ricovero notturno per i senzatetto
Incendi	Danneggiamento o compromissione totale di attrezzature, veicoli e sedi con conseguente riduzione di esercizio e aggravio dei costi di ripristino e/o ricostruzione
Esondazioni fluviali e inondazioni costiere Allagamenti	Allagamento della via con conseguente riduzione o sospensione di esercizio e aggravio nei costi di ripristino e manutenzione di tombini e caditoie Maggiori consumi di carburante in caso di diversione di percorso, con aumento delle esternalità
Frane	Danneggiamento o compromissione totale di attrezzature, veicoli e sedi, con conseguente riduzione o sospensione di esercizio e aggravio dei costi di ripristino e/o ricostruzione Maggiori consumi di carburante in caso di diversione di percorso, con aumento delle esternalità
Tempeste di vento	Danni alla via dovuti alla caduta di corpi estranei che invadono l'area di sedime, con conseguente riduzione o sospensione di esercizio e aggravio dei costi di rimozione e ripristino, disagi alla circolazione. Maggiori consumi di carburante in caso di diversione di percorso, con aumento delle esternalità Ribaltamento di veicoli

Tabella 2. Impatti climatici sulle infrastrutture di trasporto pubblico locale.

4.1.1.3. Trasporto Aereo

Le infrastrutture aeroportuali considerate comprendono tutte le superfici destinate alle operazioni di decollo, atterraggio, rullaggio e parcheggio degli aeromobili (piste di volo, vie

di circolazione a terra, piazzali di sosta degli aeromobili); tutti gli edifici a servizio dell'operatività degli aeromobili (aerostazioni passeggeri e merci, servizi tecnici, aree manutenzione a/m etc.); le zone di sosta dei veicoli (autovetture, veicoli commerciali, bus, stazioni ferroviarie) e la relativa viabilità di accesso. Di seguito si descrivono gli impatti climatici sulle infrastrutture di trasporto aereo, sintetizzati in Tabella 3.

Ondate di calore/Aumento di temperatura media

Le ondate di calore tendono ad alterare le proprietà dei materiali costituenti le pavimentazioni delle piste di volo. In particolare, una temperatura elevata rende meno rigido e più viscoso il conglomerato bituminoso, aumentando la resistenza al rotolamento durante la corsa al decollo e all'atterraggio degli aeromobili (Puempel & Williams, 2016) (Burbidge, 2016). Tale variazione si traduce in un maggior consumo di carburante. L'aumento della temperatura, inoltre, riduce la densità dell'aria, e di conseguenza anche la portanza, ovvero la forza che sostiene l'aeromobile in aria (Puempel & Williams, 2016) (Burbidge, 2016). Per questo motivo le piste esistenti potrebbero diventare insufficienti per il decollo e l'atterraggio degli aeromobili a pieno carico. La conseguenza è una diminuzione di carico pagante sul velivolo o la necessità di lavori di costruzione per l'allungamento della pista di volo. Effetti a più grande scala generati dal riscaldamento globale sul sistema climatico possono influire sul Jet Stream e in ultima analisi sulle rotte aeree (Puempel & Williams., 2016) (Burbidge, 2016). Il jet stream di media latitudine in ciascun emisfero è creato e sostenuto dalla differenza di temperatura tra i poli freddi e i tropici caldi. Questa differenza di temperatura sta diminuendo a livello del suolo a causa del riscaldamento polare, ma sta aumentando a livello di crociera in volo a causa del raffreddamento stratosferico inferiore. Tale cambiamento può modificare le rotte di volo ottimali aumentandone i tempi di viaggio e quindi i costi.

Ondate di freddo/Precipitazioni nevose

La presenza di ghiaccio sulle pavimentazioni in conseguenza di ondate di freddo riduce l'aderenza nelle fasi di decollo abortito e di atterraggio (ENAC, 2014). Ciò è particolarmente pericoloso perché l'aereo potrebbe non avere a disposizione lo spazio sufficiente per frenare in sicurezza. Inoltre, la formazione di ghiaccio sulle ali degli aeromobili modifica la superficie delle ali stesse, diminuendo la portanza. Per questo, quando la temperatura scende sotto lo zero, negli aeroporti è necessario intensificare le operazioni di manutenzione straordinaria delle pavimentazioni e degli aeromobili. Questi ultimi comprendono operazioni di "*de-icing*" (rimozione del ghiaccio dalle ali tramite acqua calda cui è aggiunto un fluido viscoso) e "*anti-icing*" (applicazione a freddo di un fluido che impedisce la formazione di ulteriore ghiaccio nel periodo che intercorre fra il *de-icing* e il decollo) (Puempel & Williams, 2016). Precipitazioni nevose intense possono portare anche alla diminuzione della visibilità e quindi alla necessità di interruzione dell'operatività (Figura 6). La chiusura dell'aeroporto comporta l'atterraggio su un aeroporto alterato con

aumento del consumo, e quindi del costo del carburante, oltre l'aumento dei costi per il trasporto dei passeggeri e del bagaglio e/o della merce dall'aeroporto alternato a quello di destinazione originario.

Esondazioni fluviali e inondazioni costiere

Negli aeroporti a quote basse in località costiere, l'innalzamento del livello del mare può aumentare il rischio di mareggiate, soprattutto in concomitanza di episodi di precipitazioni molto intense. Le inondazioni possono interessare sia direttamente gli aeroporti sia i percorsi di accesso all'aeroporto stesso danneggiando infrastrutture e velivoli, con conseguenti costi di ripristino/sostituzione/ricostruzione, e compromettendone l'operatività (Puempel & Williams, 2016); (Burbidge, 2016); (JRC, 2018); (Cipriani, 2013). La chiusura dell'aeroporto comporta l'atterraggio su un aeroporto alterato con aumentati costi necessari per il trasferimento di passeggeri, bagagli e merci. Simili impatti possono originare da fenomeni di esondazioni fluviali per aeroporti in prossimità di corsi d'acqua.

Tempeste di vento/Variazioni nella direzione del vento

Le tempeste di vento possono causare il danneggiamento delle strutture presenti in aeroporto in seguito alla pressione del vento o dell'impatto con detriti con conseguenti costi di ripristino/sostituzione/ricostruzione (Burbidge, 2016); (JRC, 2018); (Lopez, 2016). Inoltre, tali fenomeni estremi rendono generalmente necessaria la chiusura dell'aeroporto perché le operazioni diventano impossibili. La chiusura dell'aeroporto comporta l'atterraggio su un aeroporto alterato con aumentati costi necessari per il trasferimento di passeggeri, bagagli e merci. Anche variazioni nelle direzioni trasversale e prevalente del vento, non necessariamente legate a fenomeni estremi, possono avere importanti impatti su infrastrutture aeroportuali (Burbidge, 2016); (JRC, 2018); (Lopez, 2016). Le piste di volo sono orientate in base allo studio anemometrico del sito, in modo che sia sempre molto limitata la componente trasversale del vento, quella componente cioè che può limitare la governabilità degli aeromobili nelle fasi di decollo e in atterraggio. Un aumento di questa componente oltre i limiti consentiti ha come conseguenza la chiusura della pista, con risultante perdita di operatività dell'aeroporto. Nel caso in cui siano presenti più piste con direzioni diverse, il cambiamento di direzione della componente trasversale porterebbe allo spostamento di una parte del traffico sulle altre piste con conseguente cambiamento dell'impatto ambientale (in particolare il rumore) nelle aree limitrofe all'aeroporto. L'installazione della strumentazione delle piste di volo per gli aiuti alla navigazione aerea per gli atterraggi di precisione è studiata in funzione della direzione prevalente del vento. Come è noto, infatti, gli aerei decollano e atterrano sempre con vento contrario, nel primo caso per aumentare la forza di portanza, nel secondo caso per aumentare la forza di resistenza che aiuta la frenata dell'aereo. Eccetto i grandi aeroporti internazionali, nella maggior parte degli aeroporti italiani, solo una testata è strumentata, quella che registra i venti prevalenti di direzione contraria alle operazioni di decollo e di atterraggio. Una

variazione di direzione dei venti può pertanto limitare l'operatività della pista e un aumento dell'intensità del vento in coda richiede una lunghezza di pista maggiore, nel caso di nuove installazioni, o una riduzione del carico pagante a bordo degli aeromobili o l'annullamento di alcune operazioni, nel caso di piste già esistenti.

Pericolo climatico	Impatti
Ondate di calore Aumento di temperatura media	Aumento della viscosità delle pavimentazioni Riduzione della portanza dei velivoli Variazione del Jet Stream e modifica delle rotte ottimali
Ondate di freddo Precipitazioni nevose	Formazione di ghiaccio sulle pavimentazioni e conseguente riduzione di aderenza sulle piste di volo Formazione di ghiaccio sulle ali degli aeromobili e conseguente operazioni di de-icing e anti-icing Riduzione di operatività a causa di precipitazioni nevose che riducono la visibilità
Esondazioni fluviali e inondazioni costiere	Danni strutturali a causa dell'impatto diretto con i flutti
Tempeste di vento Variazioni nella direzione del vento	Danni strutturali in seguito alla pressione del vento o dell'impatto con detriti Opere di adeguamento infrastrutturale in seguito ad un aumento della componente trasversale del vento e ad una variazione della direzione prevalente del vento Riduzione di operatività

Tabella 3. Impatti climatici sulle infrastrutture di trasporto aereo.

4.1.1.4. Trasporto Marittimo

Le principali infrastrutture alle quali si fa riferimento sono costituite dai porti commerciali e industriali e le rotte marittime, le quali, pur non essendo infrastrutture in senso stretto, possono essere fortemente condizionate, come si vedrà più oltre, dai cambiamenti climatici. Di seguito si descrivono gli impatti climatici sulle infrastrutture di trasporto marittimo, sintetizzati in Tabella 4.

Ondate di calore/Aumento di temperatura media

Le ondate di calore tendono a modificare le caratteristiche dei materiali costituenti le pavimentazioni in conglomerato bituminoso, che nel caso dei porti interessano i terminali marittimi e in particolare le aree in cui avviene la movimentazione e lo stoccaggio delle merci e lo scambio intermodale del trasporto, come ad esempio dal trasporto marittimo a

quello ferroviario o su gomma e viceversa (Ligteringen, 1999). Tali impatti, a seconda della severità, possono tradursi in costi legati all'adeguamento delle componenti infrastrutturali. Le ondate di calore possono inoltre aumentare il consumo di energia (e quindi dei costi) per il raffreddamento della merce deperibile per la quale è necessaria la refrigerazione. Per quanto riguarda gli effetti a grande scala, le ondate di calore, e più in generale un aumento persistente di temperatura media dell'aria, possono influenzare il consumo del carburante delle navi a causa della riduzione di efficienza dei sistemi di raffreddamento degli apparati di propulsione e il consumo energetico degli impianti di refrigerazione delle merci a bordo delle navi e nelle aree di stoccaggio come, ad esempio, per i contenitori refrigerati. L'aumento della temperatura media inoltre sta favorendo lo scioglimento dei ghiacci polari con conseguenze rilevanti sulle rotte marittime. Lo scioglimento della banchisa artica potrebbe infatti rendere possibile l'utilizzo nel periodo estivo della rotta artica (passaggio a Nord-Est o a Nord-Ovest) per il collegamento tra l'Asia e l'Europa (Østreng, 2013). Tali variazioni potrebbero produrre una considerevole riduzione dei tempi di trasporto navale con possibili benefici economici favorendo i porti Nordeuropei rispetto a quelli italiani e più in generale quelli del Mediterraneo.

Ondate di freddo/Precipitazioni nevose

Per quanto riguarda i porti italiani, le ondate di freddo non costituiscono un problema rilevante per i traffici portuali poiché il mare svolge comunque il ruolo di volano termico mitigando gli abbassamenti della temperatura atmosferica. Tuttavia, la formazione di precipitazioni nevose o di ghiaccio a terra tende a rallentare o ostacolare le operazioni portuali riducendo l'operatività portuale e i proventi economici.

Siccità

Eventi siccitosi di lunga durata che si verificano almeno su scala regionale possono indurre nei porti problemi di approvvigionamento idrico di acqua naturale per uso potabile e industriale.

Esondazioni fluviali

Le esondazioni fluviali in prossimità della costa possono essere acute dalle variazioni climatiche a causa dell'aumento delle precipitazioni meteoriche intense e quindi dei deflussi fluviali e dell'aumento del livello medio del mare indotto dall'eustatismo (Bevacqua et al.,2020) (Ward et al.,2018). I corsi d'acqua maggiormente sensibili a questi fenomeni improvvisi e violenti sono quelli a regime torrentizio presenti in quasi tutte le regioni italiane e in particolare in Liguria, Calabria e Sicilia. I porti che possono essere interessati da esondazioni fluviali sono costituiti principalmente dai porti fluviali e canale. I porti fluviali, sono considerati in questo capitolo come infrastrutture di trasporto fluviale, e sono discussi nella sezione seguente 4.1.1.5. I porti canale sono realizzati nei tratti terminali dei corsi d'acqua in prossimità del mare principalmente adibiti al trasporto marittimo.

Numerosi di questi porti, che generalmente si sviluppano in ambiente urbano, presentano rilevanti problemi di convivenza con i corsi d'acqua a causa dell'interrimento indotto dal trasporto solido fluviale e costiero e dell'escursione dei livelli idrici causati dalle piene fluviali. Per quanto riguarda i fenomeni di interrimento portuale, si evidenzia che la vigente normativa ambientale italiana, particolarmente stringente, rende oggi di difficile attuazione e molto costosi gli interventi di dragaggio dei porti. Pertanto in generale si cerca di evitare di realizzare nuovi porti lungo i fiumi e i torrenti e se possibile di separare dai fiumi i porti canale esistenti. Nei porti i fenomeni di allagamento fluviale possono causare una serie di impatti quali il temporaneo fuori servizio dei terrapieni e dei terminali marittimi, danni agli impianti, alle pavimentazioni, ai mezzi di movimentazione delle merci, agli edifici e ai magazzini, e l'interrimento dei bacini portuali.

Inondazioni costiere/Tempeste di vento

Le cause correlate alle variazioni climatiche che possono aumentare la frequenza e l'entità delle inondazioni costiere originano principalmente dall'aumento del livello medio del mare causato dall'eustatismo e dall'intensificazione dei fenomeni estremi di vento, i quali determinano l'aumento sia del moto ondoso, sia del "sovralzo di tempesta" ("*storm surge*") (Svendsen, 1980). Nel Mediterraneo si iniziano a registrare tempeste che rientrano nel campo dei cicloni tropicali, le quali, in analogia agli uragani, vengono denominati "medicane" (Emanuel, 2005). In Italia il mare che risulta più soggetto all'acuirsi di questi fenomeni è il Mar Adriatico a causa della morfologia del suo bacino, delle coste e dei rilievi montuosi che lo delimitano (Pasquali et al., 2015). I fenomeni di inondazione costiera possono causare danni importanti alle infrastrutture di trasporto marittimo, fra cui: danni alle opere esterne (dighe foranee) ed interne (banchine e terrapieni) portuali, interrimento dei porti, danni ai mezzi marittimi localizzati nei porti, fuori servizio delle infrastrutture portuali che in caso in cui si verificano danni o fenomeni rilevanti di interrimento possono prolungarsi nel tempo fino al ripristino delle opere danneggiate, danni in generale alle infrastrutture interconnesse quali centri urbani e vie di comunicazione a causa soprattutto dell'erosione costiera.

Pericolo climatico	Impatti
Ondate di calore Aumento di temperatura media	Aumento del consumo di energia per: la movimentazione delle merci nei porti, il trasporto marittimo, la refrigerazione delle merci Modifica delle rotte di collegamento tra l'Europa e l'Asia a causa dell'utilizzo della rotta artica nel periodo estivo che favorirebbe i porti del Nord Europa

	rispetto a quelli del Mediterraneo
Ondate di freddo Precipitazioni nevose	Riduzione di operatività
Siccità	Possibili problemi di approvvigionamento idrico per uso potabile ed industriale
Esondazioni fluviali	Temporaneo fuori servizio dei terrapieni e dei terminali marittimi; danni agli impianti, alle pavimentazioni, ai mezzi di movimentazione delle merci, agli edifici e ai magazzini dei porti; interrimento dei bacini portuali
Inondazioni costiere Tempeste di vento	Danni strutturali alle opere esterne (dighe foranee) ed interne (banchine e terrapieni) portuali; interrimento dei porti Danni strutturali ai mezzi marittimi che stazionano nei porti Riduzione di operatività Danni alle infrastrutture interconnesse, quali centri urbani e vie di comunicazione, a causa dell'erosione costiera

Tabella 4. Impatti climatici sulle infrastrutture di trasporto marittimo.

4.1.1.5. Trasporto Fluviale

Le infrastrutture di supporto ai trasporti fluviali, sia turistici sia commerciali, comprendono porti e banchine, conche di navigazione, canali artificiali e infrastrutture di sostegno dei livelli idrici. Le idrovie fluviali utilizzate per trasporti commerciali nel nostro Paese sono principalmente concentrate nel Sistema Idroviario Padano Veneto. Fra i corsi d'acqua utilizzati per la navigazione si possono ricordare, oltre al Fiume Po, il Fiume Sile, il Fiume Brenta, la litoranea veneta da Venezia a Trieste, il Canale Navicelli da Pisa a Livorno, il Fiume Tevere ed altri.

Ondate di calore/Aumento della temperatura media

Il riscaldamento globale genera incremento della temperatura dell'acqua in misura paragonabile all'incremento della temperatura dell'aria. Le ondate di calore provocano a loro volta, con ritardo che dipende anche dalle caratteristiche idrologiche del corso d'acqua, un ulteriore riscaldamento del corpo idrico. Nei corsi d'acqua navigabili soggetti a glaciazione l'aumento della temperatura nei mesi invernali si potrebbe tradurre in un potenziale vantaggio per la navigazione. Tuttavia detta circostanza si può ritenere pressoché assente nel nostro Paese. In estate invece l'aumento di temperatura si traduce in una riduzione dell'ossigenazione del corso d'acqua e quindi nel peggioramento della qualità dell'ecosistema fluviale. Ciò può generare impatti significativi sulla fruizione turistica, che nel nostro Paese è diffusa e può anche essere danneggiata dalle difficili condizioni

ambientali che la temperatura eccessiva comporta. È infine da ricordare che il riscaldamento globale provoca variazioni nella distribuzione dell'accumulo nevoso e glaciale e quindi dei regimi fluviali nelle diverse stagioni. Alla luce delle proiezioni climatiche recenti è ragionevole ipotizzare un ulteriore contributo del riscaldamento globale nel senso di una riduzione dei deflussi estivi nei fiumi come il Po che beneficiano, durante i mesi caldi, di contributi nevosi e glaciali al deflusso. L'interazione fra siccità ed ondate di calore è un esempio rilevante di sovrapposizione non lineare di diversi impatti negativi del cambiamento climatico (Guerreiro et al., 2018).

Ondate di freddo

Le ondate di freddo possono generare fenomeni di glaciazione delle idrovie, circostanza che tuttavia è molto rara nelle idrovie italiane. Hanno inoltre impatto significativo sulla fruizione turistica, poiché generano condizioni ambientali non favorevoli alla navigazione per scopi contemplativi, di studio e rigenerativi.

Siccità

I fenomeni di siccità si verificano generalmente a seguito di temporanea scarsità di precipitazione, ovvero siccità meteorologica, che a sua volta, in particolari condizioni, origina siccità agricola ed idrologica. In particolare, la siccità idrologica è portatrice degli impatti più significativi del cambiamento climatico sulla navigazione fluviale. I fenomeni di siccità sono caratterizzati da evoluzione lenta e quindi lunga durata, che si può estendere su più stagioni o più anni. Esempi recenti di siccità di lunga durata sono la magra sudafricana (2015-2018), la "Millenium Drought" in Australia (2001-2009), la magra californiana (2011-2017). Si tratta di fenomeni il cui impatto è esacerbato dal riscaldamento globale che a sua volta genera maggiori prelievi per esigenze agricole e quindi un effetto di sovrapposizione non lineare di riduzione di portata fluviale ed aumento della domanda idrica. La riduzione del deflusso, a sua volta, comporta una riduzione del livello idrico e della velocità dell'acqua che successivamente impattano sulla navigabilità. L'impatto può essere diretto, poiché la riduzione del livello limita il pescaggio utile delle imbarcazioni, la loro manovrabilità e l'efficienza operativa delle strutture di navigazione; può essere indiretto mediante i cambiamenti indotti nel regime del trasporto fluviale e quindi nella morfologia del corso d'acqua, che si traducono in intensificazione delle operazioni di dragaggio. Inoltre, le infrastrutture di navigazione sono sottoposte a variazioni di sollecitazioni esterne in periodo di magra. In particolare, l'alterazione dei cicli di immersione ed emersione delle strutture in legno ne può compromettere la durabilità. I cambiamenti dei livelli idrici influenzano anche l'operabilità delle strutture portuali e delle conche di navigazione. Particolare attenzione deve essere riposta alle variazioni della stagionalità associate al cambiamento climatico, che possono comportare cambiamenti nelle operazioni di trasporto e manutenzione delle infrastrutture (Kling et al., 2003). Gli impatti innanzi descritti sono oggetto di particolare preoccupazione in particolare nei corsi

d'acqua in parte o totalmente sprovvisti di infrastrutture atte a sostenere il livello idrico, quali ad esempio sbarramenti e relative conche di navigazione.

Piene ed esondazioni fluviali

Le piene fluviali, e le possibili esondazioni che ne conseguono, generano impatti significativi sulla navigazione commerciale e turistica, sia per gli effetti diretti sulla navigabilità generati dai livelli idrici eccessivi, sia per gli effetti indotti sulla morfologia fluviale. Mentre gli effetti diretti sui livelli idrici sono generalmente di breve durata, in ragione della evoluzione rapida degli eventi di piena, l'impatto sulla morfologia fluviale può assumere carattere estremamente rilevante e non si risolve spontaneamente al termine dell'evento di piena. È ben noto, infatti, che i fenomeni di trasporto solido si estrinsecano principalmente in occasione delle piene e possono quindi provocare in breve tempo delle trasformazioni che richiedono interventi di manutenzione potenzialmente ingenti e lunghi tempi di intervento. È inoltre da ricordare che le piene possono generare danni alle infrastrutture dovuti all'incremento della spinta dell'acqua e all'impatto di materiali flottanti e di fondo trasportati durante l'evento. Nel complesso, quindi, l'impatto del cambiamento climatico sulle piene fluviali è da considerare con particolare attenzione nei confronti delle infrastrutture di navigazione, si veda, ad esempio Guerrero et al., (2013).

Allagamenti

Gli allagamenti di origine fluviale o costiera, qualora interessino le zone contermini alle idrovie fluviali, possono causare interruzione della navigazione a causa del loro impatto sulle vie di comunicazione ed attività di terra. Si tratta di un impatto generalmente di breve durata.

Tempeste di vento

Gli eventi ventosi possono essere causa di interruzione della navigazione sia per effetto diretto sull'attività portuale (manovrabilità delle imbarcazioni etc.) sia per effetto dell'incremento del moto ondoso, che si verifica in presenza di ampi specchi d'acqua. Come per le ondate di caldo e freddo, si possono inoltre verificare impatti sulla fruibilità delle vie di navigazione per scopi turistici, in ragione delle difficili condizioni ambientali generate dalla presenza di vento.

Pericolo climatico	Impatti	
	Idrovie	Infrastrutture
Ondate di calore Aumento della temperatura	Aumento della temperatura dell'acqua e conseguente peggioramento della qualità ambientale	

media	Variazione della stagionalità dei deflussi e conseguente impatto sulla navigabilità	
Ondate di freddo	Compromissione della fruizione turistica	
Siccità	Riduzione dei livelli idrici e della durata del periodo navigabile Variazione della morfologia fluviale ed impatto sulle condizioni di navigabilità	Azioni imprevedute sulle infrastrutture Incremento delle operazioni di manutenzione
Piene ed esondazioni fluviali	Compromissione della navigabilità Alterazione della morfologia fluviale	Possibile danneggiamento dovuto a trasporto materiali flottanti e di fondo Incremento delle operazioni di manutenzione e sulla operabilità
Allagamenti		Impatto sulle vie di comunicazione di accesso a terra e conseguente riduzione della navigabilità
Tempeste di vento	Compromissione della fruizione turistica	

Tabella 5. Impatti climatici sulle infrastrutture di trasporto fluviale.

4.1.2 Infrastrutture per l'energia

Le infrastrutture per l'energia considerate comprendono sia gli impianti di produzione di potenza elettrica da fonti convenzionali e rinnovabili che le reti per la sua trasmissione e distribuzione (Cox et al., 2017) (Bonjean Stanton et al., 2016). Di seguito si descrivono gli impatti climatici sulle infrastrutture per la produzione, trasmissione e distribuzione di energia, sintetizzati in Tabella 6.

Ondate di calore/Aumento di temperatura media

L'aumento di temperatura provoca molteplici impatti sulla sicurezza della disponibilità di energia, influenzando i processi e il funzionamento di impianti e sistemi. Sostanzialmente questo deriva dal fatto che l'aria potrebbe non essere sufficientemente fresca e l'acqua sufficiente e sufficientemente fresca per il raffreddamento dei sistemi. In particolare, in condizioni di elevate temperature prolungate nel tempo, come nel caso di quelle registrate al verificarsi di ondate di calore, gli impianti a combustibile fossile manifestano tipicamente una perdita di rendimento e quindi di proventi economici (Cruz & Krausmann, 2013). L'aumento di temperatura dell'aria può anche ridurre l'efficienza delle infrastrutture di generazione e di trasmissione di elettricità: le centrali elettriche diventano meno efficienti

all'aumentare della temperatura ambiente ed il raffreddamento diventa meno efficace (Sieber, 2013) (Rübbelke & Vögele, 2011). L'aumento delle temperature genera impatti anche sui sistemi di trasmissione e distribuzione riducendone la capacità termica. La corrente che scorre attraverso i cavi di trasmissione aerea genera calore e lo standard per i cavi di trasmissione fa riferimento a una determinata soglia di temperatura: in caso di aumento della temperatura dell'aria viene generalmente ridotta la trasmissione di corrente per evitare che il cavo raggiunga tale soglia (Schaeffer et al., 2012).

Inoltre, alte temperature notturne riducono la capacità di rilascio di calore dal sistema e quindi di ridurre le temperature. Da considerare anche che le ondate di calore sono tipicamente accompagnate da zone stazionarie di alta pressione che portano a venti leggeri sulla superficie terrestre con conseguente ridotta generazione di energia eolica (Ke et al., 2016) L'aumento medio delle temperature – oltre a contribuire agli impatti sopra indicati – tende ad alterare la distribuzione temporale della domanda di energia, e quindi il carico sulla rete. Tali effetti possono già essere osservati nella migrazione del picco di domanda dal periodo invernale a quello estivo, durante il quale le aumentate esigenze di raffrescamento degli spazi hanno portato a una crescita della capacità di generazione di potenza richiesta per soddisfare la domanda di energia (Zachariadis & Hadjinicolaou, 2014). Il verificarsi di temperature più miti durante il periodo invernale e un innalzamento delle temperature in estate implica una domanda di energia maggiore per il raffrescamento degli edifici e una riduzione per il riscaldamento. Infine, l'aumento delle temperature medie delle acque fluviali e marine può portare a delle interruzioni di produzione di energia da impianti che scaricano in questi bacini, a causa di limitazioni normative, con conseguenti perdite economiche (Zuo et al., 2015).

Ondate di freddo/Precipitazioni nevose/Nuvolosità

Le ondate di freddo possono causare la formazione di manicotti di neve/ghiaccio sulle linee di trasmissione e distribuzione e indurre il loro collasso strutturale (Bompard et al., 2013). Inoltre, tali eventi possono impattare significativamente la capacità di generazione di energia a causa di danni all'equipaggiamento e di messa fuori servizio forzata di componenti per la loro salvaguardia. Tali impatti si traducono in un aumento dei costi per il ripristino/sostituzione/ricostruzione delle componenti infrastrutturali colpite e per la riduzione di operatività. Per quanto riguarda la generazione di energia da impianti solari questa può venire impattata da eventi meteorologici estremi e cambiamenti nelle precipitazioni nevose, nella nuvolosità e nella temperatura dell'aria. Ad esempio riduzioni della temperatura dell'aria non solo modificano l'efficienza delle celle fotovoltaiche, ma riducono la generazione di potenza anche nei sistemi a concentrazione, intrinsecamente sensibili alle temperature.

Siccità

Prolungati periodi di siccità possono causare da un lato la variazione delle proprietà meccaniche e strutturali del suolo, con possibili fenomeni di subsidenza ove le condotte per il trasporto di petrolio e gas sono posate e relativo rischio di danno, dall'altro la diminuzione di disponibilità di acqua per il raffreddamento dei sistemi negli impianti termoelettrici per la generazione di potenza che utilizzano carbone, gas naturale, isotopi nucleari, energia geotermica e biomassa (Van Vliet et al., 2016). Per questi impianti l'efficienza dipende dai requisiti di riscaldamento e raffreddamento dei fluidi vettori implicati nei cicli Rankine e Brayton, i quali variano in funzione delle condizioni ambientali di temperatura, pressione, umidità e dalla disponibilità di acqua (Cruz & Krausmann, 2013) (Ebinger & Vergara, 2011). Naturalmente anche la produzione da centrali idroelettriche può essere affetta dalla mancanza di acqua in periodi di siccità. I danni strutturali sopra citati richiedono pertanto interventi di manutenzione straordinaria con conseguenti aumentati costi di gestione a cui si possono sommare anche le aumentate perdite economiche legate al minore rendimento energetico.

Incendi

Condizioni climatiche secche e calde tendono a favorire l'innescare e la propagazione di incendi che possono generare importanti danni alle infrastrutture esposte alle fiamme e alle alte temperature (Bompard et al., 2013) (Mitchell, 2013). Interventi di ripristino/sostituzione/ricostruzione delle componenti infrastrutturali colpite possono essere necessarie in presenza di tali eventi estremi.

Esondazioni fluviali e inondazioni costiere

Gli impianti di generazione e processo, i sistemi di stoccaggio e i sistemi di trasporto del combustibile risultano particolarmente esposti a possibili danni strutturali, con interruzione di servizio, causati da inondazioni costiere poiché spesso situati in prossimità della costa per la facilità di trasporto del carburante e la disponibilità di acqua per il raffreddamento. Di conseguenza, gli attesi innalzamenti del mare in combinazione con un'aumentata tempestosità potrebbero generare impatti strutturali sempre maggiori a queste infrastrutture, a causa della perdita delle barriere di protezione. Tali effetti si traducono in aumentati costi di ripristino/sostituzione/ricostruzione delle componenti infrastrutturali colpite e in perdite di proventi economici legati alla riduzione di operatività. Similmente, gli impianti di generazione di energia da onde e maree potrebbero essere soggetti a disfunzionalità a causa di condizioni meteo-marine estreme che ne limitano il funzionamento di regime. Le esondazioni fluviali generano tipologie di impatti strutturali simili a quelle causate da inondazioni costiere. In particolare, impianti di generazione di potenza (fossili e rinnovabili) risultano particolarmente esposti, poiché spesso situati in prossimità di fiumi per utilizzarne l'acqua a scopo di raffreddamento (Bompard et al., 2013); (Cruz & Krausmann, 2013); (Schaeffer et al., 2012); (Ebinger & Vergara, 2011).

Tempeste di vento

Forti raffiche di vento possono generare danni strutturali, in seguito alla pressione del vento o dell'impatto con detriti sulle infrastrutture di generazione di energia e distribuzione, e pertanto richiedere interventi straordinari di ripristino^{26,27,70} (Bompard et al., 2013); (Sieber, 2013); (Pryor & Barthelmie, 2010). Nel caso dei sistemi di trasmissione e distribuzione, cavi paralleli soggetti a oscillazioni causate dal forte vento possono con maggiore facilità entrare in contatto e generare un cortocircuito con conseguente riduzione di operatività. Possibili interferenze sulla rete di trasmissione e distribuzione con cavi aerei possono essere anche innescate dalla caduta di rami e alberi in seguito alle forti raffiche di vento (Schaeffer et al., 2012). In particolare gli impianti eolici presentano una vulnerabilità pronunciata alle tempeste di vento, dal momento che, in caso di condizioni di vento estremo, devono disaccoppiare le turbine dai generatori per evitarne il danneggiamento con conseguente perdita di rendimenti (Mima & Criqui, 2015).

Pericolo climatico	Impatti
Ondate di calore Aumento di temperatura media	Perdita di rendimento di impianti a combustibile fossile Riduzione della capacità di trasmissione di corrente elettrica Riduzione della generazione a causa di ridotte capacità di scarico nei bacini Riduzione della capacità di generazione di energia eolica a causa dell'indebolimento dei venti per alta pressione Aumento della domanda di energia nel periodo estivo e conseguente maggiore vulnerabilità del sistema quando esposto a eventi estremi
Ondate di freddo Precipitazioni nevose Nuvolosità	Formazione di manicotti di neve/ghiaccio sulle linee di trasmissione e distribuzione Perdita di rendimento in impianti solari
Siccità	Danni strutturali alle condotte per il trasporto di petrolio e gas in seguito a fenomeni di subsidenza Diminuzione di disponibilità di acqua per il raffreddamento degli impianti di produzione
Incendi	Danni strutturali causati dall'esposizione a fuoco e alte temperature
Esondazioni fluviali e inondazioni costiere	Danni strutturali a impianti di processo, sistemi di stoccaggio e sistemi di trasporto del combustibile a causa dell'impatto diretto con i flutti
Tempeste di vento	Danni strutturali in seguito alla pressione del vento o dell'impatto con detriti Riduzione di operatività degli impianti eolici a causa del disaccoppiamento delle turbine dai generatori per evitarne il danneggiamento

Disservizio causato dall'azione del vento su corpi estranei all'infrastruttura: caduta degli alberi e relativo impatto sulle linee di trasmissione e distribuzione
--

Tabella 6. Impatti climatici sulle infrastrutture per la produzione, trasmissione e distribuzione di energia.

4.1.3. Infrastrutture informatiche e per le telecomunicazioni

Le infrastrutture per i servizi informatici e di telecomunicazione (servizi ICT) considerate comprendono data center (o centri servizi), cioè le infrastrutture per l'elaborazione (processing) e l'archiviazione (storage) dei dati necessari per erogare i servizi stessi, e le reti di telecomunicazione, cioè le infrastrutture per il trasporto/trasferimento dati tra datacenter (comunicazioni inter- o intra-datacenter) e/o tra terminali di utenti di rete. Di seguito si descrivono gli impatti climatici su queste infrastrutture, successivamente sintetizzati in Tabella 7.

Ondate di calore/Aumento di temperatura media.

Il verificarsi di ondate di calore, e più in generale l'aumento medio della temperatura, richiede un maggior consumo energetico necessario per il raffreddamento dei datacenter e – di conseguenza – un aumento dei costi di gestione. Tale impiego energetico rappresenta attualmente il 40% dell'energia totale consumata nel settore ICT (Song et al., 2015). Ondate di freddo intenso accompagnate da gelicidio e pioggia sopraffusa possono anche generare un rivestimento ghiacciato sopra gli apparati trasmissivi degradandone le prestazioni (Añel et al., 2017).

Siccità

Periodi di siccità prolungata possono creare pericolosi scompensi negli impianti di raffreddamento dei datacenter di grandi dimensioni. Recentemente la crescita esponenziale dei datacenter ha richiesto anche un adeguamento nella gestione delle risorse idriche per il raffreddamento. I grandi provider di servizi cloud globali (per esempio Google, Microsoft e Apple) hanno già iniziato a investire nei propri impianti di trattamento delle acque per garantire l'approvvigionamento nei datacenter ed è plausibile attendersi un trend simile per i cloud provider italiani.

Incendi

Condizioni climatiche secche e calde tendono a favorire l'innescio e la propagazione di incendi che possono generare danni alle infrastrutture esposte alle fiamme e alle alte temperature, sia nella rete fissa che nella rete mobile (ACMA, 2020). Interventi di

ripristino/sostituzione/ricostruzione delle componenti infrastrutturali colpite possono essere necessari in presenza di tali eventi estremi.

Esondazioni fluviali e inondazioni costiere/Allagamenti

Le esondazioni fluviali e le inondazioni costiere rappresentano ulteriori gravi minacce all'integrità dei sistemi ICT e per una serie di servizi ad esso connessi. Ad esempio esondazioni/inondazioni e allagamenti possono interessare una serie di risorse chiave per le telecomunicazioni, interrompendo il servizio a migliaia di abitazioni, aziende (private di servizi fondamentali come l'accesso al bancomat) e soprattutto impedendo di contattare servizi pubblici emergenziali come la polizia o l'ambulanza (Dawson et al., 2018). Sebbene i condotti che contengono cavi in fibra e rame siano tipicamente progettati per essere resistenti all'acqua, in caso di prolungata copertura da parte di acqua molti uffici metropolitani e cavi potrebbero andare fuori servizio. Va notato, che, tipicamente, queste interruzioni interferiscono con il sistema proprio quando è più necessario, per esempio nei momenti immediatamente successivi ad un evento climatico dirompente, quando una interruzione delle comunicazioni può ostacolare i soccorsi e complicare grandemente la gestione della riparazione delle infrastrutture. Alcune problematiche legate agli allagamenti comprendono l'attenuazione del segnale dovuta alla penetrazione di molecole d'acqua all'interno delle micro-fratture delle fibre, i danni dovuti alla corrosione dei connettori, la perdita del segnale in corrispondenza delle apparecchiature che effettuano conversione opto-elettronica e la rottura della fibra dovuta a congelamento. Periodi prolungati di pioggia possono anche influenzare i segnali radiomobili e su onde micrometriche (per esempio, per effetto del cosiddetto "*rain shading*"), ma questo è principalmente un problema superiore a 10 gigahertz e quindi raro sui sistemi attuali. I danni dovuti ad alluvioni sulla rete di telecomunicazione possono raggiungere facilmente cifre molto significative e comprendono gli interventi di ripristino/sostituzione/ricostruzione delle componenti infrastrutturali colpite e le perdite economiche legate alla riduzione di operatività.

Frane

Eventi franosi possono provocare danni agli apparati (fibre, stazioni radiomobili, datacenter) e provocare disconnessioni dalla rete per gli utenti finali (Hervas, 2003).

Tempeste di vento

I forti venti e la conseguente caduta di rami e alberi possono danneggiare le torri della telefonia cellulare e i pali telefonici (più in generale, i cavi in rame e/o fibra), e quindi interrompere linee telefoniche, linee dati (per esempio in tecnologia Digital Subscriber Line, DSL), linee in fibra, stazioni radiomobili e disallineare i ricevitori a microonde. Il cablaggio esterno (tipicamente sospeso) è maggiormente esposto rispetto ai condotti interrati, essendo soggetto ai danni causati da detriti e oggetti in caduta (come gli alberi) e

alla rottura per tensione dovuta a raffiche di vento (USAID, 2012). Tali impatti si traducono in perdite economiche principalmente associate ai necessari interventi di ripristino/sostituzione/ricostruzione delle componenti infrastrutturali colpite.

Pericolo climatico	Impatti
Ondate di calore Aumento di temperatura media	Aumento costi di raffreddamento dei datacenter
Ondate di freddo	Degradazione prestazioni (gelicidio) Rischi derivanti dall'impatto sulla rete elettrica
Siccità	Minore disponibilità idrica per il raffreddamento dei datacenter
Incendi	Danni strutturali agli apparati (fibre, stazioni radiomobile, datacenter) Possibili disconnessioni dovuti al deterioramento di cavi e/o apparati
Esondazioni fluviali e costiere Allagamenti	Danni strutturali agli apparati (cavi, stazioni radiomobile, datacenter) dovuti ad allagamenti, corrosione, rotture fibre per congelamento Disconnessioni su reti wireless ad altissime frequenze dovute a "rain shading"
Frane	Danni strutturali agli apparati (fibre, stazioni radiomobile, datacenter)
Tempeste di vento	Danni strutturali alle torri della telefonia cellulare e i pali telefonici in seguito alla pressione del vento o dell'impatto con detriti Riduzione di operatività Deterioramento della qualità del servizio (per esempio dovuto a disallineamento dei ricevitori a microonde)

Tabella 7. Impatti climatici sulle infrastrutture per i servizi informatici e di telecomunicazione.

4.1.4. Infrastrutture logistiche

Il sistema logistico comprende la sequenza di operazioni e processi necessari a produzione, distribuzione, ritorno, riutilizzo e smaltimento di beni di consumo. Queste definiscono il concetto di "supply chain" (letteralmente, catena di approvvigionamento) e richiedono tre tipi di flussi: fisici, di informazioni (relativi al tracciamento dei flussi fisici) e finanziarie (associati alle transazioni che occorrono nella supply chain) (Sheffi, 2012). I principali attori coinvolti nel sistema logistico includono: produttori di beni, distributori e grossisti, fornitori di servizi logistici (spedizionieri, trasportatori), operatori delle infrastrutture

fisiche, proprietari di veicoli e/o edifici, terreni ed altre infrastrutture fisiche. Indirettamente il sistema logistico include anche fornitori di servizi di informazione e comunicazione, operatori delle infrastrutture di comunicazione, proprietari di infrastrutture di comunicazione, banche e altri operatori finanziari. Le infrastrutture logistiche sono riassunte in Tabella 8 e comprendono molte delle infrastrutture di trasporto, energia e ICT descritte nelle precedenti sezioni.

Tipo di infrastruttura	Veicoli	Edifici	Reti e nodi di trasporto e comunicazione	Altro
Legate a flussi fisici	Navi, treni, aerei, camion, veicoli commerciali leggeri	Magazzini, centri di carico/scarico merci, parcheggi, terreni	Porti, ferrovie, strade, canali, aeroporti, interporti (nodi intermodali terrestri)	Reti di trasporto e distribuzione di energia
Legate a flussi di informazione e finanziari	Sensori, dispositivi di comunicazione e tracciamento	Edifici che ospitano datacenters, server ed altri apparati di gestione dati	Cavi, dispositivi di trasmissione e stoccaggio di dati	Reti di trasporto e distribuzione di elettricità

Tabella 8. Infrastrutture logistiche

Di conseguenza gli impatti originati dai pericoli climatici per le infrastrutture logistiche corrispondono in larga misura a quelli descritti nelle precedenti sezioni relative al trasporto, energia e ICT (sezioni 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3, rispettivamente). A scopo di sintesi, nella presente sezione si richiamano brevemente in Tabella 9 gli impatti rilevanti per il sistema logistico aggregandoli per pericoli climatici con effetti simili sulla base di quanto suggerito da “Transportation Research Board & National Academies of Sciences” (2016) e rimandando alle precedenti sezioni per maggiori dettagli sugli specifici meccanismi di impatto.

Pericolo climatico	Impatti
Ondate di calore, Siccità,	Danni strutturali a edifici a causa dell’instabilità dei materiali esposti ad alte temperature a fenomeni di subsidenza (a seguito di siccità) nei porti, negli aeroporti e negli interporti Danni alle infrastrutture logistiche ed alle reti necessarie al loro funzionamento (e.g.,

Incendi	<p>energia elettrica e telecomunicazioni) e trasporto (e.g., strade e ferrovie, aeroporti), e alle merci trasportate</p> <p>Aumento nell'uso di energia per il condizionamento dell'aria nei veicoli e negli edifici, aumento dell'uso di acqua</p> <p>Aumento dell'uso di energia per la gestione delle emergenze, possibili sovraccarichi sulla rete di distribuzione e conseguente interruzione di fornitura, particolarmente critica per la catena del freddo, dove le interruzioni di approvvigionamento sono associate a danni ai beni da trasportare</p> <p>Incremento della frequenza di operazioni di manutenzione delle infrastrutture logistiche</p>
<p>Ondate di freddo, Esondazioni fluviali e inondazioni costiere, Allagamenti, Frane, Tempeste di vento</p>	<p>Disservizi e ritardi legati a riduzione di accesso e chiusure nei porti, negli aeroporti e negli interporti, danni ai beni da trasportare ed ai veicoli (anche per la gestione delle merci in magazzino) (Figura 11)</p> <p>Riduzione di operatività, ritardi e danni alle infrastrutture logistiche ed alle reti necessarie al loro funzionamento (e.g., energia elettrica e telecomunicazioni) e trasporto (e.g., strade, ferrovie, vie fluviali)</p> <p>Aumento dell'uso di energia per la gestione delle emergenze, possibili sovraccarichi sulla rete di distribuzione e conseguente interruzione di fornitura, particolarmente critica per la catena del freddo, dove le interruzioni di approvvigionamento sono associate a danni ai beni da trasportare</p> <p>Incremento della frequenza di operazioni di manutenzione delle infrastrutture logistiche</p>

Tabella 9. Impatti climatici sulle infrastrutture logistiche.

4.1.5. Infrastrutture per la gestione delle risorse idriche

Le infrastrutture di gestione delle risorse idriche possono essere funzionali ad un utilizzo agricolo, oppure ad un uso urbano e industriale. Le infrastrutture idriche ad uso agricolo considerate comprendono gli invasi di accumulo e opere di derivazione, le reti di adduzione e distribuzione (in pressione, a pelo libero e miste) e, infine, i sistemi irrigui, intesi come la parte terminale della rete idrica che collega la rete di distribuzione alle colture irrigue. Le infrastrutture idriche ad uso urbano e industriale considerate includono le opere di captazione, potabilizzazione e depurazione, adduzione e distribuzione agli utenti finali (prevalentemente utenze con destinazione industriale e, in ambito urbano, ad uso residenziale, commerciale e dei servizi) e, infine, i sistemi di drenaggio e raccolta delle acque meteoriche e reflue. Di seguito si descrivono gli impatti climatici sulle infrastrutture per la gestione delle risorse idriche, sintetizzati in Tabella 10.

Ondate di calore

Le ondate di calore generano un impatto generalmente limitato sulle opere di accumulo, derivazione, adduzione e distribuzione. Alcuni impatti possono verificarsi sulle infrastrutture di potabilizzazione e depurazione, con conseguenti aumentati costi di

gestione, a causa di potenziali variazioni nelle concentrazioni di alghe tossiche e materiale organico in acqua alla fonte (Li et al., 2014).

Ondate di freddo

Come per le ondate di calore, temperature minime estreme associate alle ondate di freddo non inducono generalmente danni significativi alle infrastrutture di accumulo e di distribuzione a pelo libero, mentre sono possibili danni per rottura a causa del gelo nei sistemi in pressione e negli impianti di irrigazione. Similmente, anche per le infrastrutture idriche ad uso urbano e industriale si possono verificare impatti sulle opere di captazione dove gelate possono limitare l'accessibilità e il prelievo (per esempio da sorgenti montane) o sulle reti di adduzione e distribuzione, dove gelate possono causare rotture di condotte e contatori (Rajani & Kleiner, 2001). Tali eventi possono pertanto generare costi necessari per gli interventi di ripristino/sostituzione/ricostruzione delle componenti infrastrutturali colpite.

Siccità

Periodi siccitosi esercitano un impatto indiretto sulle infrastrutture a uso irriguo, producendo un aumento significativo della domanda irrigua nei territori serviti. L'effetto combinato della minor disponibilità idrica (superficiale e sotterranea) e l'innalzamento del livello del mare può favorire l'intrusione del cuneo salino e pregiudicare l'uso irriguo della risorsa (Colombani et al., 2016). Fenomeni di siccità generano elevati impatti sulle opere di captazione direttamente dipendenti dalla disponibilità idrica. Un aumento delle temperature accompagnato da una più lenta ricarica degli acquiferi può causare infatti sia una riduzione nella disponibilità idrica che alterazioni della sua qualità, richiedendo pertanto dei cambiamenti nelle operazioni delle infrastrutture di captazione e, successivamente, di potabilizzazione e trasporto, con possibili aumentati costi di gestione.

L'aumento della domanda idrica nei diversi settori potrà essere fonte di crescenti conflitti e competizione tra i vari utilizzi idrici (de Oliveira et al., 2015). Infine, situazioni di siccità prolungate potranno avere impatti diretti sulle opere di adduzione e distribuzione (ad esempio l'incremento della fallanza delle condotte acquedottistiche nei periodi più caldi e siccitosi a causa anche di cambiamenti nello stato tensionale del terreno con ridotto contenuto di umidità) e sui sistemi di drenaggio delle acque reflue (con ridotta capacità di diluizione e maggiore concentrazione di solidi, che può causare ostruzioni, intasamento e blocco/rottura di sistemi di pompaggio) (Hughes et al., 2021).

Queste problematiche possono causare un aumento dei costi legati a manutenzione ordinaria e straordinaria delle componenti fisiche, così come costi di gestione legati a interruzioni e anomalie nel regolare funzionamento delle componenti infrastrutturali menzionate. Impatti possono verificarsi sulle opere di adduzione e distribuzione qualora la fornitura continua sia messa a repentaglio, soprattutto nelle regioni esposte a condizioni di

siccità prolungate, con conseguenti costi legati al ricorso a fonti di approvvigionamento idropotabile alternative (ad esempio autobotti).

Incendi

Condizioni climatiche secche e calde tendono a favorire l'innescare e la propagazione di incendi che possono generare danni alle infrastrutture esposte alle fiamme e alle alte temperature (Pinto et al., 2021). Recenti studi hanno mostrato inoltre che la concentrazione di sostanze tossiche e nutrienti disciolti nelle acque provenienti da bacini soggetti a incendi diffusi può risultare sostanzialmente alterata compromettendo la potabilità dell'acqua. Pertanto, gli impatti degli incendi possono avere anche effetti sui processi di trattamento e potabilizzazione e causare un possibile incremento dei costi di gestione (Chow et al., 2021) (Pacheco & Fernandes, 2021).

Precipitazioni intense/Esondazioni fluviali e inondazioni costiere/Allagamenti

Eventi estremi di precipitazione generano impatti significativi sulle infrastrutture di accumulo e derivazione, principalmente legati all'aumento dell'afflusso di acqua e con essa di sedimenti, con conseguente progressiva riduzione della capacità utile di invaso e aumento della probabilità di collassi o cedimenti strutturali di manufatti. Gli effetti sulle funzioni si traducono nell'aumento della frequenza e intensità delle piene a valle degli invasi di accumulo e nei territori serviti dall'invaso. Gli impatti delle esondazioni fluviali e – in maniera simile quelli originati da inondazioni costiere e allagamenti - sulle reti di adduzione e distribuzione sono tipicamente associati a danni a tratti di condotta e stazioni di pompaggio, mentre per le condotte a pelo libero sono riconducibili a insabbiamento, instabilità e collassi degli argini e dei manufatti di regolazione.

Le esondazioni fluviali tendono, inoltre, a ripercuotersi anche all'interno delle reti di drenaggio artificiali poste a difesa del territorio, spesso costituite da canali promiscui, irrigui e di bonifica, limitandone la capacità di laminazione distribuita e sollecitando straordinariamente gli impianti di pompaggio nelle zone in cui la bonifica avviene per sollevamento. Inoltre, i fenomeni di instabilità e collasso degli argini dei canali possono danneggiare le infrastrutture accessorie delle reti rurali, sia di servizio (strade alzaie), sia rivolte alla fruizione del territorio a fini ricreativi e turistici (piste ciclopedonali, aree di sosta), oltre a compromettere i servizi ecosistemici forniti dalle reti stesse, aspetti questi rilevanti, ad esempio, per le reti di canali storici della Pianura Padana. L'impatto sui sistemi di irrigazione aziendali e sulla loro funzionalità sono invece generalmente modesti o trascurabili.

Per quanto riguarda le infrastrutture idriche ad uso urbano e industriale, eventi di precipitazione intensa e conseguenti esondazioni e allagamenti possono causare impatti diretti sui sistemi di drenaggio e raccolta delle acque reflue urbane e sugli impianti di trattamento delle acque reflue, con possibile blocco e malfunzionamenti dei sistemi di

pompaggio soggetti a picchi di afflusso con alta concentrazione di solidi, difficoltà nel gestire picchi di afflusso agli impianti di trattamento e rischio crescente di straripamento e sversamento di acque reflue in corpi idrici naturali in caso di sistemi di scarico fognario combinati, con conseguenti impatti sull'ecologia fluviale, sulla salute umana, e sul servizio ricreativo dei corpi idrici, oltre a un possibile aumento dei relativi costi di gestione (Hughes et al., 2021). Impatti indiretti possono verificarsi a livello di opere di captazione, la cui funzionalità può essere temporaneamente compromessa in caso di eventi di piena.

Frane

L'instabilità dei versanti, spesso in relazione ad eventi precipitosi intensi e/o a esondazioni fluviali, può contribuire ad un aumento del trasporto solido e quindi contribuire al processo di insabbiamento delle infrastrutture di accumulo e distribuzione, riducendo l'efficienza di funzionamento e aumentando i costi di manutenzione. Frane e crolli possono anche danneggiare le infrastrutture di adduzione e distribuzione e i sistemi irrigui. Nei casi più critici possono costituire un rischio elevato di crollo delle dighe nei sistemi di accumulo e derivazione. A livello di infrastrutture idriche ad uso urbano e industriale, eventi di frana e smottamento possono causare la rottura di tubazioni e infrastrutture sotterranee, con conseguenti perdite di acqua potabile o rilascio di acqua di scarico, e potenziali rischi di infiltrazione di sostanze contaminanti (Gudino-Elizondo et al., 2021). Come per i sistemi irrigui, i casi più critici e violenti possono causare danni diffusi sulle opere infrastrutturali e richiedere ingenti costi per interventi di manutenzione.

Tempeste di vento

Forti raffiche di vento possono generare malfunzionamenti delle reti in pressione derivanti da danni alle infrastrutture di fornitura elettrica da cui dipendono, incidendo potenzialmente sui costi di gestione e di coperture assicurative (O' Neill, 2009).

Pericolo climatico	Impatti	
	Infrastrutture idriche - uso agricolo	Infrastrutture idriche - uso urbano e industriale
Ondate di calore		Aumento di concentrazioni di alghe tossiche e materiale organico in acqua alla fonte, conseguente aumento dei costi di gestione per la potabilizzazione e depurazione
Ondate di freddo	Rotture a causa del gelo nei sistemi in pressione e negli impianti di irrigazione	Limitata accessibilità e possibilità di prelievo da sorgenti montane Potenziali rotture di condotte e

		contatori nelle reti di adduzione e distribuzione
Siccità	Aumento della domanda irrigua Riduzione della disponibilità idrica Intrusione del cuneo salino causato dall'effetto combinato della minore disponibilità idrica e innalzamento del livello del mare Aumento della competizione tra vari utilizzi idrici	Fallanza e rotture delle componenti acquedottistiche opere di adduzione e distribuzione Ostruzioni, intasamento e blocco/rottura di sistemi di pompaggio nei sistemi di drenaggio acque reflue a causa della ridotta capacità di diluizione e maggiore concentrazione di solidi Fornitura idrica a rischio
Incendi	Danni strutturali causati dall'esposizione a fuoco e alte temperature	Danni strutturali causati dall'esposizione a fuoco e alte temperature Aumento di concentrazioni di sostanze tossiche disciolte in acqua
Precipitazioni intense/Esondazioni fluviali e inondazioni costiere Allagamenti	Riduzione della capacità utile di invasi Aumento della probabilità di collassi o cedimenti strutturali di manufatti Danni a condotte e stazioni di pompaggio Pericolo di insabbiamento, instabilità e collassi degli argini e dei manufatti di regolazione Limitata capacità di laminazione distribuita delle reti di drenaggio artificiali poste a difesa del territorio Compromissione di servizi ecosistemici, ricreativi e turistici forniti dalle reti	Blocco e malfunzionamento dei sistemi di pompaggio (acque reflue) Picchi di afflusso con alta concentrazione di solidi agli impianti di trattamento Rischio di straripamento e sversamento di acque reflue in corpi idrici naturali Funzionalità delle opere di captazione compromessa
Frane	Insabbiamento delle infrastrutture di accumulo e distribuzione, con riduzione dell'efficienza di funzionamento Danni ad infrastrutture di adduzione e distribuzione e sistemi irrigui Rischio di crollo delle dighe nei sistemi di accumulo e derivazione	Rottura di tubazioni e infrastrutture sotterranee sepolte, con conseguenti perdite di acqua potabile o rilascio di acqua di scarico e potenziali rischi di infiltrazione di sostanze contaminanti
Tempeste di vento	Malfunzionamenti delle reti in pressione derivanti da danni alle infrastrutture di fornitura elettrica da cui dipendono	

Tabella 10: Impatti climatici sulle infrastrutture per la gestione delle risorse idriche.

4.1.6. Infrastrutture per la gestione dei rifiuti urbani e speciali

Le infrastrutture considerate in relazione al sistema integrato di gestione rifiuti comprendono sezioni impiantistiche per il trattamento, servizi di raccolta e trasporto verso impianti di trattamento dedicato e discariche. Fra le varie tipologie di impianti si sono presi in considerazione i termovalorizzatori, gli impianti meccanici e biologici (come compostaggio e digestione anaerobica) e le sezioni di riciclaggio dei rifiuti da raccolta differenziata.

Ondate di calore/Aumento della temperatura media

Le ondate di calore hanno un effetto diretto sul rateo di degradazione dei rifiuti putrescibili, favorendo un aumento delle emissioni maleodoranti e una diminuzione dei contenuti di umidità degli stessi. Pertanto, negli impianti di discarica, in seguito ad aumenti estremi di temperatura, si possono verificare una crescita delle emissioni di gas fuggitivi oltre che una diminuzione della produzione di percolato con conseguente aumento della concentrazione degli inquinanti in quanto meno diluiti (Bebb & Kersey, 2003). In generale negli impianti di trattamento l'aumento della temperatura media porta ad una alterazione delle condizioni di processo (soprattutto negli impianti biologici come il compostaggio e la digestione anaerobica) e ad una riduzione dell'efficienza del processo di trattamento. In particolare negli impianti di compostaggio, con l'aumento delle temperature, i rifiuti potrebbero essicarsi velocemente e rendere più difficile il reintegro dell'umidità con le bagnature, aumentando il rischio di inibizione del processo di trattamento. Inoltre, una riduzione di operatività, in particolare dei servizi di raccolta, può verificarsi in seguito ai forti stress climatici a cui gli operatori ecologici possono essere esposti in occasione di ondate di calore. Tali effetti sono tipicamente accompagnati da un aumento dei costi di manutenzione delle infrastrutture.

Ondate di freddo

Temperature molto rigide favoriscono un'elevata produzione di percolato nelle discariche e possono aumentare la suscettibilità a smottamenti a causa delle gelate e conseguente frammentazione delle coperture realizzate in argilla. Tali eventi climatici estremi possono inoltre indurre un rallentamento dei processi biologici con conseguente aumento dei consumi energetici per il ripristino delle condizioni ideali negli impianti di trattamento (Bebb & Kersey, 2003). In base alla severità dell'evento potrebbe verificarsi l'interruzione o il rallentamento del servizio di raccolta. Un possibile aumento dell'umidità dei rifiuti, spesso associato alle basse temperature, può causare una maggiore difficoltà nella combustione o in generale nel trattamento (aumento del fenomeno dell'imbrattamento che rende difficile le operazioni di riciclo). Inoltre, in condizioni anticicloniche, può aumentare il rischio di riduzione della dispersione delle sostanze inquinanti convogliate al camino (o al biofiltro), con conseguente aggravio di ricaduta degli inquinanti nelle zone limitrofe gli

impianti. Tali fenomeni contribuiscono a generare un aumento dei costi di manutenzione e di esercizio.

Siccità

Eventi siccitosi tendono a diminuire la copertura di vegetazione in discarica e ad aumentare le fratturazioni della copertura con conseguente aumento dell'erosione dei pendii e delle arginature nonché aumento della dispersione eolica delle polveri difficili da contrastare con le opportune bagnature a causa della ridotta disponibilità idrica (Ahmed, 2013).

Incendi

In ambienti a rischio di esplosione, come spesso sono le discariche e gli impianti di trattamento rifiuti, gli incendi risultano particolarmente critici in quanto difficili da contrastare e di elevato impatto ambientale a causa dei fumi tossici e nocivi che si possono generare in seguito alla combustione a basse temperature e in carenza di ossigeno dei rifiuti solidi spesso contenenti anche sostanze pericolose (Bebb & Kersey, 2003). Fenomeni di autocombustione possono verificarsi in seguito alle elevate temperature soprattutto nelle aree di stoccaggio e lungo la catena di processo (come, ad esempio, nelle biocelle di compostaggio).

Esondazioni fluviali e inondazioni costiere/Allagamenti

Le esondazioni fluviali e le inondazioni costiere e, più in generale, i fenomeni di allagamento risultano particolarmente problematici nelle discariche a causa dei possibili sversamenti di percolati e dell'immissione incontrollata dei rifiuti nell'ambiente (Bebb & Kersey, 2003). Il verificarsi di questi fenomeni climatici estremi può contribuire alla formazione di detriti e rifiuti da alluvione che contribuiscono all'incremento della necessità di gestione dei rifiuti. In riferimento agli impianti e ai sistemi di raccolta, potrebbero verificarsi interruzione della viabilità di accesso e interruzione del servizio o addirittura danneggiamenti alla tecnologia che porterebbero ad un fermo impianto per manutenzione, con conseguente necessità di trasferire ad altro impianto il rifiuto da trattare, causando l'aumento dei costi di investimento e di manutenzione.

Frane

I maggiori impatti dovuti alle frane riguardano la possibile riduzione di operatività dei servizi di raccolta e trattamento in seguito all'interruzione della viabilità di accesso a causa di smottamenti. Eventi franosi in discarica possono inoltre indurre sversamenti di percolato o di gas. Riduzioni di operatività e danneggiamenti alla tecnologia originati da frane possono causare, in ultima analisi, un fermo impianto (o una interruzione del servizio di raccolta) per manutenzione con conseguente necessità di trasferire ad altro impianto il rifiuto da trattare (Bebb & Kersey, 2003).

Tempeste di vento

Le tempeste di vento possono generare danni strutturali in seguito alla pressione del vento o dell'impatto con detriti sulle infrastrutture dedicate alla gestione dei rifiuti e indurre una riduzione di operatività del servizio di raccolta (Bebb & Kersey, 2003). Forti raffiche di vento possono inoltre generare arie insalubri dovute all'aumento della dispersione eolica delle polveri e dei gas diffusi dalla copertura di discarica mentre negli impianti potrebbe riscontrarsi l'aumento della dispersione eolica delle emissioni convogliate. Nel caso degli impianti di trattamento potrebbero verificarsi danneggiamenti ai capannoni con conseguente fermo impianto. In riferimento alla raccolta potrebbero verificarsi difficoltà dei mezzi pesanti a transitare nei periodi di forte vento ed episodi di tempeste con possibilità di dispersione dei rifiuti nell'ambiente.

Pericolo climatico	Impatti		
	Discariche	Impianti di trattamento	Servizi di raccolta e trasporto
Ondate di calore Aumento di temperatura media	Aumento delle emissioni diffuse di gas e il disturbo olfattivo Aumento della dispersione di polveri Fessurazione e rottura delle coperture in argilla	Aumento della decomposizione dei rifiuti con conseguente incremento di maleodoranze Essiccazione dei rifiuti aumento della risorsa idrica necessaria per il processo (impianti biologici)	Aumento di maleodoranze Riduzione del servizio
Ondate di freddo	Aumento della produzione di percolato e conseguente instabilità dei pendii e degli argini di contenimento	Possibile riduzione della dispersione delle sostanze inquinanti convogliate al camino Aumento dell'umidità dei rifiuti con conseguente difficoltà nella combustione/trattamento	Riduzione del servizio
Siccità	Riduzione della copertura di vegetazione e conseguente aumento delle fratturazioni del capping Aumento della dispersione eolica delle polveri	Riduzione della disponibilità idrica necessaria per il processo e per la soppressione di polveri Possibili fenomeni di autocombustione	

Incendi	Emissioni nocive e tossiche causate dalla combustione a bassa temperatura	Emissioni nocive e tossiche causate dalla combustione a bassa temperatura	
Esondazioni fluviali e costiere Allagamenti	Sversamenti di percolati e dell'immissione incontrollata dei rifiuti nell'ambiente Aumento dei rifiuti da demolizione dovuti ad alluvioni	Interruzione dalla viabilità di accesso Interruzione del servizio e danneggiamenti alla tecnologia con conseguente fermo impianto	Riduzione del servizio Rischio di dispersione di rifiuti nell'ambiente
Frane	Crollo degli argini di contenimento della discarica con conseguente sversamento del percolato e fuoriuscita di emissioni tossiche e maleodoranti	Interruzione dalla viabilità di accesso Interruzione del servizio e danneggiamenti alla tecnologia con conseguente fermo impianto	Riduzione del servizio
Tempeste di vento	Aumento della dispersione eolica delle polveri e dei gas diffusi dal capping di discarica	Aumento della dispersione eolica delle emissioni convogliate Danni ad infrastrutture e conseguente interruzione di servizio	Riduzione del servizio Dispersione dei rifiuti nell'ambiente

Tabella 11. Impatti climatici sulle infrastrutture per la gestione dei rifiuti urbani e speciali.

4.1.7. Effetti delle interdipendenze settoriali

Le infrastrutture critiche oggetto della presente relazione sono fortemente interconnesse mediante collegamenti fisici e logico-funzionali tali da costituire un complesso sistema di sistemi. Pertanto danni e perdite di funzionalità originate da pericoli climatici (o antropici) su singole infrastrutture (sezioni 4.1.1-4.1.6) si possono trasmettere a cascata su altre infrastrutture attraverso le interdipendenze che costituiscono canali di trasmissione degli effetti di guasti e malfunzionamenti. L'interdipendenza tra infrastrutture può essere: fisica quando lo stato di una infrastruttura dipende dall'approvvigionamento del prodotto o servizio di un'altra; cyber quando lo stato di operazione di un'infrastruttura è controllato dal flusso di informazioni trasmesse attraverso il sistema di telecomunicazione; geografica, quando due o più infrastrutture sono esposte alle stesse cause di guasto e/o sollecitazioni in quanto condividono lo stesso luogo fisico; o logica, quando lo stato di una infrastruttura

dipende dallo stato dell'altra, ad esempio attraverso lo scambio di servizi, fattori socio-economici, vincoli normativi e legislativi (Kröger & Zio, 2011).

Prendendo ad esempio le infrastrutture energetiche, queste sono dipendenti da: a) infrastrutture idriche, che forniscono i meccanismi di raffreddamento necessari per la generazione di energia e la raffinazione di petrolio e gas, proteggono gli impianti energetici dalle inondazioni e garantiscono che l'ambiente di lavoro del personale sia sano e igienico; b) infrastrutture di telecomunicazione, per il funzionamento dei sistemi di controllo e di gestione, in particolare per lo sviluppo di reti intelligenti e contatori intelligenti, e per le comunicazioni; e c) infrastrutture di trasporto, a supporto della catena di approvvigionamento del carburante per la generazione di energia e la distribuzione dei prodotti petroliferi e del gas, oltre che per consentire l'accesso al personale. Al contrario, l'energia è usata per le reti: a) idriche, per far funzionare impianti di trattamento delle acque e le stazioni di pompaggio; b) di telecomunicazione, per il funzionamento degli apparati; e c) di trasporto, per il funzionamento dei sistemi di trasporto.

Inoltre, negli ambienti urbani l'energia, l'acqua, le infrastrutture di telecomunicazione e quelle di trasporto sono spesso co-localizzate: ad esempio, i cavi elettrici possono essere posti sotto le strade accanto ai cavi di comunicazione, adiacenti alle condutture dell'acqua e del gas, e sopra le fognature. Un guasto di una qualsiasi di queste infrastrutture può portare direttamente al danneggiamento di un'altra.

Considerando il caso specifico della reciproca dipendenza tra reti di telecomunicazione e reti di distribuzione dell'energia elettrica, un esempio di come l'interdipendenza funzionale possa provocare gravi danni alle infrastrutture, e di conseguenza gravi disservizi per la comunità, è rappresentato dal blackout elettrico verificatosi in gran parte d'Italia nel settembre 2003 a seguito di un flashover tra un cavo conduttore e un albero verificatosi su una linea di trasmissione che attraversa la Svizzera (Buldyrev et al., 2010).

La Figura 3 mostra le topologie della rete elettrica (riportata sulla mappa) e della rete di telecomunicazione (riportata al di sopra della mappa) coinvolte nel blackout. Nella Figura, i nodi della rete elettrica rappresentano siti di generazione e distribuzione di energia elettrica, mentre i nodi della rete di telecomunicazione rappresentano siti equipaggiati con apparati quali server e/o nodi di commutazione. Dalla Figura 3, risulta chiaro come a causa dell'interdipendenza tra le due infrastrutture, un guasto inizialmente occorso anche ad un solo elemento della rete elettrica sia in grado di provocare un disservizio a livello nazionale. Infatti, il guasto ad un apparato della rete elettrica può influire sul corretto funzionamento degli apparati di comunicazione da esso direttamente dipendenti per l'approvvigionamento energetico; a seguito del malfunzionamento di tali apparati di comunicazione, si può poi incorrere in ulteriori malfunzionamenti nella rete elettrica, e così via, dando luogo a una catena di guasti tra le due infrastrutture. Tale "effetto cascata" è ancor più critico quando una molteplicità di nodi nelle due reti è coinvolta nel guasto

iniziale (ad esempio per effetto di eventi climatici estremi diffusi nello spazio), poiché in casi del genere il diffondersi dei guasti attraverso le infrastrutture interdipendenti può avvenire con maggior velocità.

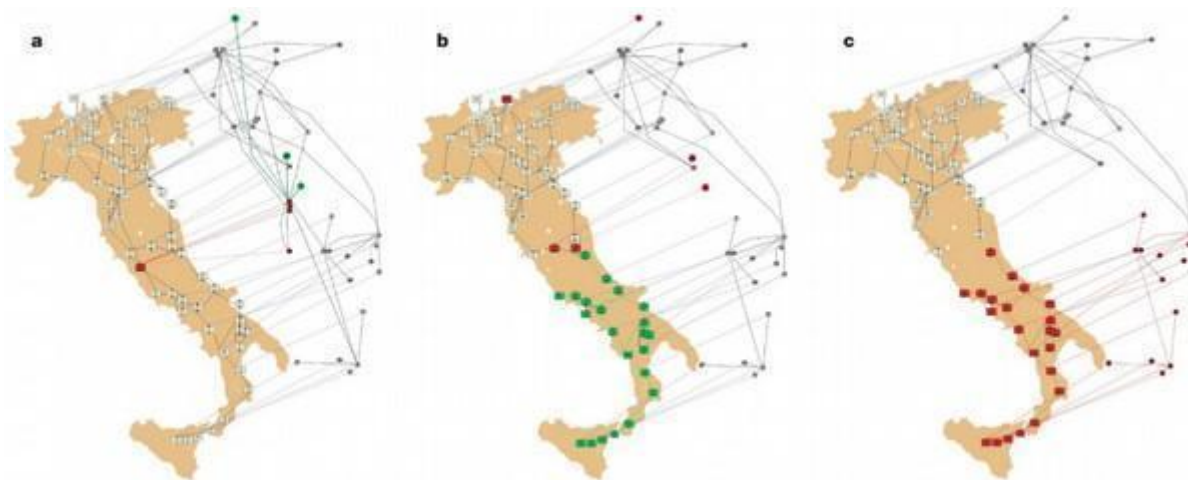


Figura 3. Interdipendenza tra rete di distribuzione elettrica e rete di telecomunicazione: l'esempio del blackout italiano del 2003 (Buldyrev et al. 2010)²⁵. a) Una centrale elettrica è rimossa (nodo rosso sulla mappa) dalla rete elettrica e di conseguenza i nodi di telecomunicazione che dipendono da essa vengono rimossi dalla rete (nodi rossi sopra la mappa). I nodi che verranno disconnessi dal cluster originale al passaggio successivo sono contrassegnati in verde. b) I nodi aggiuntivi che sono stati disconnessi dal cluster originale della rete di telecomunicazione vengono rimossi (nodi rossi sopra la mappa). Di conseguenza le centrali ad esse dipendenti vengono rimosse dalla rete elettrica (nodi rossi sulla mappa). Anche in questo caso, i nodi che verranno disconnessi dal cluster originale nel passaggio successivo sono contrassegnati in verde. c) Vengono rimossi i nodi aggiuntivi che erano disconnessi dal cluster originale della rete elettrica (nodi rossi sulla mappa), così come i nodi della rete di telecomunicazione che dipendono da essi (nodi rossi sopra la mappa).

Nel caso specifico del blackout elettrico del 2003, il ripristino dell'energia in tutto il paese ha richiesto 18 ore. In conseguenza di questa situazione, diversi altri settori infrastrutturali sono stati colpiti, dimostrando la loro forte dipendenza dall'approvvigionamento elettrico (Kröger & Zio, 2011). È stato interrotto il servizio di circa 110 treni con più di 30000 passeggeri. Numerosi voli aerei sono stati cancellati o posticipati e lo spegnimento di semafori per il controllo del traffico stradale ha portato a situazioni di caos nelle grandi città. In alcune regioni d'Italia si sono verificate interruzioni di distribuzione dell'acqua e perdite di funzionalità delle reti telefoniche e di servizi internet. In totale, si stimano perdite economiche per circa 120 milioni di euro, dovute a cibi avariati e interruzione di produzione delle industrie.

Alla luce di queste considerazioni risulta evidente quanto sia importante tenere in seria considerazione gli effetti originati dalle interdipendenze settoriali nella progettazione, realizzazione e gestione di infrastrutture interdipendenti, in particolare in un contesto di crescenti pressioni climatiche (Farhan Habib et al., 2015).

4.2. Proiezioni degli impatti economici associati ai cambiamenti negli eventi climatici estremi

Nella presente sezione si fornisce una valutazione degli impatti economici diretti e indiretti sulle infrastrutture critiche del Paese a causa dei cambiamenti negli eventi climatici estremi attesi per i prossimi decenni nell'ipotesi di uno scenario di emissioni di gas serra “*business-as-usual*” (in questo rapporto è lo scenario RCP 4.5 che conduce ad un incremento della temperatura media terrestre rispetto ai livelli pre-industriali di circa 3°C). Si descrive brevemente nei paragrafi successivi la metodologia utilizzata.

Impatti economici diretti

Gli impatti economici diretti sulle infrastrutture utilizzano stime di rischio pubblicate in un recente studio condotto dal Joint Research Centre nell'ambito della valutazione della strategia di adattamento ai cambiamenti climatici della Commissione Europea (Forzieri et al., 2018). Questo studio è l'unico, a conoscenza degli autori, a quantificare l'impatto economico diretto di molteplici eventi climatici estremi specificatamente **su infrastrutture critiche**, ed è pertanto preso come riferimento in questa relazione.

In tale valutazione sono comprese le infrastrutture dei settori di trasporto, energia e industria, e i pericoli climatici si riferiscono a ondate di calore e di freddo, siccità e incendi, esondazioni fluviali, inondazioni costiere e tempeste di vento.

La metodologia, in linea con l'approccio proposto dall'IPCC per la valutazione dei rischi climatici (IPCC, 2014) (Figura 2), integra un insieme multi-modello di proiezioni di pericoli climatici ad alta risoluzione generate in uno scenario di emissioni di gas serra “*business-as-usual*” (Forzieri et al., 2016), una rappresentazione dettagliata delle infrastrutture (Batista & Silva, 2019) e una valutazione qualitativa della loro vulnerabilità ai pericoli climatici basata sulla combinazione di conoscenze specialistiche (indagine su circa 400 esperti) e revisione della letteratura scientifica consistente con quanto descritto in sezione 4.1.

Le tre componenti sopra menzionate (pericoli climatici, esposizione, vulnerabilità) sono messe in relazione con più di 1100 osservazioni di danni climatici registrati nel database EMDAT² al fine di derivare un insieme completo e comparabile di funzioni di danno a scala

² EMDAT. EM-DAT | The international disasters database. <https://www.emdat.be/>.

nazionale per ogni combinazione di pericolo climatico e infrastruttura. Tali relazioni vengono calcolate per il periodo 1981-2010 (baseline) e successivamente estrapolate per le finestre temporali future 2011-2040 (2020s) e 2041-2070 (2050s) in funzione delle variazioni attese nei pericoli climatici, assumendo esposizione e vulnerabilità delle infrastrutture costanti alla condizione attuale. Pertanto le stime di rischio presentate non tengono conto di possibili strategie di adattamento, né di variazioni nel tessuto infrastrutturale del Paese.

La descrizione degli impatti climatici originati dai pericoli climatici sulle infrastrutture illustrata in sezione 4.1 è funzionale a comprendere le interazioni clima-infrastruttura e i meccanismi responsabili dei danni economici presentati nelle sezioni seguenti.

Impatti economici indiretti

Le stime di impatto economico diretto sono state successivamente utilizzate come input di un modello macroeconomico per quantificare gli impatti indiretti, ovvero quanto i danni sulla dotazione infrastrutturale del Paese possano ripercuotersi sulla capacità di produrre, generare ricchezza e crescita nel lungo periodo.

L'approccio modellistico scelto è quello dell'equilibrio economico generale che rappresenta le interdipendenze tra settori economici, quali ad esempio quelle descritte in sezione 4.1.7, la sostituibilità tra fattori produttivi e le dinamiche di mercato tra domanda e offerta conseguenti variazioni di prezzo. Il modello di equilibrio economico generale utilizzato ICES (intertemporal general equilibrium system, www.icesmodel.org) è stato calibrato sullo scenario di sviluppo economico SSP2 (Ahmed, 2013).

Le perdite dirette sono state implementate nel modello come perdita di asset di capitale nei settori interessati. Il modello ha copertura mondiale, ma per questo studio ne è stata utilizzata una versione che rappresenta l'Europa con dettaglio regionale. L'Italia è quindi caratterizzata nelle sue 20 regioni. Per le simulazioni i dati di impatto sono stati inizialmente aggregati nelle loro diverse tipologie di pericolo climatico e l'analisi è stata condotta in forma dinamica fino al 2050.

Scenario climatico di riferimento

Lo scenario "*business-as-usual*" di emissione di gas serra utilizzato per la valutazione degli impatti diretti e indiretti è lo SRES A1B che prevede un aumento della temperatura media globale di ~3°C (range 2,1- 3,8°C) entro il 2100, rispetto al 1990. E' lo scenario di riscaldamento che sembra più probabile alla luce delle attuali politiche ed in assenza di ulteriori misure di riduzione dei gas clima-alteranti (Hausfather & Peters, 2020). Scenari di emissione alternativi potrebbero mostrare differenze nelle future condizioni di pericolo

climatico in Italia. Per quanto riguarda gli scenari RCPs, descritti nel Capitolo 3, l'A1B può essere assimilabile, almeno fino al 2050, allo scenario RCP 4.5. Climi più caldi derivanti da una forzante radiativa più elevata (RCP 8.5) amplificheranno la variabilità climatica (Russo et al., 2015) (Roudier et al., 2016), causando una probabile maggiore intensificazione degli estremi legati alle condizioni meteorologiche rispetto a quelli osservati in questo studio. Ma lo scenario RCP 8.5 viene considerato oramai molto improbabile sia dall'IPCC che dalle Nazioni Unite. Al contrario, ci si dovrebbe aspettare una tendenza opposta in caso di forzante radiativa inferiore e conseguente riscaldamento meno evidente (ad esempio RCP2.6). Per aumentare la coerenza con gli scenari climatici analizzati nel precedente Capitolo 3, le valutazioni economiche riportate nella presente sezione arrivano fino al 2050s (2041-2070), un orizzonte temporale in cui comunque gli scenari RCP 4.5 e RCP 6.0, in relazione alle variazioni attese di temperatura, sono piuttosto simili (van Vuuren & Carter, 2014). Come già indicato nel Capitolo 3, allo scenario RCP 4.5 (il nostro “*business-as-usual*”) viene associato un incremento di temperatura media a fine secolo di circa 3 gradi.

4.2.1 Impatti economici diretti

4.2.1.1 Rischi multi-settoriali multi-pericolo

I risultati delle simulazioni illustrati nel Capitolo 3, mostrano che l'Italia dovrà affrontare, nei prossimi decenni, un aumento continuo e sempre più marcato dei danni diretti ed indiretti associati agli estremi climatici. Come visto, i danni diretti e indiretti al 2050, in assenza di rapide misure di mitigazione (Capitolo 6) e adeguate misure di adattamento (Capitolo 5) raggiungeranno il 2 - 2.5% circa del PIL (circa 66 - 82 miliardi di euro all'anno) nello scenario RCP 4.5 al 2050. Questi valori sono in linea con quelli recentemente evidenziati dalla Banca Centrale Europea e da altre organizzazioni internazionali.

Per quanto riguarda le sole infrastrutture (Forzieri et al., 2018), il **danno attuale diretto (EAD)** complessivo per l'Italia è ovviamente più contenuto. Calcolato sul periodo di riferimento 1981-2010, è di **0.42 miliardi di euro all'anno**, ma si prevede che **ammonterà a circa 2.06±0.22 miliardi di euro e 5.17±0.46 miliardi di euro all'anno rispettivamente negli anni 2020s e 2050s nello scenario “business-as-usual” considerato (Figura 4) a causa degli effetti dei cambiamenti climatici.**

Il più forte aumento dei danni economici diretti (Figura 4a) è previsto per il settore dei trasporti, per il quale l'attuale EAD di 0.15 miliardi di euro all'anno potrebbe superare 1.08 e 2.80 miliardi di euro all'anno (corrispondenti ad una crescita relativa del 736% e 1916%) rispettivamente negli anni 2020s e 2050s. **Una tendenza analoga può essere osservata per il settore energia**, per il quale l'attuale EAD di 0.04 miliardi di euro l'anno dovrebbe raggiungere 0.57 miliardi di euro all'anno (un aumento del 1325%) nel 2050s.

Per l'industria, si stima che l'EAD, attualmente di 0.23 miliardi di euro all'anno, supererà i 1.79 miliardi di euro all'anno nel 2050s, pari a un aumento del 678%.

Mentre gli attuali danni alle infrastrutture originati dai rischi climatici riguardano principalmente le esondazioni fluviali (58%), **le proporzioni dei danni associati a siccità e ondate di calore potrebbero aumentare fortemente, fino a rappresentare circa il 92% dei danni climatici nel 2050s (vs 31% nel periodo di riferimento)** (Figura 4b). Ciò suggerisce che gli impatti degli estremi climatici potrebbero cambiare non solo in termini di entità dei danni, ma anche nelle loro tipologie. I contributi relativi degli incendi e delle inondazioni costiere sono bassi, nonostante il forte aumento dei danni da inondazioni costiere previsto per i prossimi decenni.

Figura 4a
Danni climatici per settore
2020s e 2050s

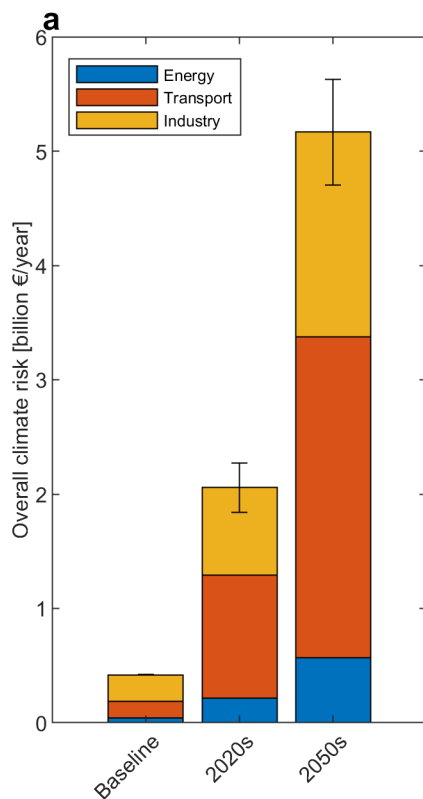
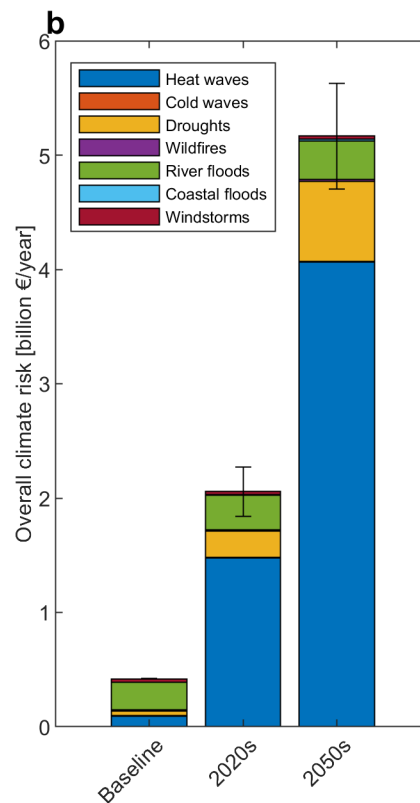


Figura 4b
Danni climatici per tipo di evento
2020s e 2050s



Si evidenzia però che il basso contributo dei danni delle inondazioni costiere può essere correlato al fatto che il database di disastri climatici utilizzati come riferimento (EMDAT) tende probabilmente a sottostimare in larga misura tali eventi. In particolare, fenomeni di inondazioni costiere, in larga misura associati all'innalzamento del livello del mare, potrebbero generare danni sostanziali in particolare nelle aree urbane e, più in generale, in aree costiere caratterizzate da alta dotazione infrastrutturale (Rojas et al., 2013). I danni

associati alle tempeste di vento non presentano sostanziali variazioni, mentre quelli relativi alle ondate di freddo sono marginali e potrebbero scomparire completamente con il riscaldamento globale.

4.2.1.2 Rischi a livello di settore e infrastruttura

La severità degli impatti economici varia in maniera sostanziale tra settori economici e pericoli climatici (Figure 5 e 6) riflettendo le differenti vulnerabilità specifiche dei vari settori. Di seguito si descrivono brevemente le variazioni attese negli impatti economici diretti a livello di singolo settore e infrastruttura, richiamando brevemente le tipologie di danno originate dai pericoli climatici descritte in dettaglio in sezione 4.1.

Il maggiore aumento dei danni diretti per il settore energetico riguarda la produzione di energia - combustibili fossili, nucleari e rinnovabili - a causa della sua sensibilità alla siccità e alle ondate di calore (ad es. diminuzione dell'efficienza del sistema di raffreddamento delle centrali elettriche a causa dell'aumento della temperatura dell'acqua/dell'aria) (sezione 4.1.2). A tale proposito è importante ricordare che tali stime si basano sull'attuale distribuzione infrastrutturale e pertanto non tengono conto della possibile evoluzione del sistema socio-economico del Paese. Questo è particolarmente importante per il settore energetico, dal momento che la produzione energetica potrebbe diversificarsi in maniera sostanziale nei prossimi decenni per raggiungere gli obiettivi concordati nell'ambito del *European Green Deal* (zero emissioni nette di gas serra entro il 2050). Sempre in uno scenario di attuale distribuzione infrastrutturale i danni da siccità e da ondate di calore in Italia potrebbero rappresentare rispettivamente il 30% e il 64% del rischio climatico totale per il settore energetico nel 2050s (ora rispettivamente il 28% e il 20%). Gli altri pericoli climatici considerati tendono attualmente a colpire principalmente i sistemi di trasporto dell'energia e con il tempo i conseguenti effetti mostrano aumenti meno distinti (incendi, esondazioni fluviali e tempeste di vento), aumentano drasticamente di frequenza ma rimangono di magnitudo bassa (inondazioni costiere) o diminuiscono bruscamente (ondate di freddo).

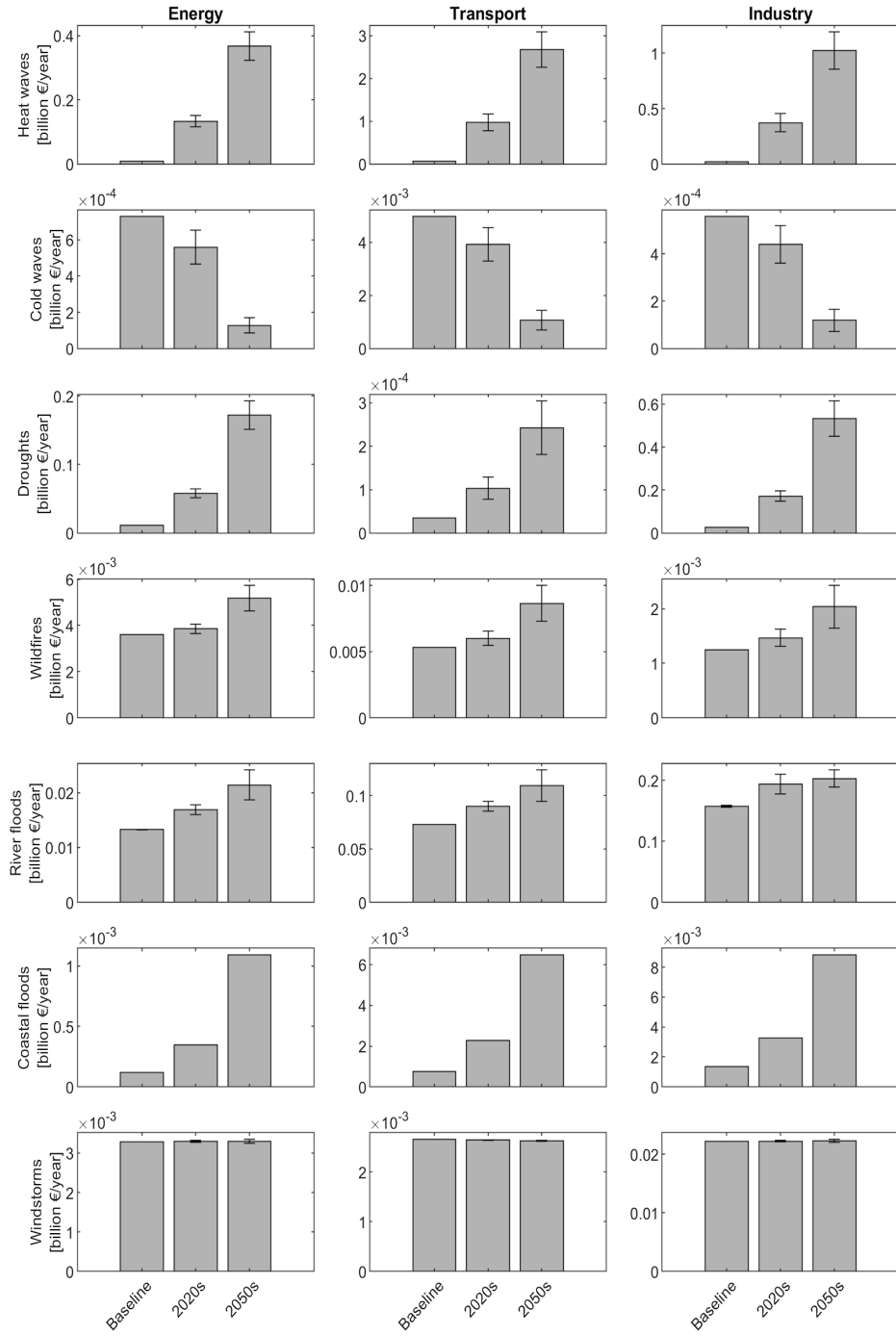
Per il settore dei trasporti, le ondate di calore domineranno in gran parte i danni diretti futuri (95% del totale dei danni attesi nel 2050s), principalmente su strade e ferrovie (ad es. deformazione delle rotaie, deterioramento del manto stradale) (sezioni 4.1.1.1 e 4.1.1.2). Queste infrastrutture di trasporto subiranno anche danni a causa di esondazioni fluviali e inondazioni costiere (> 50% degli attuali danni stradali e ferroviari), con crescite rispettivamente moderate e drastiche nel tempo, nonché danni a causa delle ondate di freddo ($\approx 2\%$ attuali danni stradali e ferroviari) ma con un trend fortemente decrescente. Seppur poco sviluppato in Italia il trasporto fluviale sarà sempre più colpito

dalla siccità: forti riduzioni della portata dei fiumi potrebbero rendere gli stessi non navigabili per prolungati periodi dell'anno (sezione 4.1.1.5). Per quanto riguarda i danni causati dalle tempeste al trasporto aereo, questi mostrano un leggero aumento (sezione 4.1.1). L'innalzamento del livello del mare e l'aumento delle mareggiate potrebbero portare, invece, a un forte aumento dei danni ai porti e più in generale alle infrastrutture critiche localizzate lungo la costa (sezione 4.1.1.4).

Esondazioni e tempeste di vento attualmente dominano i danni economici diretti associati ai rischi climatici nel settore industriale; tali perdite economiche sono principalmente imputabili a danni strutturali a infrastrutture, macchinari e attrezzature. Sebbene i danni ascrivibili a tali fenomeni siano in aumento nei prossimi decenni il loro contributo sarà rapidamente superato da quello originato da siccità e ondate di calore. Gli impatti riguardano principalmente il degrado della qualità dell'acqua (sezione 4.1.5) e dei sistemi di gestione dei rifiuti (sezione 4.1.6), con corrispondenti maggiori costi per il trattamento.

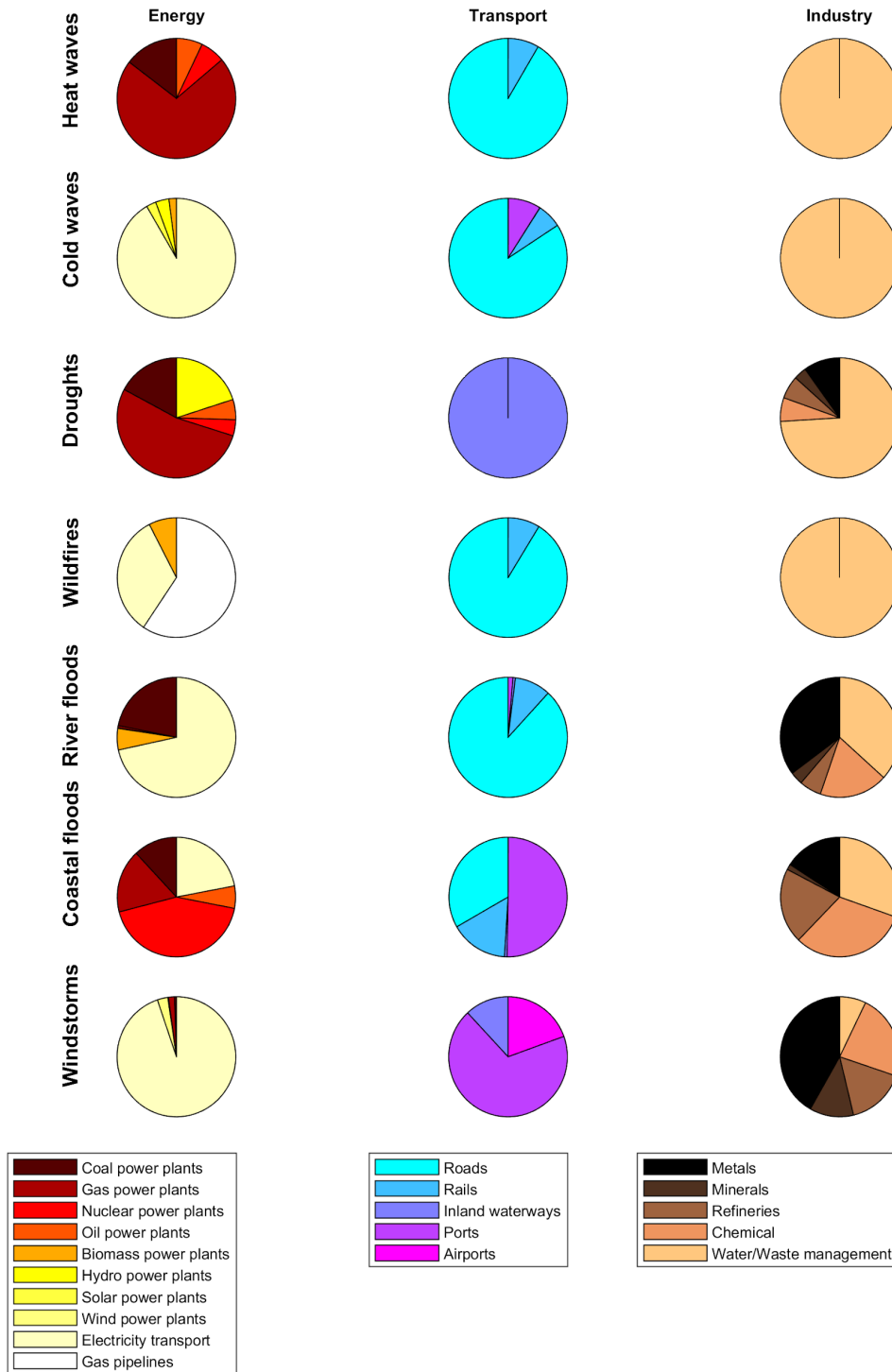
Seppur non esplicitamente analizzati qui, gli impatti generati dai crescenti pericoli climatici, ed in particolare quelli associati al forte incremento in severità e frequenza di ondate di calore, potrebbero probabilmente causare forti danni alle infrastrutture ICT e logistiche (sezioni 4.1.3 e 4.1.4, rispettivamente).

Figura 5. Danno atteso annuale (EAD) alle infrastrutture critiche aggregato a livello nazionale per ogni pericolo climatico, settore e periodo temporale. I periodi temporali considerati si riferiscono a: 1981-2010 (baseline), 2011-2040 (2020s) e 2041-2070 (2050s). Gli intervalli di confidenza riflettono



la variabili

Figura 6. Distribuzione degli impatti degli estremi climatici sui tipi di infrastrutture per settore,



calcolati nel periodo 2041–2070 (2050s). Simulazioni prodotte in Forzieri et al. (2018)

4.2.1.3 Variazione spazio-temporale dei rischi

I risultati aggregati a scala nazionale mascherano le forti differenze negli impatti sul territorio. Gli impatti regionali dipendono evidentemente dalle variazioni spaziali in frequenza e intensità dei pericoli climatici, nonché dalla distribuzione spaziale delle infrastrutture esposte e dalla loro vulnerabilità. Si prevede che comunque tutte le regioni d'Italia sperimenteranno un progressivo aumento dei danni economici diretti associati a eventi climatici estremi, ma che tali danni non si distribuiranno in maniera omogenea sul territorio.

Emerge in maniera evidente, infatti, che nei prossimi decenni il rischio climatico, **in termini assoluti, sarà probabilmente più pronunciato nelle regioni settentrionali e tirreniche rispetto al resto d'Italia** (Figura 7 a-c). Gran parte del gradiente di danno osservato deriva dal maggiore numero di infrastrutture potenzialmente esposte nel Nord Italia e nelle regioni tirreniche (Capitolo 2), effetto questo che tende ad amplificare l'aumento più ridotto in queste regioni di molti degli eventi climatici estremi considerati (Capitolo 3). **In termini di variazione relative, il gradiente appare leggermente invertito, con le regioni meridionali, in particolare Sardegna, e Calabria** (Figura 7d-f), **caratterizzate da un aumento di rischio climatico percentualmente più marcato** rispetto al resto d'Italia e associato in larga misura all'aumento in siccità più pronunciato in queste regioni (Forzieri et al., 2014).

Anche le ondate di calore contribuiscono al gradiente di danno nord-sud, ma in misura minore rispetto alla siccità, poiché si prevede che gli impatti delle ondate di calore aumenteranno in modo significativo e in misura abbastanza omogenea in tutta Italia (Forzieri et al., 2016). Le esondazioni fluviali e le inondazioni costiere rimarranno il pericolo più critico in molte pianure alluvionali e tratti costieri del Paese.

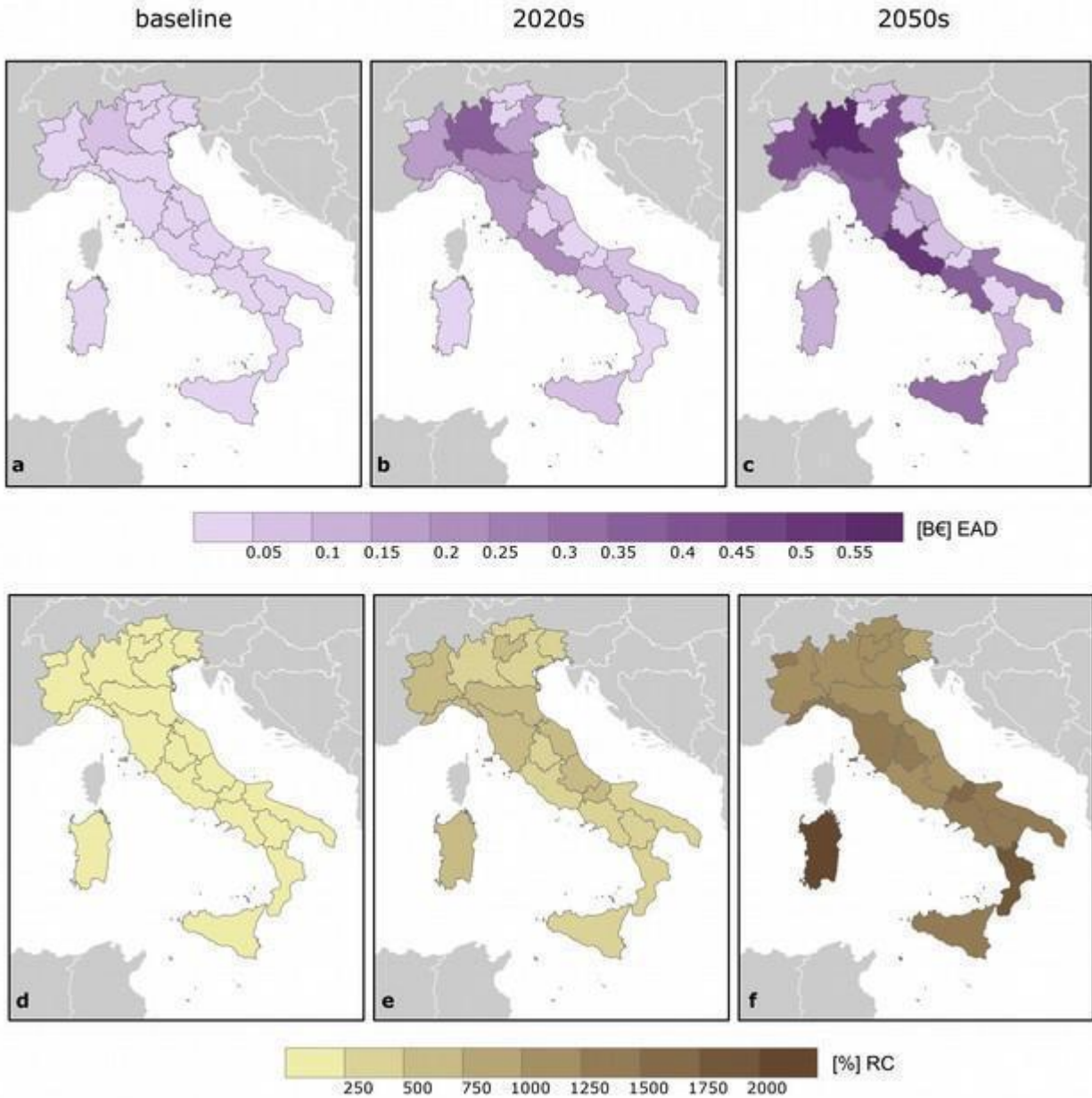


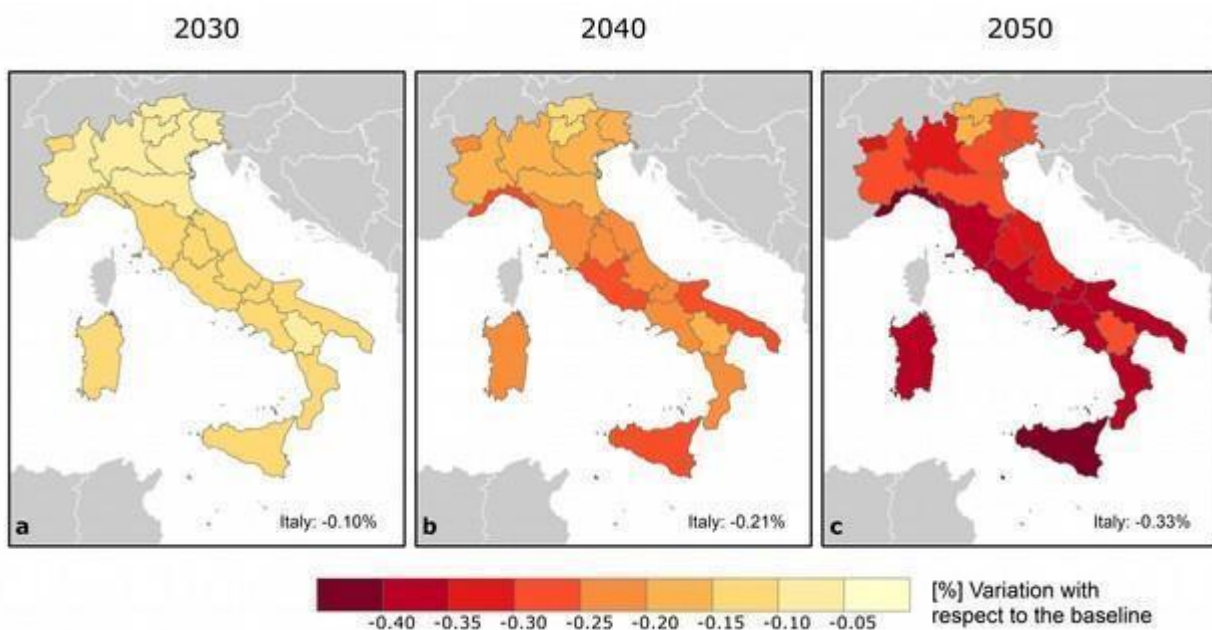
Figura 7. Mappe multi-rischio e multi-settore per le infrastrutture nei diversi periodi di tempo: 1981-2010 (baseline), 2011-2040 (2020s) e 2041-2070 (2050s). (a-c) rischio assoluto espresso in termini di miliardi di euro di danno previsti ogni anno (EAD); (d-f) rischio relativo espresso in termini di variazioni relative (RC) rispetto al periodo di riferimento (baseline). Simulazioni condotte in Forzieri et al. (2018)

4.2.2. Impatti economici indiretti

I danni economici diretti sulle infrastrutture descritti nelle precedenti sezioni avranno importanti effetti macroeconomici (impatti indiretti) sul PIL italiano complessivo e sul prodotto delle singole regioni (Figura 8). Nello scenario “*business as usual*”, si stima che **il danno complessivo (diretto e indiretto) causato dalla perdita o danneggiamento di infrastrutture per il Paese possa variare tra lo 0.1-0.4% del PIL medio nel decennio 2020-2030 e lo 0.33-0.55% del PIL nel 2050. Ad oggi, si tratterebbe di mancata capacità di produrre beni e servizi per un valore di circa 2.3 - 8.7 miliardi di euro. Proiettata al 2050, la perdita ammonterebbe a circa 11.5 - 18 miliardi di euro. Più del doppio, quindi, rispetto al danno diretto.**

Si tratta comunque di una **frazione del danno complessivo** da cambiamento climatico atteso per l'Italia nei prossimi decenni e stimato nel Capitolo 3 tra lo 0.5% e il 2% nel 2030 e tra il 2% e il 2.5 % nel 2050 nello scenario “*business as usual*” (RCP 4.5).

Si può anche notare come le perdite economiche, benché relativamente uniformi, siano maggiormente pronunciate nel sud del Paese e nell'area tirrenica. Questo risultato, pur coerente con l'andamento degli impatti diretti (Figura 7) in parte se ne discosta. E' infatti determinato da una concomitanza di fattori interagenti: l'entità degli impatti diretti appunto, la dotazione infrastrutturale esposta al rischio climatico, la relativa importanza nell'economia regionale dei settori la cui dotazione infrastrutturale è impattata e le interconnessioni economiche tra settori all'interno e tra regioni. Sicilia e Lazio risultano le più colpite con perdite pari allo 0.42% e 0.40% circa dell'output regionale nel 2050, rispettivamente, mentre il Trentino-Alto Adige appare la regione meno danneggiata con una perdita relativa di circa la metà (0.19%).



È stata anche analizzata la relazione tra gli impatti macroeconomici e i costi diretti degli impatti climatici sulle infrastrutture usati come dati in entrata per la simulazione. Una delle caratteristiche del modello utilizzato è appunto quella di catturare gli effetti moltiplicativi o di attenuazione degli shock economici derivanti dalle interazioni tra mercati.

Nel caso analizzato gli impatti si trasmettono anzitutto all'interno dei settori colpiti per gli effetti derivanti dalla perdita di asset di capitale sul processo produttivo, ma poi si espandono al resto del sistema economico a seconda delle interdipendenze settoriali e delle reazioni dal lato della domanda. La Figura 9a mostra come le dinamiche citate abbiano un effetto espansivo dei costi. Gli impatti macroeconomici sono sempre più grandi di quelli diretti e la differenza si amplifica nel tempo.

A livello macro-settoriale il settore energetico e il settore trasporto sono quelli maggiormente colpiti nella loro capacità produttiva. A livello aggregato di Paese, entrambi evidenziano perdite nell'output superiori allo 0.5%, mentre il settore industriale riporta perdite di output inferiori (Figura 9b).

La Tabella 12 riporta il dato macro-settoriale per ogni singola regione. In base alle simulazioni condotte per il 2050, la Sicilia risulterebbe la regione con la più alta perdita di prodotto nel settore industriale (-0,6%), il Molise nel settore trasporti (-1%) e la Calabria nel settore energetico (-0.75%). In maniera coerente con i risultati espressi in termini di PIL discussi sopra, il Trentino-Alto Adige emerge come regione con macro-settori produttivi meno danneggiati. Al netto della composizione settoriale dei diversi sistemi economici regionali, e della riallocazione di risorse trasmessa dai flussi commerciali interregionali, il settore industriale risulta il comparto con contributo marginale maggiore nel determinare la performance economica finale. Si veda ad esempio il caso della Sicilia e del Lazio in cui la contrazione dell'output è superiore a regioni con risultati peggiori nel settore energetico e nei trasporti.

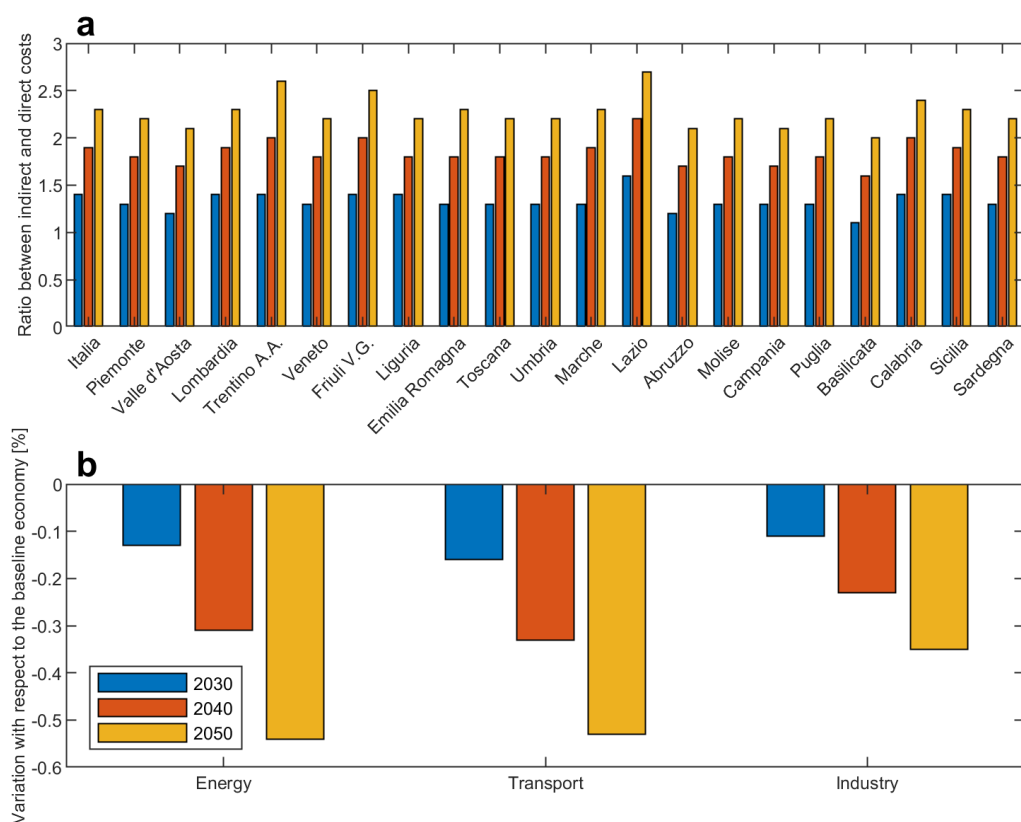


Figura 9. Effetti macro-economici a scala regionale e settoriale. a) Rapporto tra impatti macroeconomici (costi indiretti) e costi diretti, b) Impatto sulla produzione macro settoriale italiana in seguito agli impatti del cambiamento climatico sulle infrastrutture (variazione % rispetto al caso base in assenza di variazioni climatiche)

	2030	2040	2050	2030	2040	2050
	Piemonte			Marche		
Energia	-0,08	-0,21	-0,39	-0,10	-0,22	-0,38
Trasporti	-0,11	-0,26	-0,46	-0,20	-0,39	-0,60
Industria	-0,09	-0,20	-0,32	-0,11	-0,22	-0,33
	Valle d'Aosta			Lazio		

Energia	-0,08	-0,20	-0,43	-0,13	-0,30	-0,53
Trasporti	-0,18	-0,33	-0,48	-0,17	-0,36	-0,58
Industria	-0,12	-0,24	-0,38	-0,16	-0,34	-0,50
	Lombardia			Abruzzo		
Energia	-0,10	-0,25	-0,46	-0,14	-0,32	-0,55
Trasporti	-0,13	-0,31	-0,52	-0,17	-0,33	-0,51
Industria	-0,10	-0,22	-0,34	-0,12	-0,24	-0,35
	Trentino Alto Adige			Molise		
Energia	-0,03	-0,10	-0,22	-0,19	-0,39	-0,62
Trasporti	0,02	0,03	0,02	-0,34	-0,68	-1,04
Industria	-0,09	-0,18	-0,28	-0,12	-0,22	-0,32
	Veneto			Campania		
Energia	-0,12	-0,27	-0,49	-0,13	-0,33	-0,62
Trasporti	-0,15	-0,30	-0,45	-0,13	-0,30	-0,52
Industria	-0,10	-0,20	-0,30	-0,14	-0,29	-0,44
	Friuli V.G.			Puglia		
Energia	-0,14	-0,31	-0,53	-0,21	-0,44	-0,71
Trasporti	-0,17	-0,35	-0,53	-0,19	-0,41	-0,65
Industria	-0,11	-0,22	-0,34	-0,13	-0,25	-0,36
	Liguria			Basilicata		
Energia	-0,16	-0,37	-0,64	-0,16	-0,35	-0,61
Trasporti	-0,19	-0,38	-0,58	-0,21	-0,41	-0,64
Industria	-0,14	-0,29	-0,47	-0,14	-0,28	-0,40
	Emilia Romagna			Calabria		
Energia	-0,12	-0,27	-0,46	-0,17	-0,41	-0,75
Trasporti	-0,17	-0,33	-0,51	-0,18	-0,38	-0,62
Industria	-0,11	-0,21	-0,33	-0,17	-0,34	-0,49

	Toscana			Sicilia		
Energia	-0,13	-0,30	-0,54	-0,15	-0,35	-0,64
Trasporti	-0,20	-0,42	-0,68	-0,21	-0,42	-0,64
Industria	-0,12	-0,26	-0,40	-0,21	-0,41	-0,61
	Umbria			Sardegna		
Energia	-0,18	-0,42	-0,74	-0,16	-0,38	-0,68
Trasporti	-0,18	-0,40	-0,66	-0,13	-0,26	-0,40
Industria	-0,12	-0,24	-0,36	-0,16	-0,30	-0,42

Tabella 12. Perdite di output regionale in seguito agli impatti del cambiamento climatico sulle infrastrutture (variazione % rispetto al caso base in assenza di variazioni climatiche).

4.2.3. Valutazione delle incertezze

Sebbene il ragionevole accordo tra le stime descritte nelle precedenti sezioni e quelle riportate in studi indipendenti (Rojas et al., 2013) corrobori la metodologia utilizzata e i risultati ottenuti, è importante sottolineare una serie di potenziali limitazioni.

La componente di pericolo climatico è stata valutata sulla base di simulazioni di modelli regionali generate in accordo con uno scenario di emissione di gas serra A1B. Studi che stimino l'evoluzione della frequenza degli eventi estremi utilizzando gli insiemi di proiezioni climatiche più recenti, quali quelle prodotte nell'ambito dell'iniziativa CMIP6 (IPCC,2021) (Klein et al., 2021), potrebbero dare stime più affidabili su come le loro statistiche (valori medi, frequenza/probabilità di situazione estreme) possano avvenire nel futuro.

Gli scenari di rischio descritti si basano sulla proiezione del danno registrato per il periodo attuale di riferimento (1981-2010) a scenari futuri in base alle variazioni di frequenza degli eventi climatici estremi e alla distribuzione spaziale delle risorse infrastrutturali esposte. Pertanto, eventuali deviazioni del danno registrato dal suo valore reale si traducono inevitabilmente nelle stime di danno futuro.

Attualmente, la comprensione dei rischi climatici e la capacità di prevederne i futuri effetti è limitata dalla mancanza di sistemi di monitoraggio sistematico e consistente degli impatti (fisici, sociali ed economici) e delle inerenti incertezze nelle proiezioni. Nella valutazione degli impatti economici diretti presentati nelle sezioni precedenti si sono utilizzati per il

periodo attuale di riferimento dati collezionati nel database EMDAT³. Sebbene sia una delle fonti più complete degli impatti legati al clima, i danni registrati molto probabilmente si discostano dai valori reali (Felbermayr & Gröschl, 2014) (Gall et al., 2009). Poiché i dati che popolano il database provengono da diverse fonti e vengono raccolti da più attori, le stime di rischio risultanti dovrebbero essere lette alla luce di tali possibili sorgenti di incertezza.

Le stime di danno per singolo pericolo climatico registrate a livello nazionale nel database EMDAT sono state disaggregate tra settori/infrastrutture e regioni in base alla struttura sociale ed economica regionale rappresentata dalle statistiche Eurostat e dalla sensibilità allo specifico pericolo climatico valutata sulla base delle conoscenze specifiche e di una revisione della letteratura scientifica. Le assunzioni alla base della disaggregazione proposta rappresentano una potenziale fonte di incertezza che deriva dalla conoscenza incompleta dei veri impatti settoriali e della loro distribuzione spaziale (Meyer et al., 2013). Sebbene siano state formulate ipotesi ragionevoli, tali incertezze epistemiche sono difficili da valutare.

Nelle stime di impatto economico riportate in questo capitolo si assumono pericoli climatici indipendenti e vulnerabilità statica. Tuttavia, ogni pericolo può indurre o rafforzare altri pericoli e questi possono sovrapporsi spazialmente e temporalmente (Tilloy et al., 2019) (Zscheischler et al., 2020) influenzando non solo il livello di pericolosità complessivo, ma anche la vulnerabilità degli elementi a rischio attraverso possibili interrelazioni di più pericoli climatici o effetti a cascata (Kappes et al., 2012). La scarsità di osservazioni che collegano le variazioni negli impatti multi-pericolo e vulnerabilità non consente un'integrazione affidabile di tali effetti in sistemi predittivi su larga scala. Inoltre la vulnerabilità risultante dalle conoscenze specifiche non tiene conto, per le singole tipologie di infrastrutture, delle diverse caratteristiche tecnologiche, di obsolescenza, e di integrazione con altri sistemi infrastrutturali che possono influenzare la suscettibilità ad eventi climatici estremi.

Nello scenario di adattamento utilizzato si considera un rapporto costi-benefici uniforme per derivare una prima valutazione approssimata degli investimenti aggiuntivi necessari per rendere resilienti le infrastrutture d'Italia ai cambiamenti climatici. Tuttavia le misure di adattamento possono presentare caratteristiche molto diverse fra loro e tipicamente vengono sviluppate a livello locale, con diverse impostazioni normative, legali e di governance. Questi aspetti determinano il tipo di misure scelte, gli investimenti stanziati, la scala a cui le misure sono implementate e – in ultima analisi – i costi complessivi associati (Berkhout et al., 2015) (Bouwer et al., 2014). Tali informazioni su scala nazionale sono spesso difficilmente reperibili e pertanto la valutazione quantitativa dei loro effetti sui rischi climatici è difficile da stimare.

³ EMDAT. EM-DAT | The international disasters database. <https://www.emdat.be/>.

È inoltre opportuno richiamare le incertezze relative alla valutazione macro-economica. Il presente studio si riferisce allo scenario di sviluppo socio-economico SSP2. Tuttavia, ipotesi diverse di crescita e composizione settoriale dell'economia italiana possono portare a stime di impatto diverse. Altro elemento di incertezza deriva dall'avere a disposizione dati di impatto diretto per la sola Unione Europea. Il "resto del mondo", comunque presente nel modello economico, non risulta pertanto soggetto ad impatti sulle infrastrutture. Se questi determinassero delle variazioni nella performance economica dei paesi extra EU è ragionevole supporre che feedback economici sarebbero trasmessi ai Paesi EU, Italia inclusa, con effetto sui risultati finali. Altrettanto importanti sono le ipotesi di sviluppo tecnologico, in particolare quelle riferite alla sostituibilità tra fattori produttivi. Nel modello sono considerate costanti, ma se questa è un'ipotesi ragionevole nel breve periodo, è meno realistica nel lungo periodo. Un'ultima considerazione riguarda la rappresentazione stessa dell'economia come insieme di "mercati in equilibrio", efficienti e con agenti razionali. Questo artificio è necessario per fornire un punto di riferimento trattabile analiticamente, ma non cattura molte delle complessità dei mercati reali.

Le incertezze sull'impatto del cambiamento climatico sono quantificate unicamente in termini di variabilità indotta dalle proiezioni dei modelli climatici e non tengono conto di tutte le fonti di incertezza sopra descritte. Tuttavia, si sottolinea che la variabilità introdotta dai modelli di impatto può essere paragonabile, o addirittura superiore, alla variabilità introdotta dai diversi modelli climatici considerati (Piontek et al., 2014).

4.3. Dinamiche socio-economiche e rischi di transizione

Le sezioni precedenti hanno descritto le tipologie di impatto originate dai cambiamenti climatici e fornito delle valutazioni quantitative circa le possibili implicazioni economiche originate dalle variazioni climatiche attese per i prossimi decenni. Tali analisi sono sviluppate considerando le tecnologie e la distribuzione delle attuali infrastrutture del Paese, e pertanto non integrano gli effetti delle future evoluzioni socio-economiche sulle infrastrutture stesse e le loro implicazioni sulle componenti del rischio. Tuttavia, come già indicato in introduzione a questo capitolo, i processi socio-economici possono svolgere un ruolo determinante nell'influenzare il rischio originato dai pericoli climatici (Figura 2). Tali processi possono favorire il progressivo sviluppo infrastrutturale principalmente responsabile delle variazioni in esposizione delle infrastrutture e l'adozione di misure di adattamento volte a rendere le infrastrutture meno vulnerabili alle pressioni climatiche (Formetta & Feyen, 2019) (Jongman et al., 2015).

Altri processi di natura socio-economica possono invece generare un effetto opposto, rendendo il sistema infrastrutturale potenzialmente più esposto ai rischi climatici. Ad esempio, negli ultimi 20 anni in Italia vi è stata una particolare attenzione alla realizzazione di infrastrutture integrate. Tali approcci, sebbene possano apparire più robusti nei confronti di disturbi frequenti e di piccolo impatto, sono risultati molto più vulnerabili rispetto a eventi a cascata, come dimostrato dai blackout elettrici del 2003 verificatisi a scala nazionale a causa delle forti interdipendenze settoriali (Sezione 4.1.7).

In aggiunta, i processi socio-economici, indipendentemente dal verificarsi o meno di un pericolo climatico, possono generare impatti economici originati da cambiamenti significativi di natura politica, legale e tecnologica, volti a rispondere ai bisogni di mitigazione e adattamento al cambiamento climatico. Questi sono tipicamente denominati rischi di transizione⁴ e possono avere implicazioni importanti sull'uso di infrastrutture esistenti o ancora da costruire, influenzandone la viabilità economica.

In particolare investimenti indirizzati su attività ed infrastrutture che faticano ad essere compatibili con uno sviluppo economico progressivamente disaccoppiato dalle emissioni di gas serra (per esempio in infrastrutture di trasporto e distribuzione di combustibili fossili e dispositivi che ne consentono l'uso), possono essere soggetti a periodi di vita utile e profili di utilizzo inferiori alle attese, con ripercussioni negative sui ritorni sul capitale investito. Questo li rende meno resilienti alla transizione (continentale o globale) ad una economia a basso contenuto di carbonio e li espone ad un rischio di generare danni economici superiori rispetto ad investimenti ed infrastrutture compatibili con uno sviluppo sostenibile (per esempio in reti elettriche, impianti di generazione elettrica a basse emissioni e prodotti che usano l'elettricità con un'alta efficienza finale), e quindi tale da poter disaccoppiare emissioni ed impatti sulla sostenibilità della crescita economica⁴. Indirettamente, questi cambiamenti possono anche avere impatti (positivi o negativi) sulla produttività economica, dal momento che ritorni sugli investimenti (non solo infrastrutturali) superiori o inferiori alle attese portano a costi più bassi o più alti per il sistema produttivo e, rispettivamente, maggiori o minori opportunità di generare valore.

Una pianificazione e progettazione delle infrastrutture volta a favorire lo sviluppo sociale ed economico del Paese in un contesto di cambiamenti climatici deve necessariamente adottare un approccio capace di integrare rischi emergenti e opportunità di crescita. L'efficacia delle strategie di adattamento e mitigazione, descritte in dettaglio nei prossimi Capitoli 5 e 6, pertanto deve essere valutata alla luce delle possibili variazioni nei rischi climatici e di transizione. Favorire ad esempio tecnologie di mitigazione vulnerabili alle crescenti pressioni climatiche può portare a crescenti impatti economici e – in ultima analisi – favorire un inatteso aumento di emissione di gas serra in atmosfera generati nelle

⁴ Recommendations. *Task Force on Climate-Related Financial Disclosures* <https://www.fsb-tcfd.org/recommendations/>.

operazioni di ripristino/sostituzione/ricostruzione delle infrastrutture danneggiate, o nell'utilizzo di infrastrutture e tecnologie alternative più impattanti a seguito della riduzione di operatività delle infrastrutture originarie. Analogamente, puntare su tecnologie che fanno fronte a difficoltà strutturali per assicurare un progressivo disaccoppiamento di attività economica ed emissioni, o altri impatti sulla sostenibilità, può avere implicazioni negative per la crescita economica e la capacità del sistema socio-economico di prosperare in un contesto che richiede una significativa riduzione delle emissioni di gas serra.

4.4 Conclusioni e proposte

Nel presente capitolo si è fornita una sintesi degli impatti originati dai pericoli climatici più rilevanti per le infrastrutture del Paese. A tal fine si sono integrate conoscenze attuali derivate dalla letteratura sulle tipologie di impatti e modelli di impatto fisico ed economico. Gli studi scientifici considerati e le analisi condotte mostrano che l'Italia dovrà probabilmente affrontare, nei prossimi decenni, un aumento continuo e sempre più marcato dei danni associati a eventi climatici estremi.

In particolare, si stima che l'impatto economico diretto (EAD) complessivo per le infrastrutture in Italia potrebbe crescere fino a 5.17 ± 0.46 miliardi di euro l'anno entro gli anni 2050s, corrispondente ad un aumento di circa 12 volte le stime di danno attuali. La pressione dei cambiamenti climatici sulle infrastrutture è da considerarsi inequivocabile e generalizzata. Possibili strategie di adattamento e mitigazione per far fronte a queste crescenti pressioni climatiche sono descritte nei successivi Capitoli 5 e 6.

Nonostante la comunità scientifica abbia compiuto progressi importanti nella valutazione degli impatti climatici e le stime fornite in questo capitolo siano state prodotte con approcci modellistici avanzati (sezione 4.2), le valutazioni rimangono soggette ad alcune importanti incertezze (sezione 4.2.6) anche alla luce della parziale comprensione e integrazione delle dinamiche socio-economiche nelle valutazioni di rischio condotte (sezione 4.3). Di seguito si indicano una serie di possibili aspetti di carattere scientifico e operativo-gestionale il cui sviluppo ed eventuale implementazione potrebbero, a opinione degli autori, portare importanti progressi nella modellistica dei rischi climatici. Questi elementi, infatti, permetterebbero valutazioni più accurate in vista degli scenari di riscaldamento globale attesi per i prossimi decenni e – in ultima analisi – favorirebbero lo sviluppo di strategie di adattamento appropriate volte a rendere la società più resiliente ai cambiamenti climatici.

Mappatura delle infrastrutture

La conoscenza accurata della distribuzione territoriale delle infrastrutture e del loro valore economico è un prerequisito per quantificare il rischio climatico e pianificare adeguate

misure di protezione e adattamento. Sebbene progressi sostanziali siano stati compiuti per la mappatura e l'armonizzazione spaziale e tematica delle infrastrutture (Batista & Silva et al., 2019), gli attuali database rimangono ancora incompleti, in particolare in relazione alle infrastrutture di più recente costruzione e quelle in corso di realizzazione. A questa carenza, si aggiunge la quasi totale mancanza di informazioni quantitative relative alle misure di adattamento implementate (o da implementare) a scala locale e/o di singola infrastruttura (Berkhout et al., 2015) (Bouwer et al., 2014). La mancanza di informazioni dettagliate di come le dinamiche socio-economiche stanno alterando il livello di esposizione e vulnerabilità delle infrastrutture (Capitolo 2) ostacola l'integrazione di questi elementi in valutazioni di rischio a scala nazionale. Una mappatura delle attuali infrastrutture, delle misure di adattamento e dei loro costi contribuirebbe a valutare con maggiore accuratezza i rischi climatici e l'efficacia delle misure di adattamento.

Analisi delle dinamiche spazio-temporali di eventi climatici estremi composti

Le valutazioni di rischio climatico tipicamente esplorano gli impatti associati a pericoli climatici legati a singoli eventi estremi. Tuttavia, come già sottolineato nel Capitolo 3, i fattori e i processi che controllano molteplici eventi climatici estremi spesso interagiscono e possono esacerbarsi nello spazio e nel tempo. Effetti a cascata e di amplificazione che possono originare da queste interazioni (eventi composti) hanno il potenziale di generare impatti maggiori e caratterizzati da una più rapida crescita a medio termine rispetto a quanto previsto da singoli pericoli climatici (Tilloy et al., 2019) (Zscheischler & Seneviratne, 2017) Un'analisi delle attuali e future evoluzioni di pericoli climatici composti, con particolare riferimento alle interazioni critiche per le infrastrutture, potrebbe migliorare sostanzialmente la capacità di rappresentare gli stress climatici attesi per il futuro.

Sistema di monitoraggio degli impatti degli eventi climatici estremi

Una componente importante di incertezza nella stima dei futuri rischi climatici origina dalla scarsità di dati relativi a impatti (fisici ed economici) sulle infrastrutture osservati in seguito al verificarsi di eventi climatici estremi (singoli e composti). Questo aspetto limita una comprensione più approfondita dei meccanismi di vulnerabilità delle infrastrutture e lo sviluppo di approcci analitici per la rappresentazione di questi processi, come ad esempio la calibrazione robusta di curve di danno per specifiche combinazioni di infrastrutture e pericoli climatici. Quindi considerando il passato, il primo passo è analizzare l'impatto locale causato dal cambiamento climatico negli ultimi 40 anni utilizzando osservazioni e reanalisi (sia globali che a scala regionale). Guardando al presente ed al futuro, appare inoltre evidente che un passo importante per affinare le stime di rischio consiste nel dotare il Paese di un monitoraggio sistematico e consistente nello spazio e nel tempo degli eventi climatici estremi e dei conseguenti impatti sulle infrastrutture. In questo contesto la crescente disponibilità di osservazioni della Terra (Le Cozannet et al., 2020) (Guo et al., 2015) (es. piattaforma satellitare), i recenti sviluppi di

piattaforme cloud-computing (Gorelick et al., 2017) e approcci basati su intelligenza artificiale, con livelli di sofisticazione sempre più avanzati (Reichstein et al., 2019), possono offrire nuove e promettenti opportunità per un'analisi ad alta risoluzione spaziale e temporale di questi fenomeni. Sinergie fra le comunità scientifiche coinvolte nelle valutazioni del rischio climatico ed operatori/gestori/concessionari infrastrutturali nei diversi settori economici considerati dovrebbero essere promosse per favorire una maggiore condivisione di dati e conoscenze.

Comprensione più approfondita delle interdipendenze settoriali

La stima delle interdipendenze settoriali e dei possibili effetti a cascata che si possono innescare rimane un ulteriore elemento di difficile modellazione, in particolare in un contesto di cambiamenti climatici. In uno scenario atteso di aumentata integrazione dei sistemi (Capitolo 2), i margini di sicurezza con i quali le infrastrutture sono state progettate potrebbero essere insufficienti per assorbire i crescenti stress climatici (Capitolo 3) che impattano su di esse e che tendono ad amplificarsi in seguito alle interdipendenze settoriali esistenti^{25,93} (sezione 4.1.7). Data la complessità di questi sistemi, l'eterogeneità dei loro componenti, le loro interazioni, le dipendenze e interdipendenze, e le inevitabili incertezze nella conoscenza e previsione del loro comportamento, nuovi approcci sistemici e olistici sono necessari per integrare diversi metodi di analisi che guardino al sistema dalle diverse prospettive (topologiche e funzionali, statiche e dinamiche, socio-economiche, etc.) che ne caratterizzano e influenzano il funzionamento e il fallimento (Kröger & Zio, 2011). L'implementazione di un sistema di monitoraggio degli impatti degli eventi climatici estremi precedentemente descritto potrebbe fornire nuovi dati e conoscenze per una modellazione più accurata delle interdipendenze settoriali e dei loro possibili effetti a cascata.

Integrazione delle dinamiche biofisiche e umane

Gli attuali modelli di impatto tipicamente utilizzano proiezioni climatiche per simulare in modalità disaccoppiata i pericoli climatici sulla società (Capitolo 3). Tali approcci, sebbene abbiano raggiunto importanti progressi nella modellazione di eventi climatici estremi, riescono a rappresentare solo parzialmente le possibili interazioni bidirezionali esistenti fra clima e sistemi socio-economici (Bonan & Doney, 2018) (Steffen et al., 2020) e, in particolare, quelle legate allo sviluppo infrastrutturale. Una migliore comprensione delle dinamiche co-evolutive della società umana e dei processi biofisici, in parte derivabile dalle proposte sopra elencate, contribuirebbe ad una rappresentazione più realistica delle future traiettorie climatiche e delle relative conseguenze. Infatti, l'impatto del cambiamento climatico è particolarmente disastroso laddove la condizione ambientale ed antropica iniziale ed al contorno predispone effetti soglia e non linearità. Questi effetti soglia, che possono anche essere dovuti ad inadeguatezza delle infrastrutture nei confronti di mutate condizioni antropiche ed ambientali, comportano che variazioni anche moderate e

stagionali del clima quotidiano possano generare sulle infrastrutture sollecitazioni continue ed inusuali che ne possono compromettere l'esercizio. Questi effetti devono essere valutati studiando l'interazione reciproca fra sistemi sociali, infrastrutture e clima (Savenije et al., 2014) (Montanari et al., 2013). I modelli che simulano le interazioni fra suolo e atmosfera, ampiamente utilizzati come strumenti di supporto per la valutazione del cambiamento climatico e del suo impatto su ecosistemi terrestri e società, rappresentano un contesto ideale per l'integrazione di tali dinamiche. Si tratta, questa, di una sfida di ampio respiro che richiederebbe uno sforzo fortemente multi-disciplinare per far fronte alle sfide globali emergenti.

Data la rilevanza delle tematiche trattate e l'urgenza di trovare soluzioni condivise, sostenibili e appropriate per far fronte alle rapide evoluzioni climatiche a cui l'intero pianeta è soggetto, sarebbe utile promuovere iniziative congiunte a scala europea e/o globale per lo sviluppo degli aspetti sopra descritti. Tali iniziative appaiono particolarmente importanti in relazione alla prima azione prioritaria "comprendere il rischio di catastrofi" del Quadro di riferimento di Sendai per la riduzione del rischio di disastri adottato dagli stati membri delle Nazioni Unite (UN, 2015), e all'obiettivo quattro "intensificare l'azione internazionale in materia di adattamento ai cambiamenti climatici" della nuova Strategia di adattamento ai cambiamenti climatici dell'UE (European Commission, 2021).

Bibliografía

- ACMA,2020. Authority, A. C. and M. Impacts of the 2019-20 bushfires on the telecommunications network | ACMA. <https://www.acma.gov.au/publications/2020-04/report/impacts-2019-20-bushfires-telecommunications-network> (1593386028).
- Agha Kouchak, A. *et al.* (2020). Climate Extremes and Compound Hazards in a Warming World. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **48**, 519–548.
- Ahmed, Y. A. (2013) Potential Impacts of Climate Change on Waste Management in Ilorin City, Nigeria. *AFRREV STECH Int. J. Sci. Technol.* **2**, 45–63.
- Anderson, C., Claman, D. & Mantilla, R. (2015). *Iowa's Bridge and Highway Climate Change and Extreme Weather Vulnerability Assessment Pilot*. <https://intrans.iastate.edu/research/completed/iowas-bridge-and-highway-climate-change-and-extreme-weather-vulnerability-assessment-pilot/>
- Añel, J. A., Fernández-González, M., Labandeira, X., López-Otero, X. & De la Torre, L. (2017). Impact of Cold Waves and Heat Waves on the Energy Production Sector. *Atmosphere* **8**, 209.
- Batista e Silva, F. *et al.* (2019). HARCI-EU, a harmonized gridded dataset of critical infrastructures in Europe for large-scale risk assessments. *Sci. Data* **6**, 126.
- Bebb, J. & Kersey, J. (2003) *Potential impacts of climate change on waste management*. <https://www.gov.uk/government/publications/potential-impacts-of-climate-change-on-waste-management>.
- Berkhout, F. *et al.* (2015). European policy responses to climate change: progress on mainstreaming emissions reduction and adaptation. *Reg. Environ. Change* **15**, 949–959
- Bevacqua, E. *et al.* (2020). More meteorological events that drive compound coastal flooding are projected under climate change. *Commun. Earth Environ.* **1**, 1–11.
- Bompard, E., Huang, T., Wu, Y. & Cremenescu, M. (2013). Classification and trend analysis of threats origins to the security of power systems. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* **50**, 50–64
- Bonan, G. B. & Doney, S. C. (2018). Climate, ecosystems, and planetary futures: The challenge to predict life in Earth system models. *Science* **359**, EAAM8328
- Bonjean Stanton, M. C., Dessai, S. & Paavola, J. (2016). A systematic review of the impacts of climate variability and change on electricity systems in Europe. *Energy* **109**, 1148–1159
- Bouwer, L. M., Papyrakis, E., Poussin, J., Pfurtscheller, C. & Thieken, A. H. (2014). The Costing of Measures for Natural Hazard Mitigation in Europe. *Nat. Hazards Rev.* **15**, 04014010

- Buldyrev, S. V., Parshani, R., Paul, G., Stanley, H. E. & Havlin, S. (2010). Catastrophic cascade of failures in interdependent networks. *Nature* **464**, 1025–1028.
- Burbidge, R. (2016). Adapting European Airports to a Changing Climate. *Transp. Res. Procedia* **14**, 14–23.
- Chopra, S. S. & Khanna, V. (2015). Interconnectedness and interdependencies of critical infrastructures in the US economy: Implications for resilience. *Phys. Stat. Mech. Its Appl.* **436**, 865–877.
- Chow, A. T.-S., Karanfil, T. & Dahlgren, R. A. (2021). Wildfires Are Threatening Municipal Water Supplies. *Eos* **102**.
- Cipriani, L. (2013). Aeroporti e cambiamenti climatici: Floating vs Flooded Airport Urbanism. *Planum Eur. J. Plan.* **2**, 1–7.
- Colombani, N., Osti, A., Volta, G. & Mastrocicco, M. (2016). Impact of Climate Change on Salinization of Coastal Water Resources. *Water Resour. Manag.* **30**, 2483–2496.
- Corazza, Maria vittoria, Di Mascio, P., Antonio, D. & Alessandro, R. (2014). *Caratteristiche Funzionali e Costruttive delle Infrastrutture per la Mobilità Pedonale*.
- Coumou, D. & Rahmstorf, S. (2012). A decade of weather extremes. *Nat. Clim. Change* **2**, 491–496.
- Cox, S., Hotchkiss, E., Bilello, D., Watson, A. & Holm, A. (2017). *Bridging Climate Change Resilience and Mitigation in the Electricity Sector Through Renewable Energy and Energy Efficiency*.
<https://www.climatelinks.org/resources/bridging-climate-change-resilience-and-mitigation-electricity-sector-through-renewable>
- Croce, P. *et al.* (2018). The snow load in Europe and the climate change. *Clim. Risk Manag.* **20**, 138–154.
- Croce, P., Formichi, P. & Landi, F. (2019). Climate Change: Impacts on Climatic Actions and Structural Reliability. *Appl. Sci.* **9**, 5416
- Cruz, A. M. & Krausmann, E. (2013). Vulnerability of the oil and gas sector to climate change and extreme weather events. *Clim. Change* **121**, 41–53
- Dawson, R. J. *et al.* (2018). A systems framework for national assessment of climate risks to infrastructure. *Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.* **376**, 20170298.
- de Oliveira, R. P., Matos, J. S. & Monteiro, A. J. (2015). Managing the urban water cycle in a changing environment. *Water Util. J.* **9**, 3–12.
- Diffenbaugh, N. S. *et al.* (2017). Quantifying the influence of global warming on unprecedented extreme climate events. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **114**, 4881–4886.

Ebinger, J. & Vergara, W. (2011). *Climate impacts on energy systems: key issues for energy sector adaptation*. <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/580481468331850839/Climate-impacts-on-energy-systems-key-issues-for-energy-sector-adaptation>

Emanuel, K. (2005). Genesis and maintenance of 'Mediterranean hurricanes'. *Adv. Geosci.* **2**, 217–220.

EMDAT. EM-DAT | The international disasters database. <https://www.emdat.be/>

ENAC (2014). Criteri per la valutazione delle condizioni superficiali di una pista. *ENAC* <http://www.enac.gov.it/la-normativa/normativa-enac/circolari/serie-apt/apt-10b>

European Commission, 2021. EU Adaptation Strategy. *Climate Action - European Commission* https://ec.europa.eu/clima/policies/adaptation/what_en

Farhan Habib, M., Tornatore, M. & Mukherjee, B. (2015). Cascading-failure-resilient interconnection for interdependent power grid - Optical networks. in *2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)* 1–3.

Fawzy, S., Osman, A. I., Doran, J. & Rooney, D. W. (2020). Strategies for mitigation of climate change: a review. *Environ. Chem. Lett.* **18**, 2069–2094.

Felbermayr, G. & Gröschl, J. (2014). Naturally negative: The growth effects of natural disasters. *J. Dev. Econ.* **111**, 92–106.

Ferranti, E. *et al.* (2016). Heat-Related Failures on Southeast England's Railway Network: Insights and Implications for Heat Risk Management. *Weather Clim. Soc.* **8**, 177–191.

Fischer, E. M. & Knutti, R. (2015). Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nat. Clim. Change* **5**, 560–564.

Formetta, G. & Feyen, L. (2019). Empirical evidence of declining global vulnerability to climate-related hazards. *Glob. Environ. Change* **57**, 101920.

Forzieri, G. *et al.* (2014). Ensemble projections of future streamflow droughts in Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **18**, 85–108

Forzieri, G. *et al.* Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe. *Glob. Environ. Change* **48**, 97–107 (2018).

Forzieri, G. *et al.* (2016). Multi-hazard assessment in Europe under climate change. *Clim. Change* **137**, 105–119.

Fraser, A. M., Chester, M. V. & Underwood, B. S. (2020). Wildfire risk, post-fire debris flows, and transportation infrastructure vulnerability. *Sustain. Resilient Infrastruct.* **0**, 1–13.

Gall, M., Borden, K. A. & Cutter, S. L. (2009). When Do Losses Count? Six Fallacies of Natural Hazards Loss Data. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **90**, 799–810.

Gorelick, N. *et al.* (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens. Environ.* **202**, 18–27.

Gravit, M., Vaititckii, A. & Shpakova, A. (2016). Subway Constructions Fire Safety Regulatory Requirements. *Procedia Eng.* **165**, 1667–1672.

Gudino-Elizondo, N. *et al.* (2021). Rapid assessment of urban mega-gully and landslide events with Structure-from-Motion techniques validates link to water resources infrastructure failures. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* 1–22 doi:10.5194/nhess-2021-47.

Guerreiro, S. B., Dawson, R. J., Kilsby, C., Lewis, E. & Ford, A. (2018). Future heat-waves, droughts and floods in 571 European cities. *Environ. Res. Lett.* **13**, 034009.

Guerrero, M., Re, M., Kazimierski, L. D., Menéndez, Á. N. & Ugarelli, R. (2013). Effect of climate change on navigation channel dredging of the Parana River. *Int. J. River Basin Manag.* **11**, 439–448.

Guo, H.-D., Zhang, L. & Zhu, L.-W. (2015). Earth observation big data for climate change research. *Adv. Clim. Change Res.* **6**, 108–117.

Handmer, J. *et al.* (2012). Changes in Impacts of Climate Extremes: Human Systems and Ecosystems. in *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds. Field, C. B., Dahe, Q., Stocker, T. F. & Barros, V.) 231–290 (Cambridge University Press, 2012). doi:10.1017/CBO9781139177245.007.

Hausfather, Z. & Peters, G. P. (2020). Emissions – the ‘business as usual’ story is misleading. *Nature* **577**, 618–620.

Hervas, J. *Lessons Learnt from Landslide Disasters in Europe - ESDAC - European Commission.* <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/lessons-learnt-landslide-disasters-europe> (2003).

Hughes, J., Cowper-Heays, K., Oleson, E., Bell, R. & Stroombergen, A. Impacts and implications of climate change on wastewater systems: A New Zealand perspective. *Clim. Risk Manag.* **31**, 100262 (2021).

IPCC, 2014. AR5 Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability — IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/> (2014).

IPCC, 2021 *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* (Cambridge University Press, 2021).

Jongman, B. *et al.* Declining vulnerability to river floods and the global benefits of adaptation. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **112**, E2271–E2280 (2015).

- JRC (2018). Joint Research Centre (European Commission), Demirel, H. & Christodoulou, A. *Impacts of climate change on transport: a focus on airports, seaports and inland waterways*. (Publications Office of the European Union, 2018).
- Kappes, M. S., Keiler, M., von Elverfeldt, K. & Glade, T. (2012). Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review. *Nat. Hazards* **64**, 1925–1958.
- Ke, X., Wu, D., Rice, J., Kintner-Meyer, M. & Lu, N. (2016). Quantifying impacts of heat waves on power grid operation. *Appl. Energy* **183**, 504–512.
- Klein, C. *et al.* (2021). Combining CMIP data with a regional convection-permitting model and observations to project extreme rainfall under climate change. *Environ. Res. Lett.* doi:10.1088/1748-9326/ac26f1.
- Kling, G. W. *et al.* (2003). *Confronting Climate Change in the Great Lakes | Union of Concerned Scientists*. <https://www.ucsusa.org/resources/confronting-climate-change-great-lakes>
- Klose, M., Damm, B. & Terhorst, B. (2015). Landslide cost modeling for transportation infrastructures: a methodological approach. *Landslides* **12**, 321–334.
- Kreibich, H. *et al.* (2014). Costing natural hazards. *Nat. Clim. Change* **4**, 303–306.
- Kröger, W. & Zio, E. (2011). *Vulnerable Systems*. (Springer-Verlag). doi:10.1007/978-0-85729-6559.
- Le Cozannet, G. *et al.* (2020). Space-Based Earth Observations for Disaster Risk Management. *Surv. Geophys.* **41**, 1209–1235.
- Li, Z., Clark, R. M., Buchberger, S. G. & Jeffrey Yang, Y. (2014). Evaluation of Climate Change Impact on Drinking Water Treatment Plant Operation. *J. Environ. Eng.* **140**, A4014005.
- Ligteringen, H. (1999). Ports and Terminals. *Lect. Note CTwa4330*.
- Lopez, A. (2016). Vulnerability of Airports on Climate Change: An Assessment Methodology. *Transp. Res. Procedia* **14**, 24–31
- Markolf, S. A., Hoehne, C., Fraser, A., Chester, M. V. & Underwood, B. S. (2019). Transportation resilience to climate change and extreme weather events – Beyond risk and robustness. *Transp. Policy* **74**, 174–186.
- Meyer, V. *et al.* (2013). Review article: Assessing the costs of natural hazards – state of the art and knowledge gaps. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **13**, 1351–1373
- Mima, S. & Criqui, P. (2015). The Costs of Climate Change for the European Energy System, an Assessment with the POLES Model. *Environ. Model. Assess.* **20**, 303–319.

- Mitchell, J. W. (2013). Power line failures and catastrophic wildfires under extreme weather conditions. *Eng. Fail. Anal.* **35**, 726–735.
- Montanari, A. *et al.* (2013). “Panta Rhei—Everything Flows”: Change in hydrology and society—The IAHS Scientific Decade 2013–2022. *Hydrol. Sci. J.* **58**, 1256–1275.
- Mysiak, J. *et al.* Flood risk management in Italy: challenges and opportunities for the implementation of the EU Floods Directive (2007/60/EC). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **13**, 2883–2890 (2013).
- Nemry, F. & Demirel, H. *Impacts of climate change on transport: a focus on road and rail transport infrastructures*. (Publications Office of the European Union, 2012).
- O’Neill, J. A. (2009). Climate change’s impact on the design of water, wastewater, and stormwater infrastructure. *Hydrology days 2010* doi:10.25675/10217/200817.
- OECD, 2016. Adapting Transport to Climate Change and Extreme Weather: Implications for Infrastructure Owners and Network Managers | en | OECD.
<https://www.oecd.org/publications/adapting-transport-to-climate-change-and-extreme-weather-9789282108079-en.htm>
- Østreng, W. *et al.* (2013). *Shipping in Arctic Waters: A comparison of the Northeast, Northwest and Trans Polar Passages*. (Springer-Verlag, 2013). doi:10.1007/978-3-642-16790-4.
- Pacheco, F. A. L. & Sanches Fernandes, L. F. (2021). Hydrology and stream water quality of fire-prone watersheds. *Curr. Opin. Environ. Sci. Health* **21**, 100243.
- Pall, P. *et al.* (2011). Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000. *Nature* **470**, 382–385.
- Pasquali, D., Di Risio, M. & De Girolamo, P. (2015). A simplified real time method to forecast semi-enclosed basins storm surge. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **165**, 61–69.
- Pinto, F. S., de Carvalho, B. & Marques, R. C. (2021). Adapting water tariffs to climate change: Linking resource availability, costs, demand, and tariff design flexibility. *J. Clean. Prod.* **290**, 125803.
- Piontek, F. *et al.* (2014). Multisectoral climate impact hotspots in a warming world. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **111**, 3233–3238.
- Pryor, S. C. & Barthelmie, R. J. (2010). Climate change impacts on wind energy: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **14**, 430–437
- Puempel, H. & Williams, P. D. (2016). The impacts of climate change on aviation: scientific challenges and adaptation pathways.
- Qiu, L. & Nixon, W. A. (2008). Effects of Adverse Weather on Traffic Crashes: Systematic Review and Meta-Analysis. *Transp. Res. Rec.* **2055**, 139–146.

Rajani, B. & Kleiner, Y. (2001). Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models. *Urban Water* **3**, 151–164

Recommendations. *Task Force on Climate-Related Financial Disclosures* <https://www.fsb-tcfd.org/recommendations/>.

Reichstein, M. *et al.* (2019). Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. *Nature* **566**, 195–204

Rojas, R., Feyen, L. & Watkiss, P. (2013). Climate change and river floods in the European Union: Socio-economic consequences and the costs and benefits of adaptation. *Glob. Environ. Change* **23**, 1737–1751.

Roudier, P. *et al.* (2016). Projections of future floods and hydrological droughts in Europe under a +2°C global warming. *Clim. Change* **135**, 341–355.

Rübelke, D. & Vögele, S. (2011). Impacts of climate change on European critical infrastructures: The case of the power sector. *Environ. Sci. Policy* **14**, 53–63.

Russo, S., Sillmann, J. & Fischer, E. M. (2015). Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades. *Environ. Res. Lett.* **10**, 124003.

Savenije, H. H. G., Hoekstra, A. Y. & van der Zaag, P. (2014). Evolving water science in the Anthropocene. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **18**, 319–332.

Schaeffer, R. *et al.* (2012). Energy sector vulnerability to climate change: A review. *Energy* **38**, 1–12.

Sheffi, Y. (2012) *Logistics Clusters: Delivering Value and Driving Growth*. (MIT Press, 2012).

Sieber, J. (2013). Impacts of, and adaptation options to, extreme weather events and climate change concerning thermal power plants. *Clim. Change* **121**, 55–66.

Song, Z., Zhang, X. & Eriksson, C. (2015). Data Center Energy and Cost Saving Evaluation. *Energy Procedia* **75**, 1255–1260.

Steffen, W. *et al.* (2020). The emergence and evolution of Earth System Science. *Nat. Rev. Earth Environ.* **1**, 54–63.

Stewart, M. G., Wang, X. & Nguyen, M. N. (2011). Climate change impact and risks of concrete infrastructure deterioration. *Eng. Struct.* **33**, 1326–1337.

Svendsen, I. A. & Jonsson, I. G. (1980). *Hydrodynamics of coastal regions*. (Den Private Ingeniørfond, Technical University Denmark)

Thielen, A. H. *et al.* (2009). Methods for the evaluation of direct and indirect flood losses. in (Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ)

- Tilloy, A., Malamud, B. D., Winter, H. & Joly-Laugel, A. (2019). A review of quantification methodologies for multi-hazard interrelationships. *Earth-Sci. Rev.* **196**, 102881
- Transportation Research Board & National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *Transportation Resilience: Adaptation to Climate Change*. (The National Academies Press, 2016). doi:10.17226/24648.
- UN (2015). United Nations. *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030*. <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030> (2015).
- UNECE (2020). Climate Change Impacts and Adaptation for International Transport Networks | UNECE. <https://unece.org/transport/publications/climate-change-impacts-and-adaptation-international-transport-networks-0>
- USAID (2012) Addressing climate change impacts on infrastructure: Preparing for change.
- van Vliet, M. T. H., Wiberg, D., Leduc, S. & Riahi, K. (2016). Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources. *Nat. Clim. Change* **6**, 375–380.
- van Vuuren, D. P. & Carter, T. R. (2014). Climate and socio-economic scenarios for climate change research and assessment: reconciling the new with the old. *Clim. Change* **122**, 415–429.
- Vousdoukas, M. I. *et al.* (2020). Economic motivation for raising coastal flood defenses in Europe. *Nat. Commun.* **11**, 2119.
- Vousdoukas, M. I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M. & Feyen, L. (2017). Extreme sea levels on the rise along Europe's coasts. *Earths Future* **5**, 304–323.
- Ward, P. J. *et al.* (2018). Dependence between high sea-level and high river discharge increases flood hazard in global deltas and estuaries. *Environ. Res. Lett.* **13**, 084012.
- Zachariadis, T. & Hadjinicolaou, P. (2014). The effect of climate change on electricity needs – A case study from Mediterranean Europe. *Energy* **76**, 899–910.
- Zscheischler, J. & Seneviratne, S. I. (2017). Dependence of drivers affects risks associated with compound events. *Sci. Adv.* **3**, e1700263.
- Zscheischler, J. *et al.* (2020). A typology of compound weather and climate events. *Nat. Rev. Earth Environ.* **1**, 333–347.
- Zuo, J. *et al.* (2015). Impacts of heat waves and corresponding measures: a review. *J. Clean. Prod.* **92**, 1–12.