

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI ECONOMIA "GIORGIO FUÀ"

Corso di Laurea Magistrale in
DATA SCIENCE PER L'ECONOMIA E LE IMPRESE

OLTRE IL BONUS SOCIALE GAS: UN INDICATORE PER LA VULNERABILITA' ENERGETICA DA ONDATE DI CALORE IN ITALIA

BEYOND THE GAS SOCIAL BONUS: AN INDICATOR OF HEATWAVE-INDUCED ENERGY VULNERABILITY IN ITALY

Relatore:

Prof.ssa Francesca Mariani

Tesi di Laurea di:

Chiara Lella

Anno Accademico 2026 – 2027

Indice

INTRODUZIONE 3
1. ORIGINI E CONCETTI DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO 7
1.1 Cambiamento climatico: cause e dinamiche 7
1.1.1 La naturale variabilità e dei cicli storici del clima 9
1.1.2 La svolta antropica: rivoluzione industriale ed emissioni di gas serra 12
1.2 Impatti e vulnerabilità 18
1.3 Ondate di calore e contesto normativo 26
1.3.1 Soglie e punti di non ritorno 26
1.3.2 Resilienza e adattamento 31
1.3.3 Disparità geografiche nella vulnerabilità 34
1.3.4 Cause naturali e antropiche 38
1.3.5 Definizioni scientifiche di ondata di calore e strumenti di analisi 42
2. METODOLOGIA E ANALISI DELLE ONDATE DI CALORE 44
2.1 Dataset e area di studio 44
2.2 Metodologia di analisi 46
2.2.1 Metodo Inverse Distance Weighting (IDW) 46
2.2.2 Metodo Spline 48
2.2.3 Metodo Kriging 48
2.3 Temperatura percepita (Apparent Temperature) 49
2.3.1 Interpolazione spaziale e temperatura percepita 51
2.3.2 Obiettivi e metodologia 52
2.4 Analisi delle temperature 58
2.4.1 Marine heatwaves e differenze con gli eventi terrestri 58
2.4.2 Grandi ondate di calore storiche 60
2.4.3 Conseguenze socioeconomiche e sanitarie delle ondate di calore 61
2.4.4 Limiti del sistema nel contesto del cambiamento climatico 61
2.4.5 Risultati 67
3. IL BONUS SOCIALE GAS: TRA NORMATIVA ENERGETICA E VULNERABILITÀ CLIMATICA 74
3.1 Il bonus sociale gas: finalità e quadro generale 75
3.2 Il D.P.R. 412/1993 e la classificazione delle zone climatiche 77
3.3 I gradi-giorno e la formula di riferimento 79

3.4 Criteri di calcolo del bonus gas 81
4. IL GGOC E LA VULNERABILITÀ ENERGETICA ESTIVA 88
4.1 Il GGOC come indicatore complementare ai gradi-giorno 88
4.2 Ipotesi di fasce e importi per il bonus energia estivo 91
4.3 Simulazione applicativa del bonus energia estivo 93
4.3.1 Distribuzione territoriale del GGOC medio 95
4.3.2 Distribuzione territoriale del bonus simulato 96
4.3.3 Coerenza e limiti della simulazione 98
CONCLUSIONI 100
RIFERIMENTI 104

INTRODUZIONE

Il cambiamento climatico costituisce una delle principali sfide ambientali, sociali ed economiche del tempo presente. L'aumento della temperatura media globale, la maggiore frequenza degli eventi estremi e la crescente intensità delle ondate di calore producono effetti che non riguardano soltanto gli ecosistemi, ma incidono direttamente sulla salute, sull'organizzazione delle città, sui consumi energetici e sulle condizioni di vita delle famiglie. In tale scenario, la capacità di misurare correttamente il rischio climatico assume un ruolo essenziale per definire strumenti di prevenzione e politiche pubbliche adeguate.

La vulnerabilità agli eventi termici estremi non dipende esclusivamente dall'intensità del fenomeno meteorologico. Essa deriva dall'interazione tra pericolo climatico, esposizione della popolazione e capacità individuale o collettiva di adattamento. Le condizioni economiche, la qualità degli edifici, l'accesso a impianti efficienti e il costo dell'energia possono infatti determinare profonde differenze nella possibilità di proteggersi dal caldo. La povertà energetica assume quindi anche una dimensione estiva: per una parte della popolazione, mantenere l'abitazione in condizioni termiche sicure può comportare una spesa non sostenibile o la rinuncia al raffrescamento.

Gli attuali strumenti nazionali di sostegno alle famiglie sono stati costruiti principalmente intorno ai fabbisogni tradizionali. Il bonus sociale gas, in particolare, considera la situazione economica e la composizione del nucleo

familiare, la tipologia di utilizzo del gas e la zona climatica del comune di residenza. Quest'ultima è definita dal D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412 mediante i gradi-giorno, indicatore riferito al fabbisogno di riscaldamento invernale. La progressiva rilevanza dei consumi elettrici per il raffrescamento rende opportuno interrogarsi sulla possibilità di affiancare al sistema vigente un criterio capace di rappresentare anche lo stress termico estivo.

Il presente lavoro si propone pertanto di collegare l'analisi delle ondate di calore alla riflessione sugli strumenti di compensazione economica destinati ai nuclei vulnerabili. L'obiettivo generale è verificare in quale modo un indicatore climatico estivo possa concorrere alla definizione di un sostegno territorialmente differenziato. A tal fine, la tesi ricostruisce anzitutto i fondamenti scientifici del cambiamento climatico e le principali definizioni di ondata di calore; esamina poi la distribuzione spaziale e temporale degli eventi estremi sul territorio italiano; infine, analizza la disciplina del bonus sociale gas e formula una proposta esplorativa di bonus energia estivo. L'analisi climatica utilizza dati meteorologici relativi al periodo 1979-2023 e tecniche di interpolazione spaziale per stimare le variabili di interesse sul territorio nazionale. La temperatura percepita integra temperatura media, pressione di vapore e velocità del vento, offrendo una rappresentazione più vicina allo stress termico avvertito dalla popolazione. L'identificazione delle ondate di calore è

condotta sui 119 capoluoghi di provincia considerati nello studio, attraverso una soglia percentile locale e una durata minima di sei giorni consecutivi. Tale impostazione consente di confrontare contesti climatici diversi, purché i risultati siano interpretati come scostamenti rispetto alla climatologia propria di ciascun territorio e non come una semplice graduatoria delle temperature assolute. Su questa base viene introdotto il Grado Giorno di Ondata di Calore (GGOC), concepito come indicatore complementare ai tradizionali gradi-giorno. Il GGOC sintetizza l'intensità, la durata e la frequenza degli episodi di caldo attraverso l'accumulo degli scarti positivi rispetto alla soglia climatologica. La proposta prevede cinque fasce estive, da R1 a R5, associate a importi progressivi. Lo schema è stato applicato ai 119 capoluoghi di provincia mediante una simulazione riferita a una famiglia fino a quattro componenti, mantenendo distinti il criterio climatico, i requisiti economici e la composizione familiare.

La tesi è articolata in quattro capitoli. Il primo presenta l'evoluzione delle conoscenze sul cambiamento climatico, gli impatti e i principali concetti di vulnerabilità, resilienza e adattamento. Il secondo descrive i dati, i metodi di interpolazione, il calcolo della temperatura percepita e i risultati dell'analisi delle ondate di calore. Il terzo ricostruisce il quadro normativo del bonus sociale gas, illustrando il ruolo dei gradi-giorno, mentre il quarto sviluppa l'ipotesi del

GGOC e ne verifica l'applicazione attraverso una simulazione territoriale. Le conclusioni discutono la portata della proposta, i suoi limiti e gli elementi necessari per una futura applicazione.

1. ORIGINI E CONCETTI DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO

1.1 Cambiamento climatico: cause e dinamiche

Il cambiamento climatico rappresenta un fenomeno complesso determinato dall'interazione di fattori naturali e antropici.

Il clima è il risultato di interazioni complesse tra atmosfera, oceani, criosfera, biosfera e superficie terrestre: un sistema dinamico che oscilla naturalmente su molte scale temporali, ma che può essere spinto fuori dal suo "range operativo" quando le forzanti cambiano in modo accelerato e persistente. In questa tesi verrà adottata una prospettiva integrata: verrà effettuata una chiara distinzione tra variabilità climatica naturale e segnali di forzanti antropogenici per poi collegare questa distinzione ai concetti di rischio, vulnerabilità e adattamento che informano sulle politiche internazionali. L' idea principale è molto semplice: *il clima è in continuo cambiamento,* concetto molto chiaro ormai a tutti noi. Ciò che rende speciale questo periodo storico è la velocità e la direzione del cambiamento, che sono legate all'accumulo di gas serra di origine antropica e rafforzamento dell'effetto serra. Questa chiave di lettura è in linea con l'approccio dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) che si concentra sull'interazione tra rischio climatico, esposizione e vulnerabilità per

valutare gli impatti e le scelte di risposta.[1] Si può affermare che il concetto di cambiamento climatico non nasce dal nulla; è il risultato di secoli di osservazioni, esperimenti e modelli che hanno permesso di differenziare le fluttuazioni naturali del sistema terrestre causate dall'attività umana. Quando parliamo di "fondamenti scientifici", riconosciamo innanzitutto che il clima non è una variabile statica, ma piuttosto un insieme di processi dinamici in continua interazione tra loro come ad esempio: l'atmosfera; gli oceani; la criosfera; la biosfera e la superficie terrestre. Questi ultimi costituiscono un sistema unico e complesso, sensibile ai cambiamenti sia interni che esterni.

Questa teoria è ormai ben consolidata, dato anche dal fatto che è il risultato di un lungo percorso che va dalla paleoclimatologia (lo studio delle variazioni climatiche del passato) alle simulazioni al computer con modelli globali (GCM). Ed è precisamente questo quadro che ci permette di affrontare una delle domande centrali della tesi: *in che misura i cambiamenti oggi osservati fanno parte di una ciclicità naturale e in che misura sono attribuibili all'intervento umano?*

[1] IPCC (2007), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability SPM (definizioni e concetti di vulnerabilità, rischio, resilienza).*

1.1.1 La naturale variabilità e dei cicli storici del clima

Per variabilità naturale si intendono le oscillazioni interne del sistema, come ad esempio tele-connessioni, atmosferiche-oceaniche e quelle esterne, come ad esempio i cicli solari o il vulcanismo, che modulano sia la temperatura che le precipitazioni nel tempo. Questa variabilità può amplificare o attenuare, su scale temporali, che vanno da anni a decenni, i segnali di lungo periodo e influenzano la frequenza degli eventi estremi, come ondate di calore, siccità e precipitazioni intense. La letteratura operativa sull'analisi degli eventi esterni, ad esempio tramite gli indici ETCCDI (Warm Spell Duration Index, R99p, CDD, ecc.), è ormai una tecnica standard per distinguere è ormai una tecnica standard per distinguere il contributo della variabilità naturale dal segnale reale del cambiamento climatico, soprattutto quando si analizzano gli estremi statistici (le 'code' della distribuzione). È su questi indici che si costruiscono molte valutazioni di impatto e selezioni di modelli climatici rappresentativi.[2] La variabilità può essere vista come una manopola che alza o abbassa il volume degli estremi per un breve periodo. La manopola antropica, sposta l'intero sistema verso un nuovo livello di fondo, così facendo anche le oscillazioni naturali giocano su un pianale più caldo e umido/secco a seconda dei contesti. Questo è il motivo per cui l'attenzione della ricerca si concentra sugli estremi

[2] Robinson (2001), On the Definition of a Heat Wave (definizioni operative delle heatwaves).

termici: i quali sono statisticamente sensibili e socialmente molto impattanti.[3] Il clima ha una variabilità naturale e questo rappresenta il concetto di base su cui hanno origine i cambiamenti climatici odierni. Vari studi paleontologici hanno dimostrato che la Terra ha attraversato molte e grandi oscillazioni, come ad esempio:

- Cicli glaciali e interglaciali, governati da variazioni orbitali (cicli di Milanković) con periodi di decine di migliaia di anni.
- Periodo caldo medievale (circa 900–1300 d.C.), con temperature superiori alla media nell'emisfero nord.
- Piccola era glaciale (1300–1850 d.C.), caratterizzata da un raffreddamento significativo, che ebbe impatti sulla società europea, provocando effetti su agricoltura ed epidemie.

Queste oscillazioni mostrano la dinamicità del clima anche in assenza delle cosiddette forzanti antropiche. Oltre a fattori astronomici classici vanno portati alla luce anche fenomeni come:

- Attività solare, che varia in cicli di circa undici anni influenzando l'energia ricevuta dalla Terra.
- Attività vulcanica, in grado di raffreddare temporaneamente il clima con l'immissione di aerosol solfatici.

[3] Perkins & Alexander (2013/2015), Defining heatwaves: A global perspective (sintesi globale delle definizioni e degli impatti).

- Oscillazioni nell'oceano come ENSO (El Niño Southern Oscillation) o NAO (North Atlantic Oscillation), che modificano le precipitazioni e la temperatura in corso di anni e decenni.

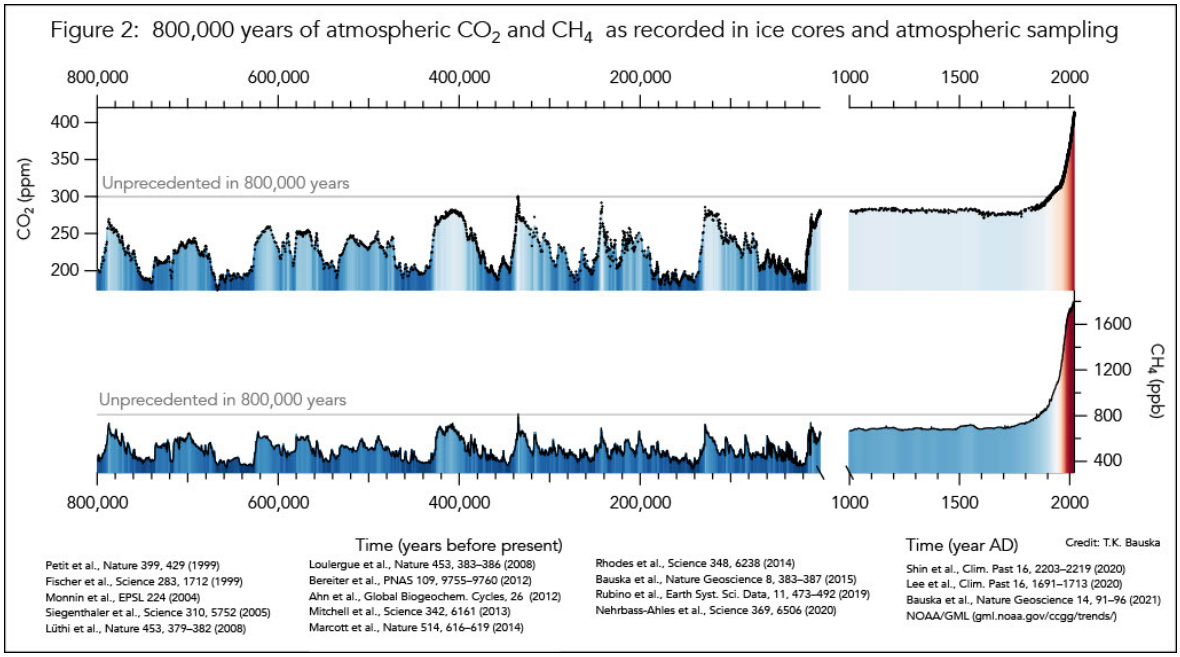


Figura 1.1 – Andamento delle temperature globali e dei principali cicli glaciali e interglaciali negli ultimi 800.000 anni (fonte: IPCC, 2007).

È utile pensare di assimilare questa variabilità a un "respiro" del pianeta: un ritmo che c'è sempre stato e sempre ci sarà. Ma oggi il problema è che questo respiro si trova innestato su una temperatura media crescente, frutto delle emissioni antropiche. Ne deriva che eventi estremi, come le ondate di calore, diventano più frequenti e più intensi giorno dopo giorno, perché le oscillazioni naturali avvengono ormai su una base climatica più calda, cioè su un livello medio di temperatura più elevato rispetto al passato.

In questo contesto, accanto alla variabilità naturale del sistema climatico, si inserisce in modo crescente l'influenza delle attività umane.

1.1.2 La svolta antropica: rivoluzione industriale ed emissioni di gas serra

Con la rivoluzione industriale, la combustione di carbone, petrolio e gas ha innalzato progressivamente le concentrazioni atmosferiche di CO_2, CH_4 e N_2O, alterando l'equilibrio energetico della Terra — il cosiddetto bilancio radiativo — cioè il rapporto tra l'energia che il pianeta riceve dal Sole e quella che riesce a reirradiare verso lo spazio. Le politiche elaborate all'epoca del Protocollo di Kyoto considerano le emissioni di gas serra il problema principale e richiedono impegni vincolanti per ridurle. È questo il problema che sta al centro del dibattito sugli obiettivi nazionali a partire dagli anni '90, e ha contribuito a plasmare la struttura della governance climatica.

Per il futuro, la scienza del clima ha chiarito che le previsioni di cambiamento dipendono sia dallo scenario delle emissioni (il famoso Representative Concentration Pathways - RCP/ora Shared Socioeconomic Pathways - SSP) sia da come il sistema viene rappresentato nei modelli. Per questo motivo, molti studi di impatto scelgono un sottoinsieme rappresentativo di sottoinsieme di modelli globali/regionali per coprire l'incertezza tra medie ed estremi senza perdere la connessione con l'abilità nella simulazione del clima storico

(approccio inviluppo + performance passata).[4] Coprire allo stesso tempo l'incertezza sulle medie e sugli estremi climatici, senza perdere il legame con la capacità dei modelli di simulare correttamente il clima storico (approccio "invilluppo + performance passata"), rappresenta un passaggio metodologico fondamentale per tradurre la scienza di base in applicazioni pratiche, ad esempio nei settori idrico-agricolo, sanitario e urbano.

A causa dell'uso massiccio di carbone, petrolio e gas naturale, le concentrazioni atmosferiche di alcuni gas sono aumentate in modo esponenziale. Tutto ha avuto inizio con la Rivoluzione Industriale (1760-1840) la quale produsse conseguenze immediate in termini di aumento di gas nocivi. Da allora:

- La CO_2 è passata da circa 280 parti per milione in epoca preindustriale a oltre 420 parti per milione oggi.
- Il metano è aumentato di più del 150% rispetto ai livelli preindustriali.
- Il protossido di azoto (N_2O), meno discusso ma potente, è cresciuto costantemente per effetto dell'agricoltura intensiva e dell'uso di fertilizzanti.

[4] Lutz A.F. et al. (2016), Selecting representative climate models for climate change impact studies (metodo envelope + past-performance; indici ETCCDI).

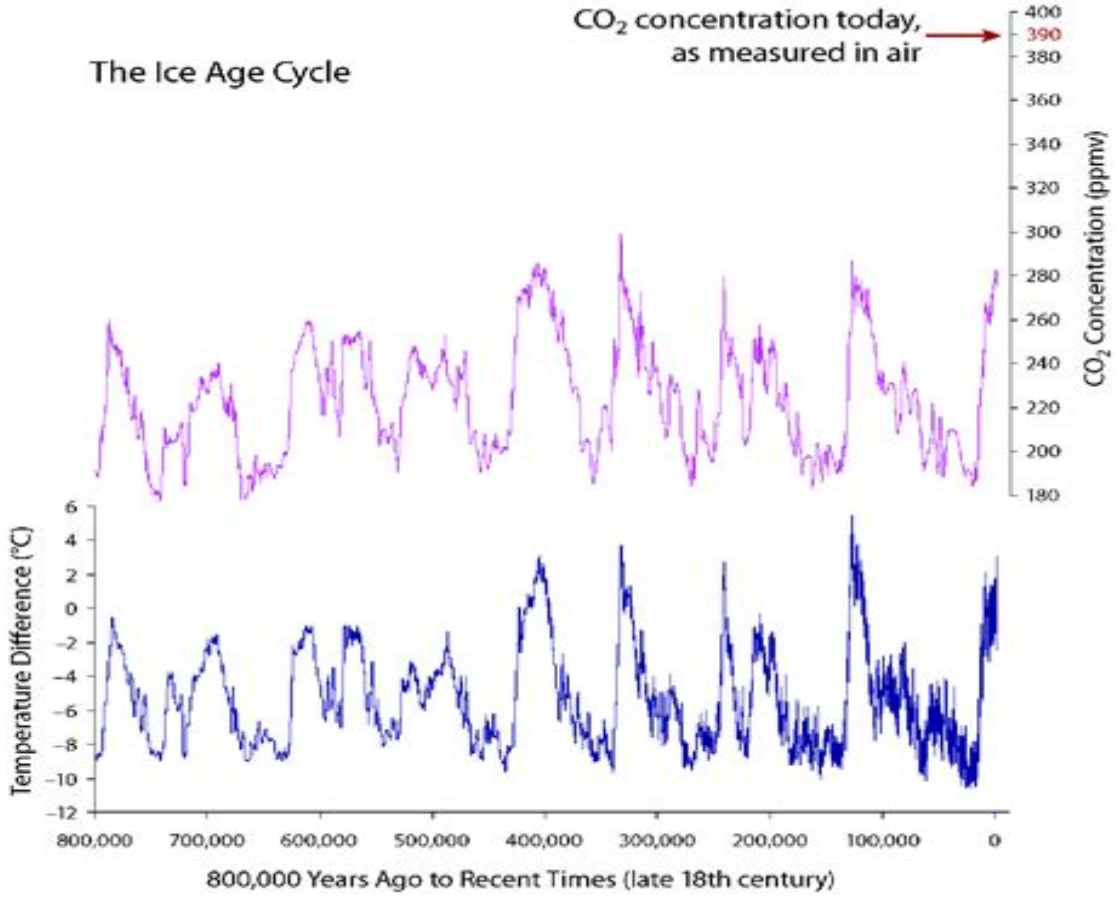


Figura 1.2 – Andamento congiunto della concentrazione atmosferica di CO_2 (grafico superiore) e delle anomalie di temperatura globale (grafico inferiore) negli ultimi 800.000 anni, fino a epoca recente. Il grafico superiore rappresenta la concentrazione di anidride carbonica espressa in ppm, ricostruita da carote di ghiaccio, mentre il grafico inferiore mostra la variazione della temperatura rispetto a un valore di riferimento. I due andamenti sono riportati sulla stessa scala temporale, consentendo un confronto diretto anno per anno tra variazioni di CO_2 e oscillazioni della temperatura. È inoltre evidenziato l'attuale valore di concentrazione atmosferica di CO_2, nettamente superiore ai valori osservati nei cicli glaciali precedenti.

Questi dati provengono non solo dalle misurazioni strumentali moderne effettuate mediante osservazioni dirette dell'atmosfera, stazioni meteorologiche e sistemi satellitari ma anche dall'analisi delle carote di

ghiaccio ottenute tramite carotaggi in Groenlandia e in Antartide, che ci hanno permesso di ricostruire la composizione atmosferica degli ultimi 800.000 anni. Ciò che caratterizza il periodo attuale non è soltanto l'aumento delle concentrazioni di gas serra, ma la rapidità senza precedenti con cui tale incremento avviene. In passato, durante i cicli glaciali, le variazioni di anidride carbonica (CO_2) erano dell'ordine di 80–100 parti per milione (ppm), distribuite su migliaia di anni. Oggi una variazione di pari entità si è verificata in poco più di due secoli, una scala temporale che i sistemi naturali e sociali non hanno mai sperimentato prima, ciò è il risultato della Rivoluzione industriale non ha soltanto incrementato le emissioni dirette di gas serra, ma ha anche avviato estesi processi di deforestazione e urbanizzazione, riducendo la capacità degli ecosistemi di assorbire anidride carbonica (CO_2) e alterando gli equilibri energetici locali, in particolare attraverso la formazione delle cosiddette isole di calore urbane.[5]

L'effetto serra è un fenomeno fisico naturale: alcuni gas (CO_2, CH_4, N_2O, vapore acqueo, aloni) intrappolano parte della radiazione infrarossa emessa dalla superficie, mantenendo la terra abitabile. L'aumento antropologico delle

[5] Intergovernmental Panel on Climate Change. (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* (V. Masson-Delmotte et al., Eds.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

concentrazioni rafforza questo effetto, con un aumento della ritenzione energetica nel sistema climatico. Questo nesso causale è alla base dei protocolli di Kyoto e misura gli impatti sulla salute (ad esempio, quando il calore e l'inquinamento atmosferico sono considerati insieme come rischi collegati).

La temperatura media della Terra, che grazie all'effetto serra naturale è di circa 15°C, sarebbe di circa –18°C in assenza dei gas serra: questo valore si ricava dal bilancio radiativo del pianeta, cioè dal confronto tra l'energia solare assorbita e quella riemessa nello spazio. Senza l'effetto serra naturale la Terra sarebbe un pianeta ghiacciato e non abitabile.

È lecito dire che la vita come la conosciamo non sarebbe possibile senza le stagioni e il cambio di clima ma il rafforzamento antropico di questo meccanismo è ciò che sbilancia il pianeta.

I principali gas che causano il rafforzamento dell'effetto serra antropico sono:

- Anidride carbonica (CO_2): deriva dalla combustione di fossili, deforestazione e produzione di cemento. Tempi di permanenza secolari, il che significa che una parte della CO_2 emessa oggi rimarrà in atmosfera per centinaia di anni.
- Metano (CH_4): ha un potere di riscaldamento circa 28–34 volte superiore alla CO_2 su un periodo di 100 anni. Le fonti principali sono l'allevamento intensivo, le risaie e le perdite negli impianti di estrazione di gas.

- Protossido di azoto (N_2O): con un potere climalterante circa 300 volte superiore alla CO_2, proviene soprattutto dall'agricoltura intensiva.
- Gas fluorurati (CFC, HFC, SF_6): benché presenti in concentrazioni minori, hanno poteri di riscaldamento estremamente elevati (fino a migliaia di volte la CO_2) e tempi di permanenza molto lunghi.

Un'idea sbagliata comune è che questi gas agiscano da soli; in realtà, lavorano insieme per modificare l'equilibrio radiativo della Terra. Ogni molecola in più è un piccolo pezzo che si aggiunge an un mosaico globale di energia che viene intrappolata.

Inoltre, vi è un effetto sinergico con l'inquinamento atmosferico; ad esempio, le condizioni che causano ondate di calore (alta pressione e aria stagnante) tendono anche a peggiorare la qualità dell'aria aumentando i livelli di ozono troposferico e di particolato fine.

Quando si analizzano i fondamenti scientifici del cambiamento climatico, emerge un aspetto centrale: il problema non risiede nel fatto che il clima muti — fenomeno naturale che accompagna da sempre la storia del pianeta — bensì nella rapidità con cui il cambiamento avviene oggi e nel grado di responsabilità diretta dell'essere umano in questa accelerazione.

Se i cicli naturali sono una sorta di lenta sinfonia, l'intervento umano ha introdotto una nota alquanto stonata che accelera e destabilizza il ritmo del quadro generale. E ciò che rende il tutto più drammatico è che conosciamo i meccanismi, disponiamo delle prove sperimentali e modellistiche, eppure fatichiamo ad invertire la rotta.

Lo studio di questi fondamenti scientifici non è solo un mero esercizio accademico; è anche un mezzo per comprendere la necessità di trasformare i nostri sistemi sociali ed economici. Senza questa consapevolezza, qualsiasi discorso su adattamento e resilienza sarebbe del tutto vuoto.

Le alterazioni del sistema climatico si traducono in una serie di impatti ambientali, sanitari e socioeconomici.

1.2 Impatti e vulnerabilità

Il cambiamento climatico non è solo un fenomeno fisico, ma anche una questione politica, sociale e morale. La consapevolezza della sua portata si è costruita lentamente, attraverso conferenze, rapporti scientifici e negoziati internazionali che hanno contribuito a definire un linguaggio comune. Si parla molto degli obiettivi climatici, si fanno discorsi sulla neutralità carbonica e sulla resilienza oggi perché si porta avanti un lungo dibattito tra scienza e politica che ha reso queste idee parte della nostra conoscenza condivisa.

La creazione di consapevolezza risulta altrettanto importante quanto i dati scientifici stessi: senza un adeguato quadro politico e culturale, le conoscenze prodotte dalla ricerca rischiano di rimanere confinate nei laboratori e nelle pubblicazioni, senza tradursi in azioni collettive e concrete.

La Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC), firmata a Rio de Janeiro nel 1992, rappresenta il primo passo politico globale verso una governance climatica condivisa. L'obiettivo definito nel testo della Convenzione è chiaro e ambizioso: *stabilizzare le concentrazioni di gas serra nell'atmosfera a un livello tale da prevenire interferenze antropiche pericolose con il sistema climatico.*

Questa formulazione, apparentemente generale, è stata rivoluzionaria per due motivi fondamentali:

1. Ha riconosciuto ufficialmente la responsabilità dell'umanità nel cambiamento climatico, trasformando una questione scientifica in un tema politico globale.
2. Ha introdotto la nozione di "pericolo", sottolineando che non tutti i cambiamenti sono equivalenti e che esiste una soglia oltre la quale gli effetti diventano insostenibili e irreversibili.

A partire da Rio, la riflessione scientifica e politica si è concentrata sulla definizione di tali soglie, sui tempi di risposta e sull'irreversibilità dei processi, nel tentativo di trasformare un obiettivo etico in criteri operativi e misurabili.

Dalla Conferenza di Rio al Protocollo di Kyoto

Il Protocollo di Kyoto (1997, in vigore dal 2005) ha rappresentato il primo strumento vincolante per la riduzione delle emissioni di gas serra da parte dei Paesi industrializzati.

L'accordo ha introdotto un ciclo di obiettivi quantificabili e meccanismi flessibili per rendere più efficiente l'azione climatica. Tra gli strumenti più significativi figurano:

- il Meccanismo di Sviluppo Pulito (Clean Development Mechanism, CDM), finalizzato a finanziare progetti di riduzione delle emissioni nei Paesi in via di sviluppo;
- il commercio delle emissioni, che ha aperto la strada alla creazione dei mercati del carbonio, come il sistema ETS europeo (Emission Trading System).

Nonostante le sue limitazioni — tra cui l'assenza di adesione di alcuni grandi emettitori e il ritiro degli Stati Uniti — Kyoto ha reso concreta l'idea che le emissioni potessero e dovessero essere misurate, rendicontate e ridotte.

Si è trattato di un vero e proprio esperimento politico che, pur imperfetto, ha posto le basi per il linguaggio, le metodologie e gli strumenti che oggi costituiscono l'ossatura delle politiche climatiche internazionali.[6]

Figura 1.3 – Schema cronologico delle principali conferenze e accordi internazionali sul clima dal 1992 al 2015.

L'Accordo di Parigi e la nuova architettura globale

L'Accordo di Parigi del 2015 ha segnato una svolta nella governance climatica internazionale, ponendo le basi per un sistema più inclusivo e cooperativo. A differenza dell'approccio "top-down" del Protocollo di Kyoto, Parigi introduce un modello ibrido e "bottom-up", fondato sui Contributi Determinati a Livello Nazionale (Nationally Determined Contributions, NDC): ogni Paese definisce i propri obiettivi di riduzione delle emissioni, soggetti a revisione periodica (*ratchet mechanism*).

L'Accordo traduce in termini quantitativi la nozione di *"cambiamento climatico pericoloso"* delineata dall'articolo 2 dell'UNFCCC, stabilendo una soglia di aumento della temperatura globale compresa tra 1,5 e 2 °C rispetto ai livelli preindustriali.[7]

[6] David Suzuki Foundation (1998), Canada, Kyoto, and the future of climate policy (contesto Kyoto e percezioni pubbliche).

[7] Rassegne con riferimenti all'Adoption of the Paris Agreement e alla letteratura 1,5–2°C (per il richiamo ai target globali).

Tale obiettivo rappresenta una base scientifica e politica per la pianificazione delle strategie di mitigazione (decarbonizzazione) e di adattamento (gestione del rischio climatico).

Tra le principali innovazioni introdotte da Parigi figurano:

- il riconoscimento della neutralità climatica, da raggiungere nella seconda metà del secolo, attraverso l'equilibrio tra emissioni e assorbimenti;
- il rafforzamento del ruolo dell'adattamento, in quanto non tutti gli impatti possono essere evitati mediante la sola mitigazione;
- l'impegno collettivo di tutti i Paesi, sviluppati e in via di sviluppo, a contribuire alla riduzione delle emissioni.

La doppia soglia di 1,5 e 2 °C riflette la profonda interconnessione tra scienza e politica: una differenza di mezzo grado comporta variazioni significative negli impatti climatici, nella frequenza degli eventi estremi e nella sopravvivenza di ecosistemi vulnerabili come le barriere coralline.

L'Accordo di Parigi può dunque essere considerato un punto di svolta storico, che ha consolidato il riconoscimento del cambiamento climatico come sfida comune e sistemica, non solo ambientale ma anche economica e sociale, dell'intera comunità internazionale.

Il ruolo dell'IPCC nella costruzione del consenso scientifico

Se Kyoto e Parigi rappresentano le “gambe” della politica climatica, i rapporti dell’Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ne costituiscono il “cervello”.

Istituito nel 1988 dal Programma delle Nazioni Unite per l’Ambiente (UNEP) e dall’Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO), l’IPCC ha il compito di valutare, sintetizzare e validare la conoscenza scientifica sui cambiamenti climatici.

Non produce ricerca originale, ma analizza e armonizza le evidenze disponibili, assegnando a ogni conclusione un livello di confidenza, basato sulla quantità di prove e sul grado di consenso tra gli esperti.

Il ruolo dell’IPCC è duplice:

1. costruire un consenso scientifico internazionale, riducendo l’incertezza e consolidando la credibilità dei dati;
2. tradurre le evidenze scientifiche in categorie operative per i decisori politici, fornendo un linguaggio comune e condiviso.

Tra i contributi più rilevanti:

- il Secondo Rapporto (1995), che per la prima volta identificò "un'evidenza suggeritrice del ruolo umano nel riscaldamento osservato"[8], preparando il terreno a Kyoto;
- il Quarto Rapporto (2007), che affermò con elevata probabilità la causa antropica del riscaldamento globale, influenzando profondamente l'opinione pubblica e le agende politiche;
- il Rapporto Speciale su 1,5 °C (2018), che ha evidenziato in modo chiaro la differenza tra gli scenari di 1,5 e 2 °C, fornendo la base scientifica per le revisioni successive dell'Accordo di Parigi.

L'autorevolezza dell'IPCC risiede non solo nella qualità dei dati ma anche nella trasparenza metodologica: ogni affermazione è accompagnata da gradi di probabilità e intervalli di incertezza, rendendo il processo decisionale scientificamente fondato e politicamente affidabile.

I rapporti dell'IPCC rappresentano una vera e propria infrastruttura cognitiva globale: forniscono un quadro interpretativo comune per concetti come vulnerabilità, resilienza, capacità adattativa e rischio (inteso come combinazione di pericolosità, esposizione e vulnerabilità). Questa grammatica condivisa ha permesso di passare da semplici elenchi di

[8] Intergovernmental Panel on Climate Change. (1996). *Climate Change 1995: The science of climate change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

impatti a valutazioni integrate, in cui politiche, sistemi socio-ecologici e traiettorie di emissione sono analizzati in modo interconnesso.

Un elemento trasversale a tutti i rapporti è la centralità degli eventi estremi: l'IPCC sottolinea come gli impatti più gravi emergano dall'aumento della frequenza, intensità e durata di ondate di calore, siccità, alluvioni e tempeste, fenomeni che comportano perdite economiche e sanitarie ingenti.

In prospettiva storica, emerge un filo rosso che unisce Rio, Kyoto e Parigi: la progressiva consapevolezza che il cambiamento climatico non rappresenta più soltanto una questione ambientale, ma una sfida sistemica globale che coinvolge la politica, la scienza e la società nel loro insieme.

Dalla nascita dell'UNFCCC a Rio de Janeiro alla maturazione dell'Accordo di Parigi, passando per l'esperienza del Protocollo di Kyoto e l'evoluzione dei rapporti IPCC, la governance climatica internazionale ha compiuto un passaggio cruciale: da una fase di riconoscimento del problema a una fase di azione coordinata e fondata sulla conoscenza scientifica.

Questo dialogo costante tra scienza e politica rappresenta oggi la vera infrastruttura della resilienza globale, dimostrando che solo l'integrazione tra evidenze empiriche e volontà politica può orientare il mondo verso una transizione sostenibile.

Tra gli effetti più rilevanti del cambiamento climatico, le ondate di calore rappresentano un fenomeno di particolare interesse per il presente studio.

1.3 Ondate di calore e contesto normativo

Uno dei maggiori problemi nel dibattito sui cambiamenti climatici è capire cosa significhi veramente pericoloso. Questa parola, che sembra semplice, contiene un'intera costellazione di idee scientifiche, politiche ed etiche. A seconda del punto di vista, pericoloso può significare il superamento di una soglia fisica irreversibile, l'impatto su una comunità umana vulnerabile, o ancora una violazione di principi di equità tra generazioni.

Nelle prossime sezioni verranno esaminate tre aree principali: le soglie di pericolo fisico e i punti di non ritorno, le soglie di pericolo sociale e istituzionale e i punti di non ritorno.

1.3.1 Soglie e punti di non ritorno

Questa idea diventa particolarmente chiara se la si osserva attraverso il prisma delle ondate di calore. Definire un'ondata di caldo significa, in primo luogo, uscire dalla genericità con cui spesso viene trattato il fenomeno e ricondurlo a parametri misurabili, comparabili e coerenti con la letteratura scientifica. Le

ondate di calore rappresentano infatti uno degli esempi più immediati di come un cambiamento climatico possa diventare "pericoloso" in senso operativo: esse costituiscono un superamento temporaneo, ma ripetuto, delle condizioni di equilibrio termico e fisiologico di persone, ecosistemi e infrastrutture.[9] Comprendere come definirle è quindi un passaggio cruciale per collegare le soglie fisiche e biologiche alle soglie di rischio sociale.

Nonostante la frequenza con cui il termine viene utilizzato, non esiste una definizione universalmente accettata di "ondata di calore". L'eterogeneità delle definizioni riflette la varietà dei contesti climatici e delle finalità con cui tali eventi vengono studiati: dalla meteorologia sinottica alla salute pubblica, dall'agricoltura alla pianificazione urbana. Ogni approccio mette in rilievo una dimensione diversa — termodinamica, statistica o impattiva — e, di conseguenza, stabilisce soglie e criteri propri.

Dal punto di vista sanitario, la World Health Organization (WHO)[10] adotta una definizione centrata sugli impatti, descrivendo le ondate di calore come *"periodi di calore anomalo che possono comportare gravi rischi per la salute umana, in particolare per le persone vulnerabili come anziani, bambini e soggetti con patologie preesistenti"*. Questa formulazione enfatizza la

[9] O'Neill & Oppenheimer (et al.), What is a dangerous climate change? (art. 2 UNFCCC, soglie, irreversibilità).

[10] Heat and health

componente antropocentrica del rischio: non è la temperatura in sé a definire la pericolosità, ma la sua interazione con la fisiologia umana, le condizioni abitative e la disponibilità di risorse per la mitigazione (come acqua, ventilazione, assistenza sanitaria). L'evento meteorologico diventa dunque evento sanitario, e la soglia di rischio è tanto più bassa quanto più fragile è la popolazione esposta.

La National Weather Service (NWS)[11] statunitense adotta invece un criterio puramente climatologico e soglia-relativo, definendo un'ondata di calore come *"un periodo di almeno due giorni consecutivi in cui le temperature risultano significativamente superiori alla norma stagionale per la regione considerata"*. In questo caso, l'accento è posto sulla deviazione statistica rispetto al clima locale, senza un riferimento esplicito agli impatti. L'obiettivo è individuare l'anomalia termica come evento di interesse meteorologico, lasciando poi alle agenzie competenti (sanitarie, agricole, ambientali) la valutazione del rischio specifico.

Il UK Met Office[12] propone un approccio intermedio, combinando l'aspetto statistico con quello territoriale. Secondo la sua definizione, un'ondata di calore si verifica quando *"si registrano almeno tre giorni consecutivi con temperature superiori a una soglia prestabilita, che varia in base alla stagione e alla zona*

[11] During a Heat Wave

[12] What is a heatwave? Met Office definition of extreme UK weather explained

geografica". Questo criterio incorpora un adattamento geografico e stagionale, riconoscendo che la stessa temperatura assoluta può avere significati diversi in contesti climatici differenti: ciò che rappresenta un evento eccezionale in Scozia può rientrare nella normalità nel sud della Spagna o nel bacino del Mediterraneo.

A livello globale, la World Meteorological Organization (WMO)[13] ha cercato di fornire un riferimento standardizzato, definendo un'ondata di calore come un periodo di almeno sei giorni consecutivi in cui le temperature massime superano il 90° percentile della distribuzione climatologica di riferimento. Questo approccio percentile-based nasce dal tentativo di integrare la comparabilità internazionale con la sensibilità locale: la soglia non è una temperatura assoluta, ma una deviazione significativa rispetto al comportamento storico del clima di ciascun luogo. Tale definizione, applicata al periodo 1979–2023, consente di analizzare in modo coerente sia le tendenze di lungo periodo sia le variazioni interannuali, mantenendo la connessione con gli indici climatici standardizzati come il *Warm Spell Duration Index* (WSDI) proposto dagli esperti ETCCDI.

Alla luce di queste differenze, lo studio adotta la definizione della WMO perché rappresenta un compromesso metodologico solido: consente di confrontare

[13] **Ondate di calore: quale definizione? | Consorzio LaMMA**

regioni diverse, di collegare la frequenza e la durata delle ondate di calore alle tendenze di riscaldamento globale e, soprattutto, di integrare le osservazioni in modelli di rischio climatico-sanitario. Il criterio percentile permette inoltre di includere non solo gli eventi eccezionali in senso assoluto, ma anche quelli "relativamente anomali" rispetto al clima locale, che sono spesso i più rilevanti dal punto di vista degli impatti sociali.

Questo aspetto mette in luce la connessione diretta tra definizione scientifica e percezione del "pericolo". Il termine "pericoloso", in ambito climatico, non coincide necessariamente con "catastrofico": un cambiamento diventa pericoloso quando spinge un sistema reale — sanitario, agricolo, energetico o ecologico — oltre la propria soglia di tolleranza. Questa chiave di lettura è in linea con l'approccio dell'IPCC che si concentra sull'interazione tra rischio climatico, esposizione e vulnerabilità per valutare gli impatti e le scelte di risposta, generando danni che non possono essere assorbiti o riparati facilmente. Le ondate di calore, in questo senso, sono un laboratorio concettuale del cambiamento climatico: rappresentano un superamento temporaneo delle soglie fisiologiche, ma che, se ripetuto e intensificato, può produrre effetti strutturali e irreversibili.

La loro analisi consente di comprendere come la nozione di "pericoloso" si muova su due piani. Da un lato, è fisica e oggettiva, perché legata a soglie

misurabili di temperatura e durata, oltre le quali si osservano alterazioni statisticamente anomale nel sistema climatico. Dall'altro, è normativa e valoriale, poiché implica una decisione collettiva su quali rischi la società ritenga accettabili e su quali invece debba intervenire. Questo doppio registro — scientifico e politico — è ciò che trasforma il concetto di "ondata di calore" in un indicatore concreto del grado di vulnerabilità di una civiltà al cambiamento climatico.

In conclusione, l'adozione della definizione WMO non è soltanto una scelta tecnica, ma anche concettuale. Essa consente di ancorare il discorso sul "cambiamento climatico pericoloso" a parametri empirici e, al tempo stesso, di riconoscere che il pericolo non risiede unicamente nella magnitudine dell'evento, ma nella sua capacità di oltrepassare le soglie di adattamento di sistemi umani e naturali. È in questa prospettiva che il concetto di "pericoloso" assume valore operativo: non come sinonimo di disastro, ma come segnale di un equilibrio che si rompe, di una soglia che viene varcata e di un ritorno che diventa via via più difficile.

1.3.2 Resilienza e adattamento

La debolezza è la tendenza a subire danni dovuti alla sensibilità e all'esposizione, moderati dalla capacità adattiva.

La resilienza è la capacità di affrontare l'impatto e riorganizzarsi mantenendo funzioni, identità e struttura fondamentale.

L'IPCC ha reso stabile questa tassonomia e ora viene utilizzata dai pianificatori delle città, dell'assistenza sanitaria e persino dell'ambiente.

Nel caso delle ondate di caldo, i mezzi di resilienza comprendono hardware come edifici, spazi verdi urbani e reti elettriche, nonché software come sistemi di allarme rapido, informazioni, social network e protezione per le persone vulnerabili. La letteratura sanitaria ha dimostrato che il calore e gli inquinanti aumentano il rischio per i bambini e gli anziani segno che l'adattamento efficace è intersettoriale, con esempi chiari. Aria; energia; sanità pubblica.

Per capire come le aziende possono affrontare i rischi climatici, dobbiamo chiarire la connessione tra tre idee importanti: vulnerabilità, resilienza e adattamento.

Vulnerabilità: è la predisposizione a subire danni, influenzata da esposizione, sensibilità e capacità di adattamento.

Resilienza: definita in precedenza.

Adattamento: è il processo mediante il quale individui, comunità e sistemi alterano comportamenti, infrastrutture e istituzioni al fine di mitigare gli effetti negativi o capitalizzare su eventuali opportunità.

Ora che abbiamo applicato queste idee alle ondate di calore, possiamo dire che la debolezza è più alta nelle città con molti anziani, i bambini e i malati cronici. La resilienza dipende da infrastrutture (aree verdi, ventilazione naturale degli edifici) e da reti sociali (servizi sanitari, sistemi di allerta).
L'adattamento può includere piani di emergenza, progettazione urbana più sostenibile o campagne di informazione.
Dallo studio dell'IPCC si evince che la resilienza non è equamente distribuita: le nazioni con risorse economiche e istituzioni solide possiedono una maggiore capacità di adattamento, mentre quelle povere o instabili risultano più vulnerabili.

Resilienza e adattamento non rappresentano soltanto concetti tecnici, ma possiedono anche una rilevante dimensione culturale. Essi implicano una visione collettiva, la capacità di cooperare e la fiducia nelle istituzioni. In questa prospettiva, la resilienza si configura anche come una forma di coesione sociale, attraverso la quale la risposta al cambiamento climatico diventa una prova della solidità dei legami comunitari.

1.3.3 Disparità geografiche nella vulnerabilità

La vulnerabilità non è omogenea. Dipende da fattori biofisici (climi caldi, isole di calore urbane, scarsità d'acqua), socioeconomici (povertà, età, accesso ai servizi), istituzionali (governance, sistemi di allerta) e ecologici (stato degli ecosistemi). Le valutazioni dell'IPCC evidenziano significative disparità tra regioni e gruppi sociali, sostenendo soluzioni specifiche per ogni contesto e lo sviluppo delle capacità locali.

Un esempio utile è quello delle malattie zoonotiche sensibili al clima: la temperatura e le precipitazioni influenzano la distribuzione geografica di vettori e serbatoi. Questo significa che il rischio sanitario cambia con il clima e che le aree che non si adattano bene possono essere più esposte. È un sintomo di come i rischi climatici siano sistemici e non limitati a un'area.

Da un punto di vista analitico, le scelte metodologiche hanno influenze dirette sulle conclusioni relative agli impatti. Per questo motivo, molti studi di impatto scelgono di selezionare sottoinsiemi di modelli che intendono mostrare l'intera gamma di prospetti futuri possibili (caldo-secco, caldo - umido, ecc) e allo stesso tempo richiedono buone competenze climatiche storiche. Il procedimento standard comprende: (1) selezione basata sulle variazioni delle medie di temperatura e pressione; (2) affinamento sui valori estremi (ad es.

WSDI, R99p, CDD[14]); (3) validazione delle prestazioni passate rispetto al dataset di riferimento. Questa pipeline consente il trasferimento di risultati più solidi nei settori dell'acqua, dell'agricoltura e della salute. [15]

Paesi del Mediterraneo: già caldi e secchi d'estate, sono maggiormente a rischio di ondate di calore e scarsità d'acqua. Le città del Mediterraneo, come Atene o Roma, sono più vulnerabili perché hanno un clima caldo, sono densamente popolate particolarmente da anziani.

Africa Sub-Sahariana: qui la vulnerabilità è dovuta alla dipendenza dall'agricoltura pluviale, alla povertà diffusa e alla debolezza delle istituzioni. Le temperature in aumento e la variabilità delle piogge possono mettere a rischio la sicurezza alimentare.

Asia Meridionale: paesi come India e Bangladesh affrontano contemporaneamente onde di calore, monsoni più variabili e innalzamento del livello del mare. La combinazione di alta densità di popolazione ed economia debole rende questi effetti molto importanti.[16]

[14] Lutz, A. F., ter Maat, H. W., Biemans, H., Shrestha, A. B., Wester, P., & Immerzeel, W. W. (2016). Selecting representative climate models for climate change impact studies: An advanced envelope-based selection approach. *International Journal of Climatology, 36*(12), 3988–4005.

[15] Toronto Public Health (2000), Taking Our Breath Away (nodo calore-inquinamento, vulnerabilità sanitaria).

[16] WHO/FAO e letteratura correlata su zoonosi e clima (quadro sintetico sulle differenze geografiche del rischio sanitario).

Paesi sviluppati: anche se hanno risorse economiche e infrastrutture avanzate, non sono al sicuro. L'ondata di caldo europea del 2003, che ha ucciso più di 70.000 persone, ha dimostrato che anche le società ricche possono essere molto deboli.

Un aspetto spesso trascurato è che la sicurezza è anche intra-nazionale: ci sono comunità più esposte e meno protette all'interno dello stesso Paese. Ad esempio, in Italia, le persone anziane che vivono da sole nelle grandi città hanno molte più probabilità di ammalarsi durante un'ondata di caldo rispetto ai giovani o alle persone che godono del sostegno familiare.

Questa distribuzione ineguale dei rischi dimostra che il cambiamento climatico è anche una questione di giustizia sociale e climatica: chi contribuisce meno alle emissioni spesso subisce i danni maggiori.

Non è solo un esercizio scientifico definire cosa sia un cambiamento climatico dannoso; è anche un atto politico e culturale. I modelli possono dirci quando un processo naturale sta per diventare instabile, ma sta a noi decidere se correre o meno quel rischio e quanto spendere per evitarlo o affrontarlo. Il termine "pericoloso" può essere inteso come il superamento della capacità di adattamento delle società umane. Un'ondata di calore, in sé, costituisce un evento naturale; essa diventa pericolosa quando mette a rischio la vita delle

persone, le economie e le infrastrutture. In questo senso, la pericolosità non risiede unicamente nei fenomeni naturali, ma emerge dall'interazione tra i processi ambientali e le dinamiche sociali.

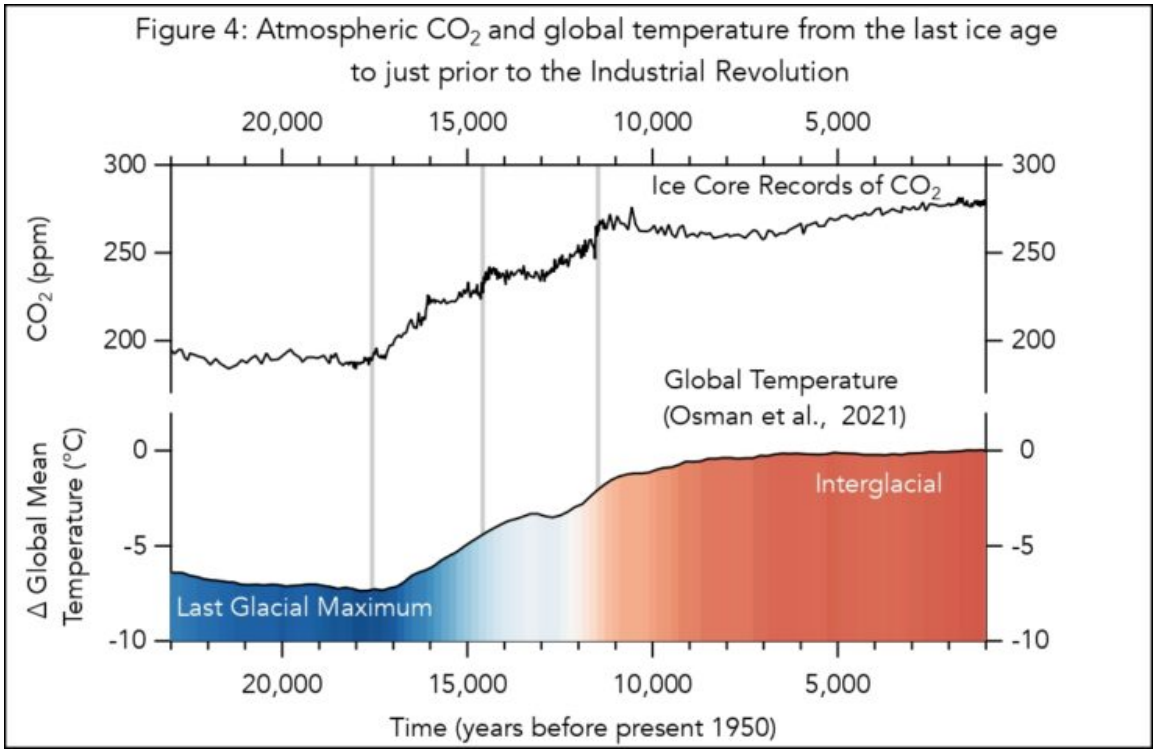


Figura 1.4 – Principali soglie climatiche e regioni vulnerabili secondo il Quarto Rapporto IPCC (2007). Grafico che indica la concentrazione CO_2 + temperatura preindustriali ideale per mostrare come concentrazioni e temperature sono correlate nel lungo termine. alternativa della didascalia: Andamento congiunto di concentrazione atmosferica di CO_2 e temperatura globale nel periodo preindustriale (fonte: ricostruzioni paleoclimatiche).

Dei due grafici abbiamo: il primo indica la Temperatura globale. È esplicitamente indicato nel grafico: "Global Temperature (Osman et al., 2021)"[17]; il secondo indica la Concentrazione atmosferica di CO_2 (Ice Core Records). Il grafico indica "Ice Core Records of CO_2", che solitamente si basa sui dataset delle carote di ghiaccio antartiche (es. EPICA Dome C).[18]

[17] Osman, M. B., Tierney, J. E., Zhu, J., Tardif, R., Hakim, G. J., & Poulsen, C. J. (2021). Globally resolved surface temperatures since the Last Glacial Maximum. Nature, 599(7884), 239–244. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03984-4

[18] Lüthi, D., et al. (2008). High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. Nature, 453, 379–382. https://doi.org/10.1038/nature06949

1.3.4 Cause naturali e antropiche

Il clima terrestre è sempre stato caratterizzato da una certa variabilità naturale. Nel corso della storia del pianeta si sono alternati periodi più caldi e più freddi, dovuti a fattori naturali come cambiamenti nell'attività solare, grandi eruzioni vulcaniche o variazioni nei movimenti della Terra intorno al Sole. Questi fenomeni hanno influenzato il clima su scale temporali molto lunghe, senza però compromettere l'equilibrio generale del sistema.

Ciò che distingue il cambiamento climatico attuale dalle variazioni del passato è la sua rapidità e la sua origine prevalentemente antropica. A partire dalla rivoluzione industriale, le attività umane hanno iniziato a incidere in modo sempre più significativo sul clima. L'utilizzo intensivo di combustibili fossili per la produzione di energia, lo sviluppo dell'industria, l'espansione dei trasporti, la deforestazione e l'agricoltura su larga scala hanno modificato la composizione dell'atmosfera, aumentando la concentrazione di gas in grado di trattenere il calore.

Questi processi sono strettamente legati alla crescita economica e allo sviluppo industriale, che hanno garantito benessere e progresso, ma al tempo stesso hanno generato effetti collaterali sull'ambiente. Il cambiamento climatico può quindi essere interpretato come una conseguenza indiretta di un

modello di sviluppo che ha privilegiato l'espansione economica senza considerare pienamente i limiti ecologici del pianeta.

Alla base del riscaldamento globale vi è il fenomeno dell'effetto serra, un meccanismo naturale che consente alla Terra di mantenere una temperatura adeguata alla vita. Alcuni gas presenti nell'atmosfera permettono di trattenere parte del calore proveniente dal Sole, evitando che venga disperso completamente nello spazio. Senza questo processo, il pianeta sarebbe troppo freddo per ospitare gli attuali ecosistemi.

Il problema nasce quando l'equilibrio di questo sistema viene alterato. Le attività umane hanno aumentato in modo significativo la quantità di gas serra presenti nell'atmosfera, rafforzando l'effetto serra oltre i livelli naturali. Di conseguenza, una maggiore quantità di calore rimane intrappolata, determinando un aumento progressivo della temperatura media globale.

Questo incremento termico ha effetti a catena sul sistema climatico. L'aumento delle temperature favorisce lo scioglimento dei ghiacci, l'innalzamento del livello dei mari e la modifica dei regimi meteorologici. Tali cambiamenti non sono isolati, ma si influenzano reciprocamente, rendendo il clima sempre più instabile e imprevedibile.

Gli effetti del cambiamento climatico sono già visibili in molte parti del mondo e coinvolgono diversi aspetti della vita umana ed economica. Gli ecosistemi naturali stanno subendo trasformazioni significative: molte specie animali e vegetali faticano ad adattarsi ai nuovi equilibri climatici, mentre fenomeni come la perdita di biodiversità e il degrado degli habitat diventano sempre più frequenti.

Un ambito particolarmente colpito è quello delle risorse idriche. Le variazioni nei regimi di precipitazione e l'aumento delle temperature influenzano la disponibilità di acqua dolce, creando situazioni di scarsità in alcune aree e aumentando il rischio di eventi estremi come siccità e alluvioni. Queste dinamiche hanno un impatto diretto sull'agricoltura, sulla produzione alimentare e sui costi economici legati alla gestione delle risorse.

Anche la salute umana risente dei cambiamenti climatici. L'aumento delle temperature e la maggiore frequenza di eventi estremi incidono sulla mortalità e sulla qualità della vita, in particolare nelle fasce più fragili della popolazione. Inoltre, il cambiamento delle condizioni ambientali può favorire la diffusione di malattie e peggiorare le condizioni di benessere psicologico delle persone esposte a situazioni di emergenza o insicurezza prolungata.

Dal punto di vista sociale ed economico, il cambiamento climatico comporta danni alle infrastrutture, perdite economiche e crescenti difficoltà per interi

settori produttivi. In alcuni casi, questi impatti contribuiscono ad aumentare i flussi migratori e a mettere sotto pressione i sistemi di welfare e le economie locali.

Uno degli aspetti più rilevanti del cambiamento climatico riguarda le disuguaglianze che esso genera e amplifica. Gli effetti del riscaldamento globale non si distribuiscono in modo uniforme: alcune popolazioni risultano molto più esposte e vulnerabili rispetto ad altre. In particolare, i gruppi sociali economicamente più fragili dispongono di minori risorse per prevenire, affrontare e superare le conseguenze degli eventi climatici estremi.

Nei Paesi meno sviluppati, la dipendenza dalle risorse naturali e la limitata capacità di adattamento rendono le comunità particolarmente sensibili ai cambiamenti ambientali. Tuttavia, anche nei Paesi industrializzati esistono forti disparità: anziani, bambini e persone con condizioni socioeconomiche svantaggiate sono spesso più colpiti dagli effetti del caldo estremo, dalla scarsità di risorse e dal degrado ambientale.

Queste dinamiche pongono il cambiamento climatico al centro di una riflessione più ampia sul tema della giustizia sociale ed economica. Affrontare il riscaldamento globale significa quindi non solo ridurre le emissioni, ma anche considerare come i costi e i benefici delle politiche ambientali vengano

distribuiti all'interno delle società, al fine di promuovere uno sviluppo più equo e sostenibile.

1.3.5 Definizioni scientifiche di ondata di calore e strumenti di analisi

Le ondate di calore (heatwaves) rappresentano uno degli eventi climatici estremi più rilevanti nel contesto del cambiamento climatico contemporaneo. Esse sono generalmente definite come periodi prolungati caratterizzati da temperature significativamente superiori alla norma climatologica di una determinata area e stagione.

Non esiste tuttavia una definizione universalmente condivisa di ondata di calore, poiché il fenomeno dipende fortemente dalle condizioni climatiche locali (Perkins & Alexander, 2013)[19], dalla variabilità stagionale e dal tipo di impatto considerato. In ambito meteorologico e climatologico, le definizioni si basano generalmente su anomalie termiche persistenti rispetto ai valori medi di riferimento, mentre in ambito sanitario l'attenzione è spesso rivolta agli effetti sulla salute umana e sulla mortalità.

Secondo l'Organizzazione Meteorologica Mondiale (World Meteorological Organization, WMO), un'ondata di calore può essere definita come un periodo di almeno sei giorni consecutivi in cui la temperatura massima supera il 90°

[19] Perkins, S. E., & Alexander, L. V. (2013). On the measurement of heat waves. *Journal of Climate*, 26(13), 4500–4517. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00383.1

percentile (WMO, 2015)[20] della distribuzione climatologica locale. Questo approccio, basato sui percentili, consente di identificare eventi estremi in modo coerente anche tra regioni caratterizzate da condizioni climatiche molto diverse.

Negli ultimi anni, la letteratura scientifica ha progressivamente ampliato il concetto di ondata di calore includendo non soltanto la temperatura dell'aria, ma anche altri parametri meteorologici che influenzano la percezione del caldo da parte dell'organismo umano. In particolare, variabili come l'umidità atmosferica e la velocità del vento giocano un ruolo fondamentale nei processi di scambio termico tra il corpo umano e l'ambiente.

Per questo motivo, numerosi studi utilizzano indicatori climatici compositi che tengono conto di più variabili meteorologiche contemporaneamente, al fine di rappresentare in modo più realistico le condizioni di stress termico.

[20] World Meteorological Organization. (2015).
Guidelines on the definition and monitoring of extreme weather and climate events.
https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3790

2. METODOLOGIA E ANALISI DELLE ONDATE DI CALORE

Alla luce del quadro teorico delineato, il presente studio si propone di analizzare l'evoluzione delle temperature in Italia attraverso l'utilizzo di dati climatici e tecniche di interpolazione spaziale.

Negli ultimi decenni il cambiamento climatico è entrato stabilmente nel dibattito pubblico, politico ed economico, diventando una delle principali sfide globali del nostro tempo. Non si tratta più di un fenomeno lontano o astratto, ma di una realtà concreta che influenza il funzionamento degli ecosistemi, la disponibilità delle risorse naturali, la salute delle persone e l'organizzazione delle società. Il riscaldamento globale e l'aumento della frequenza di eventi climatici estremi stanno modificando profondamente gli equilibri ambientali ed economici, ponendo interrogativi rilevanti sullo sviluppo futuro e sulla sostenibilità dei modelli produttivi attuali.

2.1 Dataset e area di studio

Per lo svolgimento dell'analisi è stato costruito un dataset climatico. L'analisi delle ondate di calore richiede spesso la disponibilità di dati climatici distribuiti in modo continuo sul territorio. Tuttavia, le osservazioni meteorologiche sono generalmente disponibili soltanto in punti specifici, come stazioni meteorologiche o griglie climatiche.

Per stimare i valori delle variabili climatiche in località prive di misurazioni dirette vengono utilizzate tecniche di interpolazione spaziale (Burrough & McDonnell, 1998)[21], che consentono di prevedere il valore di una variabile in un punto non osservato sulla base dei valori registrati nei punti circostanti.

L'interpolazione rappresenta quindi un passaggio fondamentale nelle analisi climatiche territoriali, poiché permette di generare superfici continue a partire da dati puntuali, facilitando la costruzione di mappe climatiche e l'analisi della distribuzione spaziale delle variabili meteorologiche.

Tra i metodi di interpolazione più utilizzati nella letteratura scientifica si distinguono tre approcci principali (Samanta et al., 2012)[22]:

1. Inverse Distance Weighting (IDW)
2. Spline interpolation
3. Kriging

Questi metodi differiscono principalmente per il modo in cui modellano la relazione spaziale tra i punti osservati e per il tipo di ipotesi matematiche alla base del processo di stima.

---

[21] Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press. Link https://global.oup.com/academic/product/principles-of-geographical-information-systems-9780198233657

[22] Samanta, S., Pal, D. K., Lohar, D., & Pal, B. (2012). Interpolation of climate variables and temperature modeling. *Theoretical and Applied Climatology*, 107, 35–45. https://doi.org/10.1007/s00704-011-0455-3

2.2 Metodologia di analisi

Una volta costruito il dataset, si è proceduto all'applicazione di specifiche metodologie di analisi. In particolare, per ottenere una rappresentazione spaziale continua dei dati, è stata utilizzata una tecnica di interpolazione.

2.2.1 Metodo Inverse Distance Weighting (IDW)

Uno dei metodi di interpolazione più diffusi nelle analisi climatiche è l'Inverse Distance Weighting (IDW)[23]. Questo metodo si basa sul principio secondo cui i punti geograficamente vicini tendono ad avere valori più simili rispetto a quelli più distanti.

Nel metodo IDW il valore stimato in una determinata posizione viene calcolato come una media pesata dei valori osservati nei punti circostanti. (Watson & Philip, 1985)[24]. I pesi assegnati a ciascun punto sono inversamente proporzionali alla distanza dal punto di interpolazione: i punti più vicini hanno un peso maggiore rispetto a quelli più lontani.

Formalmente, l'interpolazione basata sul peso dell'inverso della distanza (IDW) viene espressa come:

[23] Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press.

[24] Watson, D. F., & Philip, G. M. (1985). A refinement of inverse distance weighted interpolation. *Geo-Processing*, 2, 315–327. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0146664X85900131

$$Z(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{Z(x_i)}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{d_i^p}}$$

dove:

- $Z(x_0)$ rappresenta il valore stimato nel punto di interpolazione
- $Z(x_i)$ indica il valore osservato nel punto i
- d_i è la distanza tra il punto osservato e quello da stimare
- p è il parametro di potenza che controlla l'influenza della distanza
- n rappresenta il numero di punti utilizzati nell'interpolazione

L'esponente p determina la velocità di decadimento dei pesi in funzione della distanza. I valori più elevati attribuiscono un peso maggiore ai punti più vicini e riducono rapidamente l'influenza di quelli più lontani.

Il metodo IDW è considerato un metodo deterministico, in quanto non utilizza modelli statistici della variabilità spaziale ma si basa esclusivamente sulla distanza tra i punti osservati.

2.2.2 Metodo Spline

Il metodo Spline[25] è una tecnica di interpolazione che utilizza una funzione matematica progettata per produrre una superficie continua e il più possibile liscia.

In termini concettuali, questo metodo può essere paragonato alla deformazione di una superficie elastica che viene adattata ai valori dei punti osservati minimizzando la curvatura complessiva della superficie. Il risultato è una superficie interpolata che passa esattamente attraverso i punti di campionamento e che presenta variazioni graduali tra le osservazioni.

Questo approccio è particolarmente utile quando si desidera ottenere rappresentazioni molto lisce delle variabili climatiche, anche se in alcuni casi può produrre valori leggermente al di fuori dell'intervallo osservato nei dati originali.

2.2.3 Metodo Kriging

Il Kriging[26] rappresenta invece un metodo di interpolazione geostatistica che tiene conto della struttura statistica della variabilità spaziale dei dati.

---

[25] Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *rinciples of Geographical Information Systems*. Oxford University Press.

[26] Matheron, G. (1970). *The theory of regionalized variables and its applications*. Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique, École des Mines de Paris.

A differenza dei metodi deterministici, il Kriging si basa sul concetto di autocorrelazione spaziale, ovvero sulla tendenza dei punti vicini nello spazio ad avere valori simili tra loro. Questa relazione viene descritta attraverso uno strumento statistico noto come semivariogramma, che rappresenta la variazione della variabile in funzione della distanza tra i punti osservati.

Uno dei principali vantaggi del Kriging è la possibilità di stimare non soltanto il valore interpolato ma anche l'incertezza associata alla stima, rendendo questo metodo particolarmente utile nelle analisi climatiche e ambientali.

2.3 Temperatura percepita (Apparent Temperature)

Per analizzare gli effetti delle condizioni meteorologiche sul benessere umano, numerosi studi utilizzano il concetto di temperatura percepita (Apparent Temperature, AT)[27].

La temperatura percepita rappresenta una misura più completa delle condizioni di caldo rispetto alla sola temperatura dell'aria, poiché incorpora nella sua formulazione altri fattori meteorologici che influenzano la percezione del calore da parte dell'organismo umano.

[27] Steadman, R. G. (1984). A universal scale of apparent temperature. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(12), 1674–1687. https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<1674:AUSOAT>2.0.CO;2

Il concetto di apparent temperature è stato introdotto da Steadman (1984)[28], che sviluppò un modello termofisiologico basato sull'equilibrio energetico del corpo umano. Questo modello considera i principali processi di scambio termico tra il corpo e l'ambiente, tra cui l'evaporazione del sudore, lo scambio convettivo con l'aria e la radiazione termica (Steadman, 1984)[29]. In forma semplificata, la temperatura apparente può essere espressa come:

$$AT = T + 0.33e - 0.70v - 4.00$$

dove:

- T rappresenta la temperatura dell'aria (°C)
- e indica la pressione di vapore (hPa)
- v rappresenta la velocità del vento (m/s)

L'introduzione della temperatura percepita consente di rappresentare in modo più realistico le condizioni di stress termico cui è esposta la popolazione, poiché integra nella stessa misura temperatura, umidità e vento. Per questo motivo, l'AT viene frequentemente utilizzata negli studi sulle ondate di calore e sugli impatti climatici sulla salute.

[28] Steadman, R. G. (1984). A universal scale of apparent temperature. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(12), 1674–1687. https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<1674:AUSOAT>2.0.CO;2

[29] Steadman, R. G. (1984). A universal scale of apparent temperature. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(12), 1674–1687. https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<1674:AUSOAT>2.0.CO;2

2.3.1 Interpolazione spaziale e temperatura percepita

La misurazione delle ondate di calore avviene attraverso diversi indici climatici, sviluppati per quantificarne frequenza, durata e intensità.

Uno dei metodi più diffusi utilizza i percentili della distribuzione climatologica delle temperature: una giornata è considerata “estrema” se la temperatura supera il 90°, 95° o 99° percentile rispetto a una serie storica di riferimento (generalmente 30 anni); un’ondata di calore si configura quando tale superamento persiste per più giorni consecutivi.

Questo approccio consente di effettuare confronti anche tra regioni climaticamente molto diverse tra loro, superando il limite di una semplice soglia assoluta di temperatura. In particolare, la durata di un evento viene definita come il numero di giorni consecutivi in cui la temperatura supera una determinata soglia di riferimento. L’intensità, invece, rappresenta l’entità dell’anomalia termica rispetto alla media climatologica del periodo considerato, cioè quanto la temperatura osservata si discosta dai valori normalmente attesi per quella specifica area e stagione. La severità dell’evento deriva dalla combinazione di durata e intensità, integrando quindi sia la persistenza nel tempo sia la magnitudine dell’anomalia.

Un indicatore ampiamente utilizzato in questo ambito è l'Excess Heat Factor (EHF)[30], che permette di quantificare le ondate di calore considerando sia il confronto con le condizioni climatologiche di lungo periodo sia l'adattamento termico recente della popolazione, rendendo così la valutazione più sensibile agli impatti reali dell'evento caldo.

L'Excess Heat Factor (EHF)[31], che combina:

- l'anomalia rispetto alla climatologia stagionale;
- l'adattamento termico recente della popolazione (temperature dei giorni precedenti).

L'EHF è particolarmente utilizzato negli studi epidemiologici, in quanto presenta una correlazione più significativa con i tassi di mortalità e morbilità associati alle ondate di calore estremo.

2.3.2 Obiettivi e metodologia

L'obiettivo dello studio è stimare la distribuzione spaziale della temperatura massima (MAX), della temperatura minima (MIN), della temperatura

[30] Nairn, J. R., & Fawcett, R. J. B. (2013). Defining heatwaves: Heatwave defined as a heat-impact event servicing all community and business sectors in Australia. *Bureau of Meteorology, Australia*. https://www.cawcr.gov.au/technical-reports/CTR_060.pdf

[31] **Nairn, J. R., & Fawcett, R. J. B. (2013).** *Defining heatwaves: heatwave defined as a heat-impact event servicing all community and business sectors in Australia*. Bureau of Meteorology, CAWCR Technical Report No. 060, Melbourne, Australia.

percepita (AT) e delle precipitazioni nel periodo compreso tra il 1° gennaio 1979 e il 31 dicembre 2023 sull'intero territorio italiano.

A tal fine, per ricavare le quattro variabili per tutti i comuni italiani a partire dai punti climatici forniti dal dataset Agri4cast, è stata utilizzata la tecnica di interpolazione Inverse Distance Weighting (IDW).

La temperatura percepita (apparent temperature, AT) è stata calcolata usando l'approccio proposto da Steadman nel suo articolo *A universal scale of apparent temperature* (1984), secondo la seguente formulazione:

$$AT = -2.7 + 1.04 \times AVG + 0.2 \times VAPOUR\ PRESSURE + 0.65 \times WINDSPEED$$

dove:

- **AVG** rappresenta la temperatura media dell'aria (°C);
- **VAPOUR PRESSURE** indica la pressione di vapore (hPa);
- **WINDSPEED** rappresenta la velocità media giornaliera del vento a 10 m (m/s).

Tutte le analisi relative all'identificazione e alla caratterizzazione delle ondate di calore sono state condotte utilizzando come principale indicatore la temperatura percepita (Apparent Temperature, AT). Tale scelta è motivata dal fatto che la temperatura percepita rappresenta una misura più completa delle

condizioni di stress termico rispetto alla sola temperatura dell'aria, in quanto incorpora nella sua formulazione la temperatura media, la velocità del vento e la pressione del vapore, consentendo una valutazione più accurata dell'effettiva esposizione della popolazione alle condizioni di caldo estremo. L'identificazione degli eventi di ondata di calore è stata effettuata mediante il pacchetto **heatwaveR** per il software statistico R (Schlegel & Smit, 2018)[32], sviluppato per il rilevamento e la caratterizzazione automatica di eventi di caldo e freddo estremi all'interno di serie temporali climatiche. Il pacchetto implementa procedure standardizzate basate sulla metodologia proposta da Hobday et al. (2016)[33], consentendo di individuare gli eventi estremi e di calcolarne i principali parametri descrittivi, tra cui frequenza, durata, intensità e severità.

Nel presente studio heatwaveR è stato applicato alle serie temporali della temperatura percepita dei 119 capoluoghi di provincia italiani nel periodo 1979–2023, al fine di individuare e confrontare la distribuzione spaziale e temporale delle ondate di calore sul territorio nazionale.

[32] Schlegel, R. W., & Smit, A. J. (2018). heatwaveR: A central algorithm for the detection of heatwaves and cold-spells. R package version. Disponibile su: https://robwschlegel.github.io/heatwaveR/

[33] Hobday, A. J., Alexander, L. V., Perkins, S. E., et al. (2016). A hierarchical approach to defining marine heatwaves. Progress in Oceanography, 141, 227–238. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014

Tra le otto variabili climatiche disponibili nei dati Agri4cast[34] sono state pertanto selezionate solo quattro variabili (temperatura massima, temperatura minima, temperatura percepita e precipitazioni), ritenute più direttamente rilevanti rispetto agli obiettivi dello studio. Le restanti variabili non sono state incluse separatamente nell'analisi delle ondate di calore in quanto già parzialmente incorporate nella misura della temperatura percepita o meno direttamente connesse alla valutazione dello stress termico. Questa scelta ha consentito di evitare sovrapposizioni informative tra indicatori climatici e di adottare un approccio più parsimonioso, migliorando l'interpretabilità e la robustezza delle stime.

[34] European Commission, Joint Research Centre. (n.d.). Agri4cast Resources Portal. https://agri4cast.jrc.ec.europa.eu/

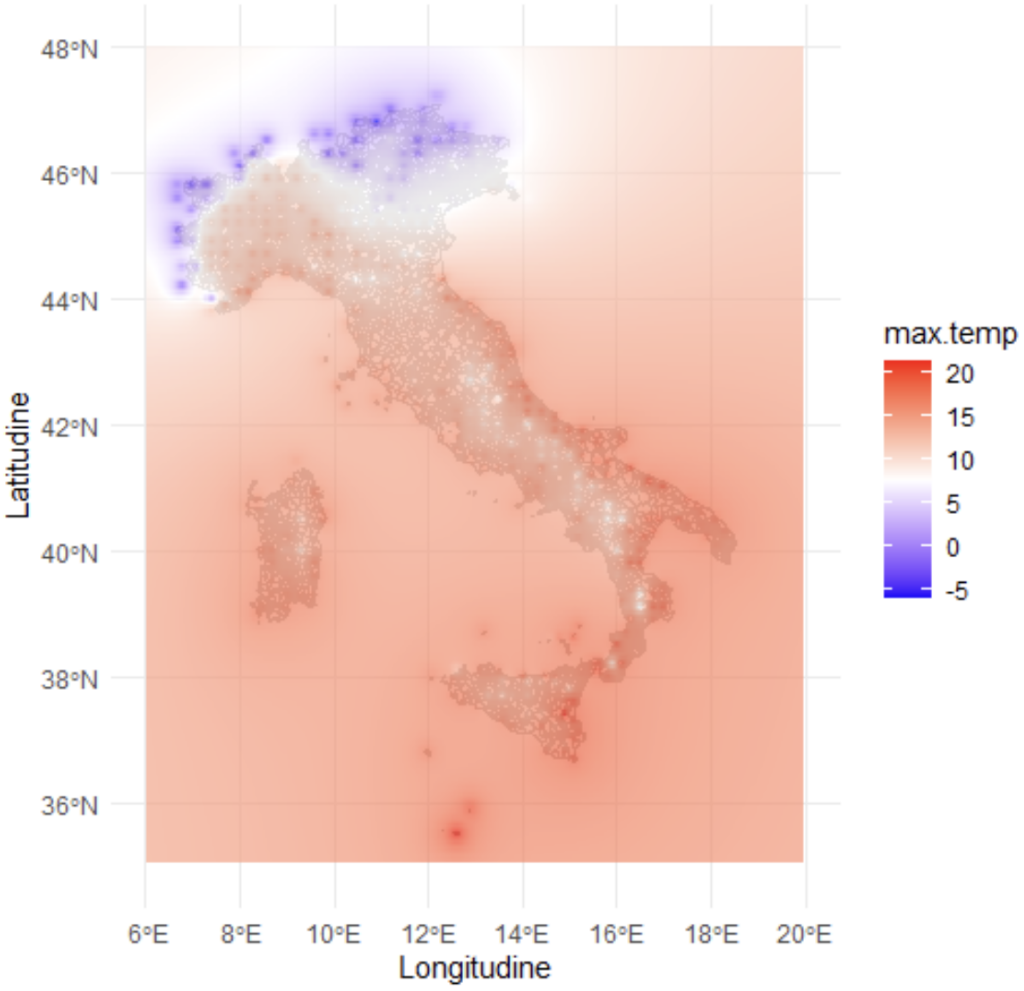


Figura 2.1 – Distribuzione della temperatura massima giornaliera in Italia (01/01/1979). Mappa della temperatura massima interpolata relativa al 1° gennaio 1979. Si osserva che la colorazione si estende anche alle aree marine, in quanto risultato del processo di interpolazione, sebbene l'analisi sia riferita esclusivamente al territorio terrestre.

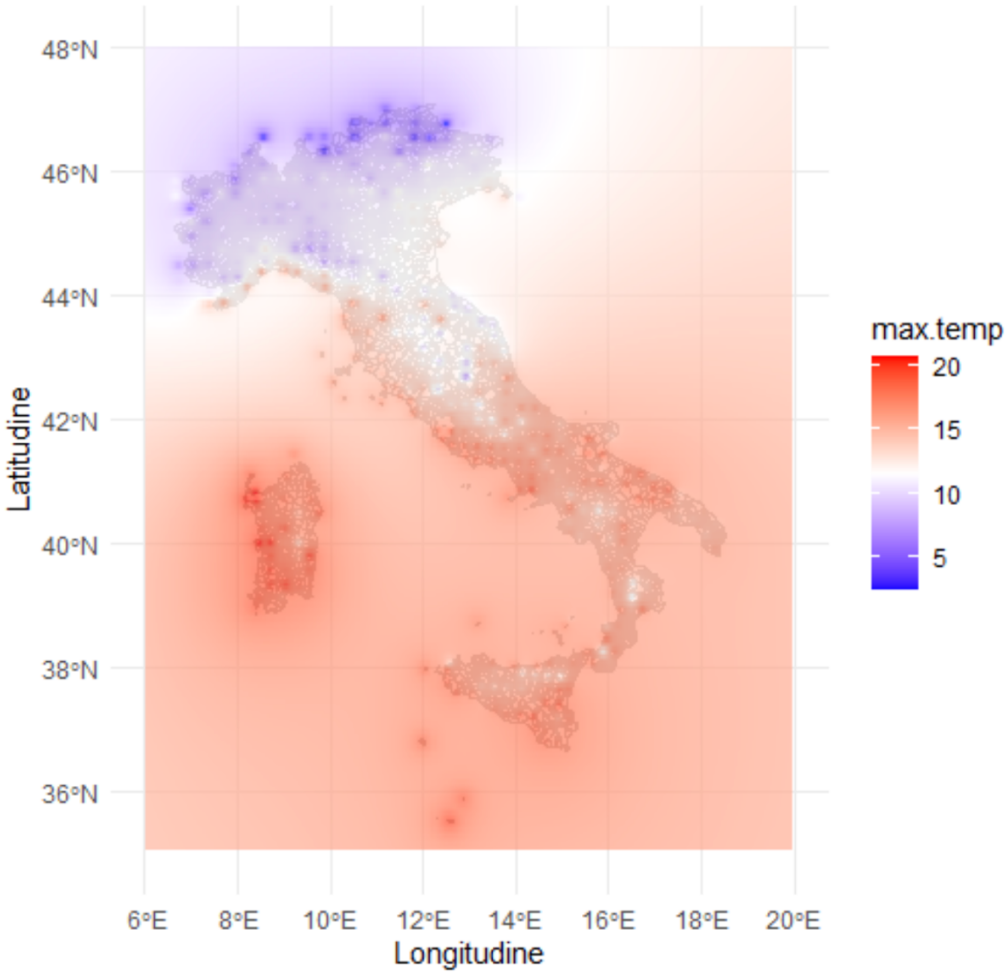


Figura 2.2 – Distribuzione della temperatura massima giornaliera in Italia (01/01/2023). Mappa della temperatura massima interpolata relativa al 1° gennaio 2023.

Le mappe rappresentano la distribuzione spaziale della temperatura massima giornaliera in Italia nei giorni 1° gennaio 1979 e 1° gennaio 2023.

Dall'analisi visiva si osserva che, nel giorno considerato, i valori di temperatura massima risultano complessivamente più elevati nel 1979 rispetto al 2023, in particolare nelle regioni centro-meridionali e nelle aree insulari. Le

zone settentrionali e alpine mostrano in entrambi i casi temperature più basse, coerenti con la stagione invernale.

È importante sottolineare che il confronto tra due singole giornate rappresenta un'analisi puntuale delle condizioni meteorologiche e non consente di trarre conclusioni sull'evoluzione del clima nel lungo periodo.

2.4 Analisi delle temperature

Una volta definite le metodologie di analisi e gli indicatori climatici utilizzati nello studio, è possibile esaminare l'evoluzione delle temperature e delle ondate di calore nel territorio italiano nel periodo considerato. L'analisi dei risultati consente di evidenziare non soltanto le variazioni termiche osservate, ma anche le principali implicazioni ambientali, sanitarie e socioeconomiche associate agli eventi di caldo estremo.

2.4.1 Marine heatwaves e differenze con gli eventi terrestri

Le marine heatwaves (MHWs) sono eventi di caldo estremo che interessano le acque superficiali oceaniche, caratterizzati da temperature insolitamente elevate che persistono per giorni, settimane o mesi.

A differenza delle ondate di calore terrestri, le MHWs presentano generalmente una durata maggiore, una minore variabilità nel breve termine e

possono influenzare gli ecosistemi marini su larga scala (Hobday et al., 2016)[35]. Le principali differenze possono essere riassunte come segue:

Ondate di calore terrestri	**Marine heatwaves**
Durata da giorni a settimane	Durata da settimane a mesi
Forte impatto sanitario diretto	Impatto ecologico ed economico
Raffreddamento notturno possibile	Raffreddamento molto lento
Elevata variabilità spaziale	Estensione geografica ampia

Tabella 2.1 – Principali differenze tra ondate di calore terrestri e marine. Fonte: elaborazione dell'autrice sulla base della letteratura esaminata.

Le marine heatwaves sono responsabili di fenomeni quali sbiancamento dei coralli, mortalità di massa di specie marine e alterazioni delle catene trofiche, con conseguenze rilevanti sulla pesca e sulla sicurezza alimentare.

Al fine di evidenziare l'evoluzione temporale del fenomeno, è stato effettuato un confronto tra due anni rappresentativi.

[35] Hobday, A. J., Alexander, L. V., Perkins, S. E., Smale, D. A., Straub, S. C., Oliver, E. C. J., Benthuysen, J. A., Burrows, M. T., Donat, M. G., Feng, M., Holbrook, N. J., Moore, P. J., Scannell, H. A., Sen Gupta, A., & Wernberg, T. (2016). A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*, 141, 227–238. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014

2.4.2 Grandi ondate di calore storiche

Negli ultimi decenni, l'aumento globale delle temperature ha portato a un incremento significativo della frequenza e dell'intensità delle ondate di calore. L'ondata di calore dell'estate 2003 è considerata una delle più gravi nella storia europea moderna. Le temperature superarono di oltre 5–6 °C la media stagionale per settimane, causando circa 70.000 decessi in eccesso, soprattutto tra anziani e soggetti fragili.

Nel 2010, un'intensa ondata di calore colpì la Russia occidentale, con temperature superiori ai 40 °C. L'evento fu associato a incendi boschivi estesi, gravi problemi di qualità dell'aria e una significativa riduzione della produzione agricola.

L'estate 2022 ha visto una delle più intense sequenze di ondate di calore nel bacino del Mediterraneo, con temperature record sia terrestri sia marine. Le marine heatwaves hanno contribuito a mortalità di massa di organismi marini e a un deterioramento degli ecosistemi costieri.

Questi eventi, un tempo considerati eccezionali, stanno diventando sempre più frequenti, coerentemente con le proiezioni dei modelli climatici.

2.4.3 Conseguenze socioeconomiche e sanitarie delle ondate di calore

Le ondate di calore rappresentano uno dei rischi climatici più rilevanti per la salute pubblica. Gli effetti sanitari includono: colpi di calore e disidratazione, aggravamento di patologie cardiovascolari e respiratorie, aumento della mortalità, soprattutto nelle fasce vulnerabili.

Dal punto di vista socioeconomico, gli impatti comprendono: riduzione della produttività lavorativa; aumento dei consumi energetici per raffrescamento; danni alle infrastrutture; perdite nel settore agricolo e ittico.

Le disuguaglianze sociali amplificano gli effetti delle ondate di calore: popolazioni con minore accesso a sistemi di raffrescamento, spazi verdi e assistenza sanitaria risultano maggiormente esposte.

In questo contesto, le ondate di calore non sono più eventi isolati, ma rappresentano una sfida strutturale per la salute pubblica, la pianificazione urbana e le politiche di adattamento ai cambiamenti climatici.

Alla luce di questi impatti, emerge la necessità di interrogarsi sull'adeguatezza degli strumenti economici e normativi attualmente utilizzati per mitigare il disagio climatico, in particolare nel settore energetico.

2.4.4 Limiti del sistema nel contesto del cambiamento climatico

L'attuale sistema di classificazione climatica e di attribuzione del bonus sociale gas si basa prevalentemente su parametri sviluppati per stimare il

fabbisogno energetico legato al riscaldamento invernale. Tuttavia, il progressivo aumento delle temperature medie globali e la crescente frequenza degli eventi climatici estremi stanno modificando in modo significativo il rapporto tra clima, consumi energetici e vulnerabilità sociale.

In questo contesto, emerge la necessità di interrogarsi sull'adeguatezza degli strumenti climatici tradizionali rispetto agli attuali scenari di cambiamento climatico.

Tuttavia, questo schema presenta un limite strutturale sempre più evidente nel contesto del cambiamento climatico attuale: la classificazione si basa su medie climatiche di lungo periodo e non tiene conto degli eventi estremi, né freddi né caldi. In altre parole, il sistema delle fasce climatiche fotografa un clima "medio", ma non intercetta la crescente variabilità e l'intensificazione degli estremi termici.

Negli ultimi decenni, la letteratura scientifica ha mostrato come il riscaldamento globale non si manifesti solo attraverso un aumento della temperatura media, ma soprattutto tramite un aumento della frequenza, durata e intensità delle ondate di calore. Le ondate di calore rappresentano eventi climatici discreti, caratterizzati da temperature eccezionalmente elevate per più giorni consecutivi rispetto alla climatologia locale, e hanno effetti diretti sulla salute, sulla produttività e sui consumi energetici.

Proprio per questo motivo, numerosi studi utilizzano le ondate di calore non solo come indicatore fisico del cambiamento climatico, ma anche come variabile di interesse per valutazioni economiche. In ambito economico e socioeconomico, le ondate di calore vengono impiegate per analizzare:

- l'aumento della domanda energetica per il raffrescamento;
- la riduzione della produttività del lavoro, in particolare nei settori esposti;
- l'aumento della spesa sanitaria e dei costi sociali;
- le perdite economiche indirette legate alla riduzione del benessere e alla maggiore vulnerabilità delle fasce di popolazione fragili.

In questo senso, le ondate di calore costituiscono un ponte concettuale tra clima ed economia, perché trasformano un fenomeno meteorologico in un fattore misurabile di impatto economico e sociale. A differenza delle temperature medie, gli estremi termici hanno effetti immediati, concentrati nel tempo e spesso regressivi, colpendo in modo sproporzionato le famiglie a basso reddito, che dispongono di minori risorse per adattarsi (ad esempio attraverso sistemi di raffrescamento efficienti).

Alla luce di queste considerazioni, emerge una possibile criticità nell'attuale impianto dei bonus energetici: mentre il sostegno per il riscaldamento è ancorato alle fasce climatiche basate sui gradi-giorno, non esiste un'analoga

integrazione sistematica degli estremi di caldo, nonostante il loro impatto crescente sui consumi energetici e sul benessere delle famiglie.

Non è quindi possibile stabilire, allo stato attuale, una relazione diretta e formale tra ondate di calore e bonus energetici, poiché il sistema di bonus non è progettato per rispondere a eventi estremi ma a condizioni climatiche medie. Tuttavia, è possibile individuare una relazione indiretta e potenziale: le ondate di calore aumentano il fabbisogno energetico per il raffrescamento, soprattutto nelle aree urbane e nelle regioni già caratterizzate da vulnerabilità socioeconomica, suggerendo che un sistema di sussidi basato esclusivamente sulle fasce climatiche tradizionali rischia di non intercettare nuove forme di disagio energetico.

In questa prospettiva, le ondate di calore possono essere interpretate come un indicatore complementare alle fasce climatiche, utile per ripensare i criteri di allocazione dei bonus energetici in un contesto di cambiamento climatico. L'integrazione di indicatori legati agli estremi termici nella previsione del clima futuro di passare da un approccio stazionario, basato su medie storiche, a un approccio non stazionario, capace di rispondere alle nuove forme di rischio climatico ed energetico.

L'obiettivo di questo studio è analizzare l'evoluzione delle condizioni climatiche in Italia nel periodo 1979–2023, con particolare attenzione alla

frequenza e all'intensità delle ondate di calore. Questo intervallo temporale è stato scelto in quanto corrisponde al periodo di disponibilità dei dati climatici utilizzati nello studio.

Tutti i dati utilizzati per l'analisi sono stati scaricati da siti ufficiali come l'ISTAT[36] e Agri4cast[37], quest'ultimo è una piattaforma della Commissione Europea, facente parte del programma Copernicus, che fornisce previsioni climatiche e agricole per supportare le decisioni in ambito agricolo a livello europeo.

I dati scaricati da Agri4cast contengono rilevamenti di 8 variabili climatiche, organizzati in griglie di 25 km per 25km. Le variabili sono: temperatura massima, temperatura minima, temperatura media, velocità del vento, precipitazioni, pressione del vapore in hPa, evapotraspirazione di riferimento (ET0) e radiazione solare.

Tuttavia, per ottenere una maggiore precisione nelle stime climatiche a livello comunale, la griglia è stata successivamente infittita fino a una risoluzione spaziale di 2,5 km mediante un processo di interpolazione spaziale dei dati climatici, utilizzando il metodo Inverse Distance Weighting (IDW), che consente di stimare i valori nelle aree non campionate a partire

[36] ISTAT (Istituto Nazionale di Statistica). (n.d.). Dati e indicatori statistici. https://www.istat.it/
[37] European Commission, Joint Research Centre. (n.d.). Agri4cast Resources Portal. https://agri4cast.jrc.ec.europa.eu/

dai punti osservati.

Con una risoluzione di 2,5 km per 2,5km, è stato possibile ottenere stime climatiche a livello comunale, utilizzando lo shapefile dell'ISTAT per definire i limiti amministrativi e mappare correttamente ogni variabile. Questo approccio ha garantito che ogni comune fosse rappresentato da almeno un punto climatico, rendendo possibile un'analisi più precisa dei parametri climatici per ciascun territorio. Il comune con il maggior numero di punti climatici è Roma con ben 65 punti, che consentono una stima ancora più dettagliata delle condizioni climatiche nell'area metropolitana.

Questo infittimento della griglia, insieme all'uso dello shapefile ISTAT per i confini comunali, ha permesso una gestione accurata dei dati climatici, facilitando l'applicazione dei risultati a livello locale, fondamentale per l'analisi delle ondate di calore e degli altri fenomeni climatici estremi.

I risultati evidenziano un incremento significativo delle temperature massime, coerente con le tendenze descritte in letteratura.

Alla luce di queste considerazioni, il cambiamento climatico non modifica soltanto le condizioni ambientali, ma mette progressivamente in discussione anche strumenti normativi ed economici costruiti su equilibri climatici storici ormai in evoluzione. In prospettiva futura, l'integrazione di indicatori legati agli estremi termici e alla vulnerabilità climatica potrebbe rappresentare un

elemento utile per sviluppare sistemi di sostegno energetico maggiormente coerenti con le nuove dinamiche climatiche e sociali.

2.4.5 Risultati

Analisi delle ondate di calore dei 119 capoluoghi di provincia presi dal seguente sito (https://www.tuttitalia.it/capoluoghi/#google_vignette), utilizzando il pacchetto heatwaveR:

Regione	Capoluoghi di provincia
Abruzzo	L'Aquila, Chieti, Pescara, Teramo
Basilicata	Matera, Potenza
Calabria	Catanzaro, Cosenza, Crotone, Reggio di Calabria, Vibo Valentia
Campania	Avellino, Benevento, Caserta, Napoli, Salerno
Emilia-Romagna	Bologna, Ferrara, Forlì, Cesena, Modena, Parma, Piacenza, Ravenna, Reggio Emilia, Rimini
Friuli-Venezia Giulia	Gorizia, Pordenone, Trieste, Udine
Lazio	Frosinone, Latina, Rieti, Roma, Viterbo
Liguria	Genova, Imperia, La Spezia, Savona
Lombardia	Bergamo, Brescia, Como, Cremona, Lecco, Lodi, Mantova, Milano, Monza, Pavia, Sondrio, Varese
Marche	Ancona, Ascoli Piceno, Fermo, Macerata, Pesaro, Urbino

Molise	Campobasso, Isernia
Piemonte	Alessandria, Asti, Biella, Cuneo, Novara, Torino, Verbania, Vercelli
Puglia	Bari, Barletta, Andria, Trani, Brindisi, Foggia, Lecce, Taranto
Sardegna	Cagliari, Carbonia, Iglesias, Nuoro, Oristano, Sassari, Olbia, Tempio Pausania, Lanusei, Tortolì, Sanluri, Villacidro
Sicilia	Agrigento, Caltanissetta, Catania, Enna, Messina, Palermo, Ragusa, Siracusa, Trapani
Toscana	Arezzo, Firenze, Grosseto, Livorno, Lucca, Massa, Carrara, Pisa, Pistoia, Prato, Siena
Trentino-Alto Adige	Bolzano/Bozen, Trento
Umbria	Perugia, Terni
Valle d'Aosta	Aosta
Veneto	Belluno, Padova, Rovigo, Treviso, Venezia, Verona, Vicenza

Tabella 2.2 – Capoluoghi di provincia inclusi nell'analisi delle ondate di calore. Fonte: elaborazione dell'autrice.

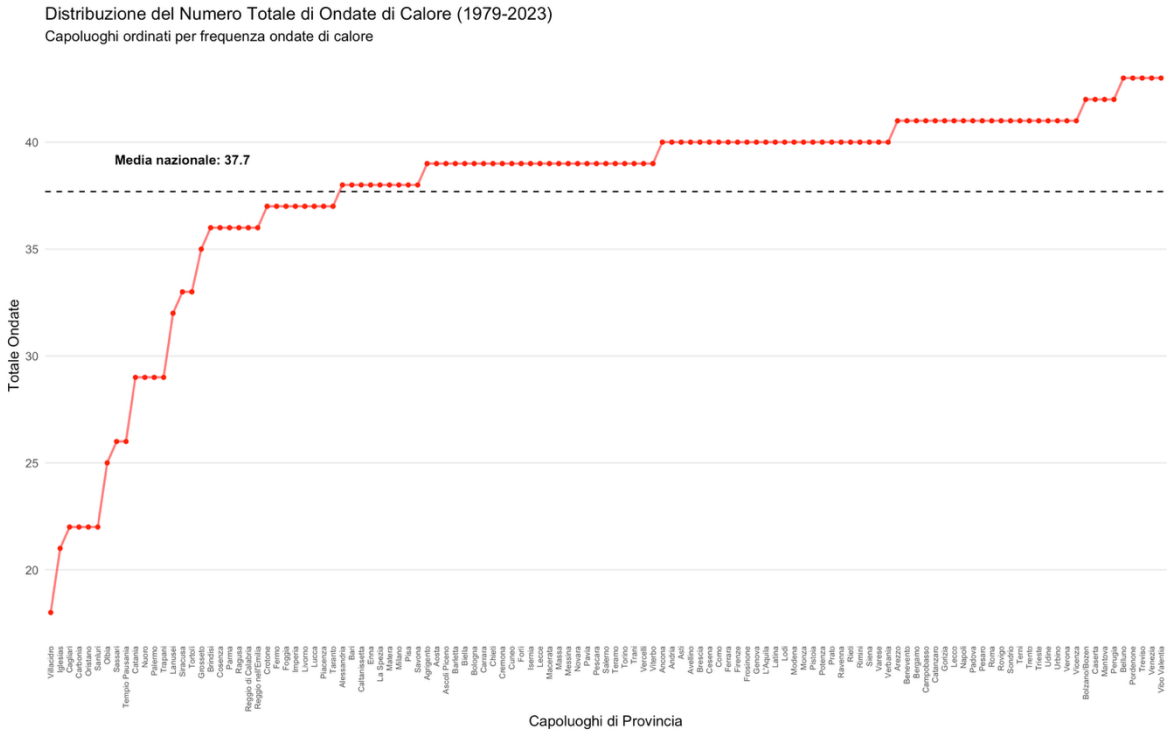


Figura 2.3 – Distribuzione del numero totale di ondate di calore (1979–2023).

Il grafico mostra la distribuzione del numero totale di ondate di calore registrate nei 119 capoluoghi di provincia italiani nel periodo compreso tra il 1979 e il 2023, ordinati in base alla frequenza crescente degli eventi. La linea tratteggiata rappresenta la media nazionale pari a 37,7 ondate di calore.

Dall'analisi emerge una notevole variabilità territoriale. I capoluoghi collocati nella parte iniziale del grafico registrano un numero di eventi inferiore alla media nazionale, con valori che partono da circa 18 ondate di calore, indicando una minore esposizione al fenomeno nel periodo considerato.

La maggior parte dei capoluoghi si concentra intorno alla media nazionale, mentre nella parte finale del grafico si osservano i territori maggiormente

colpiti, con valori superiori a 40 eventi complessivi e picchi che raggiungono circa 43 ondate di calore.

Questo andamento evidenzia come la frequenza delle ondate di calore non sia uniforme sul territorio italiano e conferma una crescente diffusione del fenomeno climatico nel lungo periodo analizzato.

Un aspetto che merita particolare attenzione nell'interpretazione dei risultati riguarda la natura relativa della definizione di ondata di calore adottata nello studio. Gli eventi sono stati identificati utilizzando una soglia percentile-based, coerente con le indicazioni della World Meteorological Organization (WMO), secondo cui un'ondata di calore si verifica quando la temperatura supera il 90° percentile della distribuzione climatologica locale per almeno sei giorni consecutivi. Tale approccio consente di confrontare territori climaticamente differenti, ma può generare risultati apparentemente controintuitivi.

In particolare, alcuni comuni caratterizzati da temperature medie annue relativamente basse possono registrare un numero elevato di ondate di calore o eventi di maggiore durata rispetto a territori mediamente più caldi. Questo fenomeno è spiegabile considerando che la soglia utilizzata per identificare gli eventi estremi è calcolata rispetto alla climatologia locale. Nei territori più freddi, la soglia del 90° percentile tende quindi ad assumere valori

assoluti inferiori rispetto alle aree tradizionalmente più calde; di conseguenza, anomalie termiche anche moderate possono superare più facilmente il valore soglia e venire classificate come ondate di calore.
Al contrario, nei comuni caratterizzati da temperature medie elevate, la soglia climatologica locale risulta generalmente più alta. In questi contesti, affinché si verifichi un'ondata di calore è necessario il raggiungimento di condizioni particolarmente eccezionali rispetto al clima abituale della zona. Pertanto, territori strutturalmente più caldi possono registrare un numero inferiore di eventi estremi pur presentando temperature assolute superiori.
Un ulteriore elemento interpretativo è rappresentato dalla diversa variabilità climatica dei territori italiani. Le aree interne e montane sono spesso caratterizzate da una maggiore escursione termica stagionale rispetto alle zone costiere, dove l'effetto mitigatore del mare contribuisce a mantenere temperature più stabili nel corso dell'anno. Questa maggiore variabilità può favorire il verificarsi di anomalie statisticamente significative rispetto alla climatologia locale, aumentando la probabilità di identificare eventi classificati come ondate di calore.
I risultati devono quindi essere interpretati non come una misura diretta dei territori più caldi in termini assoluti, ma come un'indicazione della frequenza

con cui le condizioni termiche superano livelli considerati anomali rispetto al clima tipico di ciascun territorio.

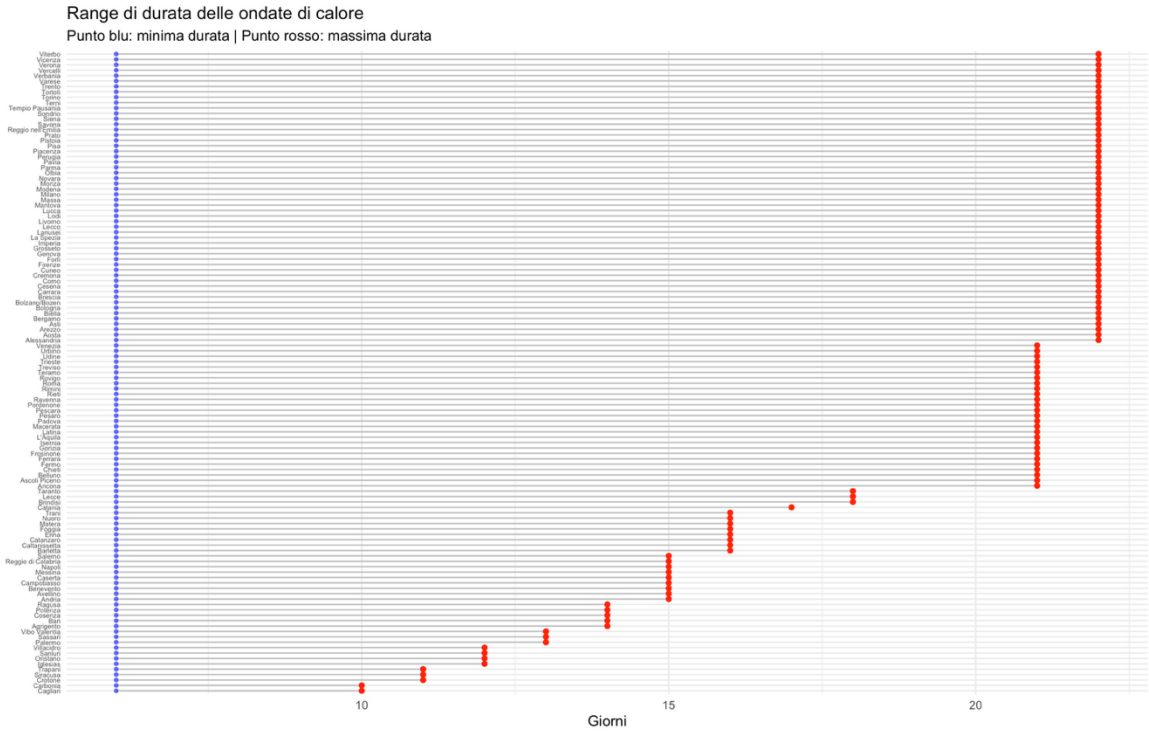


Figura 2.4 – Durata minima e massima delle ondate di calore nei capoluoghi di provincia.

Il grafico rappresenta la durata minima e massima delle ondate di calore registrate nei diversi capoluoghi di provincia italiani nel periodo di studio. Il punto blu indica la durata minima degli eventi, che risulta costante e pari a 6 giorni per tutti i capoluoghi analizzati.

I segmenti rossi rappresentano invece la durata massima raggiunta dalle ondate di calore nei diversi territori. Si osserva una significativa variabilità: in alcuni capoluoghi la durata massima si attesta intorno ai 10–12 giorni

consecutivi, mentre in altri supera i 20 giorni, raggiungendo un massimo di circa 22 giorni consecutivi.

Il grafico evidenzia quindi che le differenze territoriali non riguardano soltanto la frequenza delle ondate di calore, ma anche la loro persistenza nel tempo. Eventi più prolungati possono determinare effetti più rilevanti sulla salute pubblica, sui consumi energetici e sulle attività economiche locali.

3. IL BONUS SOCIALE GAS: TRA NORMATIVA ENERGETICA E VULNERABILITÀ CLIMATICA

Negli ultimi anni il cambiamento climatico ha modificato profondamente il rapporto tra condizioni ambientali, consumi energetici e vulnerabilità economica delle famiglie. L'aumento della frequenza degli eventi climatici estremi, in particolare delle ondate di calore, ha evidenziato come il disagio energetico non riguardi più esclusivamente il fabbisogno di riscaldamento invernale, ma coinvolga sempre più anche la necessità di raffrescamento durante i mesi estivi.

In questo contesto, gli strumenti di sostegno economico legati ai consumi energetici assumono un ruolo centrale nelle politiche di tutela sociale. Tra questi, il bonus sociale gas rappresenta una misura finalizzata a sostenere le famiglie economicamente vulnerabili rispetto ai costi legati ai consumi energetici domestici.

L'attuale sistema di classificazione climatica utilizzato per la determinazione del fabbisogno energetico deriva dal Decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412, che suddivide il territorio italiano in diverse zone climatiche sulla base dei gradi-giorno. Tale classificazione è stata sviluppata principalmente con riferimento alle esigenze di riscaldamento degli edifici e alla gestione energetica invernale.

Tuttavia, nel contesto del cambiamento climatico contemporaneo, emerge la necessità di interrogarsi sull'adeguatezza di un sistema costruito su medie climatiche storiche, in un quadro caratterizzato da una crescente intensificazione degli estremi termici. Le ondate di calore, infatti, determinano un aumento della domanda energetica per il raffrescamento e contribuiscono ad amplificare forme di vulnerabilità economica e sociale già esistenti.

Alla luce di queste considerazioni, il presente capitolo analizza il quadro normativo del bonus sociale gas, la classificazione climatica introdotta dal D.P.R. 412/1993 e il ruolo dei gradi-giorno nella definizione del fabbisogno energetico, evidenziando i limiti di un approccio basato prevalentemente sulle esigenze di riscaldamento rispetto agli attuali scenari climatici.

3.1 Il bonus sociale gas: finalità e quadro generale

Il bonus sociale gas rappresenta una misura di sostegno economico introdotta con l'obiettivo di ridurre il peso della spesa energetica sulle famiglie in condizioni di disagio economico. Tale strumento rientra nell'ambito delle politiche di welfare energetico sviluppate per garantire l'accesso ai servizi essenziali e contrastare fenomeni di povertà energetica.

Il bonus viene riconosciuto ai nuclei familiari che presentano specifici requisiti economici, individuati principalmente attraverso l'Indicatore della

Situazione Economica Equivalente (ISEE). L'agevolazione è differenziata in funzione di vari fattori, tra cui il numero di componenti del nucleo familiare, la categoria d'uso del gas naturale e la zona climatica di appartenenza del comune di residenza.

L'impostazione del sistema riflette una logica storicamente orientata alla copertura dei fabbisogni energetici legati al riscaldamento domestico. Per questo motivo, la classificazione climatica del territorio nazionale assume un ruolo centrale nella determinazione dell'entità del beneficio economico riconosciuto alle famiglie.

Nel tempo, il bonus sociale gas è diventato uno degli strumenti principali utilizzati per mitigare il disagio energetico delle famiglie vulnerabili[38], soprattutto nei periodi caratterizzati da un aumento dei costi dell'energia. Tuttavia, l'evoluzione delle condizioni climatiche e l'aumento degli eventi estremi pongono nuove questioni relative all'adeguatezza dei criteri utilizzati per definire il fabbisogno energetico delle famiglie.

[38] Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente (ARERA). Bonus sociale gas. Disponibile su: https://www.arera.it

3.2 Il D.P.R. 412/1993 e la classificazione delle zone climatiche

La classificazione climatica del territorio italiano attualmente utilizzata nei sistemi di regolazione energetica deriva dal Decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412, recante "Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia".

Il decreto rappresenta uno dei principali riferimenti normativi italiani in materia di efficienza energetica degli edifici e introduce una suddivisione del territorio nazionale in sei zone climatiche, identificate con le lettere dalla A alla F.

La classificazione si basa sul parametro dei gradi-giorno (GG), un indicatore climatico utilizzato per stimare il fabbisogno energetico necessario al riscaldamento degli edifici. I gradi-giorno vengono calcolati considerando la differenza tra una temperatura convenzionale di riferimento pari a 20°C e la temperatura media giornaliera esterna, limitatamente ai giorni in cui tale differenza risulta positiva.

In base al D.P.R. 412/1993, i comuni italiani vengono classificati secondo le seguenti fasce climatiche:

- Zona A: comuni con gradi-giorno non superiori a 600;
- Zona B: comuni con gradi-giorno compresi tra 601 e 900;

- Zona C: comuni con gradi-giorno compresi tra 901 e 1400;
- Zona D: comuni con gradi-giorno compresi tra 1401 e 2100;
- Zona E: comuni con gradi-giorno compresi tra 2101 e 3000;
- Zona F: comuni con gradi-giorno superiori a 3000.

Questa classificazione riflette principalmente le necessità energetiche legate al riscaldamento invernale. Le zone climatiche più fredde presentano infatti un maggior numero di gradi-giorno e, di conseguenza, un fabbisogno energetico teoricamente più elevato per il mantenimento del comfort termico all'interno degli edifici.

Il sistema dei gradi-giorno è stato sviluppato in un contesto climatico e normativo in cui il principale problema energetico era rappresentato dal fabbisogno di riscaldamento durante la stagione fredda. Per questo motivo, la classificazione climatica introdotta dal D.P.R. 412/1993 è oggi utilizzata anche come riferimento per la definizione di alcune agevolazioni economiche legate ai consumi energetici, tra cui il bonus sociale gas.[39]

La classificazione climatica introdotta dal D.P.R. 412/1993 costituisce ancora oggi uno dei principali strumenti di riferimento per la regolazione energetica nazionale. Tuttavia, l'evoluzione delle condizioni climatiche rende necessario

[39] D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412. Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, n. 242 del 14 ottobre 1993. https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1993/10/14/093G0451/sg

interrogarsi sulla capacità di tali parametri di rappresentare adeguatamente gli attuali fabbisogni energetici della popolazione.

3.3 I gradi-giorno e la formula di riferimento

Il parametro dei gradi-giorno (GG) rappresenta uno degli indicatori climatici più utilizzati nell'ambito della pianificazione energetica degli edifici. Esso consente di stimare il fabbisogno teorico di energia necessario per il riscaldamento invernale sulla base delle condizioni climatiche medie di un determinato territorio.

Il parametro dei gradi-giorno (GG) rappresenta un indicatore climatico utilizzato per descrivere il fabbisogno teorico di energia necessario al mantenimento del comfort termico negli edifici. In climatologia, i gradi-giorno vengono generalmente definiti come la somma, estesa all'intero anno solare, delle differenze positive tra una temperatura di riferimento convenzionale e la temperatura media giornaliera esterna.

Nel presente studio viene considerata una temperatura di riferimento pari a 20°C, coerentemente con la normativa italiana e con la letteratura energetica sugli edifici. Il calcolo giornaliero dei gradi-giorno può essere espresso come:

$$GG_i = max(20 - T_{media,i}, 0)$$

dove:

- GG_irappresenta il valore giornaliero dei gradi-giorno del giorno i;
- $T_{media,i}$ indica la temperatura media giornaliera esterna del giorno i;
- la funzione $max(0,\cdot)$consente di considerare soltanto i valori positivi, assegnando valore nullo ai giorni in cui la temperatura media supera i 20°C.

Il valore annuale complessivo dei gradi-giorno viene quindi ottenuto sommando i contributi giornalieri sull'intero arco dei 365 giorni dell'anno. In questo modo, l'indicatore descrive in maniera sintetica le condizioni climatiche di un territorio e il relativo fabbisogno energetico teorico associato al riscaldamento degli ambienti.[40]

$$GG = \sum_{i=1}^{365} GG_i$$

Il valore complessivo dei gradi-giorno consente di classificare ciascun comune italiano all'interno delle diverse zone climatiche previste dal D.P.R. 412/1993. La classificazione climatica costituisce ancora oggi uno dei principali riferimenti normativi per la regolazione degli impianti termici e per la

[40] Eurostat. (2024). *Heating Degree Days and Cooling Degree Days*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Heating_and_cooling_degree_days

determinazione di alcune misure di sostegno economico legate ai consumi energetici domestici.

L’utilizzo dei gradi-giorno come parametro sintetico del fabbisogno energetico ha consentito per molti anni una classificazione efficace del territorio nazionale. Tuttavia, i cambiamenti climatici in atto stanno progressivamente modificando il rapporto tra temperatura, consumi energetici e vulnerabilità sociale.

3.4 Criteri di calcolo del bonus gas

L’ammontare del bonus sociale gas viene determinato sulla base di differenti parametri economici, demografici e climatici. Il sistema di agevolazione è infatti costruito considerando contemporaneamente la situazione economica del nucleo familiare, la composizione della famiglia e la zona climatica del comune di residenza.

Tra i principali requisiti richiesti per l'accesso al bonus sociale gas rientra il possesso di un Indicatore della Situazione Economica Equivalente (ISEE) entro le soglie stabilite annualmente dalla normativa vigente. Il riconoscimento dell'agevolazione avviene in maniera automatica per i nuclei familiari che presentano la Dichiarazione Sostitutiva Unica (DSU) e risultano in possesso dei requisiti previsti.

L'importo del beneficio non è uguale per tutti i beneficiari, ma viene determinato combinando diversi elementi, con l'obiettivo di stimare il presumibile fabbisogno energetico della famiglia. In particolare, il calcolo tiene conto:

- della fascia ISEE del nucleo familiare;
- del numero dei componenti della famiglia;
- della categoria d'uso del gas naturale (cottura dei cibi, produzione di acqua calda sanitaria e riscaldamento);
- della zona climatica del comune di residenza, determinata secondo la classificazione prevista dal D.P.R. 412/1993.

La classificazione climatica assume un ruolo centrale nella determinazione dell'importo del bonus. A parità di condizioni economiche, infatti, una famiglia residente in una zona climatica caratterizzata da un maggior numero di gradi-giorno può beneficiare di un'agevolazione superiore rispetto a una famiglia residente in una zona con un clima più mite. Tale impostazione deriva dall'ipotesi che le aree con inverni più rigidi richiedano consumi energetici maggiori per garantire il riscaldamento degli edifici.

A titolo esemplificativo, la normativa distingue differenti categorie di beneficiari sulla base delle soglie ISEE previste e riconosce importi differenziati anche in funzione della composizione del nucleo familiare. La

Tabella 3.1 riassume sinteticamente le principali soglie di accesso e la struttura generale del beneficio.

Parametro	**Descrizione**
Requisito economico (ISEE)	Il bonus è riconosciuto ai nuclei familiari che rientrano nelle soglie ISEE previste dalla normativa vigente.
Composizione del nucleo familiare	L'importo varia in funzione del numero dei componenti del nucleo familiare.
Categoria d'uso del gas	L'agevolazione tiene conto dell'utilizzo del gas naturale (cottura dei cibi, produzione di acqua calda sanitaria e riscaldamento).
Zona climatica del comune	Il comune di residenza è classificato nelle zone climatiche dalla A alla F secondo il D.P.R. 412/1993, sulla base dei gradi-giorno.
Entità del beneficio	L'importo finale deriva dalla combinazione dei parametri economici, familiari e climatici previsti dalla normativa.

Tabella 3.1 – Principali criteri utilizzati per la determinazione del bonus sociale gas. Fonte: elaborazione dell'autore su dati ARERA e D.P.R. 412/1993.

Al fine di comprendere più nel dettaglio il funzionamento del sistema di agevolazione, è opportuno evidenziare che il bonus sociale gas non viene riconosciuto in maniera uniforme a tutti i beneficiari. La normativa distingue infatti diverse categorie di nuclei familiari sulla base dei requisiti economici e delle caratteristiche del nucleo, individuando differenti condizioni di accesso al beneficio.

Ai soli fini espositivi, i principali casi di accesso sono organizzati nella Tabella 3.2 come Profili da 1 a 5. Queste denominazioni non costituiscono categorie previste dal D.P.R. 412/1993 e sono utilizzate esclusivamente per evitare sovrapposizioni con le lettere A-F, riservate alle zone climatiche. I profili distinguono i nuclei in funzione delle soglie ISEE, della composizione familiare e dell'eventuale accesso alle ulteriori misure richiamate.

Profilo di accesso	**Requisiti di accesso**
Profilo 1	Nuclei familiari con ISEE ≤ 9.530 €
Profilo 2	Nuclei familiari con ISEE compreso tra 9.530 € e 20.000 € (escluso il limite inferiore e incluso quello superiore) con 4 o più figli, indipendentemente dalla percezione del Reddito di cittadinanza (RdC) o della Pensione di cittadinanza (PdC).

Profilo 3	Nuclei familiari con ISEE > 9.530 €, percettori di Reddito di cittadinanza (RdC) o Pensione di cittadinanza (PdC), con meno di 4 figli.
Profilo 4	Nuclei familiari con ISEE compreso tra 9.530 € e 15.000 €.
Profilo 5	Nuclei familiari con ISEE compreso tra 20.000 € e 30.000 €, con 4 o più figli.

Tabella 3.2 – Profili espositivi dei requisiti di accesso al bonus sociale gas per disagio economico. Fonte: elaborazione dell'autrice su dati ARERA.

Una volta verificati i requisiti di accesso, l'entità della compensazione economica viene determinata considerando la zona climatica del comune di residenza, la numerosità del nucleo familiare e la tipologia di utilizzo del gas naturale.

Le elaborazioni successive assumono la configurazione u = acr: acqua calda sanitaria (a), cottura (c) e riscaldamento (r). La categoria d'uso resta così costante nel confronto tra zone climatiche e nuclei familiari.

Composizione nucleo familiare	**Utilizzo gas**	**Zona A/B**	**Zona C**	**Zona D**	**Zona E**	**Zona F**

Famiglie fino a 4 componenti	Acqua calda sanitaria e/o uso cottura + riscaldamento	52,20	55,80	67,50	78,30	74,70
Famiglie con più di 4 componenti	Acqua calda sanitaria e/o uso cottura + riscaldamento	60,30	66,60	81,90	74,70	72,00

Tabella 3.3 – Ammontare trimestrale della compensazione economica del bonus sociale gas per la configurazione u = acr, I trimestre 2026 (euro per trimestre e per punto di riconsegna). Fonte: elaborazione dell'autrice su dati ARERA.

Gli importi riportati non seguono in ogni colonna una progressione strettamente crescente dalla zona A/B alla zona F. La Tabella 3.3 riproduce infatti valori trimestrali determinati da ARERA per specifiche combinazioni di periodo, composizione familiare, utilizzo del gas e zona climatica; non rappresenta una funzione lineare dei soli gradi-giorno. La non monotonicità osservata nel singolo trimestre deve quindi essere distinta dalla regola progressiva adottata, a fini esplorativi, per il bonus energia estivo.

L'importo del bonus sociale gas viene determinato combinando diversi parametri economici, familiari e climatici. In particolare, il calcolo tiene conto della fascia ISEE del nucleo familiare, della numerosità della famiglia, della tipologia di utilizzo del gas naturale e della zona climatica del comune di residenza, definita secondo la classificazione introdotta dal D.P.R. 412/1993.

La classificazione climatica assume un ruolo centrale nella determinazione dell'entità della compensazione economica. A parità di condizioni economiche, infatti, una famiglia residente in una zona climatica caratterizzata da un maggior numero di gradi-giorno può beneficiare di un'agevolazione superiore rispetto a una famiglia residente in una zona più mite, poiché il sistema presuppone un maggiore fabbisogno energetico per il riscaldamento domestico.

L'attuale struttura del bonus sociale gas evidenzia quindi come il sistema di agevolazione sia costruito sulla combinazione di parametri socioeconomici e climatici, assumendo i gradi-giorno quale principale indicatore del fabbisogno energetico. Tale impostazione riflette tuttavia una concezione del disagio energetico prevalentemente orientata ai consumi della stagione invernale.

Alla luce del progressivo aumento delle temperature estive e della crescente frequenza delle ondate di calore, emerge la necessità di valutare indicatori in grado di descrivere anche il fabbisogno energetico associato al raffrescamento degli edifici. In questa prospettiva si inserisce la proposta sviluppata nel presente lavoro, illustrata nel paragrafo seguente.

4. IL GGOC E LA VULNERABILITÀ ENERGETICA ESTIVA

4.1 Il GGOC come indicatore complementare ai gradi-giorno

Come evidenziato nel capitolo precedente, il sistema attualmente utilizzato per la determinazione del bonus sociale gas si basa sulla classificazione climatica definita dal D.P.R. 412/1993, la quale utilizza i gradi-giorno (GG) per stimare il fabbisogno energetico necessario al riscaldamento degli edifici durante la stagione invernale. Tale approccio rappresenta ancora oggi un valido riferimento per la valutazione dei consumi legati al riscaldamento, ma non considera direttamente il crescente fabbisogno energetico determinato dalle elevate temperature estive.

Negli ultimi decenni il cambiamento climatico ha determinato un progressivo incremento dell'intensità e della persistenza degli episodi di caldo estremo, con un conseguente aumento della domanda energetica destinata al raffrescamento degli ambienti. Tale evoluzione rende necessario l'impiego di un indicatore capace di sintetizzare lo stress termico accumulato durante la stagione estiva. Per tale motivo, nel presente studio viene proposto il Grado Giorno di Ondata di Calore (GGOC) quale possibile indicatore complementare ai tradizionali gradi-giorno. Il GGOC consente infatti di quantificare lo stress termico cumulato associato alle ondate di calore, fornendo una misura sintetica del potenziale fabbisogno energetico estivo. A

differenza dei gradi-giorno, che descrivono il fabbisogno energetico necessario al riscaldamento, il GGOC è finalizzato a rappresentare il fabbisogno energetico legato al raffrescamento degli edifici.

Il GGOC viene calcolato considerando esclusivamente i giorni appartenenti a un'ondata di calore validata secondo i criteri adottati nel presente studio. Per ciascun giorno viene assunto il massimo tra lo scarto della temperatura massima giornaliera rispetto al novantesimo percentile della distribuzione climatologica di riferimento e il valore zero; i contributi così ottenuti vengono successivamente sommati per misurare lo stress termico accumulato durante la stagione.

$$GGOC = \sum_{i=1}^{n} \left[max\left(T_{max,i} - P_{90}, 0\right) \cdot I_i \right]$$

dove:

- $T_{max,i}$ rappresenta la temperatura massima registrata nel giorno i;
- P_{90} rappresenta il novantesimo percentile della distribuzione climatologica di riferimento;
- I_i è una variabile booleana che assume valore pari a 1 quando il giorno appartiene a un'ondata di calore validata (di almeno sei giorni consecutivi secondo i criteri adottati nello studio) e valore pari a 0 negli altri casi.

Il termine $\max(T_{max,i} - P_{90}, 0)$ impedisce che i giorni in cui la temperatura non supera la soglia forniscano un contributo negativo. La variabile booleana limita inoltre la somma ai soli giorni appartenenti a ondate di calore validate secondo la definizione adottata.

L'indicatore GGOC integra in un'unica misura le tre principali componenti del rischio climatico associate alle ondate di calore: l'intensità, rappresentata dallo scarto tra la temperatura massima giornaliera e il novantesimo percentile climatologico; la durata, poiché la sommatoria accumula il contributo di ciascun giorno appartenente all'ondata di calore; e la frequenza, in quanto il valore finale tiene conto di tutti gli eventi verificatisi nel corso della stagione. Rispetto al semplice conteggio del numero di ondate di calore, il GGOC fornisce quindi una misura più completa dello stress termico complessivamente accumulato.

Mentre i gradi-giorno (GG) descrivono il fabbisogno energetico necessario al riscaldamento degli edifici, calcolato rispetto alla temperatura convenzionale di riferimento di 20°C, il GGOC permette di rappresentare il fabbisogno energetico associato al raffrescamento durante gli episodi di caldo estremo. I due indicatori risultano pertanto complementari e consentono di descrivere esigenze energetiche riferite a stagioni differenti.

L'introduzione del GGOC non intende sostituire il sistema dei gradi-giorno previsto dal D.P.R. 412/1993, ma affiancarlo, offrendo uno strumento in grado di rappresentare anche le nuove forme di vulnerabilità energetica determinate dal cambiamento climatico. Tale indicatore costituisce la base metodologica adottata nel presente studio per formulare, nel paragrafo successivo, una proposta esplorativa di bonus energia estivo complementare all'attuale bonus sociale gas.

4.2 Ipotesi di fasce e importi per il bonus energia estivo

Per tradurre il GGOC in un criterio operativo di attribuzione del bonus per il raffrescamento, si propongono cinque fasce estive, indicate da R1 a R5. In assenza di una stima diretta dei consumi elettrici estivi per ciascun comune, le soglie sono definite in modo relativo sulla distribuzione territoriale del GGOC: Q20, Q40, Q60 e Q80 rappresentano rispettivamente il 20°, il 40°, il 60° e l'80° percentile dei valori rilevati nei comuni analizzati.

All'aumentare del GGOC cresce la fascia di fabbisogno potenziale. A differenza della Tabella 3.3, che riproduce valori trimestrali ufficiali non determinati dal solo fattore climatico, la proposta estiva assume esplicitamente una progressione monotona: a un GGOC più elevato corrisponde un importo non inferiore. In via esplorativa, gli importi già riportati per il bonus sociale gas sono pertanto ordinati in senso crescente, distinguendo i nuclei fino a

quattro componenti da quelli più numerosi. Questa scelta rende esplicito il legame tra livello del GGOC e intensità del sostegno.

Fascia estiva	**Intervallo di GGOC**	**Importo fino a 4 componenti (€)**	**Importo oltre 4 componenti (€)**
R1	GGOC ≤ Q20	52,20	60,30
R2	Q20 < GGOC ≤ Q40	55,80	66,60
R3	Q40 < GGOC ≤ Q60	67,50	72,00
R4	Q60 < GGOC ≤ Q80	74,70	74,70
R5	GGOC > Q80	78,30	81,90

Tabella 3.4 – Ipotesi di fasce GGOC e importi per il bonus energia estivo.
Fonte: elaborazione dell'autore sulla base degli importi riportati nella Tabella 3.3.

Il valore convenzionale di 20 °C appartiene esclusivamente al calcolo dei gradi-giorno per il riscaldamento previsto dal D.P.R. 412/1993 e non viene assunto come temperatura obiettivo del raffrescamento. Nel modello estivo lo stress termico è misurato attraverso il superamento del novantesimo percentile locale espresso dal GGOC. Il richiamo agli importi del bonus gas ha quindi una funzione di prima calibrazione economica e amministrativa, ma non presuppone un'equivalenza fisica o energetica tra l'aumento e la riduzione della temperatura interna.

Si tratta di una proposta preliminare. Nella realtà, la spesa per ridurre la temperatura interna di x °C non coincide necessariamente con quella necessaria ad aumentarla dello stesso valore, poiché dipende dal vettore energetico, dall'efficienza degli impianti, dalle caratteristiche dell'edificio, dalle condizioni climatiche e dal prezzo dell'energia. Le soglie percentile e gli

importi sono pertanto presentati come ipotesi di calibrazione economica e non come equivalenze fisiche definitive.

In questo schema, il GGOC determina la fascia climatica estiva, mentre i requisiti economici e la composizione del nucleo familiare restano quelli già illustrati per il bonus sociale gas. Il bonus energia estivo si configura quindi come una misura complementare e non sostitutiva, finalizzata a includere nel sostegno economico anche il fabbisogno legato alle ondate di calore. La struttura proposta collega direttamente la progressione del GGOC alla fascia di sostegno, mantenendo invariati gli altri requisiti di accesso.

4.3 Simulazione applicativa del bonus energia estivo

Al fine di verificare la coerenza interna del meccanismo proposto, è stata svolta una simulazione sui 119 capoluoghi di provincia già considerati nell'analisi climatica. L'unità di osservazione è il capoluogo e ogni territorio assume lo stesso peso, senza ponderazione per popolazione. È stata considerata una famiglia fino a quattro componenti, mantenendo invariati i requisiti economici e la composizione del nucleo. In questo modo, le differenze tra gli importi simulati dipendono esclusivamente dalla componente climatica espressa dal GGOC.

Per ciascun capoluogo è stato utilizzato il GGOC medio, ottenuto come media dei valori annuali relativi al periodo 1979-2023. La scelta di un indicatore

medio di lungo periodo riduce il peso delle anomalie riferite a un singolo anno e sintetizza il livello complessivo di stress termico estivo osservato nell'intero intervallo di analisi.

Sulla distribuzione dei 119 valori medi sono stati calcolati i percentili Q20, Q40, Q60 e Q80. I capoluoghi sono stati quindi ordinati e assegnati alle cinque fasce definite nel paragrafo 3.6: R1 fino a Q20, R2 tra Q20 e Q40, R3 tra Q40 e Q60, R4 tra Q60 e Q80 e R5 oltre Q80. A ciascuna fascia è stato associato l'importo previsto per una famiglia fino a quattro componenti: 52,20 euro per R1, 55,80 euro per R2, 67,50 euro per R3, 74,70 euro per R4 e 78,30 euro per R5.

Fascia	**Intervallo di GGOC**	**Importo (€)**	**Capoluoghi (n.)**
R1	GGOC ≤ Q20	52,20	24
R2	Q20 < GGOC ≤ Q40	55,80	24
R3	Q40 < GGOC ≤ Q60	67,50	23
R4	Q60 < GGOC ≤ Q80	74,70	24
R5	GGOC > Q80	78,30	24

Tabella 3.5 – Ripartizione dei 119 capoluoghi nelle fasce simulate per una famiglia fino a quattro componenti. Fonte: elaborazione dell'autore.

La suddivisione per quintili restituisce gruppi sostanzialmente equivalenti: 24 capoluoghi rientrano in R1, 24 in R2, 23 in R3, 24 in R4 e 24 in R5. L'importo medio non ponderato dei 119 scenari è pari a 65,68 euro, mentre la mediana è pari a 67,50 euro. La differenza tra il livello minimo e quello massimo è di 26,10 euro; l'importo associato a R5 risulta quindi superiore del 50% rispetto

a quello di R1. Questi valori descrivono il funzionamento della regola di attribuzione e non una stima della spesa effettiva delle famiglie.

4.3.1 Distribuzione territoriale del GGOC medio

La Figura 3.1 rappresenta la distribuzione territoriale del GGOC medio nei 119 capoluoghi. I valori sono espressi attraverso una scala cromatica continua dal giallo al rosso: le tonalità più intense corrispondono a livelli più elevati di stress termico estivo.

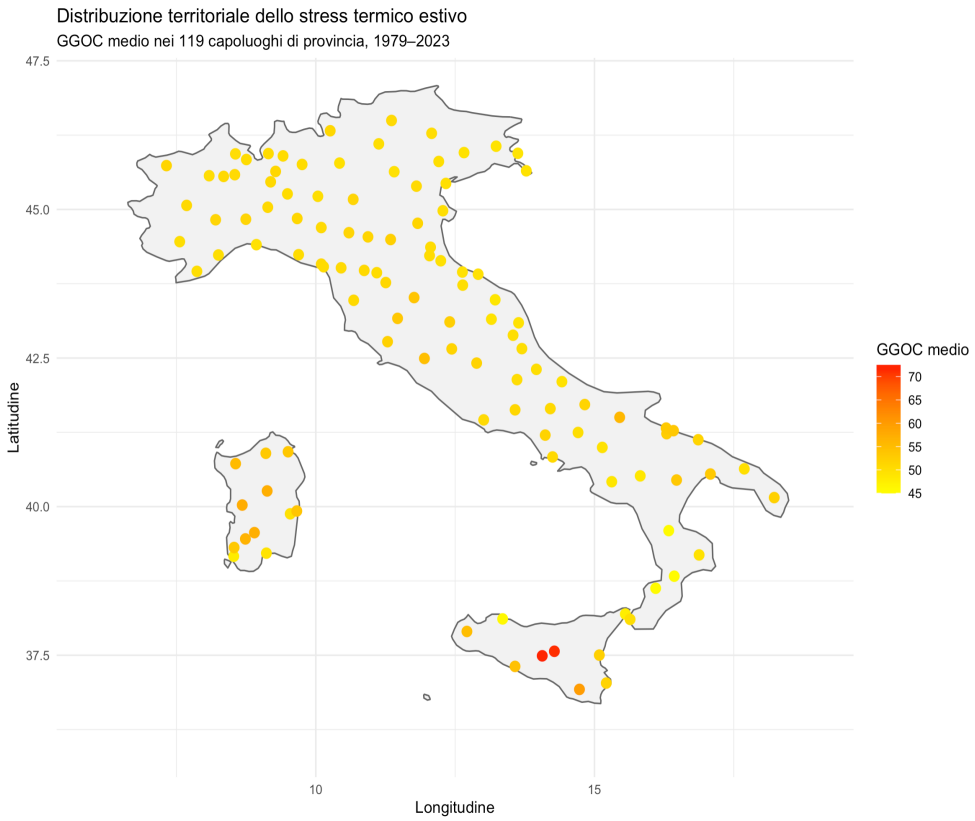


Figura 3.1 – Distribuzione territoriale del GGOC medio nei 119 capoluoghi di provincia (1979-2023). Fonte: elaborazione dell'autore.

La scala visualizzata si estende indicativamente da valori prossimi a 45 fino a valori superiori a 70. I livelli più elevati risultano concentrati in un numero

limitato di capoluoghi, con una particolare evidenza in Sicilia e, più in generale, in alcune aree meridionali e insulari. Nel Centro-Nord prevalgono valori bassi o intermedi, pur con differenze tra territori vicini. La distribuzione non segue quindi un gradiente latitudinale perfettamente uniforme, ma riflette anche la variabilità climatica locale. L'impiego del valore medio consente di leggere una condizione persistente nell'intero periodo 1979-2023, evitando che la rappresentazione sia dominata da una singola annualità particolarmente anomala. La mappa non descrive pertanto l'evento massimo né l'anno più recente, ma una misura sintetica dello stress termico accumulato nel lungo periodo.

4.3.2 Distribuzione territoriale del bonus simulato

L'applicazione delle soglie percentile e degli importi della Tabella 3.4 traduce il GGOC medio in un valore economico simulato. La Figura 3.2 mostra il risultato per una famiglia fino a quattro componenti; le cinque tonalità rappresentano gli importi associati alle fasce da R1 a R5. Le fasce di importo più elevate si concentrano soprattutto in alcuni capoluoghi delle isole e del Mezzogiorno, ma compaiono anche in aree del Centro. Le fasce inferiori e intermedie sono presenti in tutte le macroaree del Paese. Ne deriva una geografia del beneficio articolata, che non coincide automaticamente con la

sola appartenenza a una zona climatica tradizionale e che rende visibili differenze anche tra capoluoghi relativamente vicini.

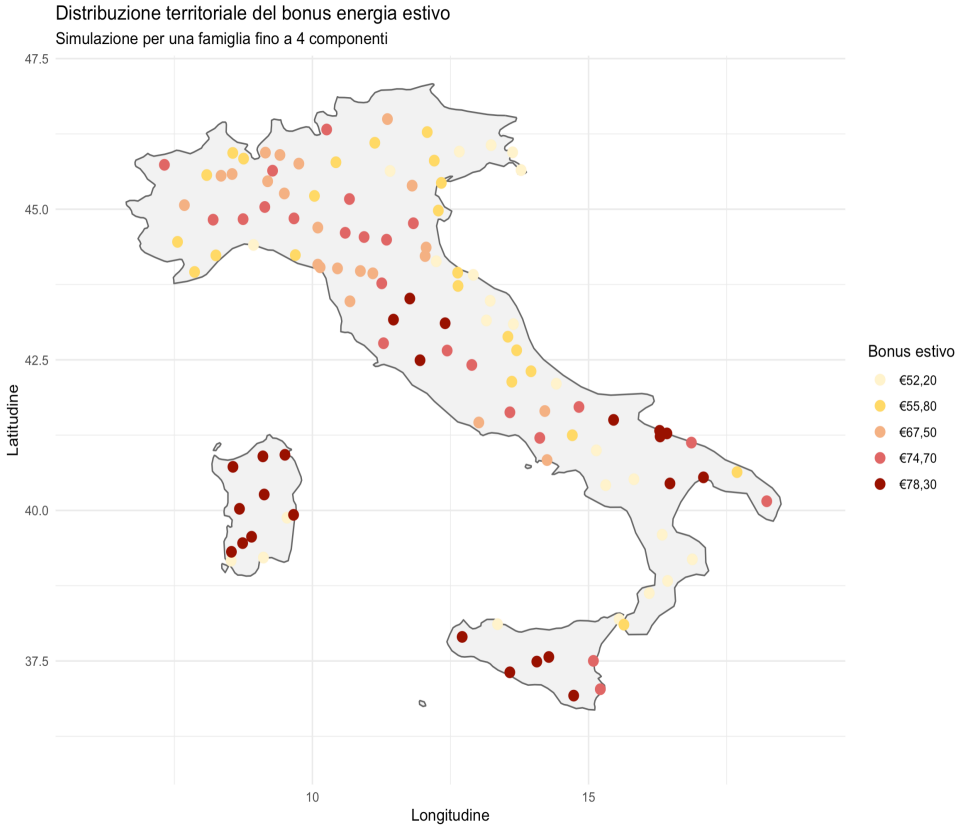


Figura 3.2 – Distribuzione territoriale del bonus energia estivo simulato per una famiglia fino a quattro componenti. Fonte: elaborazione dell'autore.

Poiché la composizione familiare e i requisiti economici sono mantenuti costanti, ogni differenza di importo deriva dalla fascia climatica assegnata. La relazione prevista dal modello risulta quindi rispettata: al crescere del GGOC il capoluogo passa a una fascia uguale o superiore e non può ricevere un importo inferiore. La seconda mappa rende immediatamente leggibile questa

corrispondenza e mostra la capacità dello schema di differenziare territorialmente il sostegno.

4.3.3 Coerenza e limiti della simulazione

La simulazione conferma la coerenza interna della proposta sotto due profili. In primo luogo, il passaggio dal GGOC alla fascia è trasparente e replicabile, poiché dipende da quattro soglie definite sulla stessa distribuzione territoriale. In secondo luogo, la progressione degli importi è monotona e impedisce che un livello maggiore di stress termico sia associato a un beneficio economico più basso. L'efficacia osservata è quindi di tipo classificatorio: il modello distingue i territori e traduce la graduazione climatica in una graduazione economica coerente.

I risultati richiedono tuttavia una lettura prudente. Le fasce sono relative e, proprio perché costruite mediante quintili, dividono i capoluoghi in gruppi quasi equivalenti anche quando le differenze assolute di GGOC sono contenute. Inoltre, la media di lungo periodo attenua la variabilità tra anni e non misura direttamente i consumi elettrici, l'efficienza degli edifici, la disponibilità di impianti di raffrescamento o la densità della popolazione. Gli importi simulati non rappresentano pertanto un diritto già vigente né una stima del costo complessivo della misura, ma un test territoriale del meccanismo proposto.

La lettura congiunta delle due mappe consente comunque di seguire l'intero passaggio logico, dall'indicatore climatico alla fascia e dalla fascia all'importo. In questo senso, la simulazione completa la proposta teorica del GGOC e ne dimostra l'applicabilità come criterio sintetico, uniforme e territorialmente differenziato.

CONCLUSIONI

Il percorso sviluppato nella tesi mostra come il cambiamento climatico non possa essere considerato esclusivamente un problema ambientale. L'aumento delle temperature e la crescente rilevanza delle ondate di calore producono conseguenze sanitarie, sociali ed economiche che si distribuiscono in modo diseguale sul territorio e tra i diversi gruppi della popolazione. La possibilità di adattarsi dipende infatti non soltanto dall'esposizione al caldo, ma anche dalle condizioni abitative, dall'efficienza degli impianti e dalle risorse economiche disponibili per sostenere i consumi di raffrescamento.

L'analisi condotta sui 119 capoluoghi di provincia nel periodo 1979-2023 evidenzia una marcata variabilità territoriale delle ondate di calore. Il numero complessivo degli eventi si colloca mediamente intorno a 37,7, con valori che variano da circa 18 a oltre 40 episodi, mentre la durata massima può raggiungere circa 22 giorni consecutivi. Tali risultati confermano che frequenza e persistenza non sono uniformi e che la sola temperatura media non è sufficiente a descrivere la complessità dello stress termico. L'impiego di soglie basate sul novantesimo percentile locale rende possibile il confronto tra territori climaticamente differenti, ma richiede cautela nell'interpretazione. Un evento viene classificato come estremo rispetto alle condizioni abituali del luogo: per questa ragione un territorio mediamente più fresco può registrare numerosi superamenti della propria soglia, mentre un'area strutturalmente più calda può

presentare temperature assolute elevate senza produrre lo stesso numero di anomalie relative. L'indicatore descrive pertanto l'eccezionalità e l'accumulo dello stress termico rispetto alla climatologia locale, non una graduatoria geografica fondata unicamente sulla temperatura assoluta. Il confronto con il bonus sociale gas evidenzia un limite dell'attuale impostazione delle misure di sostegno energetico. Il sistema vigente utilizza i gradi-giorno e le zone climatiche definite dal D.P.R. 412/1993 per rappresentare il fabbisogno di riscaldamento invernale. Questa struttura conserva la propria utilità, ma non descrive il fabbisogno di raffrescamento generato dagli episodi di caldo estremo. Ne deriva l'opportunità di affiancare, senza sostituire il criterio esistente, un indicatore specificamente rivolto alla stagione estiva. Il Grado Giorno di Ondata di Calore proposto nel lavoro risponde a tale esigenza integrando, in un'unica misura, intensità, durata e frequenza degli eventi validati. L'articolazione in cinque fasce relative, individuate mediante i quintili della distribuzione territoriale, consente di trasformare il valore climatico in un criterio amministrativo semplice e leggibile. Nel modello esplorativo l'importo cresce al crescere del GGOC, mentre i requisiti economici e la composizione familiare restano costanti. La progressività non deriva automaticamente dagli importi trimestrali del bonus gas, ma costituisce una scelta esplicita della proposta estiva. Il riferimento agli importi del bonus gas ha esclusivamente una

funzione di prima calibrazione economica. Non implica un'equivalenza fisica tra riscaldamento e raffrescamento, né assume la temperatura convenzionale di 20 °C come obiettivo estivo. I consumi effettivi dipendono dal vettore energetico, dall'efficienza degli apparecchi, dalle caratteristiche dell'edificio, dal comportamento degli occupanti e dal prezzo dell'energia. Le soglie e gli importi sono quindi interpretati come valori esplorativi, utili a illustrare la struttura della proposta e non come valori definitivi per l'applicazione.

La simulazione applicativa sui 119 capoluoghi, riferita a una famiglia fino a quattro componenti, ha reso operativo questo passaggio. La ripartizione per quintili ha prodotto cinque gruppi sostanzialmente equivalenti e un importo medio non ponderato di 65,68 euro; il valore massimo di 78,30 euro è superiore del 50% al minimo di 52,20 euro. Le mappe evidenziano una distribuzione non uniforme, con fasce elevate più frequenti in alcuni capoluoghi meridionali e insulari, ma non riconducibile a un semplice gradiente Nord-Sud. Mantenendo costanti i requisiti familiari ed economici, la simulazione isola l'effetto della componente climatica e conferma che a un GGOC più elevato corrisponde sempre un beneficio non inferiore. L'esito deve essere interpretato come una verifica della coerenza e della capacità classificatoria del modello. La costruzione per quintili è relativa alla distribuzione dei capoluoghi e il GGOC medio sintetizza il lungo periodo senza misurare direttamente il consumo

elettrico delle famiglie. La simulazione dimostra quindi il funzionamento della regola di attribuzione, mentre gli importi mantengono il carattere esplorativo già dichiarato nella proposta.

In conclusione, la proposta non costituisce un modello definitivo, ma offre una base metodologica per ampliare il concetto di vulnerabilità energetica alla stagione estiva. Integrare gli indicatori climatici nelle politiche sociali può contribuire a rendere gli strumenti di sostegno più coerenti con l'evoluzione del clima. La solidità della misura dipenderà tuttavia dalla trasparenza del calcolo, dalla qualità dei dati e dalla capacità di coniugare rischio climatico, bisogno economico e consumo energetico reale.

RIFERIMENTI

1. Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente (ARERA). (2026). Bonus sociale per disagio economico: a quanto ammontano. https://www.arera.it/consumatori/bonus-sociale/bonus-sociale-per-disagio-economico/a-quanto-ammontano
2. Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press. Link: https://global.oup.com/academic/product/principles-of-geographical-information-systems-9780198233657
3. Consorzio LaMMA . (n.d.). *Ondate di calore: quale definizione?* Retrieved May 5, 2026, from https://www.lamma.toscana.it/news/ondate-di-calore-quale-definizione
4. David Suzuki Foundation (1998), *Canada, Kyoto, and the future of climate policy* (contesto Kyoto e percezioni pubbliche).
5. Decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412. *Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, n. 242 del 14 ottobre 1993.
6. During a Heat Wave . (n.d.). *During a heat wave*. National Oceanic and Atmospheric Administration. Retrieved May 5, 2026, from https://www.weather.gov/safety/heat-during
7. Emissioni globali di CO_2 (1950–2022) mostra l'evoluzione delle emissioni da epoca moderna ad oggi, con contributi regionali. Didascalia e*missioni globali di CO_2 tra il 1950 e il 2022, con contributi per regione (fonte: Visual Capitalist / Global Carbon Project).*
8. European Commission, Joint Research Centre. (2026). Gridded Agro-Meteorological Data in Europe [Dataset]. https://doi.org/10.2905/JRC.WG6925R

9. Eurostat. (2024). Heating Degree Days and Cooling Degree Days. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Heating_and_cooling_degree_days
10. Heat and health . (n.d.). *Climate change, heat and health*. Retrieved May 5, 2026, from https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-heat-and-health
11. Hobday, A. J., Alexander, L. V., Perkins, S. E., Smale, D. A., Straub, S. C., Oliver, E. C. J., Benthuysen, J. A., Burrows, M. T., Donat, M. G., Feng, M., Holbrook, N. J., Moore, P. J., Scannell, H. A., Sen Gupta, A., & Wernberg, T. (2016). A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*, 141, 227–238. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014
12. iNews. (n.d.). *What is a heatwave? Met Office definition of extreme UK weather explained*. https://inews.co.uk/news/heatwave-what-met-office-definition-changing-extreme-uk-weather-climate-change-1545604
13. INPS. *Bonus sociale per disagio economico*. Disponibile su: https://www.inps.it
14. Intergovernmental Panel on Climate Change. (1996). *Climate Change 1995: The science of climate change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
15. Intergovernmental Panel on Climate Change. (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* (V. Masson-Delmotte et al., Eds.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896
16. IPCC (2007), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. SPM* (definizioni e concetti di vulnerabilità, rischio, resilienza).
17. ISTAT (Istituto Nazionale di Statistica). (n.d.). Dati e indicatori statistici. https://www.istat.it/
18. Lüthi, D., et al. (2008). High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. Nature, 453, 379–382. https://doi.org/10.1038/nature06949

19. Lutz, A. F., ter Maat, H. W., Biemans, H., Shrestha, A. B., Wester, P., & Immerzeel, W. W. (2016). *Selecting representative climate models for climate change impact studies: An advanced envelope-based selection approach*. *International Journal of Climatology, 36*(12), 3988–4005. https://doi.org/10.1002/joc.4608
20. Matheron, G. (1970). *The theory of regionalized variables and its applications*. Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique, École des Mines de Paris.
21. Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. *Bonus sociale energia*. Disponibile su: https://www.mase.gov.it
22. Nairn, J. R., & Fawcett, R. J. B. (2013). Defining heatwaves: Heatwave defined as a heat-impact event servicing all community and business sectors in Australia. *Bureau of Meteorology, Australia*. https://www.cawcr.gov.au/technical-reports/CTR_060.pdf
23. O'Neill & Oppenheimer (et al.), *What is a dangerous climate change?* (art. 2 UNFCCC, soglie, irreversibilità).
24. Osman, M. B., Tierney, J. E., Zhu, J., Tardif, R., Hakim, G. J., & Poulsen, C. J. (2021). Globally resolved surface temperatures since the Last Glacial Maximum. Nature, 599(7884), 239–244. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03984-4
25. Perkins, S. E., & Alexander, L. V. (2013). On the measurement of heat waves. *Journal of Climate*, 26(13), 4500–4517. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00383.1
26. Robinson, P. J. (2001). *On the definition of a heat wave*. *Journal of Applied Meteorology, 40*(4), 762–775. https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<0762:OTDOAH>2.0.CO;2
27. Samanta, S., Pal, D. K., Lohar, D., & Pal, B. (2012). Interpolation of climate variables and temperature modeling. *Theoretical and Applied Climatology*, 107, 35–45. https://doi.org/10.1007/s00704-011-0455-3
28. Schlegel, R. W., & Smit, A. J. (2018). heatwaveR: A central algorithm for the detection of heatwaves and cold-spells. R package version. Disponibile su: https://robwschlegel.github.io/heatwaveR/
29. Steadman, R. G. (1984). A universal scale of apparent temperature. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(12), 1674–1687. https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<1674:AUSOAT>2.0.CO;2

30. Toronto Public Health. (2000). *Taking our breath away: The health effects of air pollution and climate change in Toronto*.
31. United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015). *Adoption of the Paris Agreement*. https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf
32. Watson, D. F., & Philip, G. M. (1985). A refinement of inverse distance weighted interpolation.
Geo-Processing, 2, 315–327.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0146664X85900131
33. World Health Organization. (2023). *Climate change*. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health
34. World Meteorological Organization. (2015). *Guidelines on the definition and monitoring of extreme weather and climate events*.
https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3790