



BANCA D'ITALIA
EUROSISTEMA

Questioni di Economia e Finanza

(Occasional Papers)

Dinamica delle temperature e attività economica in Italia:
un'analisi di lungo periodo

di Michele Brunetti, Paolo Croce, Matteo Gomellini e Paolo Piselli

Luglio 2023

Numero

787



BANCA D'ITALIA
EUROSISTEMA

Questioni di Economia e Finanza

(Occasional Papers)

Dinamica delle temperature e attività economica in Italia:
un'analisi di lungo periodo

di Michele Brunetti, Paolo Croce, Matteo Gomellini e Paolo Piselli

Numero 787 – Luglio 2023

La serie Questioni di economia e finanza ha la finalità di presentare studi e documentazione su aspetti rilevanti per i compiti istituzionali della Banca d'Italia e dell'Eurosistema. Le Questioni di economia e finanza si affiancano ai Temi di discussione volti a fornire contributi originali per la ricerca economica.

La serie comprende lavori realizzati all'interno della Banca, talvolta in collaborazione con l'Eurosistema o con altre Istituzioni. I lavori pubblicati riflettono esclusivamente le opinioni degli autori, senza impegnare la responsabilità delle Istituzioni di appartenenza.

La serie è disponibile online sul sito www.bancaditalia.it.

DINAMICA DELLE TEMPERATURE E ATTIVITÀ ECONOMICA IN ITALIA: UN'ANALISI DI LUNGO PERIODO

di Michele Brunetti*, Paolo Croce†, Matteo Gomellini‡ e Paolo Piselli§

Sommario

Questo lavoro ricostruisce la dinamica delle temperature a livello provinciale per il territorio italiano dalla fine del XIX secolo e ne stima gli effetti sull'economia. L'analisi, condotta su un lungo arco temporale utilizzando medie decennali dei dati, permette di apprezzare l'impatto degli aumenti di temperatura imputabili a dinamiche climatiche più che a oscillazioni meteorologiche di breve periodo. Dalla ricostruzione dei dati emerge come le temperature medie in Italia siano aumentate di circa 2°C dall'inizio del Novecento, con una sostanziale omogeneità dei trend di crescita a livello territoriale. Le stime della relazione tra la crescita economica e il livello della temperatura, realizzate con due differenti metodologie empiriche (*panel* e *autoregressive distributed lags*, ARDL), mostrano come il processo di riscaldamento globale abbia avuto effetti negativi sull'economia italiana che si sono accentuati alla fine del ventesimo secolo. Tali stime sono state utilizzate per valutare i possibili impatti di ulteriori futuri aumenti di temperatura. In particolare, sulla base delle analisi effettuate, incrementi che portassero le temperature medie nel 2100 a essere più elevate di +1,5°C rispetto a oggi (scenario corrispondente a un quadro di future emissioni di gas serra "intermedio") ridurrebbero la crescita economica fino a ottenere nel 2100 un livello di PIL pro capite inferiore tra il 2,8 e il 9,5% rispetto a quello che prevarrebbe in un'ipotesi di crescita pari a quella registrata dall'inizio del Novecento di circa +2% l'anno.

Classificazione JEL: N00, O44, Q54

Parole chiave: cambiamento climatico, crescita economica, lungo periodo.

DOI: 10.32057/0.QEF.2023.0787

Indice

1. Introduzione.....	5
2. Gli effetti delle variazioni di temperatura sull'attività economica: una rassegna della letteratura empirica.....	7
3. La ricostruzione dei dati sulla temperatura in Italia dal 1861.....	11
4. Le dinamiche delle temperature nel lungo periodo.....	16
5. Analisi empirica e risultati.....	19
5.1 I modelli di analisi empirica.....	19
5.2 I risultati delle stime.....	23
6. Conclusioni.....	33
Bibliografia.....	35
Appendice 1. Dati economici storici a livello provinciale.....	38
Appendice 2. Il calcolo dei <i>degree days</i>	43

* Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima, ISAC-CNR: M.Brunetti@isac.cnr.it.

† Banca d'Italia, Servizio Struttura economica, Divisione Storia economica: paolo.croce@bancaditalia.it.

‡ Banca d'Italia, Servizio Struttura economica, Divisione Storia economica: matteo.gomellini@bancaditalia.it.

§ Banca d'Italia, Servizio Struttura economica, Divisione Storia economica: paolo.piselli@bancaditalia.it.

1. Introduzione¹

*“It is unequivocal that human influence has warmed
the atmosphere, ocean and land*
(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 2021, p.4).

Le emissioni di gas serra prodotte dall’attività dell’uomo sono il principale motore del cambiamento climatico in atto e rappresentano una sfida cruciale dei nostri tempi laddove minacciano l’equilibrio dell’ecosistema e la vita dell’uomo stesso, con impatti rilevanti sulla salute, sulla disponibilità di risorse fondamentali (acqua, cibo) e sul sistema economico. Il cambiamento climatico si traduce nel rialzo della temperatura media, nella maggior frequenza di eventi atmosferici estremi (precipitazioni intense, tempeste, inondazioni), nel dissesto idrogeologico, nell’innalzamento del livello delle acque. Dall’inizio del XX secolo, la temperatura media della superficie terrestre è aumentata a una velocità senza precedenti e la maggior parte degli scienziati concorda sul fatto che le temperature globali siano destinate ad aumentare ulteriormente (IPCC, 2021).

Le conseguenze negative di tali cambiamenti possono in prima approssimazione essere distinte in danni di mercato (*market damages*) e danni non di mercato (*non-market damages*; Goulder e Pizer 2006). I primi riguardano gli effetti economici a livello aggregato e settoriale (non solo nel settore agricolo su cui più direttamente incidono le variazioni climatiche, ma anche su altre attività nella manifattura e nei servizi) di cui può essere tentata una misurazione. I danni *non-market*, di più difficile quantificazione ma non meno preoccupanti, riguardano invece le perdite di benessere derivanti da un clima meno ospitale e più variabile che determina un degrado degli ecosistemi, una minore biodiversità.

Gli studi cross-country mostrano che gli effetti economici possono essere molto diversi tra paesi e regioni del mondo: più acuti in paesi con climi caldi, come la maggior parte dei paesi a basso reddito (cfr. Dell et al., 2012; Peri e Robert-Nicoud, 2021), ma non limitati ad essi. Molte simulazioni suggeriscono che in assenza di azioni di mitigazione i futuri aumenti di temperatura potranno determinare progressivamente un prodotto significativamente più basso rispetto a quello che si registrerebbe se si riuscisse a limitare il riscaldamento globale. I paesi più avanzati ne risulterebbero influenzati sia direttamente sia indirettamente (ad esempio per gli aumenti dei prezzi delle materie

¹ Ringraziamo Antonio Accetturo, Beppe Albanese, Matteo Alpino, Federico Barbiellini Amidei, Federico Cingano, Luca Citino, Guido de Blasio, Kamiar Mohaddes, Alessandro Palma, Roberto Torrini e tutti i partecipanti ai seminari che si sono tenuti presso la Banca d’Italia nel marzo e nel dicembre 2021, e all’Università degli Studi di Napoli Parthenope nel febbraio 2023. Il lavoro è parte del progetto di ricerca della Banca d’Italia “Gli effetti del cambiamento climatico sull’economia italiana” i cui risultati sono sintetizzati in Alpino et al. (2022). Le opinioni espresse sono esclusivamente degli autori e non coinvolgono gli istituti di appartenenza.

prime, per i possibili flussi migratori interni e internazionali)². Recenti studi mostrano inoltre come la relazione tra il livello di temperatura e l'attività economica sia caratterizzata da un profilo non lineare. Burke, Hsiang e Miguel (2015) in un'analisi realizzata a livello cross-country, ricavano una relazione a U rovesciata tra temperatura e attività economica con un picco che, nella media globale, si situerebbe in corrispondenza di una temperatura media annua di 13°C.

Il presente studio esamina in particolare gli impatti sul PIL pro capite dell'aumento delle temperature in Italia a livello provinciale lungo il XX secolo. L'incremento delle temperature può avere effetti negativi *diretti* sulla produzione nazionale attraverso un'ampia gamma di canali come la contrazione del prodotto agricolo, la riduzione della produttività dei lavoratori e la flessione degli investimenti in settori più esposti alle conseguenze del riscaldamento globale. Questo lavoro non misura *direttamente* le possibili conseguenze di eventi indotti dal riscaldamento (e.g. catastrofi naturali, incremento della mortalità, deterioramento della salute, migrazioni, ecc.), come anche, concentrandosi sostanzialmente sul PIL quale variabile di interesse, non considera esplicitamente le perdite di "stock" (danni agli edifici, ai terreni, alle infrastrutture: cfr. Ronchi, 2019, p.27). Tuttavia, di alcuni tra questi effetti si tiene *indirettamente* conto laddove si stimano gli impatti degli incrementi di temperatura sulla *crescita* economica.

L'analisi si basa sulla ricostruzione di serie storiche di temperatura media a livello provinciale dalla fine dell'Ottocento ottenute con il *metodo delle anomalie* (Brunetti et al., 2012; Di Luzio et al., 2008), a partire da una suddivisione del territorio italiano in una griglia molto fine costituita da celle aventi lato di estensione pari a circa 800 metri. Con tali dati si effettua, per la prima volta su di un arco temporale così lungo, un esame delle relazioni tra le dinamiche delle temperature (medie ed estreme) e l'attività economica, complessiva e settoriale. L'indagine econometrica utilizza diverse metodologie empiriche proposte in letteratura, opportunamente adattate all'utilizzo di dati con frequenza decennale. Quest'ultima caratteristica ci permette di superare la possibile criticità delle analisi effettuate su dati annuali, quella cioè di cogliere essenzialmente effetti di breve periodo imputabili alle dinamiche meteorologiche e non climatiche (cfr. Dell, Jones e Olken 2012, 2014; Newell, Prest e Sexton 2021; Kolstad e Moore 2020). La combinazione della variabilità temporale e di quella territoriale permette inoltre di indagare sia gli aspetti di non-linearità nella relazione tra temperatura e attività economica sia gli impatti sulla crescita nel lungo periodo che verranno, nell'ultima parte dello studio, proiettati nel futuro per esaminare i potenziali effetti del cambiamento climatico lungo il XXI secolo.

² Le diverse stime danno risultati eterogenei ma sono univoche nell'indicare effetti negativi: da un minimo di perdita del 2% di prodotto mondiale (cfr. Newell, Prest e Sexton, 2021), a una perdita in un range tra 7 e 14% con un aumento della temperatura media di 3,5°C alla fine del secolo (Kalkuhl e Wenz 2020). Danni ancora maggiori si registrerebbero nelle regioni più povere: cfr. Acevedo et al. (2020).

Il lavoro presenta nel paragrafo 2 una rassegna della letteratura empirica; i paragrafi 3 e 4 descrivono la metodologia di ricostruzione dei dati sulle temperature e l'esame della loro evoluzione nel lungo periodo; il paragrafo 5 descrive i modelli di analisi empirica utilizzati e i risultati delle stime. Il paragrafo 6 conclude.

2. Gli effetti delle variazioni di temperatura sull'attività economica: una rassegna della letteratura empirica

Risposte efficaci ai cambiamenti climatici richiedono stime accurate dei danni aggregati. Per questa ragione negli anni recenti vi è stato un incremento significativo degli studi sulle relazioni clima-economia con l'obiettivo di misurare le conseguenze del cambiamento climatico globale causato dall'uomo, anche per stimarne gli effetti futuri (Dell et al., 2014; Carleton e Hsiang, 2016; Kahn et al. 2021). A tal fine sono state prodotte dagli esperti una grande quantità di previsioni in particolare sugli aumenti delle temperature globali. Esse differiscono in base agli scenari di emissione, ma sono sostanzialmente concordi nel prefigurare ulteriori incrementi di temperatura nel futuro.

Nel recente assessment IPCC (2021, p.14) si legge come “*Global surface temperature will continue to increase until at least mid-century under all emissions scenarios considered. Global warming of 1.5°C and 2°C will be exceeded during the 21st century unless deep reductions in CO₂ and other greenhouse gas emissions occur in the coming decades*”³.

Il rapporto IPCC (2021), disegna diversi scenari di emissione (*Shared Socioeconomic Pathways, SSP*) le cui conseguenze in termini di aumento delle temperature sono riassunte nella Figura 2.1. L'area più scura degli istogrammi indica il livello di incremento delle temperature che si registra oggi in media a livello globale rispetto al periodo 1850-1900. Ciò che supera l'area più scura è l'aumento ulteriore di temperature atteso da oggi a fine secolo⁴. Nei due scenari più ottimisti (*low or very low greenhouse gas emissions, SSP1-1.9 e SSP1-2.6*), le temperature potrebbero aumentare a livello globale tra 0,5 e 1°C circa, fino ad arrivare allo scenario peggiore in cui la temperatura globale potrebbe aumentare fino a +4,5°C al 2100.

Il cambiamento climatico esercita influenze significative su una varietà di aspetti economici (e non). In questa rassegna ci concentriamo su quelli più strettamente connessi con l'obiettivo del presente lavoro, quello cioè di analizzare la relazione tra temperatura e variabili economiche aggregate. Anche se spesso restano nell'ombra i meccanismi di trasmissione, valutare gli impatti

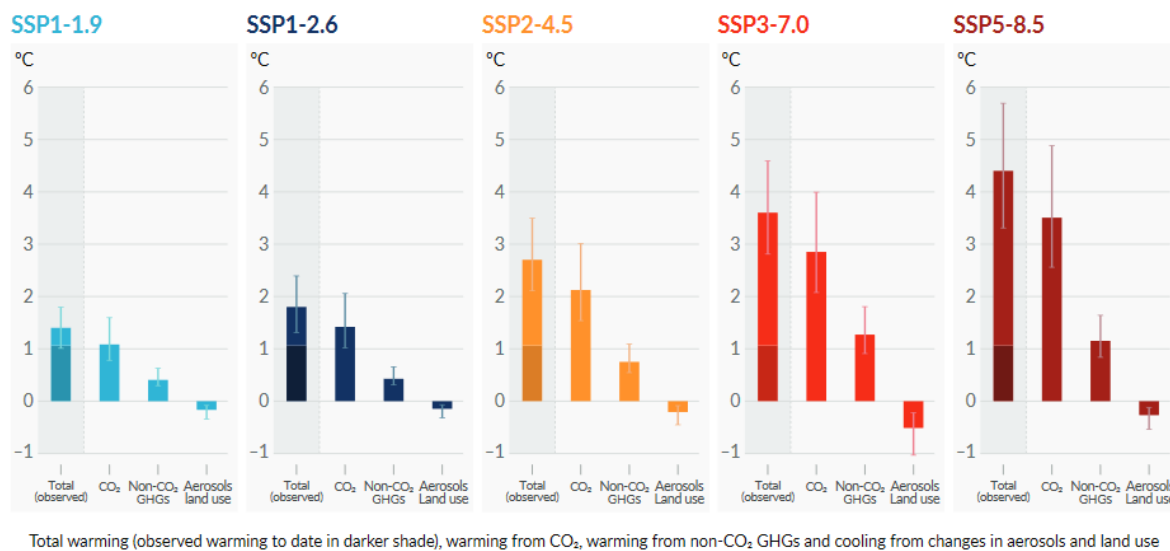
³ Gli aumenti di temperatura cui si riferisce il rapporto in questione fanno riferimento ai livelli di temperatura medi globali 1850-1900. cfr. infra, Figura 1.

⁴ In molti paesi, come l'Italia, l'aumento di temperatura rispetto al periodo 1850-1900 è già maggiore di 1°C (infra, paragrafo 4).

climatici sugli aggregati macroeconomici come il PIL procapite e la produttività, è un'importante base di partenza su cui costruire scenari ed elaborare azioni di contrasto.

Figura 2.1 Aumenti della temperatura previsti in differenti scenari SSP

(2081-2100, rispetto alla media 1850-1900)



Fonte: IPCC (2021). Gli Shared Socioeconomic Pathways (SSP) sono gli scenari descritti nel più recente rapporto dell'Intergovernmental Panel on Climate Change. Si considerano cinque "possibili futuri climatici" con diversi livelli di emissioni di gas serra (a fronte di diverse ipotesi su crescita economica mondiale, istruzione della popolazione, impatto dell'innovazione tecnologica, azioni di mitigazione). Questi scenari vanno da "emissioni molto basse" SSP1-1.9, "basse" SSP1-2.6 e "intermedie" SSP2-4.5, fino ad "alte" SSP3-7.0 e "molto alte" SSP5-8.5. A livelli di emissione differente corrispondono aumenti di temperatura differenti.

Gli economisti hanno inizialmente condotto analisi empiriche *cross-section* evidenziando una robusta correlazione negativa tra climi caldi e reddito (per una rassegna: Dell, Jones e Olken, 2014). Nordhaus (2006) stima che circa il 20% della differenza nei redditi tra paesi del continente africano e regioni più industrializzate del mondo può essere imputato a fattori dovuti alla collocazione geografica e quindi anche temperature e precipitazioni. Dell, Jones e Olken (2014) considerando un ampio insieme di paesi hanno stimato come a un grado di temperatura più elevato sia associato un reddito pro capite più basso dell'8,5 per cento⁵.

Gli studi basati su *cross-section* non considerano la variabilità temporale e colgono spesso relazioni affette da variabili omesse. Diversamente, le analisi che utilizzano dati panel sfruttando l'esogeneità della variazione nei dati meteo/clima nel tempo possono potenzialmente identificare, sotto alcune condizioni, effetti causali.

Considerando un campione di 125 paesi con dati per il periodo 1950-2003, Dell, Jones e Olken (2012) mettono in relazione il PIL pro capite con la temperatura, controllando per effetti fissi di tempo

⁵ Utilizzando nello stesso lavoro anche dati a livello di città in dodici stati degli Stati Uniti, trovano come all'interno di un singolo paese a un grado di temperatura in media più elevato si associa un reddito pro capite inferiore tra 1-2 per cento.

e paese. Essi stimano come a 1° C di temperatura più elevata sia associato un reddito pro capite inferiore dell'1,4%, risultato valido solo per i paesi a basso reddito (per i paesi più ricchi le stime hanno un basso livello di significatività). Gli stessi autori esaminano anche la relazione clima-produzione industriale e agricoltura rilevando effetti negativi non trascurabili⁶.

Burke, Hsiang e Miguel (2015), stimano una relazione quadratica tra temperatura e crescita del PIL pro capite (cfr. anche Schlenker e Roberts, 2006, 2009, per il valore aggiunto del settore agricolo⁷) e mostrano come i paesi ricchi e i paesi poveri soffrano allo stesso modo del riscaldamento globale. Nei loro risultati il PIL pro capite ha una relazione non lineare con la temperatura, con un picco a una temperatura annuale in media di 13 °C (cfr. anche Burke et al., 2018). Deryugina e Hsiang (2017) stimando anch'essi una relazione non lineare tra temperatura e livelli di PIL ottengono per i paesi in via di sviluppo impatti decisamente negativi della temperatura media giornaliera sul PIL procapite, superata la soglia dei 24-27 °C.

Diversi studi documentano gli effetti delle temperature a livello settoriale. Colacito et al. (2019) mettono in discussione l'idea secondo cui i danni economici derivanti dall'aumento delle temperature globali sarebbero limitati al settore agricolo o alle economie in via di sviluppo, mostrando che le temperature estive elevate danneggiano una varietà di settori economici negli Stati Uniti⁸. Acevedo et al. (2020) utilizzano i dati di oltre 180 economie nel periodo 1950-2015 e sfruttano la variazione annuale della temperatura per stimare l'effetto sull'attività economica aggregata e sulla produzione di vari sottosectori dell'economia nel breve e nel lungo periodo. Inoltre, studiano in che modo gli shock meteorologici influenzano gli elementi chiave della funzione di produzione. L'effetto negativo della temperatura sulla produzione nei paesi con climi caldi passerebbe attraverso investimenti ridotti, produttività del lavoro depressa, peggioramento della salute e produzione agricola e industriale ridotta⁹.

⁶ “A 1°C higher temperature in poor countries is associated with 2.66 percentage points lower growth in agricultural output. For wealthier countries, the point estimate is substantially smaller and not statistically significant, showing 0.22 percentage points lower growth in agricultural output for each additional 1°C of temperature. Negative temperature impacts on the growth of industrial value-added in poor countries. Specifically, a 1° C higher temperature in poor countries is associated with 2.04 percentage points lower growth in industrial output”. Dell, Jones e Olken (2012), p. 85.

⁷ Per quanto riguarda l'agricoltura, come evidenziato in Accetturo e Alpino (2022), la letteratura empirica sugli effetti del cambiamento climatico è ampia, in particolare con riferimento agli Stati Uniti. Gli studi più rilevanti per gli USA (Schlenker e Roberts, 2009; Deschênes e Greenstone, 2007; Burke e Emerick, 2016) rilevano che gli effetti sono altamente non lineari e la crescita della produttività (produzione per acro) diminuisce significativamente con il persistere di temperature elevate. Schlenker and Roberts (2009) in particolare individuano una soglia a partire da 29–32°C, superata la quale le temperature hanno effetti negativi sui raccolti. Accetturo e Alpino (2022), identificano un punto di svolta a circa 30°C.

⁸ Per gli Stati Uniti le evidenze mostrano che le alte temperature giornaliere riducono i raccolti delle principali colture (Schlenker e Roberts, 2009) nonché la produttività del lavoro nel settore agricolo e l'offerta di lavoro tra i lavoratori esposti alle temperature esterne tra cui i lavoratori del settore manifatturiero.

⁹ Studi empirici micro hanno mostrato l'esistenza di una relazione tra temperatura e produttività per lavori in fabbrica, call center, su impiegati e studenti. Niemelä et al. (2002) riscontrano che, nell'intervallo di temperature da 22 a 29°C, ogni

Gli stessi Acevedo et al. (2020) mostrano che lo sviluppo economico, in generale, aiuta a proteggere i paesi dagli shock climatici: le regioni calde nei paesi ad alto reddito subiscono in media meno danni all'aumento delle temperature rispetto alle regioni calde nei paesi a basso reddito. Burke e Tanutama (2019), invece, mostrano che la crescita della produzione a livello locale risponde in modo non lineare alla temperatura in tutti i paesi e l'impatto di una data esposizione alla temperatura non varia in modo significativo tra paesi ricchi e poveri: sarebbe dunque l'esposizione a temperature elevate a differenziare l'impatto e il "solo" sviluppo economico non sembrerebbe ridurre i danni del cambiamento climatico.

Per l'Italia sono state effettuate diverse valutazioni (principalmente all'interno di analisi *cross-country*) sugli effetti economici a livello aggregato. Carraro, Crimi e Sgobbi (2008) utilizzano un modello di equilibrio economico generale (CGE)¹⁰ e stimano per l'Italia come, in uno scenario di aumenti di temperatura che al 2050 risultino tra +0,9 e +1,2°C rispetto a inizio secolo, il danno potrebbe tradursi in una riduzione del PIL nel range 0,9-1,3% a fine secolo. McCallum et al. (2013), in un rapporto internazionale, utilizzano un modello CGE ed esaminano scenari climatici più severi con aumenti di temperatura fino a +3,7°C al 2100 (rispetto all'era pre-industriale) che produrrebbero un PIL inferiore del 2% già al 2050.

Con riferimento allo scenario estremo *Representative Concentration Pathways* (Rcp) 8.5 dell'IPCC¹¹, che prefigura aumenti delle temperature tra i 3,4 e i 5,7°C al 2100, Ronchi (2019), attraverso una stima econometrica che adotta una specificazione quadratica (cfr. infra, par. 5) prevede perdite di produzione che si cumulano fino a ottenere un PIL pro capite del 3,7% inferiore nel 2050 e dell'8,5% nel 2080.

Stime più recenti di Kahn et al. (2021), effettuate su 174 paesi per il periodo 1960-2014 utilizzando un modello panel dinamico a ritardi distribuiti (ARDL), calcolano per l'Italia una possibile riduzione del PIL pro capite fino al 7% nel 2100 in uno scenario senza mitigazione. Infine, in un recente lavoro sull'Italia, Olper et al. (2021) utilizzano dati relativi ai capoluoghi di provincia dal 1980 al 2014 e, nello scenario Rcp8.5, ottengono effetti di riduzione del PIL pro capite italiano al 2100 concentrati al Sud (-4%) e per il settore agricolo (il cui valore aggiunto per occupato potrebbe subire una severa

°C aggiuntivo è associato a una riduzione di circa l'1,8% della produttività del lavoro. Le giornate calde riducono l'offerta di manodopera nelle industrie esposte alla temperatura esterna, come agricoltura, silvicoltura, estrazione mineraria, edilizia e alcuni servizi pubblici. Inoltre, le alte temperature possono avere l'effetto di riduzione dei consumi disincentivando la mobilità dei consumatori. Seppänen, Fisk e Faulkner (2003) riportano una perdita di produttività di circa il 2% per ogni aumento di 1°C della temperatura oltre i 25°C.

¹⁰ Il modello è utilizzato per stimare le conseguenze degli aumenti delle temperature anche in termini di: variazione delle ore lavorate in seguito alla maggiore mortalità; variazione nei raccolti; innalzamento dei mari e desertificazione con conseguente perdita di terreno produttivo; variazioni nella domanda di energia.

¹¹ I *Representative Concentration Pathways* sono gli scenari previsivi di aumento della concentrazione di gas serra e di temperatura proposti nei rapporti IPCC precedenti l'ultimo IPCC (2021). Lo scenario Rcp8.5 non prevede azioni di mitigazione future.

riduzione, fino a -35%). Quest'ultimo lavoro ha un interesse particolare per il nostro studio poiché utilizza la stessa fonte originaria di dati per le temperature e in parte anche la medesima metodologia econometrica (Kahn et al., 2021). Tuttavia, il nostro lavoro si distingue per una profondità temporale più ampia (dalla fine dell'Ottocento), per l'utilizzo di dati relativi all'intera provincia e non solo al capoluogo, e per ricorrere a una frequenza dei dati decennale.

In conclusione, una pluralità di studi mostrano che gli aumenti di temperatura influiscono negativamente sull'economia sia nei paesi in via di sviluppo sia in quelli sviluppati, hanno un impatto su diversi settori e sulle principali variabili economiche riducendo la produttività, gli investimenti e l'offerta di lavoro (Burke et al., 2018) e persino influenzando le funzioni cognitive individuali e la salute umana (Deschênes e Greenstone, 2011). La relazione tra livelli della temperatura e livelli di attività economica risulta più spesso non lineare (Burke et al., 2015). L'Italia non sarebbe immune ma anzi, come vedremo anche più avanti, subirebbe effetti economici rilevanti dall'aumento delle temperature.

3. La ricostruzione dei dati sulla temperatura in Italia dal 1861

I valori delle temperature registrati dalle stazioni meteorologiche mancano in generale di rappresentatività su una scala locale fine essendo disponibili solo per i punti del territorio dove è presente la stazione meteo. Per ottenere dati sulle temperature su una scala locale fine è dunque necessario procedere a una particolare e complessa ricostruzione dei dati mancanti.

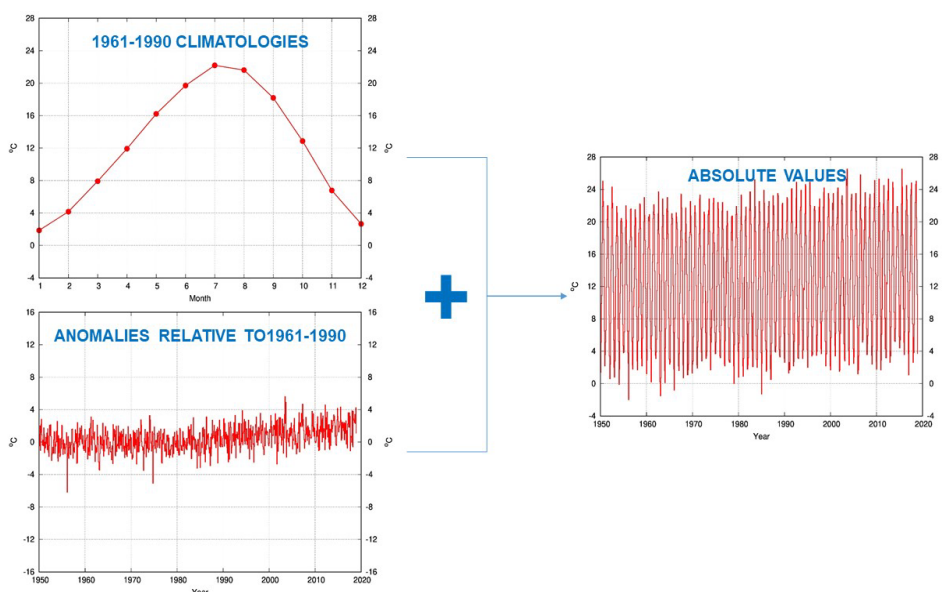
Nel nostro caso, volendo effettuare la ricostruzione per un lungo periodo storico, l'operazione presenta almeno tre criticità aggiuntive. In primo luogo, la numerosità di stazioni meteorologiche in Italia, almeno prima degli anni Sessanta del Novecento è particolarmente esigua. Secondo, il numero di stazioni non è costante nel tempo: nuove attivazioni o dismissioni di stazioni esistenti introducono problemi nella ricostruzione. Infine, i valori di temperatura registrati dalle stazioni mancano spesso di *omogeneità*, quest'ultima definita come la capacità del dato registrato di rilevare dinamiche di temperatura imputabili unicamente alle variazioni climatiche e non influenzate dalle perturbazioni legate alla storia della stazione stessa, come il cambio di strumenti di rilevazione, il miglioramento delle schermature dalla radiazione solare, lo spostamento degli strumenti o della stazione stessa in altro luogo.

Nonostante queste difficoltà, utilizzando i dati meteorologici strumentali disponibili per l'Italia relativamente agli ultimi 150 anni e una speciale tecnica di ricostruzione, è stato possibile costruire serie storiche di temperatura relativa a porzioni di territorio molto fini (celle di lato pari a 30 secondi d'arco, che alle latitudini dell'Italia corrispondono a circa 800 metri), per un totale di 474.708 punti, che sono state aggregate per ottenere dati a livello provinciale.

La tecnica di ricostruzione utilizzata è nota come *metodo dell'anomalia* (Mitchell e Jones, 2005; Brunetti et al., 2012). Il metodo dell'anomalia consiste nella ricostruzione indipendente (cioè con due dataset diversi) di due componenti, definiti *climatologie* e *anomalie*, che poi vengono combinate insieme per ottenere il valore di temperatura specifico di un punto sul territorio.

In sintesi questa metodologia si compone di tre passaggi (una rappresentazione schematica della procedura descritta è mostrata in Figura 3.1).

Figura 3.1 Schema di ricostruzione delle serie di temperatura nel lungo periodo secondo il metodo delle anomalie



Fonte: Brunetti et al. (2012)

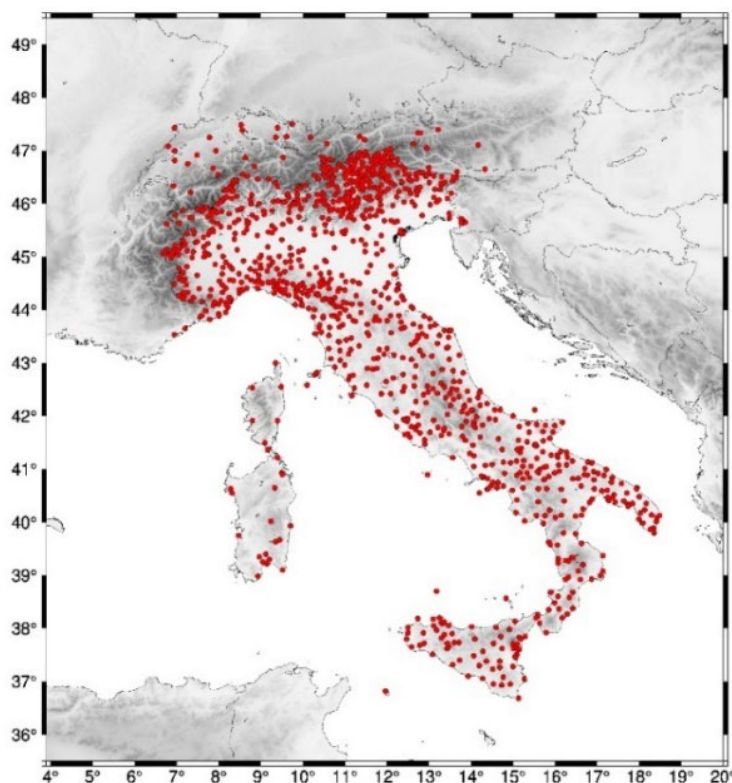
Nel primo step si calcola, per ogni cella del territorio, un ciclo mensile medio di temperature (cd. *climatologia* o *climate normal*) che può essere considerato costante nel tempo e quindi valido anche per tutti gli anni. Le climatologie devono essere calcolate per ogni punto del territorio perché caratterizzate da forti gradienti spaziali: per misurarle è necessario disporre di un elevato numero di stazioni meteorologiche limitrofe al punto del territorio di interesse, anche se disponibili per un periodo “breve” (la Figura 3.2 mostra le stazioni utilizzate per la ricostruzione delle climatologie, tutte stazioni presenti sul territorio nell’arco temporale 1960-1990).

Per ricostruire tali climatologie si adotta una tecnica di interpolazione che sfrutta la dipendenza delle normali climatiche dall’orografia e da altri parametri geografici. La tecnica di interpolazione per ricostruire la climatologia in uno specifico punto del territorio consiste in una regressione lineare della temperatura registrata da stazioni limitrofe in funzione dell’altitudine e di altre caratteristiche orografiche, in cui vengono assegnati pesi maggiori alle stazioni con parametri geografici il più possibile simili a quelli del punto per il quale si ricostruisce il dato (in termini di distanza orizzontale

e verticale, pendenza e orientamento del pendio, distanza dal mare. Per maggiori dettagli si veda Brunetti et al., 2014).

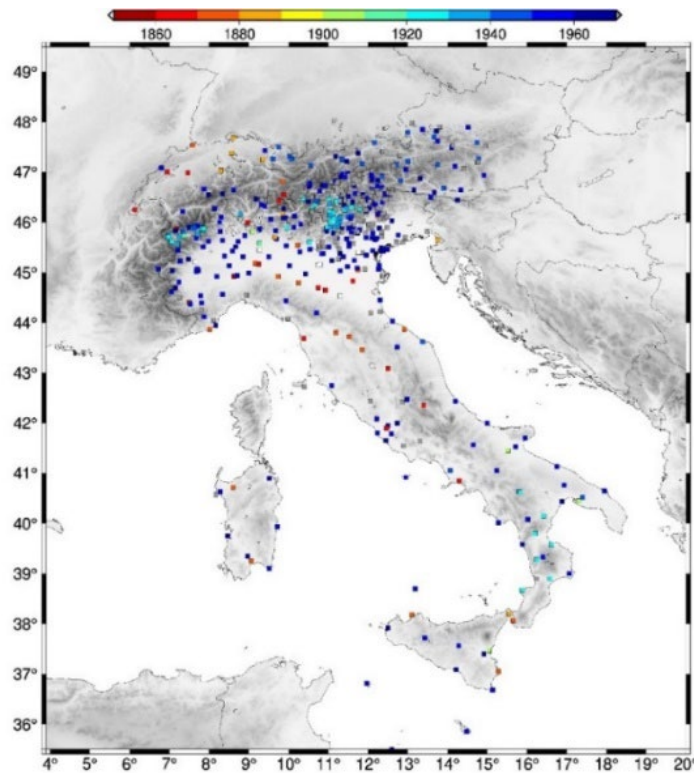
Una volta ricostruita la climatologia per un punto del territorio, per ottenere la temperatura effettiva in un singolo anno è necessario passare al secondo step e considerare le deviazioni (*anomalie*) che in quell'anno la temperatura ha avuto dal *climate normal*. Queste anomalie sono caratterizzate da una elevata *coerenza spaziale* ma da una forte variabilità nel tempo. Per cui, se da un lato è sufficiente un numero limitato di stazioni meteorologiche sul territorio per il loro computo, dall'altro è però cogente utilizzare serie disponibili per un lungo arco temporale. I valori delle serie storiche che si utilizzano per il calcolo delle anomalie inoltre, come già evidenziato, devono essere preliminarmente depurati dai segnali non imputabili alle dinamiche climatiche ma derivanti dalla storia delle stazioni stesse come cambiamenti di stazione e ubicazione degli strumenti, sostituzioni di strumenti, cambiamenti nei protocolli di osservazione (la Figura 3.3 mostra le stazioni utilizzate per la ricostruzione della componente di anomalia unitamente al loro anno di attivazione).

Figura 3.2 Distribuzione sul territorio italiano delle stazioni per la ricostruzione delle climatologie “normali”



Fonte: Brunetti et al. (2012). La barra dei colori indica l'anno di inizio della disponibilità dei dati per ogni stazione.

Figura 3.3 Distribuzione sul territorio italiano delle stazioni per la ricostruzione delle anomalie



Fonte: Brunetti et al. (2012). La barra dei colori indica l'anno di inizio della disponibilità dei dati per ogni stazione.

Infine, la combinazione del ciclo stagionale medio (*climatologia*) e delle anomalie, fornisce le serie mensili di temperatura in valori assoluti per ciascun punto del territorio (Brunetti et al., 2006; Brunetti et al., 2012; Brunetti et al., 2014).

A partire dalle serie mensili di temperatura sono stati ricostruiti anche i valori giornalieri seguendo il metodo descritto in Di Luzio et al. (2008). Con questa tecnica, si è ottenuta una serie giornaliera di temperatura minima e massima per ogni punto di un *digital elevation model* (DEM)¹² con risoluzione di 30 secondi d'arco sul territorio italiano. Le serie temporali dei punti della griglia appartenenti alla stessa provincia sono state infine aggregate in una serie media provinciale.

Dalle minime e massime giornaliere, seguendo l'approccio suggerito in D'Agostino e Schlenker (2016) sono stati calcolati i *growing* e i *killing degree days* (“gradi giorno”, *GDD* e *KDD*, rispettivamente), che rappresentano una misura della persistenza all'interno di una giornata di temperature comprese tra (*growing*) o superiori a (*killing*) determinate soglie. Queste misure sono state originariamente calcolate in relazione ai problemi che possono essere causati in agricoltura dalla frequenza di temperature estreme, ma sono state più in generale individuate come misure di

¹² Un modello di elevazione digitale (DEM nell'acronimo inglese) è una rappresentazione digitale della superficie topografica del terreno nudo, che esclude dunque qualsiasi oggetto di superficie (alberi, edifici etc.).

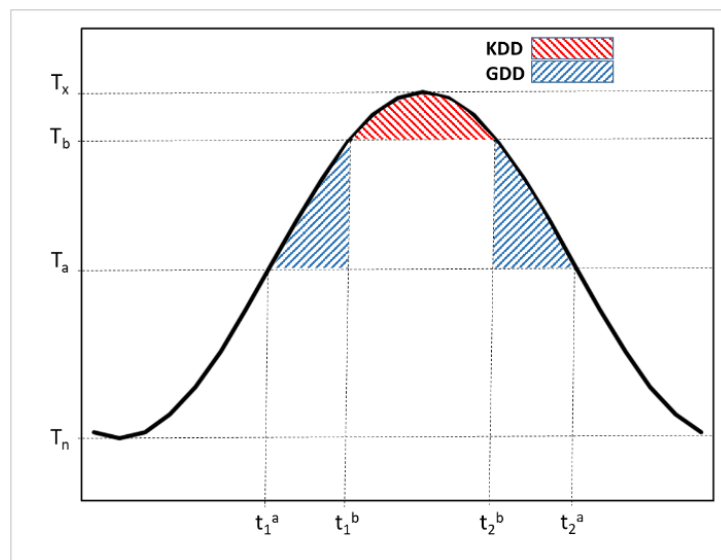
persistenza di temperature elevate che possono avere un impatto su vari aspetti dell'economia, a partire dagli effetti sulla produttività dei lavoratori o sull'integrità di alcune infrastrutture.

Per il loro calcolo la distribuzione della temperatura in un giorno è stata approssimata da una funzione sinusoidale (Snyder 1985) MANCA REF come segue:

$$T(t) = \frac{T_x + T_n}{2} - \frac{T_x - T_n}{2} \cos(t - \varphi_0) \quad (1)$$

con $t = \frac{h}{24} \cdot 2\pi$ che va da 0 a 2π nell'arco giornaliero (h è l'ora locale) e φ_0 rappresenta la fase che definisce il timing di T_x e T_n . Tuttavia, la fase è irrilevante per l'integrazione che fornisce la stima *GDD* e *KDD*. Pertanto, possiamo porre $\varphi_0 = 0$.

Figura 3.4 Derivazione dei *GDD* e *KDD* dal ciclo di temperatura giornaliero



Fonte: per le modalità di calcolo dei degree days, si veda l'Appendice 2.

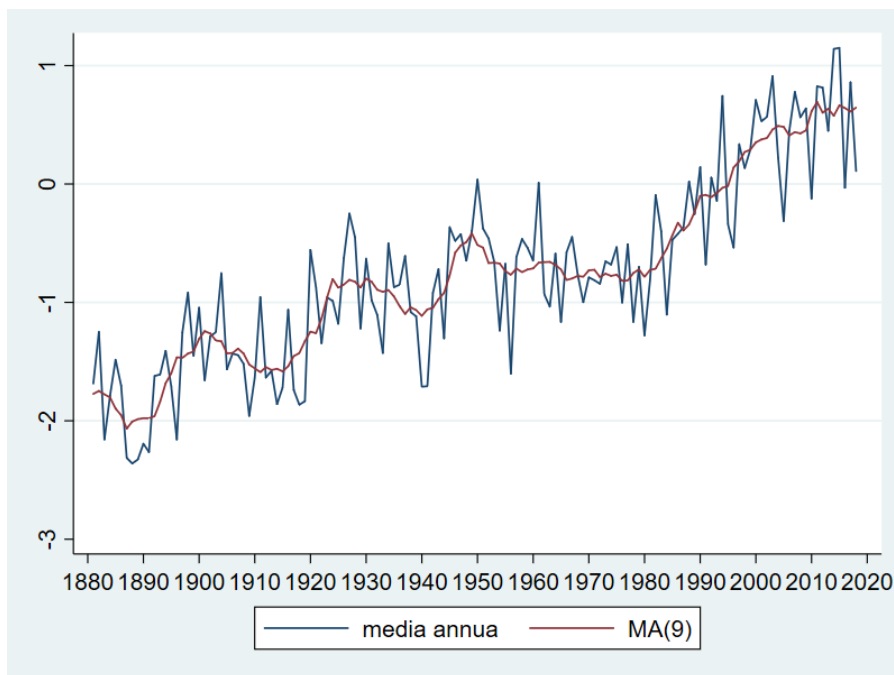
I *growing degree days* rappresentano a livello annuale il calore cumulato giornalmente con temperature comprese tra una soglia inferiore T_a e una soglia superiore T_b . I *killing degree days* sono definiti in modo simile, ma sommando le temperature al di sopra della soglia superiore T_b . In accordo con D'Agostino e Schlenker (2016), Schlenker e Roberts (2009), abbiamo impostato le due soglie rispettivamente a 5°C per la minima e a 28°C (con variazioni fino a 32°C) per la massima. I *KDD* sono semplicemente l'area sotto la curva di temperatura al di sopra della soglia T_b durante il giorno come mostrato in Figura 3.4 (area rossa), pari al risultato dell'integrazione dell'equazione 1 da t_1^b a t_2^b . I *GDD* di converso sono l'area al di sopra della soglia T_a e al di sotto della soglia T_b nell'arco della giornata (area blu in figura 3.5), ovvero l'integrazione dell'equazione 1 da t_1^a a t_1^b e da t_2^b to t_2^a .

4. Le dinamiche delle temperature nel lungo periodo

La ricostruzione dei dati sulle temperature nel lungo periodo descritta nel paragrafo 3 ci consente di tracciare l'evoluzione della temperatura in Italia dalla fine dell'Ottocento a oggi. La Figura 4.1 mostra la dinamica della temperatura media a partire dal 1881, risultato dell'aggregazione dei dati ricostruiti per il territorio italiano.

La temperatura media in Italia è aumentata di circa 2°C tra la fine dell'Ottocento e l'inizio del ventunesimo secolo. L'evoluzione non è stata uniforme nel tempo: la crescita ha avuto un episodio di pausa/inversione di 25 anni circa tra l'inizio degli anni Cinquanta e gli anni Settanta, per poi riprendere a crescere con un ritmo sostenuto.¹³

Figura 4.1 Evoluzione delle temperature medie



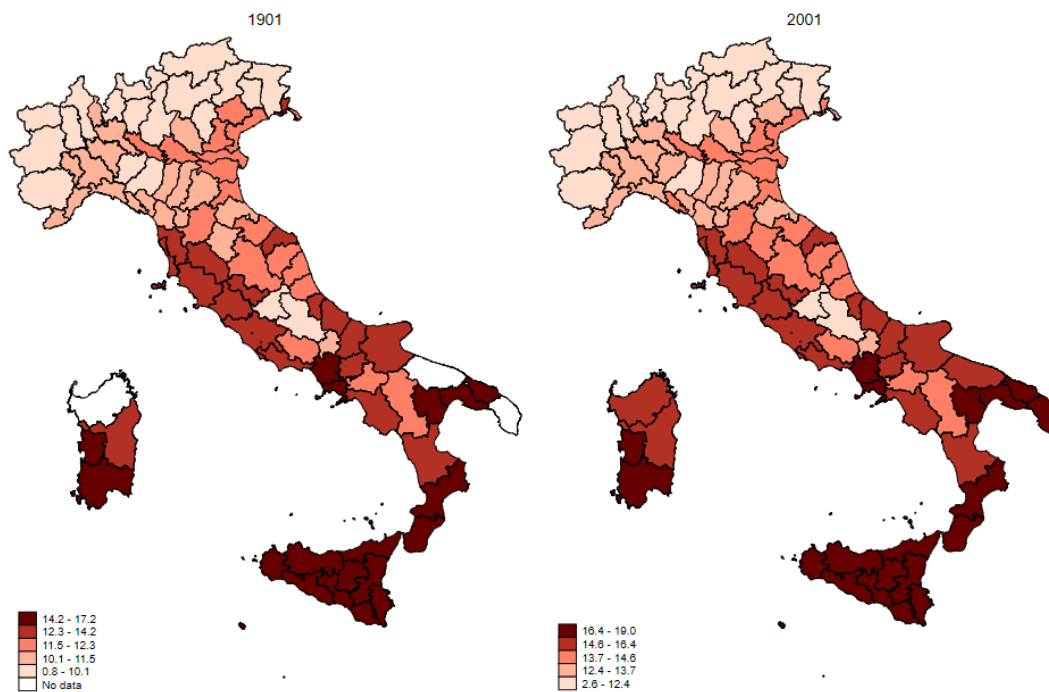
Nota: Nostra elaborazione. Evoluzione della temperatura (scostamento rispetto alla media del periodo 1990-1999) calcolata a partire dai dati provinciali. Media annua e media mobile di 9 anni.

Una misura di temperatura per tutto il territorio italiano effettua una media tra località che hanno temperature differenti. Il livello delle temperature dal punto di vista territoriale è come noto molto

¹³ Gli studiosi attribuiscono questa interruzione nelle dinamiche di crescita delle temperature registrata nel secondo dopoguerra all'aumento delle emissioni inquinanti che ha portato a una progressiva maggiore presenza di particolato (cd. *aerosol* o *anthropogenic dust*) aumentando la torbidità atmosferica con una conseguente riduzione della radiazione solare misurata al suolo. Ciò avrebbe compensato gli effetti degli aumenti di CO₂, tornati a prevalere dagli anni '80 con la riduzione di aerosol antropogenico indotta da un nuovo quadro normativo sul contenimento delle emissioni, e.g. Direttiva 80/779/CEE, del 15 luglio 1980, relativa ai valori limite e ai valori guida di qualità dell'aria per l'anidride solforosa e le particelle in sospensione. Cfr. Bartok et al. (2015); Brunetti et al. (2016), Manara et al. (2015).

eterogeneo non solo tra Nord e Sud del paese, variando significativamente anche lungo altre dimensioni (ad esempio quella Est-Ovest: Figura 4.2).

Figura 4.2. Temperature medie - provinciali nel 1901 e nel 2001

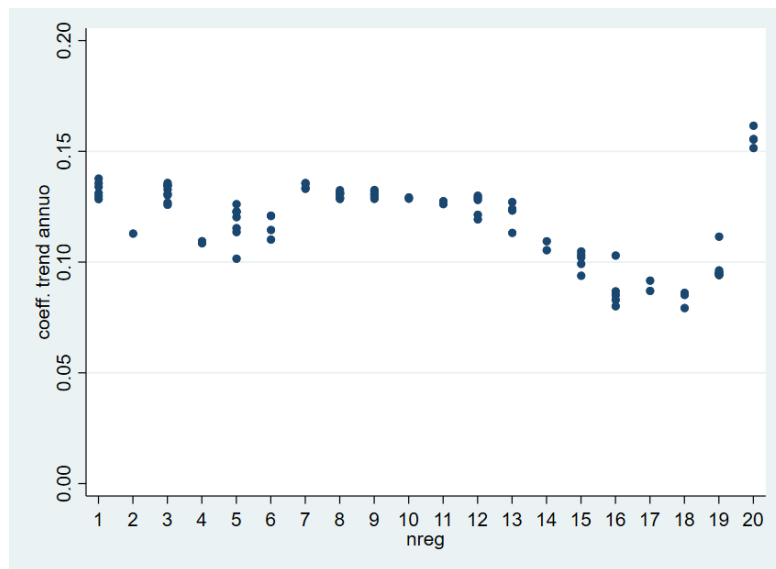


Fonte: Nostre elaborazioni. Le scale nei due grafici sono differenti ma è mantenuta uniformità cromatica per sottolineare l'uniformità nei differenziali territoriali.

Nonostante questa eterogeneità spaziale nei livelli, l'eterogeneità nei trend di crescita di temperatura nelle singole province sull'arco temporale considerato è molto ridotta come evidenziato nella Figura 4.3 in cui è riportato per le province (ordinate per regione, sull'asse X) il valore del coefficiente di una regressione tra il livello di temperatura e l'anno tra il 1901 e il 2001: $Temp_{it} = \alpha_i + \beta_i year$. Il coefficiente β_i è pari in media a 0,12 con una standard deviation contenuta. Per quanto tale eterogeneità nei trend sia ridotta, si è indagato su alcune sue possibili caratteristiche: essa non appare correlata alla differente natura orografica dei territori mentre registra un debole gradiente Nord-Sud¹⁴. Alcune stime nei paragrafi successivi (in particolare le stime ARDL: cfr. par. 5) terranno conto di trend di temperatura differenziati per provincia.

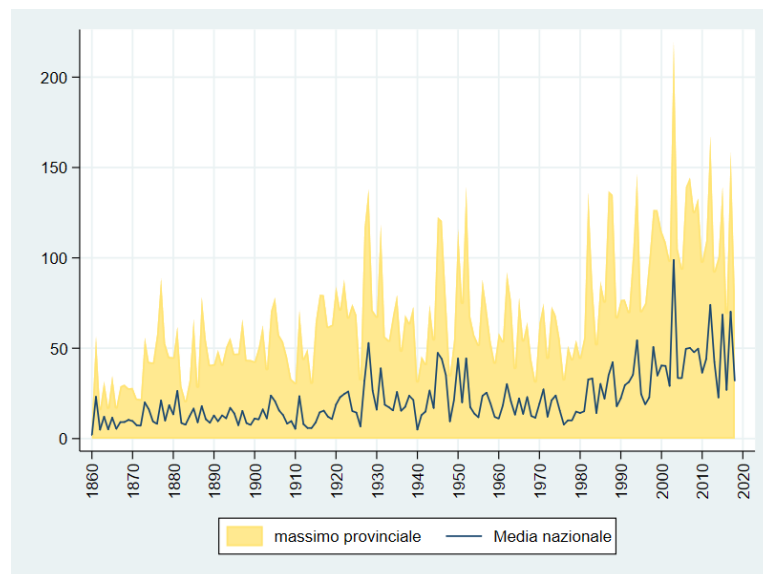
¹⁴ La regressione tra i coefficienti β_i (trend di temperatura delle singole province) e un indicatore che sintetizza la differente orografia dei territori (zone montane, zone pianeggianti, zone collinari), restituisce coefficienti non significativi (con una magnitudine molto bassa). Effettuando lo stesso esercizio con la latitudine, emerge invece una debole correlazione positiva. I motivi di questo lieve differenziale nei trend di temperatura lungo l'asse Nord-Sud del paese sono oggetto di studio tra i climatologi: Manara et al. (2015) indagano il fenomeno per il periodo 1959-2013 e avanzano l'ipotesi che esso possa dipendere in parte dalla maggiore esposizione del Sud alle polveri desertiche che creano un effetto di "dimming" limitando la radiazione solare sulla superficie terrestre.

Figura 4.3 Trend decennali di temperatura per singola provincia, 1901-2001
 (valore del coefficiente β di una regressione $Temp_{it} = \alpha_i + \beta_i \text{ year}$)



Nota: Il grafico mostra il valore del coefficiente di una regressione $Temp_{it} = \alpha_i + \beta_i \text{ year}$. I punti nel grafico sono relativi alle diverse province, raggruppate a seconda della regione di appartenenza (asse x): 1= Piemonte; 2= Valle d'Aosta; 3= Lombardia; 4= Trentino Alto Adige; 5= Veneto; 6= Friuli Venezia Giulia; 7= Liguria; 8= Emilia Romagna; 9= Toscana; 10= Umbria; 11= Marche; 12= Lazio; 13= Abruzzo; 14= Molise; 15= Campania; 16= Puglia; 17= Basilicata; 18= Calabria; 19= Sicilia; 20= Sardegna.

Figura 4.4. Killing degree days 5°-28°C



Nota: nostre elaborazioni, cfr. par. 3. La figura riporta la media nazionale e il numero massimo di degree days in ciascun anno.

Infine, nella Figura 4.4 si riporta la misura annuale dei *killing degree days* calcolata come descritto nel paragrafo precedente come somma cumulata del prodotto tra i valori di temperatura registrati ogni giorno al di sopra dei 28°C e il numero di ore al giorno in cui la temperatura è risultata essere superiore a tale valore soglia. A partire dalla metà degli anni Settanta del secolo scorso, la frequenza a livello giornaliero di temperature superiori al valore estremo considerato (in questo caso 28°C) è aumentata significativamente.

5. Analisi empirica e risultati

5.1 I modelli di analisi empirica

I modelli e le specificazioni utilizzate in letteratura per la stima empirica della relazione aggregata tra variabili climatiche ed economiche sono molteplici (cfr. Kolstad e Moore 2020). Newell, Prest e Sexton (2021) passano in rassegna circa 800 esercizi che differiscono per controlli utilizzati, variabili dipendenti, variabili esplicative, forma funzionale. Le specificazioni che utilizzeremo nelle stime riproducono alcune di quelle proposte in letteratura con adattamenti connessi al nostro esercizio in cui utilizziamo variazioni decennali e non annuali come nella maggior parte delle analisi in letteratura.

Variabili economiche e misure di temperatura

La variabile economica a cui principalmente si farà riferimento è il PIL pro capite (provinciale) ricostruito sulla base di diverse fonti storiche (cfr. Appendice 1). Come già sottolineato in apertura del lavoro, le misure basate sul PIL riescono a cogliere gli effetti degli aumenti di temperatura media attraverso meccanismi come le variazioni della produttività, degli investimenti, dell'offerta di lavoro, ma non sono in grado di registrare direttamente perdite di "stock" come ad esempio quelle relative ai "valori fondiari" (edifici, infrastrutture, terreni) derivanti da eventi indotti dal cambiamento climatico (esse potranno essere indirettamente considerate attraverso i loro effetti sulla crescita economica: cfr. *infra*). Per la temperatura si considera sia il suo livello medio decennale sia un suo scostamento da una media mobile su trenta anni, calcolate a partire da dati giornalieri. Oltre ai livelli medi, utilizziamo una misura di temperatura estrema calcolata come permanenza nell'ambito di valori di temperatura superiori a una certa soglia, cosiddetti "gradi giorno" o *degree days* (cfr. par. 3).

Controlli per determinanti non osservabili

L'assenza di variabili rilevanti (variabili omesse) nelle stime può causare un problema di endogeneità e distorcere i risultati¹⁵. I dati panel consentono di ridurre il rischio utilizzando effetti fissi. Alcuni autori (e.g. Dell, Jones e Olken 2012), nelle loro stime panel cross-country, utilizzano

¹⁵ L'altra distorsione per effetto dell'endogeneità nella relazione è quella dovuta a *reverse causality* tra aumento della temperatura e incremento dell'attività economica. Sebbene questo possa essere un problema rilevante nelle analisi *cross-country* su vaste aree del mondo, non rappresenta un rischio per la nostra analisi *within country*, potendosi considerare l'attività economica di un singolo paese ininfluente per la dinamica della temperatura dell'intero pianeta. Tuttavia, anche se la ricostruzione dei nostri dati di temperatura corregge per eventuali errori di misurazione legati alla storia delle stazioni e alla loro ubicazione, l'urbanizzazione di un territorio potrebbe modificare in parte la temperatura rilevata in un punto se quest'ultimo si trovasse al centro di un'area urbana in forte crescita, introducendo un meccanismo di *reverse causality* nella relazione. Per misurare il possibile contributo di questo fattore abbiamo regredito le temperature medie decennali del nostro campione sulla densità di popolazione delle province. Da queste stime è risultato un coefficiente di 0.0013 sull'intero periodo. Seppur molto ridotto, abbiamo depurato i dati di temperatura media per provincia costruendo una nuova misura: $tmean_urb = tmean - 0.0013 * dens$. La nuova misura $tmean_urb$ di temperatura è stata inserita nelle principali stime del lavoro e non ha prodotto effetti diversi rispetto ai risultati ottenuti in mancanza di tale correzione.

effetti fissi di paese ed effetti fissi di tempo interagiti con controlli (*dummies*) per area geografica per eliminare differenze nei trend specifici per le singole aree. Il presente lavoro si concentra sull'Italia utilizzando dati longitudinali a livello provinciale. Limitando l'analisi al territorio italiano, come mostrato nel paragrafo 3, l'eterogeneità nei trend di temperatura tra le diverse aree è trascurabile e nelle regressioni è sufficiente introdurre effetti fissi di provincia per cogliere differenze strutturali tra le aree ed effetti fissi di tempo che colgono un trend comune di aumento della temperatura nel tempo. Come mostrato nel paragrafo 4, una (lieve) eterogeneità nei trend locali si apprezza solamente tra macroaree Nord e Sud. Per controllare tale residua eterogeneità si inseriscono in alcune specificazioni trend specifici per macroarea.

Livelli e tassi di crescita.

Aumenti di temperatura possono avere impatti sul livello del PIL con effetti prevalentemente non lineari ed avere dunque effetti diversi a seconda del livello di partenza.

Stimiamo dunque con l'equazione (1) una relazione in cui y_{it} è il livello del PIL pro capite nella provincia i -esima al tempo t (anno censuario), c_i sono effetti fissi di provincia, d_t è un effetto fisso di tempo (decennio) che coglie trend comuni nella temperatura. Per cogliere le non-linearità nella relazione si introduce un termine quadratico (cfr. Burke e Emerick 2016) per le stime sugli effetti di una maggiore o minore temperatura media decennale, mentre si utilizzeranno stime lineari a tratti (*piece-wise linear*: equazione 2) per valutare attraverso la variabile dei *degree days* se una maggiore esposizione a temperature elevate oltre una determinata soglia rispetto a quelle considerate favorevoli allo sviluppo economico in generale (e in particolare alle produzioni agricole) ha effetti sulla produzione settoriale e sulla produttività:

$$y_{it} = \alpha + \beta_1 Temp_{it} + \beta_2 Temp_{it}^2 + c_i + d_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

$$y_{it} = \alpha + \beta_1 GDD_{it} + \beta_2 KDD_{it} + c_i + d_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

Per stimare gli effetti delle temperature sulla crescita economica piuttosto che sui livelli, seguiamo Dell et al. (2012) che suggeriscono di utilizzare una specificazione econometrica simile a quella proposta in Bond, Leblebicioglu, e Schiantarelli (2010), la cui forma funzionale deriva da un semplice modello teorico. In particolare, gli autori considerano un'economia in cui:

$$Y_{it} = \exp^{\beta T_{it}} A_{it} L_{it} \quad (3)$$

$$\Delta A_{it}/A_{it} = g_i + \sigma T_{it} \quad (4)$$

dove Y è la produzione aggregata, L è la popolazione, A misura la produttività del lavoro, T è la variabile meteo e g è il tasso di crescita del PIL pro capite. Nella prima equazione il coefficiente β cattura l'effetto del *livello* della variabile meteo, ad esempio, l'effetto del livello di temperatura sul PIL. Nell'equazione (2) il coefficiente σ cattura l'effetto sulla *crescita*, ad esempio attraverso l'effetto della temperatura su elementi che influenzano i tassi di crescita della produttività. Prendendo il logaritmo della funzione di produzione, differenziando e sostituendo nell'equazione (4) si ottiene l'equazione di crescita:

$$g_{it} = g_i + (\beta + \sigma)T_{it} + (-\beta)T_{it-1} \quad (5)$$

Il coefficiente associato alla temperatura ritardata misura gli effetti sul livello del PIL pro capite mentre l'impatto sulla crescita è pari alla somma dei coefficienti di T_{it} e T_{it-1} . Trasponendo questo modello in una specificazione di stima si ottiene:

$$g_{it} = \alpha + \theta_i + \theta_t + (\sigma + \beta)T_{it} + (-\beta)T_{it-1} + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

dove θ_i sono effetti fissi di provincia e θ_t sono gli effetti fissi di tempo.

Rilevante ai nostri fini è la dimensione decennale: se in una stima panel con dati annuali si coglie lo shock di temperatura di breve periodo, utilizzando medie decennali e introducendo la temperatura ritardata di un periodo, l'impatto è quello di un aumento persistente di temperatura che approssima meglio la variazione climatica.

Conseguentemente all'utilizzo di dati medi decennali è necessario un adattamento di questa specificazione al nostro caso, rispetto a quella utilizzata in letteratura. In particolare, il livello di temperatura che utilizzeremo non sarà quello puntuale di un anno ma sarà quello dato dalla media delle temperature nel decennio, per cui, ad esempio, la crescita 1991-2001 sarà messa in relazione con la media delle temperature annuali registrate nello stesso periodo. Inoltre, in un recente lavoro Kahn et al. (2021) mostrano che, introducendo la temperatura in livelli si vada di fatto ad inserire una variabile non stazionaria con un trend temporale che può distorcere e rendere inconsistenti le stime dei coefficienti, laddove la variabile dipendente è espressa invece in tassi di crescita ed è stazionaria. Come è usuale nelle stime con dati panel, il trend nei dati può essere eliminato inserendo effetti fissi

di tempo. In un prima stima, noi seguiamo questa strada, avendo verificato che l'ipotesi di un trend di crescita comune della temperatura è plausibile nel nostro caso¹⁶.

Modello ARDL

In un recente lavoro Kahn et al. (2021), per stimare gli effetti di lungo periodo degli aumenti di temperatura sul tasso di crescita del PIL pro capite (usando un panel di 174 paesi per il periodo 1960-2014), propongono come migliore specificazione un modello di tipo autoregressivo a ritardi distribuiti (ARDL). Inoltre, diversamente da altre specificazioni in cui la temperatura compare in livelli (lineari o quadratici), utilizzano come variabile indipendente una misura di temperatura definita come scostamento dalla media di lungo periodo (anziché come in genere la temperatura in livello o in differenza)¹⁷ in quanto questa è una variabile stazionaria, coerente con la stazionarietà della variabile dipendente.

Come livello di lungo periodo della temperatura Kahn et al. (2021) utilizzano in particolare la media mobile su 30 anni delle temperature medie annuali¹⁸, ottenendo così una misura coerente con la definizione di climatologia (calcolata usualmente su medie trentennali) e inoltre flessibile, variabile nel tempo, che tiene conto della nonlinearità degli andamenti della temperatura.

Nel paragrafo 5.2 utilizziamo questa loro metodologia e specificazione, adattandola ai nostri dati a frequenza decennale. Stimiamo così un ARDL (1,1) in cui a destra nell'equazione compare anche il ritardo della variabile dipendente (il tasso di crescita del PIL pro capite) e una misura della temperatura espressa come scostamento da una media mobile di 2 o 3 decenni:

$$g_{it} = \alpha + \delta g_{it-1} + \beta_1 \Delta Tempscost_{it} + \beta_2 \Delta Tempscost_{it-1} + c_i + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

dove g_{it} è il tasso di crescita del PIL pro capite, $Tempscost_i = T10_{it} - T(MM)_{it}$ è pari alla differenza tra la temperatura media decennale ($T10_t$) e la media mobile $T(MM)$ della temperatura nei 2 o 3 decenni

¹⁶ Attraverso una serie di test di stazionarietà per dati panel, abbiamo anche verificato che l'insieme delle temperature in scostamenti dalla media decennale nazionale (come conseguenza dell'inserimento dell'effetto fisso) sia stazionario.

¹⁷ Se infatti la temperatura è non stazionaria per la presenza di un trend, la specificazione in tassi di crescita della variabile dipendente implica una stima distorta del coefficiente. La non-stazionarietà delle variabili viene superata nei panel con l'introduzione di un effetto fisso temporale che tuttavia elimina soltanto il trend comune a tutte le variabili cross-section. Kahn et al. (2021) mostrano che i diversi Paesi hanno trend di temperatura molto eterogenei. Nel nostro caso, l'ipotesi di trend comune nella temperatura tra province è invece sostanzialmente corretta e nelle stime panel dei prossimi paragrafi utilizzeremo un effetto fisso di tempo. La specificazione di Kahn et al. (2021) è comunque più generale in quanto considera per ciascuna regione uno scostamento rispetto alla propria climatologia di riferimento variabile nel tempo e non uno scostamento da una media nazionale (effetto fisso temporale).

¹⁸ Nel lavoro gli autori presentano anche stime basate su medie di 20 e 40 anni, come verifica di robustezza dei loro risultati.

precedenti e Δ è l'operatore differenza tra decenni¹⁹, c_i sono gli effetti fissi per provincia e ε_{it} l'usuale termine di errore. Il coefficiente di lungo periodo in questa specificazione, che indichiamo con θ , è dato dalla somma dei coefficienti della variabile indipendente (con i suoi ritardi), divisa per $(1 - \delta)$:

$$\theta = \varphi^{-1} \sum_{l=1}^2 \beta_l, \quad \text{con} \quad \varphi = 1 - \delta \quad (8)$$

5.2 I risultati delle stime

Nel paragrafo precedente si sono descritte una serie di metodologie che saranno adottate in questo paragrafo per stimare gli impatti delle variazioni di temperatura su differenti variabili economiche. Esse si differenziano sotto diversi profili che in sintesi riguardano: la variabile dipendente espressa in livelli o in tassi di crescita; la variabile esplicativa (temperatura media, degree days); la forma funzionale (lineare o quadratica); le modalità per controllare possibili variabili omesse (attraverso effetti fissi e trend comuni o specifici per le singole celle di osservazione).

Tabella 5.1. Statistiche descrittive, 1871-2001

<i>Stat</i>	<i>Tmean</i>	<i>logProd</i>	<i>logPIL</i>	<i>logPILpc</i>	<i>dlProd</i>	<i>dlPIL</i>	<i>dlPILpc</i>	<i>KDD</i>	<i>GDD</i>
Media	12,65	2,86	7,88	8,74	0,22	0,26	0,23	23,75	2791
DevSt	2,92	0,85	1,17	0,92	0,20	0,23	0,23	22,22	612,6
Min	1,71	0,49	5,34	7,27	-0,42	-1,38	-1,4	0,00	583,6
Max	18,98	4,30	11,99	10,63	0,99	0,89	0,92	118,2	4131

Note: Tmean= temperatura media per decennio. Livelli medi negli anni di censimento, logProd: logaritmo della produttività; logPIL, logaritmo del PIL; logPILpc, logaritmo del PIL pro capite. Tassi di crescita decennali: dlProd, tasso di crescita della produttività; dlPIL, tasso di crescita del PIL; dlPILpc, tasso di crescita del PIL pro capite. GDD e KDD: Growing e Killing degree days.

La tabella 5.1 riporta alcune statistiche descrittive relative alle variabili utilizzate nelle stime. In particolare, tra il 1871 e il 2001 la temperatura media annua avrebbe registrato il valore di circa

¹⁹ Come è noto, una specificazione panel dinamica come la (7) presenta una distorsione nella stima OLS dei coefficienti. Per eliminare questa distorsione, si utilizza uno stimatore *half-jackknife*, come suggerito da Chudik et al. (2018), che corregge per la possibile endogeneità di tutti i regressori non solo la variabile dipendente ritardata, ma anche la stessa temperatura. Quest'ultimo aspetto è senz'altro rilevante nell'analisi di Khan et al. (2021) che stimano l'effetto globale su un panel di paesi la cui attività economica in aggregato influenza senz'altro la dinamica delle temperature. È meno rilevante nel nostro caso, in quanto l'attività di un singolo paese non ha effetti rilevanti sulle dinamiche globali della temperatura.

12,6°C, con un minimo di 1,7° (in quelle province del Nord Italia in cui sono prevalenti zone di alta montagna) e un massimo di quasi 19 gradi. Il tasso di crescita del PIL pro capite è stato in media di 23 punti percentuali a decennio (circa il 2% l'anno).

Stime panel

In relazione ai modelli empirici sopra descritti, si mostrano i risultati per tre diverse specificazioni della relazione tra crescita economica e temperatura: quadratica in livelli, in tassi di crescita, e *piecewise linear*, utilizzando in quest'ultima non la temperatura media ma i degree days.

Tabella 5.2. PIL pro capite e temperature: una relazione non lineare, 1871-2001

	Stima quadratica
Temp	.255**
Temp ²	-.008**
Cost	8.26***
TimeFE	X
Prov FE	X
N. oss.	1037
R ²	.821

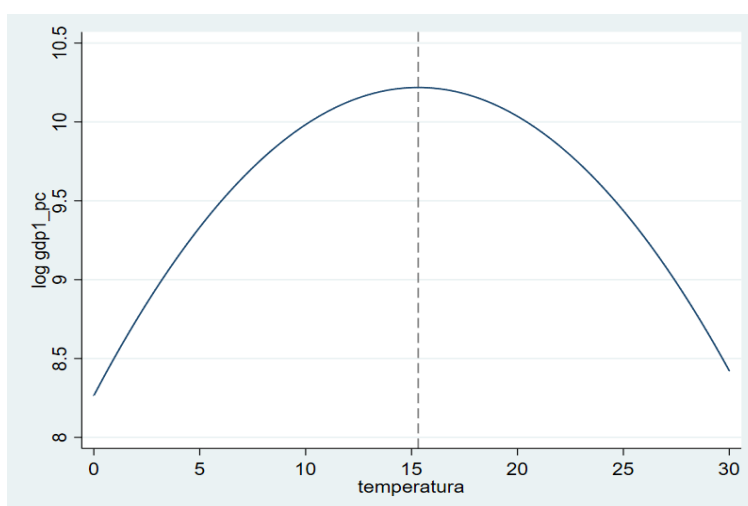
*Nota: Stime quadratiche, equazione (1); var dip.: logaritmo del PIL procapite; p-values: * p<0.1; ** p<0.05; *** p<0.01*

La Tabella 5.2 mostra i risultati delle stime in livelli per l'intero periodo considerato, 1871-2001 (equazione 1): la specificazione quadratica restituisce coefficienti significativi e la relazione si presenta a U rovesciata²⁰. La figura 5.1 riporta graficamente i risultati. Il punto di inversione della relazione tra PIL pro capite e livello di temperatura si colloca a una temperatura di circa 15,2°C²¹ (resta simile in stime che controllano per trend di temperatura *province-specific*).

²⁰ La stessa stima è ripetuta inserendo un trend specifico per ogni provincia: i coefficienti confermano la forma della relazione *hump shaped*.

²¹ Un recente lavoro per l'Italia (Olper et al., -2021) trova risultati coerenti? simili? utilizzando dati dagli anni '80 del Novecento:

Figura 5.1. Modello quadratico (PIL pro capite).



Nota: Sull'asse orizzontale; temperatura media annua. Su quello verticale: logaritmo del PIL pro capite. Stime quadratiche dalla Tabella 5.2

Rispetto ai principali risultati in letteratura per i paesi avanzati, il punto di massimo risulta spostato verso destra. Burke e Emerick (2016) ad esempio, in un lavoro cross country, registrano massimi per temperature di circa 13 gradi (ma con ampia variabilità tra paesi). Per l'Italia vi potrebbe essere un effetto di composizione dato l'asse Nord-Sud lungo il quale si sviluppa territorialmente il Paese con conseguenti livelli di temperatura significativamente diversi tra le due aree.

Tabella 5.3 Effetti dell'aumento di temperature sulla crescita del PIL pro capite

Variabili	1871-2001 A	1981-2001 B
(a) Tmean	.123**	.043
(b) Tmean (t-1)	-.224***	-.270**
Const	1.42*	3.09**
Effetto (a+b)	-.101*	-.227*
TimeFE	X	X
Prov FE	X	X
N. oss.	926	284
R ²	.666	.542

Nota: stime con metodologia Bond et al. (2010) sui tassi di crescita del PIL pro capite; p-values: * $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$.

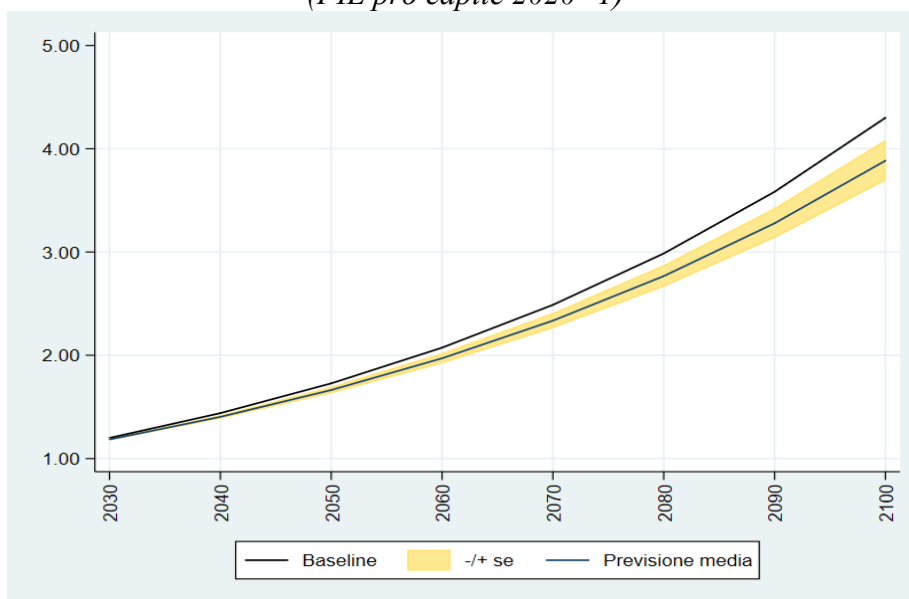
Considerando gli effetti sui tassi di crescita, le stime realizzate con la specificazione à la Bond et al. (2010) (equazione 6) restituiscono i coefficienti della tabella 5.3. Come detto nel paragrafo precedente, gli effetti sul tasso di crescita si ottengono sommando i coefficienti della temperatura

contemporanea e ritardata di un periodo. Le stime, oltre che per tutto il periodo considerato, sono effettuate anche sul sottoperiodo 1981-2001 e suggeriscono che a fine secolo vi sia stata un'intensificazione degli effetti a fronte di temperature significativamente più elevate.

Nella Tabella 5.3 il coefficiente delle stime realizzate su tutto il periodo (colonna A) è pari a 0,101²². Dal punto di vista della quantificazione degli effetti implicita in questo coefficiente, la crescita storica della temperatura media di circa 0,02 gradi l'anno avrebbe sottratto ai tassi di crescita decennali del PIL pro capite circa 1,8 punti percentuali a decennio, su 23 punti percentuali di crescita complessivi in media a decennio.

Questi coefficienti delle stime di lungo periodo sono stati utilizzati per costruire scenari dell'impatto di aumenti di temperatura previsti nel futuro²³. Per gli esercizi di quantificazione e di proiezione degli effetti delle temperature sul periodo 2020-2100, utilizzeremo solo i coefficienti riferiti all'intero arco temporale esaminato per coerenza tra l'orizzonte di stima con quello di previsione.

Figura 5.2. L'impatto degli aumenti di temperatura sulla crescita del PIL pro capite nel lungo periodo
(PIL pro capite 2020=1)



Fonte: nostre elaborazioni. A partire da una crescita del 2% annuo (ipotesi baseline, linea nera), in uno scenario di aumento della temperatura di +2°C al 2100 il livello del PIL pro capite risulterebbe alla fine del secolo il 9,5 per cento (linea blu) inferiore (valore centrale delle stime: in giallo l'intervallo di confidenza)

²² Risultati ulteriori non riportati nel lavoro mostrano come complessivamente l'impatto risulti superiore al Nord, evidenza questa che sembra invertirsi se si considera solamente l'ultimo periodo 1981-2001 (per il quale tuttavia le stime separate Nord e Sud non sono significative).

²³ Come già evidenziato, nella formulazione degli scenari che seguono si utilizzano i coefficienti stimati per il periodo 1871-2001 che si ritengono più idonei per la valutazione degli effetti di lungo periodo futuri rispetto all'utilizzo dei coefficienti stimati su sottoperiodi più brevi.

La figura 5.2 mostra i possibili effetti sul PIL pro capite delle variazioni di temperatura attese, calcolati sulla base delle stime effettuate per il passato. In particolare, a partire da un'ipotesi di incremento del PIL pro capite del 2% l'anno (equivalente a quanto registrato in media nel periodo 1871-2001), se la temperatura crescesse in modo costante di 1,5°C tra oggi e il 2100, la dinamica del prodotto sarebbe più contenuta rispetto all'ipotesi del suo aumento al trend storico, con una riduzione del tasso di crescita annuale di 0,13 punti percentuali. Al 2100 il PIL pro capite risulterebbe, considerando il valore centrale delle nostre stime, del 9,5 per cento inferiore (con un range di valori possibili tra -5 e -14 per cento, ottenuti variando il coefficiente di stima di \pm una deviazione standard).

Stime ARDL

La tabella 5.4 riporta le stime del modello ARDL nelle due specificazioni secondo il differente scostamento del livello di temperatura nel lungo periodo rispetto alla media mobile calcolata su 20 anni (pannello a), o rispetto alla media mobile su 30 anni (pannello b). L'intestazione di colonna indica l'anno iniziale del periodo di stima (l'anno finale è sempre il 2001), per cui l'ampiezza del periodo di stima (e corrispondentemente il numero delle osservazioni) si riduce progressivamente da sinistra a destra. In ciascuna tavola è riportato anche il coefficiente di lungo periodo, come ricavato dall'equazione (8). Esso indica l'effetto di un aumento permanente di un grado nello scostamento tra la temperatura nel decennio t e la media storica nei 2/3 decenni precedenti. Prendendo ad esempio la colonna 1 del pannello (a), un coefficiente di -0,70 indica che un aumento permanente di un decimo di grado nella differenza tra la temperatura e il suo livello storico in ciascun decennio, implica una riduzione del tasso di crescita del PIL pro capite di $(0,7/10)*100 = 7$ punti percentuali nel lungo periodo.

A partire dalle stime ottenute, anche in questo caso, come per l'analisi panel, si effettua un esercizio di simulazione per descrivere il possibile impatto dell'aumento di temperatura sul PIL pro capite previsto nei prossimi decenni²⁴.

Consideriamo l'aumento di temperatura sulla base dell'evoluzione della sua media storica e sulla base delle previsioni di aumento futuro. Lo scostamento cumulato tra la dinamica storica della temperatura e quella attesa, moltiplicato per i coefficienti del modello, ci dà l'effetto del cambiamento climatico previsto sul livello del PIL pro capite alla fine del periodo.

Il risultato dipende crucialmente non solo dalla dimensione dei coefficienti (sintetizzati dal moltiplicatore di lungo periodo), ma anche dallo scostamento tra la dinamica storica della temperatura osservata nel campione e quella prevista. Per l'Italia si considera uno scenario coerente con le

²⁴ L'esercizio di simulazione replica, seppur con dati e profondità temporale differenti, quello in Kahn et al. (2021).

previsioni RCP 4.5, che prevede per il nostro paese un aumento di temperatura tra il 2000 e il 2100 tra 1,8 e 3,1 °C²⁵. Questa dinamica si confronta con quella osservata nei dati storici del nostro periodo di stima 1901-2001 che è di circa +1°C in cento anni. Nel nostro esercizio, in particolare, utilizziamo il lower e l'upper bound dello scenario RCP4.5: nel primo caso supponiamo che l'aumento di temperatura tra oggi e il 2100 sia di 1,5°C; nel secondo caso che sia di 2,5°C. La Tabella 5.5 e la figura 5.3 riportano gli impatti in termini di riduzione di PIL pro capite nei due scenari alla fine del periodo (2100), sulla base dei coefficienti stimati nella Tabella 5.4. Nello scenario di moderato aumento della temperatura, l'effetto negativo sul PIL pro capite sarebbe, considerando la media degli effetti stimati al variare del periodo di stima e della media mobile considerata, pari al 2,8%; nello scenario di maggior intensificazione del riscaldamento l'effetto negativo risulterebbe in media del 8,6 per cento²⁶.

Le stime effettuate a partire da diversi punti nel tempo tra il 1901 e il 1961 nella Tabella 5.4, mostrano una riduzione progressiva degli impatti fino al 1951 e un incremento significativo per la stima dal 1961. Ciò suggerisce che possono aver agito possibili processi di adattamento e successiva intensificazione. L'adattamento può derivare dal processo di sviluppo che si traduce nell'adozione di innovazioni tecnologiche, come anche nel cambiamento strutturale e nel mutamento nella composizione delle attività economiche verso produzioni con diversa sensibilità al riscaldamento. L'intensificazione può emergere dalle caratteristiche di non linearità nella relazione tra temperature e attività economica, tali per cui superata una certa soglia di temperatura gli effetti negativi del *global warming* possono risultare più marcati. Ferma restando la necessità di ulteriori approfondimenti sul tema, i risultati per il caso italiano sono compatibili con un'interpretazione di una prima fase, fino agli anni Settanta, in cui hanno prevalso fattori di adattamento dell'economia, e di una seconda fase successiva in cui si sono manifestati fenomeni di intensificazione legati possibilmente alla risposta non lineare dell'attività economica al crescere della temperatura.

²⁵ Gli incrementi di temperatura non sono in realtà definiti su un singolo anno, ma come differenza tra la media 1971-2000 e quella 2071-2100.

²⁶ Le nostre stime indicano un impatto maggiore di quello riportato da Kahn et al. (2021) per l'Italia (pari a -7%), utilizzando questo stesso modello nello scenario RCP 8.5. Ciò è essenzialmente dovuto alla differenza nella stima del trend storico, poiché le stime in Kahn et al. (2021) sono basate sul periodo più recente (1960-2014) e implicano un trend storico di +0.028°C all'anno (2,8 gradi per secolo), molto più accentuato di quello da noi stimato sull'intero ventesimo secolo. Di conseguenza, la differenza tra scenario previsto e la dinamica storica della temperatura è più piccola in previsione, con un minore impatto negativo sul PIL pro capite.

Tabella 5.4 Stime panel ARDL (1,1) e moltiplicatori di lungo periodo

a) Scostramento della temperatura rispetto alla media storica su 20 anni

	Anno iniziale di stima						
	1901	1911	1921	1931	1941	1951	1961
Var % PIL _{pc,t-1}	0.73 (0.000)	0.70 (0.000)	0.67 (0.000)	0.36 (0.000)	0.28 (0.000)	0.25 (0.000)	-0.10 (0.057)
Diff(stmean1020)	-0.18 (0.000)	-0.15 (0.000)	-0.16 (0.000)	-0.14 (0.000)	-0.11 (0.004)	-0.17 (0.000)	-0.54 (0.000)
Diff(stmean1020 _{t-1})	-0.01 (0.848)	-0.18 (0.000)	-0.12 (0.001)	-0.32 (0.000)	-0.31 (0.000)	-0.25 (0.000)	-0.51 (0.000)
Moltiplicatore di lungo periodo	-0,70	-1,10	-0,85	-0,72	-0,58	-0,56	-0,95
Osservazioni	756	719	673	617	558	499	420

p-values in parentesi

b) Scostamento della temperatura rispetto alla media storica su 30 anni

	Anno iniziale di stima						
	1901	1911	1921	1931	1941	1951	1961
Var % PIL _{pc,t-1}	0.75 (0.000)	0.65 (0.000)	0.65 (0.000)	0.38 (0.000)	0.30 (0.000)	0.21 (0.000)	-0.07 (0.245)
Diff(stmean1030)	-0.25 (0.000)	-0.26 (0.000)	-0.25 (0.000)	-0.16 (0.000)	-0.14 (0.000)	-0.23 (0.000)	-0.60 (0.000)
Diff(stmean1030 _{t-1})	0.03 (0.228)	-0.16 (0.000)	-0.11 (0.003)	-0.24 (0.000)	-0.21 (0.000)	-0.20 (0.000)	-0.44 (0.000)
Moltiplicatore di lungo periodo	-0,88	-1,20	-1,03	-0,65	-0,50	-0,54	-0,97
Osservazioni	756	719	673	617	558	499	420

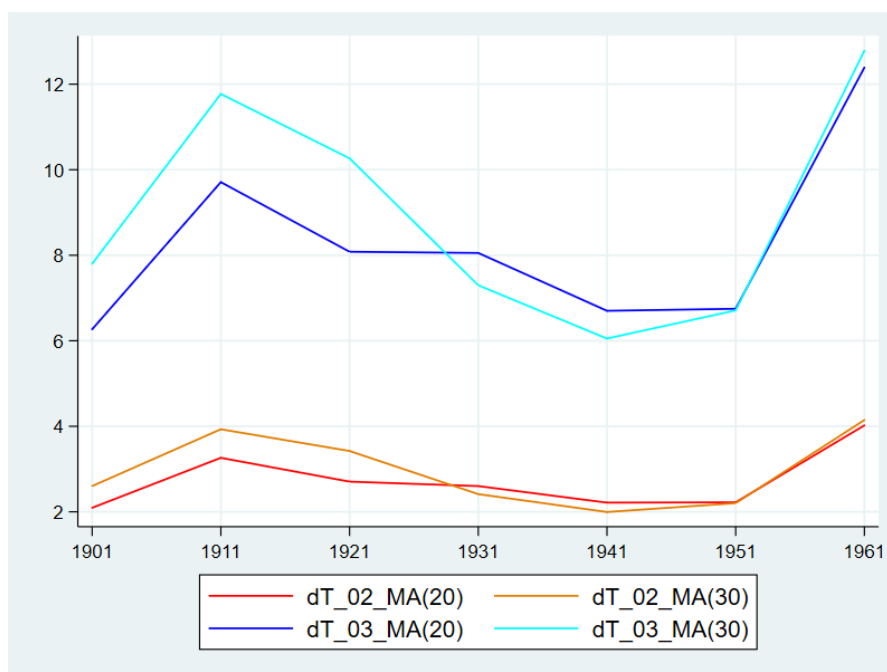
p-values in parentesi

Nota: l'equazione stimata è quella indicata nel testo come equazione (7). Var % PIL_{pc,t-1} è la crescita decennale del PIL pro capite con un decennio di ritardo; Diff(stmean1020) e Diff(stmean1030) rappresentano la differenza della temperatura rispetto alla sua media calcolata su 2 o 3 decenni precedenti.

Tabella 5.5 Perdita di PIL pro capite al 2100
(percentuale)

Anno iniziale stima:	1901	1911	1921	1931	1941	1951	1961
Trend di temperatura previsto: +0,2 per decennio							
Media mobile 20 anni	2,1	3,3	2,7	2,6	2,2	2,2	4,0
Media mobile 30 anni	2,6	3,9	3,4	2,4	2,0	2,2	4,1
Media delle stime:							
2,8							
Trend di temperatura previsto: +0,3 per decennio							
Media mobile 20 anni	6,3	9,7	8,1	8,1	6,7	6,7	12,4
Media mobile 30 anni	7,8	11,8	10,3	7,3	6,1	6,7	12,8
Media delle stime:							
8,6							

Figura 5.3 Perdita percentuale di PIL pro capite al 2100
(per anno iniziale di stima e media mobile)



Nota: dT_02 indica uno scostamento della temperatura dal trend di 2 decimi di grado per decennio; dT_03 uno scostamento di 3 decimi di grado. MA(20)/(30) indicano il numero di anni (20 o 30) su cui è calcolato il trend a media mobile.

Degree days

Dopo aver analizzato gli effetti delle variazioni di temperatura media esaminiamo adesso gli impatti che possono derivare dalla persistenza di temperature elevate. L'analisi considera come variabile esplicativa i *degree days* calcolati come descritto nella sezione 3 del lavoro. Nelle tabelle e nei grafici che seguono si presentano i risultati utilizzando come soglia limite 28°C (le stime non variano sensibilmente se si utilizzano soglie massime superiori, fino ai 32°C).

Come mostrato nella Figura 4.4, la frequenza nell'esposizione a temperature elevate è aumentata nel recente passato. Le tabelle che seguono riportano il coefficiente stimato utilizzando l'equazione (2) per il periodo successivo al 1980. La tabella 5.6 mostra il risultato di stime che mettono in relazione i livelli delle variabili dipendenti (in questo caso, PIL, PIL pro capite e produttività) con i *degree days*, considerando effetti fissi di tempo, di provincia, e un trend specifico per provincia. La figura 5.5 mostra i coefficienti della stima lineare per i tratti inferiori e superiori a 28°C. Si ottengono risultati negativi e significativi solo per i *killing degree days* (non significativi per i *growing degree days*) in base ai quali aumenti del 2,4 per cento nella frequenza di temperature superiori a 28°C (pari al loro incremento medio annuo registrato nel periodo 1981-2001) avrebbero fatto diminuire il PIL, il PIL pro capite e la produttività del lavoro in un range di valori tra lo 0,22 e lo 0,1 per cento annuo.

**Tabella 5.6. Effetti dell'aumento nella persistenza di temperature elevate (>28°C):
*Degree Days***

	1981-2001
<i>PIL</i>	
KDD	-1.19**
GDD	-.049
<i>PIL pc</i>	
KDD	-.813**
GDD	-.026
<i>Produttività</i>	
KDD	-.560***
GDD	0.01
TimeFE	X
Prov FE	X
FExTrend	X
N. oss.	1036

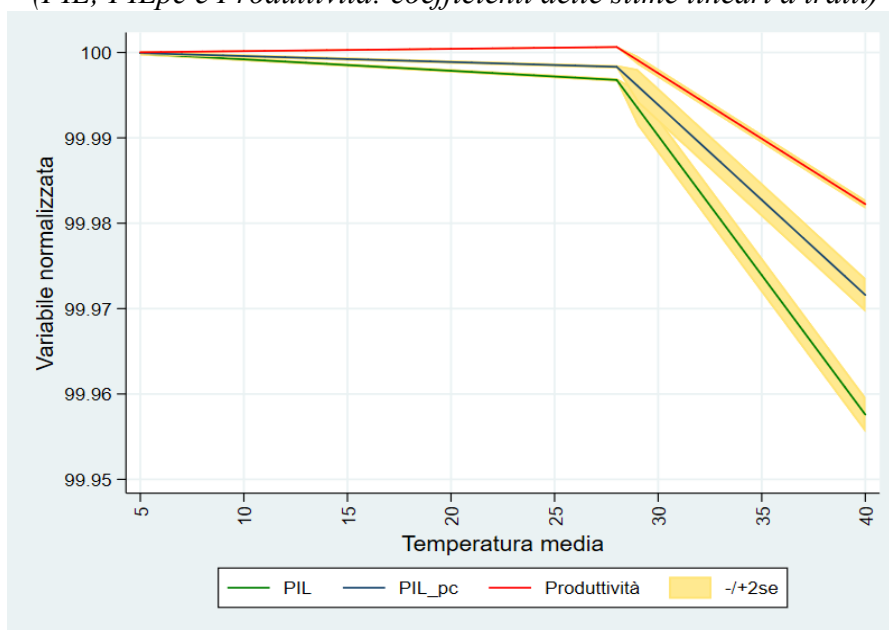
Nota: stima equazione (2); p-values: * $p < 0.1$; ** $p < 0.05$; *** $p < 0.01$

Analizzando i settori Agricoltura, Industria e Servizi separatamente (Tabella 5.7 e Figura 5.6, con stime relative al periodo 1981-2001), il settore agricolo risulta il più colpito: un aumento dei *KDD*

pari alla loro variazione media annua nel periodo 1981-2001 avrebbe ridotto il valore aggiunto agricolo dello 0,60 per cento l'anno, la produttività dello 0,65 per cento. Per l'industria e i servizi l'impatto sul valore aggiunto sarebbe stato inferiore in termini percentuali, con una riduzione del valore aggiunto pari rispettivamente a 0,30 e 0,24 per cento (-0,45 e -0,03 per cento gli effetti sulla produttività).

Figura 5.5. Degree days: effetti aggregati (>28°C), 1981-2001

(PIL; PILpc e Produttività: coefficienti delle stime lineari a tratti)



Nota: rappresentazione grafica dei coefficienti di una stima lineare a tratti tra temperatura e PIL, PIL pro capite e produttività.

Tabella 5.7 Gli effetti dell'aumento nella persistenza di temperature elevate (>28°C) per macro settori.

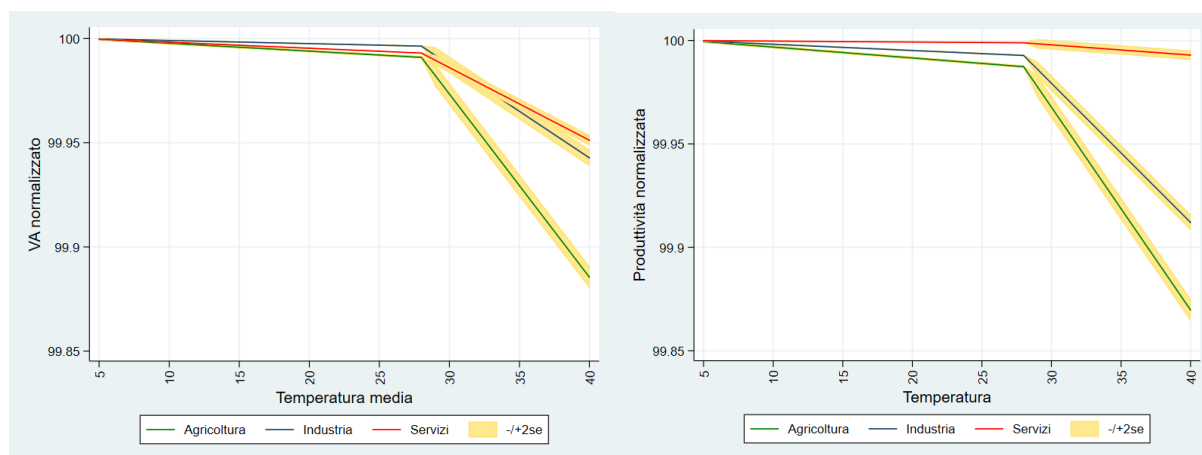
	1981-2001 Valore aggiunto	1981-2001 Produttività
Agricoltura		
KDD	-3,21***	-3.58***
GDD	-.137	-.192
Industria		
KDD	-1,63*	-2.46***
GDD	-.055	-.110
Servizi		
KDD	-1,27	-.181
GDD	-.017	-.017
TimeFE	X	X
Prov FE	X	X
FExTrend	X	X
N. oss.	285	285

Nota: growing (GDD) and killing (KDD) degree days; p-values: * p<0.1; ** p<0.05; *** p<0.01.

Figura 5.6 Degree days: effetti settoriali (>28°C), 1981-2001

Valore Aggiunto

Produttività



Nota: rappresentazione grafica dei coefficienti di una stima lineare a tratti tra temperatura e valore aggiunto settoriale (sx) o produttività (dx).

6. Conclusioni

Il contributo di questo lavoro è duplice. In primo luogo, si sono ricostruite le serie storiche delle temperature per il territorio italiano a livello provinciale dalla fine del XIX secolo. In secondo luogo, si è effettuata una stima degli effetti economici degli aumenti di temperatura registrati tra il 1871 e il 2001, sulla cui base si sono valutati i possibili impatti degli incrementi di temperatura attesi nel futuro.

Due elementi chiave qualificano gli esercizi empirici di questo lavoro. Da un lato, l'esame realizzato su medie decennali dei dati permette di identificare gli effetti degli aumenti di temperatura più persistenti, imputabili a dinamiche climatiche piuttosto che a variabilità meteorologica annuale; dall'altro, l'analisi su un lungo periodo storico può incorporare fenomeni di adattamento o intensificazione degli effetti di aumenti delle temperature, producendo risultati più idonei a essere proiettati nel futuro su un orizzonte temporale anch'esso di lungo periodo. L'adattamento può derivare dal processo di sviluppo che si è tradotto (e si tradurrà) nell'adozione di innovazioni tecnologiche, come anche nel cambiamento strutturale e in un mutamento nella composizione delle attività economiche verso produzioni con differente sensibilità al riscaldamento. L'intensificazione può emergere dalle caratteristiche di non linearità nella relazione tra attività produttiva e temperature tali per cui, superate determinate soglie, gli effetti economici negativi del *global warming* possono risultare più marcati.

Le temperature medie in Italia sono aumentate di circa 2°C dall'inizio del secolo scorso con una sostanziale omogeneità dei trend di crescita a livello territoriale. Questi aumenti hanno avuto un impatto negativo sulla crescita del PIL pro capite, accentuatosi alla fine del Novecento parallelamente all'incremento delle temperature nel periodo 1981-2001. Le analisi fanno registrare in aggregato una relazione quadratica tra la temperatura e il livello del PIL pro capite a forma di U rovesciata con un punto di inversione a circa 15°C.

Nell'ipotesi che la sensibilità del PIL pro capite all'incremento delle temperature si attesti nel futuro sui livelli medi stimati per il Novecento, si sono proiettate in avanti le analisi realizzate per il passato e calcolati i potenziali effetti al 2100 del riscaldamento atteso nei prossimi decenni.

Sulla base delle analisi effettuate con metodologie panel e ARDL, uno scenario di emissioni con aumenti di temperatura di +1,5°C al 2100 potrebbe frenare la crescita del PIL pro capite riducendone l'incremento annuo in un range tra 0,04 e 0,13 punti percentuali, fino a determinarne a fine secolo un livello tra il 2,8 e il 9,5 per cento inferiore rispetto a quello che prevarrebbe se crescesse al suo trend storico. Queste valutazioni, che per la natura dell'esercizio effettuato sono necessariamente connotate da un grado di incertezza elevato, risultano coerenti con quelle di altri studi realizzati a livello *cross-country*.

Infine, oltre alle temperature medie, lo studio ha esaminato l'impatto della persistenza di temperature elevate. Si è rilevato come l'incremento nella frequenza di temperature giornaliere superiori a 28°C abbia influito negativamente sull'attività economica, in particolare negli ultimi 20 anni del Novecento quando tale frequenza si è acuita significativamente, incidendo principalmente sul settore dell'agricoltura ma con effetti negativi registrati anche nell'industria e nei servizi.

Bibliografia

- Accetturo, A. e M. Alpino (2022), *Climate change and Italian agriculture: Evidence from weather shocks*, *Questioni di economia e finanza*, n. 756, Banca d'Italia.
- Acevedo, M., M. Mrkaic, N. Novta, E. Pugacheva e P. Topalova (2020), *The Effects of Weather Shocks on Economic Activity: What are the Channels of Impact?* *Journal of Macroeconomics*, n.65, issue C.
- Alpino, M. L. Citino, G. de Blasio e F. Zeni (2022), *Gli effetti del cambiamento climatico sull'economia italiana. Un progetto di ricerca della Banca d'Italia*, *Questioni di economia e finanza*, n. 728, Banca d'Italia.
- Antonielli, E. (1872), *Annuario statistico delle provincie italiane per l'anno 1872 compilato sopra documenti parlamentari e delle pubbliche amministrazioni*, Tipografia Tofani.
- Bartok, B., M. Brunetti, J. A. Guijarro, M. Z. Hakuba, J. Calbó, S. Mystakidis, A. Sanchez-Lorenzo e M. Wild (2015), *Reassessment and update of long-term trends in downward surface shortwave radiation over Europe (1939–2012)*, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 120, Issue18: 9555-9569, September.
- Bond, S., A. Leblebicioglu e F. Schiantarelli (2010), *Capital accumulation and growth: a new look at the empirical evidence*, *Journal of Applied Econometrics*, 2010, vol. 25, issue n. 7: 1073-1099.
- Brunetti, M., M. Maugeri, F. Monti e T. Nanni (2006), *Temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenised instrumental time series*, *International Journal Of Climatology* 26: 345–381.
- Brunetti, M., G. Lentini, M. Maugeri, T. Nanni, C. Simolo e J. Spinoni (2012), *Projecting North Eastern Italy temperature and precipitation secular records onto a highresolution grid*, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 40, 9–22.
- Brunetti, M., M. Maugeri, T. Nanni, C. Simolo e J. Spinoni (2014), *High-resolution temperature climatology for Italy: interpolation method intercomparison*, *International Journal of Climatology*. 34, 1278-1296.
- Brunetti, M., A. Celozzi, V. Manara, M. Maugeri, A. Sanchez-Lorenzo e M. Wild (2016), *Detection of dimming/brightening in Italy from homogenized all-sky and clear-sky surface solar radiation records and underlying causes (1959–2013)*, *Atmospheric Chemistry Physics*, 16, 11145–11161.
- Burke, M. e K. Emerick (2016), *Adaptation to Climate Change: Evidence from US Agriculture*, *American Economic Journal: Economic Policy* 8(3): 106–40.
- Burke, M., S.M. Hsiang e E. Miguel (2015), *Global Non-Linear Effect of Temperature on Economic Production*, *Nature* 527(7577): 235–39.
- Burke, M., W. M. Davis, N. S. Diffenbaugh (2018), *Large potential reduction in economic damages under UN mitigation targets*, *Nature*, n. 557, pp. 549–553.
- Burke, M. e V. Tanutama (2019), *Climatic Constraints on Aggregate Economic Output*, NBER Working Paper n. 25779, April.
- Carleton, T.A., S.M. Hsiang (2016), *Social and Economic Impacts of Climate*, *Science*, vol. 353, n. 6304.
- Carraro C, J. Crimi e A. Sgobbi (2008), *La Valutazione economica degli Impatti dei Cambiamenti Climatici in Italia e delle relative Misure di adattamento*, in Carraro C. (a cura di), *Cambiamenti climatici e strategie di adattamento in Italia*, Il Mulino, Bologna.
- Chudik, A., M. H. Pesaran, e J. C. Yang (2018), *Half Panel Jackknife Fixed Effects Estimation of Panels with Weakly Exogenous Regressors*, *Journal of Applied Econometrics* 33 (6): 816-836.

- Colacito, R., B. Hoffmann e T. Phan (2019), *Temperature and Growth: A Panel Analysis of the United States*, Journal of Money, Credit and Banking, Vol. 51, Issue 2-3, March-April 2019, pp. 313-368.
- D'Agostino, A.L. e W. Schlenker (2016), *Recent weather fluctuations and agricultural yields: implications for climate change*, in Agricultural Economics, Volume 47, Issue S1, pp. 159-171, November.
- Dell, M., B. F. Jones e B. A. Olken (2014), *What do we learn from the weather? The New Climate-Economy Literature*, Journal of Economic Literature 52 (3): 740–98.
- Dell, M., B. F. Jones e B. A. Olken (2012), *Temperature Shocks and Economic Growth: Evidence from the Last Half Century*, American Economic Journal: Macroeconomics 4 (3): 66–95.
- Deryugina, T. e S.M. Hsiang (2017), *The Marginal Product of Climate* NBER Working Papers 24072,
- Deschênes, O. and M. Greenstone (2007), *The Economic Impacts of Climate Change: Evidence from Agricultural Output and Random Fluctuations in Weather*, American Economic Review 97(1): 354-385.
- Deschênes, O. and M. Greenstone (2011). *Climate Change, Mortality, and Adaptation: Evidence from Annual Fluctuations in Weather in the US*, American Economic Journal: Applied Economics, 3 (4): 152-85.
- Di Luzio, M., G.L. Johnson, C. Daly, J.K. Eischeid e J.G. Arnold (2008), *Constructing retrospective gridded daily precipitation and temperature datasets for the conterminous United States*, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 47, pp. 475–497.
- Felice, E. (2019), *The roots of a dual equilibrium: PIL, productivity, and structural change in the Italian regions in the long run (1871–2011)*, European Review of Economic History, Volume 23, Issue 4, November 2019, Pages 499–528.
- Goulder L. H. e W.A. Pizer (2006), *The Economics of Climate Change*, NBER Working Paper n. 11923
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2021), *Summary for Policymakers*, in *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, J.B.R. Matthews, S. Berger, M. Huang, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou, E. Lonnoy, T. K. Maycock, T. Waterfield, K. Leitzell, N. Caud.
- Kahn, M.E., K. Mohaddes, R.N.C. Ng, M.H. Pesaran, M. Raissi e J. Yang (2021), *Long-term macroeconomic effects of climate change: A cross-country analysis*, Energy Economics, Elsevier, vol. 104(C).
- Kalkuhl, M. and L. Wenz (2020), *The impact of climate conditions on economic production. Evidence from a global panel of regions*, Journal of Environmental Economics and Management, vol. 103, issue C.
- Kolstad, C.D. e F.C. Moore (2020), *Estimating the Economic Impacts of Climate Change Using Weather Observations*, Review of Environmental Economics and Policy, Vol. 14, Number 1, Winter.
- Manara, V., M. C. Beltrano, M. Brunetti, M. Maugeri, A. Sanchez-Lorenzo, C. Simolo, and S. Sorrenti (2015), *Sunshine duration variability and trends in Italy from homogenized instrumental time series (1936–2013)*, Journal of Geophysics Research, 120, 3622–3641, doi:10.1002/2014JD022560.
- McCallum, S., T. Dworak, A. Prutsch, N. Kent, J. Mysiak, F. Bosello, J. Klostermann, A. Dlugolecki, E. Williams, M. Konig, M. Leitner, K. Miller, M. Harley, R. Smithers, M. Berglund, N. Glas, L. Romanovska, K. van de Sandt, R. Bachschmidt, S. Voller, e L. Horrocks (2013). *Support to the development of the EU Strategy for Adaptation to Climate Change: Background report to the Impact*

- Assessment, Part I—Problem definition, policy context and assessment of policy options*. Environment Agency Austria, Vienna.
- Mitchell, T. D. e P.D. Jones (2005) *An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high resolution grids*. *International Journal of Climatology*, 25: 693–712.
- Nordhaus, W. D. (2006), *Geography and Macroeconomics: New Data and New Findings*, *Proceedings of the National Academy of Science* 103(10): 3510–17.
- Newell, R.G., B.C. Prest e S.E. Sexton (2021), *GDP-Temperature relationship: Implications for climate change damages*, *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 108, July
- Niemelä, J. Railio, M. Hannula, S. Rautio, and K. Reijula (2002), *The effect of air temperature on labour productivity in call centres - a case study*, in *Energy and Buildings* 34: 759–764.
- Olper, A. Maugeri, M. Manara, V. e V. Raimondi (2021), *Weather, climate and economic outcomes: Evidence from Italy*, *Ecological Economics*, Elsevier, vol. 189(C).
- Peri, G. e F. Robert-Nicoud (2021), <https://voxeu.org/article/economic-geography-climate-change>.
- Ronchi E. (2019), *Relazione sullo stato della Green Economy*, European Institute on Economics and the Environment in collaborazione con la Fondazione per lo sviluppo sostenibile e Italy4Climate.
- Seppänen, O., W. Fisk, and D. Faulkner (2003), *Cost benefit analysis of the night-time ventilative cooling in office building*, Lawrence Berkeley National Laboratory. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/3j82f642>
- Schlenker W e M.J. Roberts (2006) *Nonlinear effects of weather on corn yields*, *Review of Agricultural Economics*, vol. 28, pp.391–398.
- Schlenker, W. e M.J. Roberts (2009), *Nonlinear Temperature Effects Indicate Severe Damages to US Crop Yields under Climate Change*, *PNAS* 106(37): 15594–98.

Appendice 1. Dati economici storici a livello provinciale

Per analizzare la relazione tra crescita economica e cambiamento climatico effettuiamo anche una ricostruzione con elevata profondità storica del PIL, del PIL pro capite e della produttività del lavoro a livello provinciale e per ciascun macrosettore economico (agricoltura, industria, servizi). L'unica fonte di dati storici provinciali è Unioncamere (2011), che forniva dati sul valore aggiunto dal 1861 a confini d'epoca negli anni di censimento. La documentazione sulla metodologia utilizzata appare tuttavia scarsa, per cui tale ricostruzione non appare pienamente affidabile e non può tener conto di ricostruzioni della contabilità nazionale realizzate negli ultimi anni. Più recentemente Felice (2019) ha proposto una ricostruzione territoriale su base regionale a confini attuali delle variabili di occupazione, valore aggiunto, produttività per gli anni censuari dal 1871 al 2011. In questo lavoro abbiamo considerato la cornice regionale di Felice come benchmark dei nostri dati economici storici e abbiamo utilizzato il dato provinciale per ripartire il valore regionale di riferimento.

I passi della ricostruzione sono stati i seguenti.

a) Il valore aggiunto/PIL pro capite di Felice è stato riportato a valore aggregato sulla base della popolazione regionale. Il dato di Felice è in euro a prezzi costanti 2011.

b) I valori aggregati calcolati in a) sono stati ripartiti per provincia sulla base del valore aggiunto provinciale di Unioncamere.

c) I valori aggregati così stimati sono stati trasformati in pro-capite sulla base della popolazione provinciale Unioncamere.

d) Felice fornisce una stima della produttività del lavoro settoriale per ciascuna regione. Quest'ultima è assunta costante tra le province all'interno della stessa regione.

e) La produttività del lavoro totale per provincia è calcolata come media pesata in ciascuna provincia della produttività regionale settoriale, usando come peso la quota di occupazione in ciascun settore in ciascuna provincia.

f) Dal 1951 Unioncamere fornisce il valore aggiunto per settore e provincia.

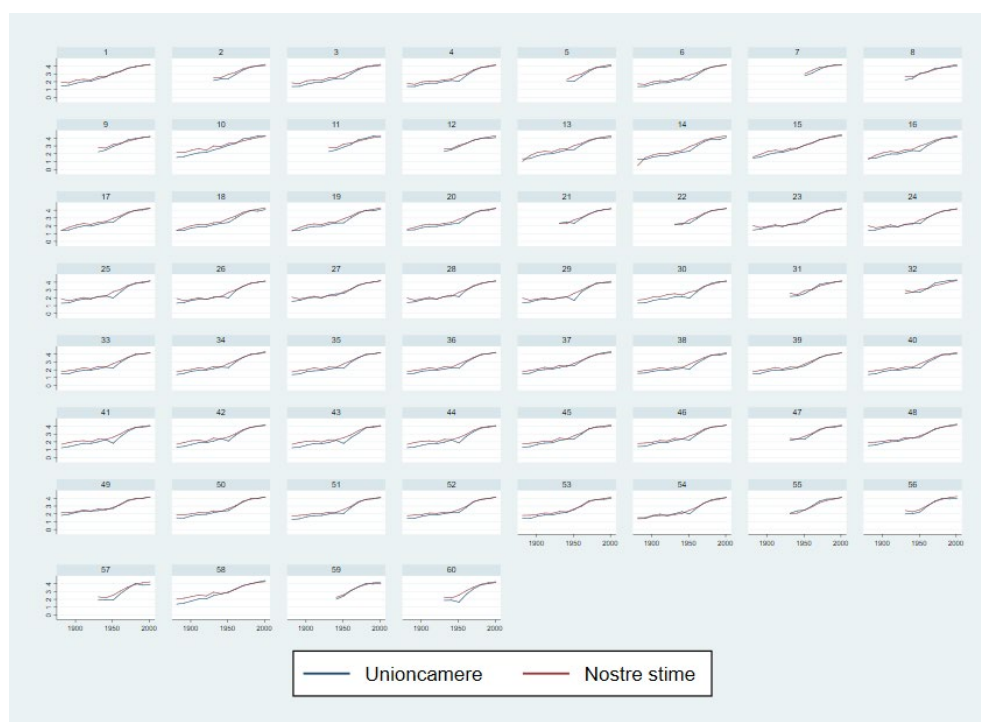
g) Usando la popolazione attiva per regione e settore tratta dai Censimenti 1951-2001, dalla produttività per addetto regionale d) si ottiene il valore aggiunto settoriale regionale.

h) Il valore aggiunto settoriale regionale in f) viene ripartito sulla base del valore aggiunto settoriale provinciale in e) e diviso per la corrispondente popolazione attiva per ottenere la produttività del lavoro settoriale per provincia.

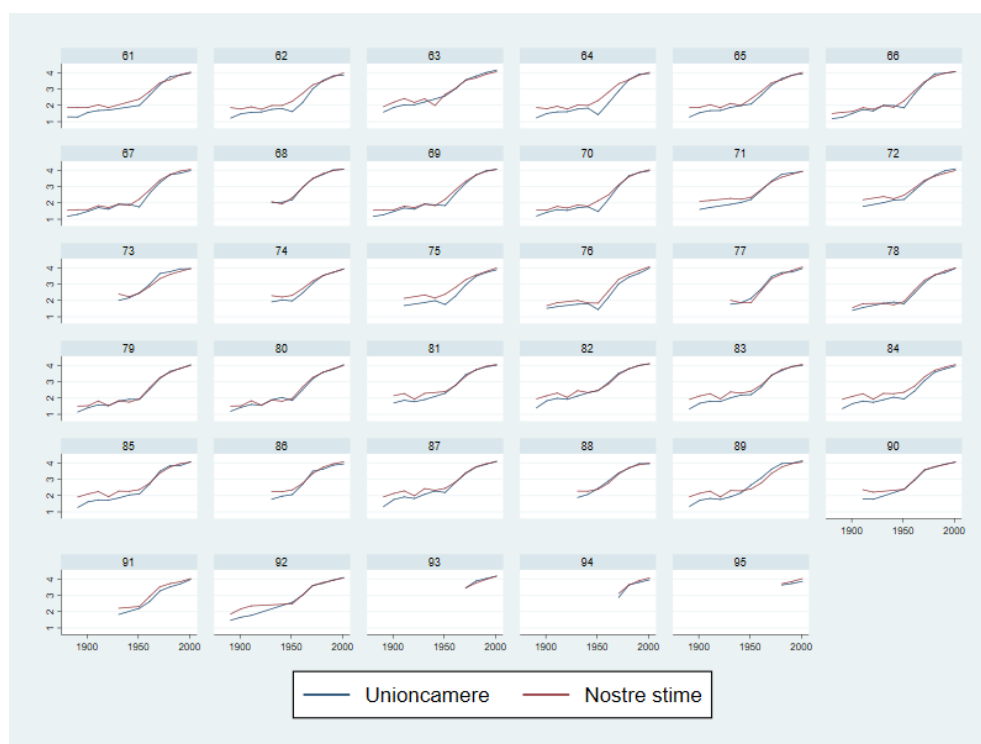
Infine, i valori Unioncamere sono nominali e in lire. La trasformazione in euro a prezzi 2011 è ottenuta usando il deflatore implicito del PIL ricostruito in Baffigi (2013).

Figura A1. Produttività del lavoro (logs).

a) Centro-Nord



b) Mezzogiorno



Nota: Produttività del lavoro. Valori a prezzi costanti 2011. I valori nominali Unioncamere sono stati deflazionati con il deflatore implicito del PIL in Baffigi (2013). Il numero in alto in ciascun box indica la provincia secondo la classificazione Istat.

La figura A1 confronta i valori della produttività per occupato per ciascuna provincia secondo l'Unioncamere con quelli della nostra ricostruzione. Sebbene la ripartizione provinciale della nostra ricostruzione usi i dati Unioncamere il livello in ciascun decennio di censimento è completamente indipendente, essendo tratto da Felice (2019). Nonostante ciò, le due ricostruzioni appaiono largamente sovrapponibili anche nel dettaglio provinciale e anche nei periodi meno recenti.

La provincia come unità di osservazione.

La provincia come unità di osservazione fornisce un dettaglio territoriale sufficientemente ricco per analizzare la varietà delle caratteristiche climatiche e geografiche del territorio italiano. Anche la base dati di temperature di cui disponiamo, pur essendo stimata su una griglia geografica molto fine (1 km quadrato), è stata aggregata spazialmente considerando la media delle temperature sulla base delle coordinate geografiche delle 95 province italiane al 1991.

Tale scelta è stata dettata dalla necessità di avere un panel di province quanto più bilanciato possibile su un'epoca lunga, senza perdere il crescente dettaglio provinciale che si ha dopo la II guerra mondiale.

Al 1870, dopo l'unificazione, le guerre d'indipendenza e la conquista dello Stato Pontificio, il Regno d'Italia era suddiviso in 69 province (Antonielli 1872). Negli anni '20 del XX secolo, dopo la Prima Guerra Mondiale e le conseguenti acquisizioni territoriali per l'Italia (Trento e Trieste, in particolare), furono istituite altre 24 province (comprese Pola, Fiume e Zara) e ne fu soppressa 1 (quella di "Terra di Lavoro"). Dagli anni '30 agli anni '90 si aggiungeranno soltanto altre 6 province: 3 tra il 1934 e il 1945 (Latina – 1934, Asti – 1935, Caserta – 1945); 3 tra il 1968 e il 1974 (Pordenone – 1974, Isernia – 1970, Oristano – 1974). Dalla metà degli anni '70 del secolo scorso fino al 1992, complessivamente l'Italia annoverava 95 province.

Occorrerà attendere il 1992 per assistere alla istituzione di 8 nuove province (Biella, Lecco, Lodi, Rimini, Prato, Crotone, Vibo Valentia e Verbano-Cusio-Ossola), giungendo a un totale di 103.

Con l'intento di rendere confrontabili i nostri dati, climatici ed economici, sull'intero periodo preso in considerazione (1871-2001), si è ritenuto opportuno adottare lo schema di articolazione territoriale che ha connotato per lungo tempo e sino ad anni piuttosto recenti la classificazione delle diverse aree geografiche del Paese. Così, si è scelto di scattare una fotografia agli assetti territoriali italiani all'inizio degli anni '90 del secolo scorso e di riportare alla griglia provinciale allora in vigore anche i dati riferiti alle province istituite successivamente e presenti nel 2001.

Per ricondurre alle province in essere fino al 1992 i territori successivamente enucleati con il ridisegno dei confini provinciali, i valori economici e di popolazione/occupazione sono stati riaggregati con le province di provenienza. Per la provincia di Lecco, il cui territorio proviene da due

distinte province (Como, Bergamo) è stato necessario ripartire i suoi valori economici e di popolazione tra le due province cui prima appartenevano. Per farlo, si è scelto di considerare la percentuale di comuni della provincia di provenienza sul totale di quelli della nuova provincia. Nel caso di Lecco, dei 90 comuni in cui inizialmente si è articolata la nuova provincia creata nel 1992, precedentemente 84 erano parte della provincia di Como, mentre 6 erano parte della provincia di Bergamo. Si è così convenzionalmente stabilito che, per gli anni successivi al 1992, volendo riassegnare territorialmente il valore assunto da una variabile riferita a Lecco, tale importo è da imputare nuovamente per il 93% (84/90) a Como e per il 7% (6/90) a Bergamo.

Mentre per la disponibilità di dati è stato possibile riaggregare le province successive al 1992, non abbiamo invece proceduto ad alcuna ricostruzione delle province in epoche storiche precedenti alla loro effettiva costituzione. Non abbiamo quindi stimato ad esempio i valori economici della provincia di Udine prima del 1974, come ripartiti tra l'attuale area della provincia di Udine e Pordenone. Tale stima è stata considerata troppo arbitraria in prima approssimazione.

Le province nominalmente presenti sono state così considerate uguali nel tempo, pur se riferite a territori diversi. I valori economici della provincia di Udine sono stati così considerati presenti nel dataset fin dal 1881, anche se prima del 1974 si riferivano al complesso delle province di Udine e Pordenone.

L'alternativa sarebbe stata quella di considerare un campione chiuso di province omogenee nel tempo (65), dal 1871 al 2001. Per le 30 province che non hanno rispettato questo criterio di omogeneità si è tenuto conto del fatto che 2 delle nostre misure di attività economica sono intensive (PIL pro capite, produttività), per cui la grandezza assoluta dell'area non è rilevante e le misure di territori contigui si possono considerare più omogenee di altri.

L'intersezione tra l'insieme dei dati economici e quello dei dati climatici mostra che prima del 1951, ci sono alcune province per cui questi ultimi non sono disponibili (Tavola A1). La carenza riguarda soltanto alcune province meridionali e alcuni anni, ma è trascurabile dopo il 1911.

La Tavola A2 mostra le province per anno nel dataset finale per cui sono disponibili dati economici e climatici. Il panel è sostanzialmente bilanciato dal 1931 in poi.

Tavola A1. Province con dati economici, per cui non sono disponibili dati climatici

prov	1871	1881	1921	1931	1936
Agrigento	1				
Avellino	1				
Bari	1	1	1		
Benevento	1				
Cagliari	1	1	1	1	
Caltanissetta	1				
Campobasso	1				
Catania	1				
Catanzaro	1				
Cosenza	1	1			
Foggia	1	1			
Lecce	1	1	1		
Messina	1				
Napoli	1				
Palermo	1				
Potenza	1	1			
Reggio Calabria	1				
Salerno	1				
Sassari	1	1			
Siracusa	1				
Trapani	1	1	1		1

Tavola A2. Province con dati economici e temperature per anno di censimento.

year	Provinces
1871	47
1881	61
1901	65
1911	68
1921	62
1931	86
1936	86
1951	92
1961	92
1971	94
1981	95
1991	95
2001	95
Total	1,038

Appendice 2. Il calcolo dei *degree days*

Nel caso più generale con $T_n < T_a < T_b < T_x$ GDD e KDD possono essere ottenuti come:

$$GDD = \frac{1}{2\pi} \int_{t_1^a}^{t_1^b} (T(t) - T_a) dt + \frac{1}{2\pi} \int_{t_2^a}^{t_2^b} (T(t) - T_a) dt = \left[\frac{T_x + T_n}{2} - T_a \right] \cdot \frac{t_1^b - t_1^a + t_2^a - t_2^b}{2\pi} - \frac{1}{2\pi} \frac{T_x - T_n}{2} [\sin(t_1^b) - \sin(t_1^a) + \sin(t_2^a) - \sin(t_2^b)] \quad (2a)$$

$$KDD = \frac{1}{2\pi} \int_{t_1^b}^{t_2^b} (T(t) - T_b) dt = \frac{\pi - t_1^b}{\pi} \left[\frac{T_x + T_n}{2} - T_b \right] + \frac{T_x - T_n}{2\pi} \sin(t_1^b) \quad (2b)$$

Dove $t_1^a, t_2^a, t_1^b, t_2^b$ possono essere facilmente ottenuti dall'equazione 1 (risolta per $t = t_1^a, t_2^a, t_1^b, t_2^b$, respectively) as:

$$t_1^a = \arccos\left(\frac{T_x + T_n - 2T_a}{T_x - T_n}\right) \quad (3a)$$

$$t_2^a = 2\pi - t_1^a \quad (3b)$$

$$t_1^b = \arccos\left(\frac{T_x + T_n - 2T_b}{T_x - T_n}\right) \quad (3c)$$

$$t_2^b = 2\pi - t_1^b \quad (3d)$$

Oltre a questo caso, abbiamo altre cinque situazioni più particolari che differiscono a seconda della posizione di T_n e T_x relative alle due soglie:

1. $T_n < T_a < T_x < T_b$

$$GDD = \frac{\pi - t_1^a}{\pi} \left[\frac{T_x + T_n}{2} - T_a \right] + \frac{T_x - T_n}{2\pi} \sin(t_1^a)$$

$$KDD = 0$$

2. $T_n < T_x < T_a < T_b$

$$GDD = 0$$

$$KDD = 0$$

3. $T_a < T_n < T_x < T_b$

$$GDD = \left[\frac{T_x + T_n}{2} - T_a \right]$$

$$KDD = 0$$

4. $T_a < T_n < T_b < T_x$

$$GDD = \left[\frac{T_x + T_n}{2} - T_a \right] \cdot \left(1 + \frac{t_1^b - t_2^b}{2\pi} \right) - \frac{1}{2\pi} \frac{T_x - T_n}{2} [\sin(t_1^b) - \sin(t_2^b)]$$

$$KDD = \frac{1}{2\pi} \int_{t_1^b}^{t_2^b} (T(t) - T_b) dt = \frac{\pi - t_1^b}{\pi} \left[\frac{T_x + T_n}{2} - T_b \right] + \frac{T_x - T_n}{2\pi} \sin(t_1^b)$$

5. $T_a < T_b < T_n < T_x$

$$GDD = 0$$

$$KDD = \left[\frac{T_x + T_n}{2} - T_b \right]$$