

Scarica PDF

[natura](#) > [articoli](#) > articolo

Scarica PDF

Articolo | [Accesso aperto](#) | Pubblicato: 17 aprile 2024

L'impegno economico del cambiamento climatico

[Massimiliano Kotz](#), [Anders Levermann](#) e [Leonia Wenz](#) 

Natura **628**, 551–557 (2024)

186k accessi | **53** citazioni | **4168** Altmetrico | [Metrica](#)

 Una [correzione dell'autore](#) a questo articolo è stata pubblicata il 24 giugno 2024

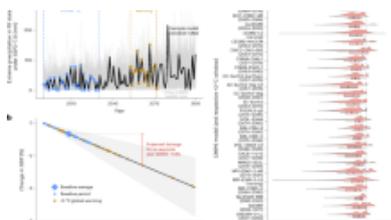
 Questo articolo è stato [aggiornato](#)

Astratto

Le proiezioni globali dei danni macroeconomici causati dal cambiamento climatico considerano in genere gli impatti delle temperature medie annuali e nazionali su orizzonti temporali lunghi [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [5](#), [6](#). Qui utilizziamo recenti risultati empirici da oltre 1.600 regioni in tutto il mondo negli ultimi 40 anni per proiettare i danni subnazionali causati da temperatura e precipitazioni, tra cui variabilità giornaliera ed estremi [7](#), [8](#). Utilizzando un approccio empirico che fornisce un solido limite inferiore sulla persistenza degli impatti sulla crescita economica, scopriamo che l'economia mondiale è impegnata in una riduzione del reddito del 19% entro i prossimi 26 anni indipendentemente dalle future scelte di emissione (rispetto a una linea di base senza impatti climatici, intervallo probabile dell'11-29% tenendo conto del clima fisico e dell'incertezza empirica). Questi danni superano già di sei volte i costi di mitigazione necessari per limitare il riscaldamento globale a 2 °C in questo arco di tempo a breve termine e in seguito divergono fortemente a seconda delle scelte di emissione. I danni

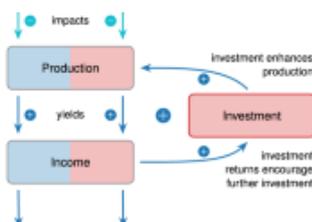
50% e si determina una maggiore eterogeneità regionale. Le perdite commesse sono previste per tutte le regioni, eccetto quelle a latitudini molto elevate, dove le riduzioni della variabilità della temperatura portano benefici. Le perdite maggiori sono commesse a latitudini inferiori in regioni con emissioni storiche cumulative inferiori e reddito attuale inferiore.

Contenuti simili visualizzati da altri



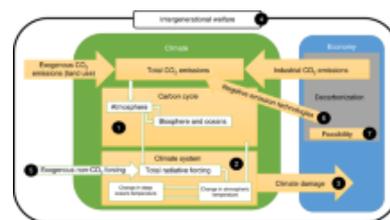
Proiezioni dei danni climatici oltre la temperatura annuale

Articolo | Accesso libero
17 aprile 2024



Gli incentivi agli investimenti ridotti dai danni climatici possono essere ripristinati da un...

Articolo | Accesso libero
31 maggio 2021



Supporto dell'economia climatica per gli obiettivi climatici delle Nazioni Unite

Articolo | 13 luglio 2020

Principale

Le proiezioni del danno macroeconomico causato dai futuri cambiamenti climatici sono fondamentali per informare i dibattiti pubblici e politici su adattamento, mitigazione e giustizia climatica. Da un lato, l'adattamento agli impatti climatici deve essere giustificato e pianificato sulla base di una comprensione della loro futura entità e distribuzione spaziale⁹. Ciò è importante anche nel contesto della giustizia climatica¹⁰, nonché per i principali attori sociali, tra cui governi, banche centrali e aziende private, che richiedono sempre più l'inclusione dei rischi climatici nelle loro previsioni macroeconomiche per aiutare il processo decisionale adattivo^{11, 12}. D'altro canto, la politica di mitigazione del clima come l'accordo di Parigi sul clima è spesso valutata bilanciando i costi della sua attuazione rispetto ai benefici dell'evitare danni fisici previsti. Questa valutazione avviene sia formalmente attraverso analisi costi-

Le proiezioni di danni futuri incontrano delle sfide quando informano questi dibattiti, in particolare i pregiudizi umani relativi all'incertezza e alla lontananza che sono sollevati dalle prospettive a lungo termine¹⁴. Qui miriamo a superare tali sfide valutando l'entità dei danni economici derivanti dal cambiamento climatico a cui il mondo è già impegnato dalle emissioni storiche e dall'inerzia socio-economica (la gamma di scenari di emissioni future che sono considerati plausibili dal punto di vista socio-economico¹⁵). Tale attenzione al breve termine limita le grandi incertezze sulle divergenti traiettorie di emissioni future, la conseguente risposta climatica a lungo termine e la validità dell'applicazione delle relazioni clima-economiche osservate storicamente su lunghe scale temporali durante le quali le condizioni socio-tecniche possono cambiare considerevolmente. Pertanto, questa attenzione mira a semplificare la comunicazione e massimizzare la credibilità dei danni economici previsti dal futuro cambiamento climatico.

Nel proiettare i futuri danni economici derivanti dal cambiamento climatico, utilizziamo i recenti progressi nell'econometria climatica che forniscono prove degli impatti sulla crescita economica subnazionale da numerose componenti della distribuzione della temperatura giornaliera e delle precipitazioni^{3,7,8}. Utilizzando modelli di regressione a panel a effetti fissi per controllare i potenziali fattori confondenti, questi studi sfruttano la variazione all'interno della regione della temperatura locale e delle precipitazioni in un panel di oltre 1.600 regioni in tutto il mondo, comprendente dati sul clima e sul reddito degli ultimi 40 anni, per identificare gli effetti plausibilmente causali dei cambiamenti in diverse variabili climatiche sulla produttività economica^{16,17}. In particolare, sono stati identificati impatti macroeconomici dalla variazione della variabilità della temperatura giornaliera, dalle precipitazioni annuali totali, dal numero annuale di giorni di pioggia e dalle precipitazioni giornaliere estreme che si verificano in aggiunta a quelli già identificati dalla variazione della temperatura media^{2,3,18}. Inoltre, è stata riscontrata un'eterogeneità regionale in questi effetti in base alle condizioni climatiche locali prevalenti utilizzando termini di interazione. La selezione di queste variabili

temperatura sulla produttività agricola e sulla salute – , nonché delle precipitazioni sulla produttività agricola, sui risultati del lavoro e sui danni da inondazione [8](#) (vedere la Tabella dati estesa [1](#) per una panoramica, inclusi riferimenti più dettagliati). I riferimenti [7](#), [8](#) contengono una motivazione più dettagliata per l'uso di queste particolari variabili climatiche e forniscono ampi test empirici sulla robustezza e la natura dei loro effetti sulla produzione economica, che sono riassunti in [Metodi](#) . Tenendo conto di queste variabili climatiche extra a livello subnazionale, puntiamo a una descrizione più completa degli impatti climatici con maggiori dettagli sia nel tempo che nello spazio.

Limitare la persistenza degli impatti

Un determinante chiave e una fonte di discrepanza nelle stime dell'entità dei futuri danni climatici è la misura in cui persiste l'impatto di una variabile climatica sui tassi di crescita economica. I due casi estremi in cui questi impatti persistono indefinitamente o solo istantaneamente sono comunemente indicati come effetti di crescita o di livello [19](#), [20](#) (vedere la sezione [Metodi](#) 'Specifiche del modello empirico: modelli di ritardo distribuiti a effetti fissi' per le definizioni matematiche). Lavori recenti mostrano che i danni futuri derivanti dal cambiamento climatico dipendono fortemente dal fatto che si assumano effetti di crescita o di livello [20](#) . Seguendo i riferimenti [2](#), [18](#) , forniamo vincoli su questa persistenza utilizzando modelli di ritardo distribuiti per testare la significatività degli effetti ritardati separatamente per ciascuna variabile climatica. In particolare, e in contrasto con i riferimenti [2](#), [18](#) , utilizziamo le variabili climatiche nella loro prima forma differenziata seguendo il riferimento [3](#) , implicando una dipendenza del tasso di crescita da un cambiamento nelle variabili climatiche. Questa scelta significa che una specifica di base senza ritardi costituisce un modello a priori di effetti puramente di livello, in cui un cambiamento permanente nel clima ha solo un effetto istantaneo sul tasso di crescita [3](#), [19](#), [21](#) . Includendo i ritardi, si può quindi verificare se eventuali effetti possono persistere ulteriormente. Ciò è in contrasto con la specifica utilizzata dai riferimenti [2](#), [18](#) , in cui le variabili climatiche sono utilizzate senza prendere la prima differenza, implicando una dipendenza del tasso di crescita dal livello delle variabili climatiche. In questo

persistente sul tasso di crescita. Di conseguenza, includere ulteriori ritardi in questo caso alternativo verifica se l'impatto iniziale sulla crescita viene recuperato [18](#), [19](#), [21](#). Entrambe queste specifiche soffrono della possibilità limitante che, se vengono inclusi troppi pochi ritardi, si potrebbe accettare falsamente il modello a priori. Le limitazioni dell'inclusione di un numero molto elevato di ritardi, tra cui la perdita di dati e l'aumento dell'incertezza statistica con un numero crescente di parametri, significano che tale possibilità è probabile. Scegliendo una specifica in cui il modello a priori è uno degli effetti di livello, il nostro approccio è quindi conservativo per progettazione, evitando ipotesi di persistenza infinita degli impatti climatici sulla crescita e fornendo invece un limite inferiore a questa persistenza basato su ciò che è osservabile empiricamente (vedere [Metodi](#) sezione 'Specifiche del modello empirico: modelli di ritardo distribuiti a effetti fissi' per un'ulteriore esposizione di questo framework). La natura conservativa di tale scelta è probabilmente la ragione per cui il rif. [19](#) trova una coerenza molto maggiore tra gli impatti proiettati dai modelli che utilizzano la prima differenza delle variabili climatiche, rispetto ai loro livelli.

Iniziamo la nostra analisi empirica della persistenza degli impatti climatici sulla crescita utilizzando dieci ritardi delle prime variabili climatiche differenziate in modelli di ritardo distribuiti a effetti fissi. Rileviamo effetti sostanziali sulla crescita economica a ritardi temporali fino a circa 8-10 anni per i termini di temperatura e fino a circa 4 anni per i termini di precipitazione (Extended Data Fig. [1](#) e Extended Data Table [2](#)). Inoltre, la valutazione mediante criteri informativi indica che l'inclusione di tutte e cinque le variabili climatiche e l'uso di questi numeri di ritardi forniscono un compromesso preferibile tra il miglior adattamento dei dati e l'inclusione di ulteriori termini che potrebbero causare un overfitting, rispetto alle specifiche del modello che escludono le variabili climatiche o includono più o meno ritardi (Extended Data Fig. [3](#), Supplementary Methods Section [1](#) e Supplementary Table [1](#)). Pertanto rimuoviamo i termini statisticamente insignificanti a ritardi successivi (Supplementary Fig. [1](#) – [3](#) e Supplementary Table [2](#) – [4](#)). Ulteriori test che utilizzano simulazioni Monte Carlo dimostrano che i modelli empirici sono robusti all'autocorrelazione nelle variabili climatiche ritardate (Metodi supplementari

Figura supplementare 6), che i risultati sono robusti alle preoccupazioni di multicollinearità imperfetta tra variabili climatiche e che includere diverse variabili climatiche è effettivamente necessario per isolare i loro effetti separati (Metodi supplementari Sezione 3 e Figura supplementare 7). Forniamo un ulteriore controllo di robustezza utilizzando un modello di ritardo distribuito ristretto per limitare le oscillazioni nelle stime dei parametri ritardati che possono derivare dall'autocorrelazione, scoprendo che fornisce stime simili di effetti marginali cumulativi al modello non ristretto (Metodi supplementari Sezione 4 e Figure supplementari 8 e 9). Infine, per tenere conto in modo esplicito di qualsiasi incertezza in sospeso derivante dalla scelta precisa del numero di ritardi, includiamo modelli empirici con numeri di ritardi marginalmente diversi nella procedura di campionamento degli errori della nostra proiezione di danni futuri. Sulla base della procedura di selezione dei ritardi (significato dei termini ritardati in Extended Data Fig. 1 e Extended Data Table 2, nonché criteri informativi in Extended Data Fig. 3), eseguiamo il campionamento da modelli con otto-dieci ritardi per la temperatura e quattro per le precipitazioni (modelli mostrati nelle Figure supplementari 1-3 e nelle Tabelle supplementari 2-4). In sintesi, questo approccio empirico per limitare la persistenza degli impatti climatici sui tassi di crescita economica è conservativo per progettazione nell'evitare ipotesi di persistenza infinita, ma fornisce comunque un limite inferiore all'entità della persistenza dell'impatto che è robusto ai numerosi test delineati sopra.

Danni commessi fino a metà secolo

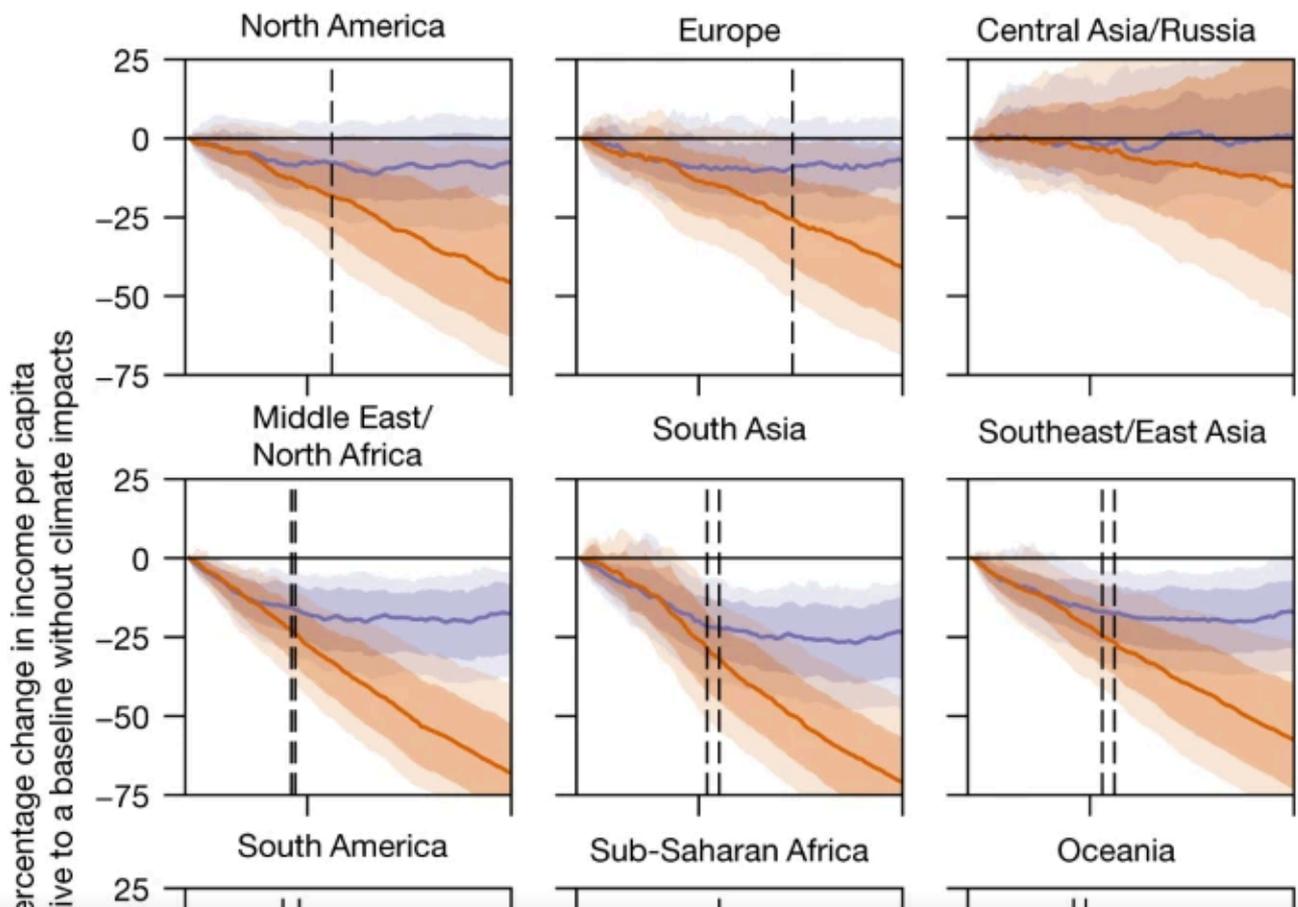
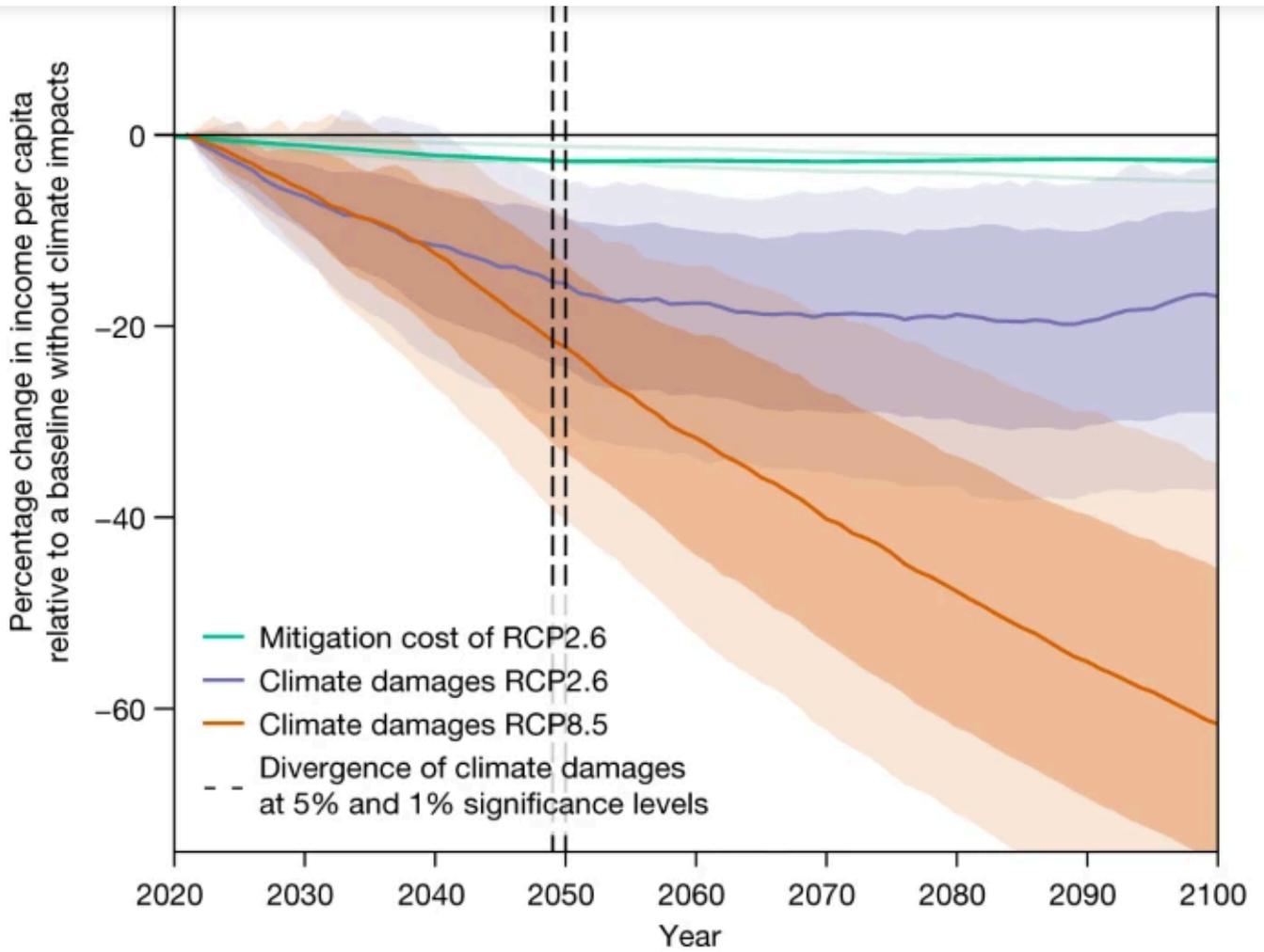
Combiniamo queste funzioni di risposta economica empirica (Fig. supplementari 1 – 3 e Tabelle supplementari 2 – 4) con un insieme di 21 modelli climatici (vedere Tabella supplementare 5) dal Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP-6)²² per proiettare i danni macroeconomici da queste componenti del cambiamento climatico fisico (vedere [Metodi](#) per ulteriori dettagli). I modelli climatici con aggiustamento dei bias che forniscono una riproduzione altamente accurata dei modelli climatologici osservati con incertezza limitata (Tabella supplementare 6) vengono utilizzati per evitare di introdurre bias nelle proiezioni. Seguendo una

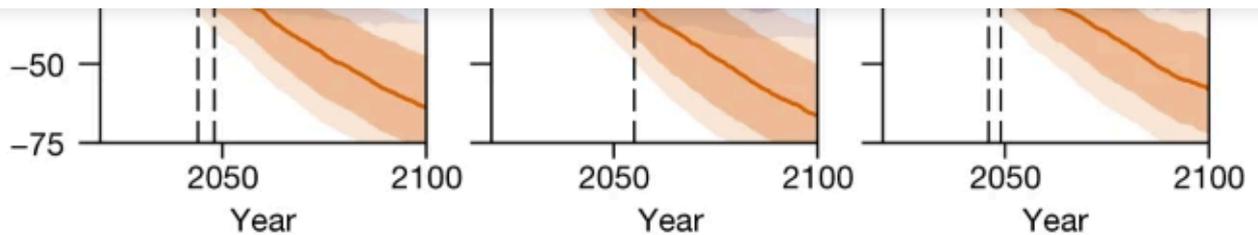
esogeno delle future condizioni climatiche sull'economia rispetto alle linee di base specificate dalle proiezioni socio-economiche, basate sulle plausibilmente causali relazioni dedotte dai modelli empirici e assumendo ceteris paribus. Altri fattori esogeni rilevanti per la previsione della produzione economica sono volutamente considerati costanti.

Una procedura Monte Carlo che campiona da proiezioni di modelli climatici, modelli empirici con diversi numeri di ritardi e stime di parametri di modello (ottenuti da 1.000 ricampionamenti block-bootstrap di ciascuna delle regressioni nelle Figure supplementari [1](#) – [3](#) e nelle Tabelle supplementari [2](#) – [4](#)) viene utilizzata per stimare l'incertezza combinata da queste fonti. Date queste distribuzioni di incertezza, scopriamo che i danni globali previsti sono statisticamente indistinguibili nei due scenari di emissione più estremi fino al 2049 (al livello di significatività del 5%; Figura [1](#)). Pertanto, i danni climatici che si verificano prima di questo momento costituiscono quelli a cui il mondo è già impegnato a causa della combinazione di emissioni passate e della gamma di scenari di emissione futuri che sono considerati plausibili dal punto di vista socio-economico [15](#). Questi danni commessi comprendono una riduzione permanente del reddito del 19% in media a livello globale (media ponderata in base alla popolazione) rispetto a una base di riferimento senza impatti del cambiamento climatico (con un intervallo probabile dell'11-29%, seguendo la classificazione della probabilità adottata dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC); vedere la didascalia della Fig. [1](#)). Anche se i livelli di reddito pro capite generalmente aumentano ancora rispetto a quelli odierni, ciò costituisce una riduzione permanente del reddito per la maggior parte delle regioni, tra cui Nord America ed Europa (ciascuna con riduzioni del reddito mediane di circa l'11%) e con l'Asia meridionale e l'Africa che sono le più fortemente colpite (ciascuna con riduzioni del reddito mediane di circa il 22%; Fig. [1](#)). In uno scenario intermedio di sviluppo futuro del reddito (SSP2, in cui SSP sta per Shared Socio-economic Pathway), ciò corrisponde a danni annuali globali nel 2049 di 38 trilioni in dollari internazionali del 2005 (intervallo probabile di 19-59 trilioni di dollari internazionali del 2005). Rispetto alle specifiche empiriche che presuppongono effetti di pura crescita o di puro livello, la

estremi (Fig. 2 dei dati ESTES).

Fig. 1: Impegno e divergenza tra danni al clima economico e costi di mitigazione.





Le stime della riduzione prevista del reddito pro capite da cambiamenti in tutte le variabili climatiche basate su modelli empirici di impatti climatici sulla produzione economica con un limite inferiore robusto sulla loro persistenza (Extended Data Fig. 1) in uno scenario a basse emissioni compatibile con l'obiettivo di riscaldamento di 2 °C e uno scenario ad alte emissioni (rispettivamente SSP2-RCP2.6 e SSP5-RCP8.5) sono mostrate rispettivamente in viola e arancione. L'ombreggiatura rappresenta gli intervalli di confidenza del 34% e del 10% che riflettono rispettivamente gli intervalli probabili e molto probabili (seguendo la classificazione di verosimiglianza adottata dall'IPCC), avendo stimato l'incertezza da una procedura Monte Carlo, che campiona l'incertezza dalla scelta di modelli climatici fisici, modelli empirici con diversi numeri di ritardi e stime bootstrapped dei parametri di regressione mostrati nelle Fig. supplementari 1 – 3. Le linee tratteggiate verticali mostrano il momento in cui i danni climatici dei due scenari di emissione divergono ai livelli di significatività del 5% e dell'1% in base alla distribuzione delle differenze tra gli scenari di emissione derivanti dal campionamento dell'incertezza discusso sopra. Si noti che l'incertezza nella differenza dei due scenari è inferiore all'incertezza combinata dei due rispettivi scenari perché i campioni dell'incertezza (modello climatico e scelta del modello empirico, nonché bootstrap del parametro del modello) sono coerenti nei due scenari di emissione, quindi la divergenza dei danni si verifica mentre i limiti di incertezza dei due scenari di danno separati si sovrappongono ancora. Le stime dei costi di mitigazione globali dai tre IAM che forniscono risultati per la baseline SSP2 e lo scenario SSP2-RCP2.6 sono mostrate in verde chiaro nel pannello superiore, con la mediana di queste stime mostrata in grassetto.

I danni superano già i costi di mitigazione

Confrontiamo i danni a cui il mondo è impegnato nei prossimi 25 anni con le stime dei costi di mitigazione necessari per raggiungere l'accordo di Parigi sul clima.

Prendendo le stime dei costi di mitigazione dai tre modelli di valutazione integrata (IAM) nel database IPCC AR6 [23](#) che forniscono risultati in scenari comparabili (SSP2 baseline e SSP2-RCP2.6, in cui RCP sta per Representative Concentration Pathway),

fattore di circa sei (si noti che le stime dei costi di mitigazione sono fornite solo ogni 10 anni dagli IAM e quindi un confronto nel 2049 non è possibile). Questo confronto mira semplicemente a confrontare l'entità dei danni futuri con i costi di mitigazione, piuttosto che condurre un'analisi costi-benefici formale della transizione da un percorso di emissione a un altro. Le analisi costi-benefici formali in genere rilevano che i benefici netti della mitigazione emergono solo dopo il 2050 (rif. [5](#)), il che potrebbe portare alcuni a concludere che i danni fisici causati dal cambiamento climatico non sono semplicemente abbastanza grandi da controbilanciare i costi di mitigazione fino alla seconda metà del secolo. Il nostro semplice confronto delle loro entità chiarisce che i danni sono in realtà già considerevolmente maggiori dei costi di mitigazione e l'emergere ritardato dei benefici netti di mitigazione deriva principalmente dal fatto che i danni lungo diversi percorsi di emissione sono indistinguibili fino a metà secolo (Fig. [1](#)).

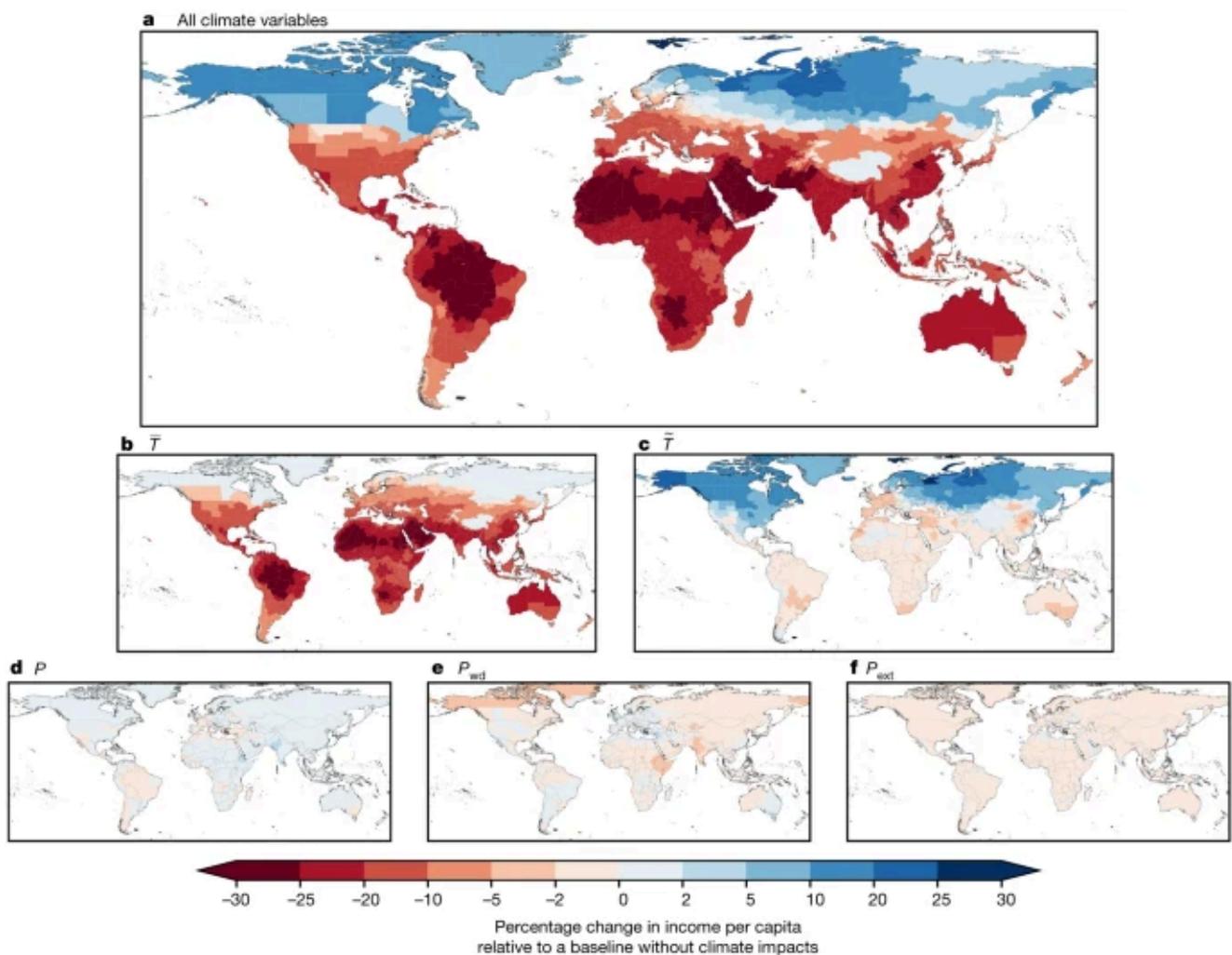
Sebbene questi danni a breve termine costituiscano quelli a cui il mondo è già impegnato, notiamo che le stime dei danni divergono fortemente tra gli scenari di emissione dopo il 2049, trasmettendo i chiari benefici della mitigazione da un punto di vista puramente economico che sono stati enfatizzati in studi precedenti [4](#), [24](#). Oltre alle incertezze valutate nella Fig. [1](#), queste conclusioni sono robuste alle scelte strutturali, come la scala temporale con cui vengono stimati i cambiamenti nelle variabili moderatrici dei modelli empirici (Fig. supplementari [10](#) e [11](#)), così come l'ordine in cui si tiene conto delle componenti intertemporali e internazionali del confronto valutario (Fig. supplementare [12](#); vedere [Metodi](#) per ulteriori dettagli).

Danni da variabilità ed estremi

I danni commessi derivano principalmente da cambiamenti nella temperatura media (Fig. [2](#)). Ciò riflette il fatto che i cambiamenti previsti nella temperatura media sono maggiori di quelli in altre variabili climatiche quando espressi in funzione della loro variabilità interannuale storica (Extended Data Fig. [4](#)). Poiché la variabilità storica è quella su cui vengono stimati i modelli empirici, cambiamenti previsti più ampi rispetto a questa variabilità probabilmente portano a impatti futuri maggiori in senso

temperature media sono i più senza precedenti dal punto di vista delle fluttuazioni storiche a cui l'economia è abituata e quindi causeranno il danno maggiore. Questa intuizione può rivelarsi utile in termini di guida delle misure di adattamento alle fonti del danno maggiore.

Fig. 2: Danni economici causati dal cambiamento climatico per regione subnazionale e componente climatica.



Stime della riduzione mediana prevista del reddito pro capite subnazionale attraverso gli scenari di emissione (SSP2-RCP2.6 e SSP2-RCP8.5) nonché incertezza del modello climatico, del modello empirico e dei parametri del modello nell'anno in cui i danni climatici divergono al livello del 5% (2049, come identificato nella Fig. 1). **a**, Impatti derivanti da tutte le variabili climatiche. **b – f**, Impatti derivanti separatamente da variazioni della temperatura media annuale (**b**), variabilità della temperatura giornaliera (**c**), precipitazioni totali annuali (**d**), numero annuale di giorni di pioggia (>1 mm) (**e**) e precipitazioni giornaliere estreme (**f**)

Tuttavia, i danni futuri basati su modelli empirici che considerano solo i cambiamenti nella temperatura media annuale ed escludono le altre variabili climatiche costituiscono riduzioni del reddito di solo il 13% nel 2049 (Extended Data Fig. [5a](#), intervallo probabile 5-21%). Ciò suggerisce che la contabilizzazione delle altre componenti della distribuzione di temperatura e precipitazioni aumenta i danni netti di quasi il 50%. Questo aumento deriva dagli ulteriori danni causati da queste componenti climatiche, ma anche perché la loro inclusione rivela una risposta economica negativa più forte alle temperature medie (Extended Data Fig. [5b](#)). Quest'ultima scoperta è coerente con le nostre simulazioni di Monte Carlo, che suggeriscono che l'entità dell'effetto della temperatura media sulla crescita economica è sottostimata a meno che non si tenga conto degli impatti di altre variabili climatiche correlate (Supplementary Fig. [7](#)).

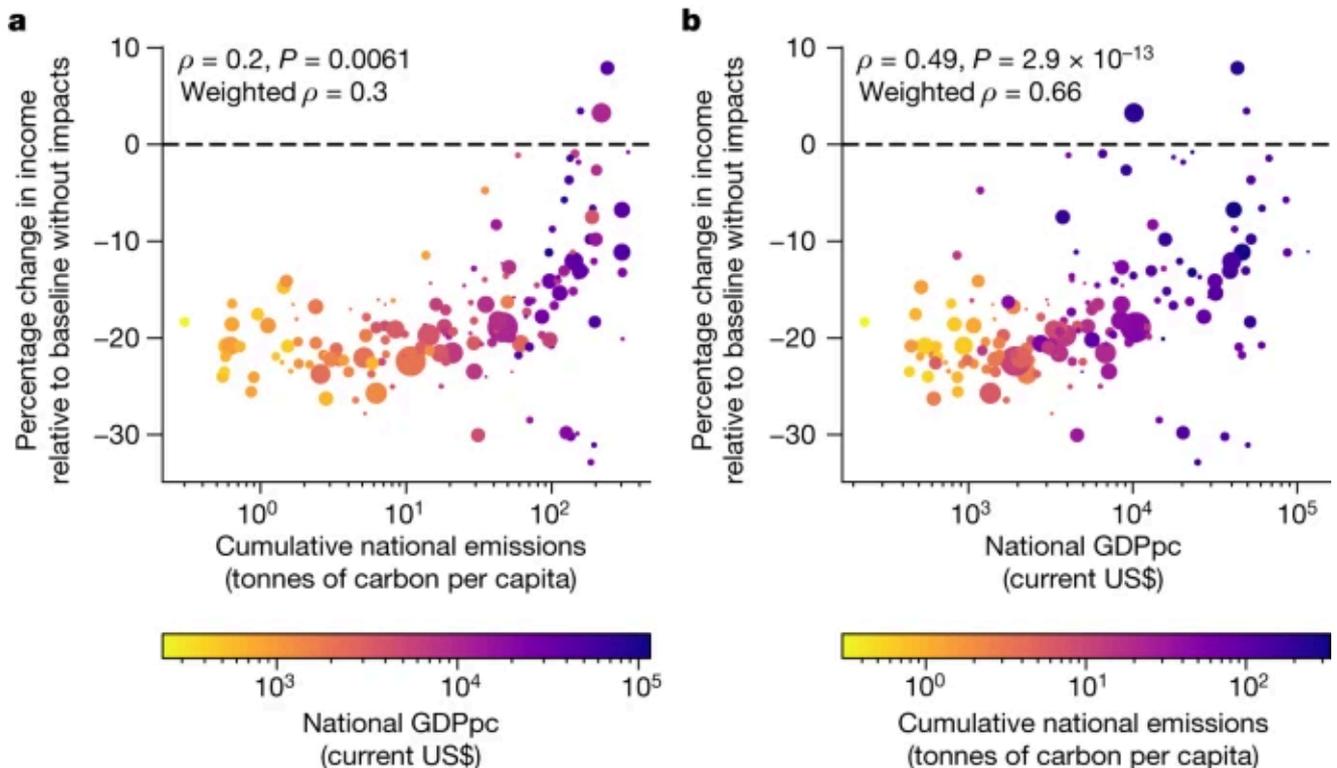
In termini di contributi relativi delle diverse componenti climatiche ai danni complessivi, scopriamo che la contabilizzazione della variabilità della temperatura giornaliera determina il maggiore aumento dei danni complessivi rispetto ai quadri empirici che considerano solo i cambiamenti nella temperatura media annuale (4,9 punti percentuali, intervallo probabile 2,4-8,7 punti percentuali, equivalenti a circa 10 trilioni di dollari internazionali). La contabilizzazione delle precipitazioni determina incrementi minori nei danni complessivi, che sono, tuttavia, equivalenti a circa 1,2 trilioni di dollari internazionali: 0,01 punti percentuali (-0,37-0,33 punti percentuali), 0,34 punti percentuali (0,07-0,90 punti percentuali) e 0,36 punti percentuali (0,13-0,65 punti percentuali) dalle precipitazioni annuali totali, dal numero di giorni di pioggia e dalle precipitazioni giornaliere estreme, rispettivamente. Inoltre, i modelli climatici sembrano sottostimare i futuri cambiamenti nella variabilità della temperatura [25](#) e nelle precipitazioni estreme [26, 27](#) in risposta alla forzatura antropica rispetto a quanto osservato storicamente, il che suggerisce che i veri impatti di queste variabili potrebbero essere maggiori.

La ripartizione dei danni commessi

quelli della vulnerabilità economica storica ai cambiamenti in quelle variabili. I danni derivanti dall'aumento della temperatura media annuale (Fig. [2b](#)) sono negativi quasi ovunque a livello globale e maggiori alle latitudini più basse nelle regioni in cui le temperature sono già più elevate e la vulnerabilità economica agli aumenti di temperatura è maggiore (vedere l'eterogeneità della risposta alla temperatura media incorporata nei dati estesi Fig. [1a](#)). Ciò si verifica nonostante il riscaldamento amplificato previsto alle latitudini più elevate [28](#), il che suggerisce che l'eterogeneità regionale nella vulnerabilità economica ai cambiamenti di temperatura supera l'eterogeneità nell'entità del riscaldamento futuro (Fig. [13a](#) supplementare). I danni economici dovuti alla variabilità giornaliera della temperatura (Fig. [2c](#)) mostrano una forte polarizzazione latitudinale, che riflette principalmente la risposta fisica della variabilità giornaliera alla forzatura delle serre in cui gli aumenti della variabilità alle latitudini più basse (e in Europa) contrastano con le diminuzioni alle latitudini più alte [25](#) (Fig. [13b](#) supplementare). Questi due termini di temperatura sono i determinanti dominanti del modello dei danni complessivi (Fig. [2a](#)), che mostra una forte polarità con danni nella maggior parte del globo, eccetto alle latitudini più settentrionali. I futuri cambiamenti nelle precipitazioni annuali totali portano principalmente benefici economici, eccetto nelle regioni di siccità, come il Mediterraneo e il Sud America centrale (Fig. [2d](#) e Fig. [13c](#) supplementare), ma questi benefici sono contrastati dai cambiamenti nel numero di giorni di pioggia, che producono danni con un modello simile di segno opposto (Fig. [2e](#) e Fig. [13d](#) supplementare). Al contrario, i cambiamenti nelle precipitazioni giornaliere estreme producono danni in tutte le regioni, riflettendo l'intensificazione degli estremi delle precipitazioni giornaliere sulle aree terrestri globali [29, 30](#) (Fig. [2f](#) e Figura supplementare [13e](#)).

La distribuzione spaziale dei danni commessi implica una notevole ingiustizia lungo due dimensioni: la colpevolezza per le emissioni storiche che hanno causato il cambiamento climatico e i livelli preesistenti di benessere socioeconomico. Le correlazioni di rango di Spearman indicano che i danni commessi sono significativamente maggiori nei paesi con emissioni cumulative storiche inferiori, così come nelle regioni con un reddito pro capite attuale inferiore (Fig. [3](#)). Ciò

Fig. 3: L'ingiustizia dei danni climatici commessi in base alle emissioni storiche cumulative e al reddito.



Le stime della variazione mediana prevista del reddito nazionale pro capite negli scenari di emissione (RCP2.6 e RCP8.5), nonché l'incertezza del modello climatico, del modello empirico e dei parametri del modello nell'anno in cui i danni climatici divergono al livello del 5% (2049, come identificato nella Fig. 1) sono tracciate rispetto alle emissioni nazionali cumulative pro capite nel 2020 (dal Global Carbon Project) e colorate in base al reddito nazionale pro capite nel 2020 (dalla Banca Mondiale) in **a** e viceversa in **b**. In ogni pannello, la dimensione di ogni punto di dispersione è ponderata dalla popolazione nazionale nel 2020 (dalla Banca Mondiale). I numeri inseriti indicano la correlazione di rango di Spearman ρ e i valori P per un test di ipotesi la cui ipotesi nulla è di nessuna correlazione, nonché la correlazione di rango di Spearman ponderata dalla popolazione nazionale.

Per quantificare ulteriormente questa eterogeneità, valutiamo la differenza nei danni commessi tra i quartili superiore e inferiore delle regioni quando classificati in base ai

gruppo). In media, il quartile dei paesi con reddito più basso è impegnato in una perdita di reddito che è di 8,9 punti percentuali (o 61%) maggiore rispetto al quartile superiore (Extended Data Fig. 6), con un intervallo probabile di 3,8-14,7 punti percentuali attraverso il campionamento dell'incertezza delle nostre proiezioni dei danni (seguendo la classificazione della verosimiglianza adottata dall'IPCC). Analogamente, il quartile dei paesi con emissioni cumulative storiche più basse è impegnato in una perdita di reddito che è di 6,9 punti percentuali (o 40%) maggiore rispetto al quartile superiore, con un intervallo probabile di 0,27-12 punti percentuali. Questi modelli sottolineano nuovamente la prevalenza dell'ingiustizia negli impatti climatici [31](#), [32](#), [33](#) nel contesto dei danni a cui il mondo è già esposto a causa delle emissioni storiche e dell'inerzia socio-economica.

Contestualizzare l'entità dei danni

L'entità dei danni economici previsti supera le stime della letteratura precedente [2](#), [3](#), derivanti da diversi sviluppi fatti su approcci precedenti. Le nostre stime sono maggiori di quelle del rif. [2](#) (vedere la prima riga della Tabella dati estesa [3](#)), principalmente a causa del fatto che le stime subnazionali mostrano in genere una risposta alla temperatura più ripida (vedere anche i rif. [3](#), [34](#)) e che la contabilizzazione di altre componenti climatiche aumenta le stime dei danni (Fig. dati estesa [5](#)). Tuttavia, notiamo che il nostro approccio empirico che utilizza variabili climatiche differenziate per prime è conservativo rispetto a quello del rif. [2](#) per quanto riguarda la persistenza degli impatti climatici sulla crescita (vedere l'introduzione e la sezione [Metodi](#) 'Specifiche del modello empirico: modelli di ritardo distribuiti a effetti fissi'), un importante determinante dell'entità dei danni a lungo termine [19](#), [21](#). Utilizzando una specifica empirica simile al rif. [2](#), che presuppone una persistenza infinita mantenendo il resto del nostro approccio (dati subnazionali e ulteriori variabili climatiche), produce danni considerevolmente maggiori (curva viola della Fig. [3](#) dei dati estesi). Rispetto agli studi che prendono la prima differenza delle variabili climatiche [3](#), [35](#), anche le nostre stime sono maggiori (vedere la seconda e la terza riga della Tabella [3](#) dei dati estesi). L'inclusione di ulteriori variabili climatiche (Fig. [5](#) dei dati estesi) e un numero sufficiente di ritardi

che catturano le non linearità nella risposta della temperatura rispetto all'innalzamento [35](#). In sintesi, le nostre stime si basano su studi precedenti incorporando i dati più recenti e le intuizioni empiriche [7,8](#), nonché fornendo un solido limite inferiore empirico sulla persistenza degli impatti sulla crescita economica, che costituisce una via di mezzo tra gli estremi del dibattito crescita contro livelli [19,21](#) (Fig. [3](#) dei dati estesi).

Rispetto alla frazione di varianza spiegata dai modelli empirici storicamente (<5%), la proiezione di riduzioni del reddito del 19% può sembrare ampia. Ciò è dovuto al fatto che i cambiamenti previsti nelle condizioni climatiche sono molto più ampi di quelli sperimentati storicamente, in particolare per i cambiamenti nella temperatura media (Extended Data Fig. [4](#)). Pertanto, qualsiasi valutazione degli impatti futuri del cambiamento climatico richiede necessariamente un'estrapolazione al di fuori dell'intervallo dei dati storici su cui sono stati valutati i modelli di impatto empirici. Tuttavia, questi modelli costituiscono i metodi più all'avanguardia per l'inferenza di impatti climatici plausibilmente causali basati sui dati osservati. Inoltre, adottiamo misure esplicite per limitare l'estrapolazione fuori dal campione limitando le variabili moderatrici dei termini di interazione al 95° percentile della distribuzione storica (vedere [Metodi](#)). Ciò evita di estrapolare gli effetti marginali al di fuori di quanto osservato storicamente. Data la risposta non lineare della produzione economica alla temperatura media annuale (Extended Data Fig. [1](#) e Extended Data Table [2](#)), questa è una scelta prudente che limita l'entità dei danni che prevediamo. Inoltre, calcoli approssimativi indicano che i danni previsti sono coerenti con l'entità e i modelli dello sviluppo economico storico (vedere la sezione [5](#) della discussione supplementare).

Impatti mancanti e ricadute spaziali

Nonostante la valutazione di diverse componenti climatiche da cui sono stati recentemente identificati impatti economici [3,7,8](#), questa valutazione dei danni climatici aggregati non dovrebbe essere considerata esaustiva. Canali importanti come gli impatti delle ondate di calore [31](#), dell'innalzamento del livello del mare [36](#),

sume. È improbabile che l'innalzamento del livello del mare possa essere incorporato in modo fattibile in valutazioni empiriche come questa perché la variabilità storica del livello del mare è per lo più piccola. I danni non di mercato sono intrinsecamente intrattabili all'interno delle nostre stime degli impatti sulla produzione monetaria aggregata e le stime di questi impatti potrebbero presumibilmente essere considerate come extra rispetto a quelle identificate qui. Recenti studi empirici suggeriscono che tenere conto di questi canali probabilmente aumenterebbe le stime di questi danni commessi, con danni più grandi che continuerebbero a verificarsi nel Sud del mondo [31](#), [36](#), [37](#), [38](#), [39](#), [40](#), [41](#), [42](#).

Inoltre, la nostra principale analisi empirica non valuta esplicitamente il potenziale degli impatti nelle regioni locali per produrre effetti che si "ripercuotono" su altre regioni. Tali effetti possono ulteriormente mitigare o amplificare gli impatti che stimiamo, ad esempio, se le aziende trasferiscono la produzione da una regione interessata a un'altra o se gli impatti si propagano lungo le catene di fornitura. La letteratura attuale indica che il commercio svolge un ruolo sostanziale nella propagazione degli effetti di ricaduta [43](#), [44](#), rendendo la loro valutazione a livello subnazionale difficile senza dati disponibili sulle dipendenze commerciali subnazionali. Studi che tengono conto solo dei vicini spazialmente adiacenti indicano che gli impatti negativi in una regione inducono ulteriori impatti negativi nelle regioni vicine [45](#), [46](#), [47](#), [48](#), suggerendo che i nostri danni previsti sono probabilmente conservativi escludendo questi effetti. Nella Figura supplementare [14](#), valutiamo gli effetti di ricaduta dalle regioni vicine utilizzando un modello di ritardo spaziale. Per semplicità, questa analisi esclude i ritardi temporali, concentrandosi solo sugli effetti contemporanei. I risultati mostrano che la contabilizzazione degli spillover spaziali può amplificare la portata complessiva, e anche l'eterogeneità, degli impatti. In linea con la letteratura precedente, ciò indica che la portata complessiva (Fig. [1](#)) e l'eterogeneità (Fig. [3](#)) dei danni che proiettiamo nella nostra specifica principale potrebbero essere conservative senza contabilizzare esplicitamente gli spillover. Notiamo che un'ulteriore analisi che affronti sia gli spillover spaziali che quelli connessi al commercio, tenendo conto anche degli impatti ritardati utilizzando

ma vanno oltre lo scopo di questo manoscritto, che mira principalmente a esplorare gli impatti di diverse condizioni climatiche e la loro persistenza.

Implicazioni politiche

Abbiamo scoperto che i danni economici derivanti dal cambiamento climatico fino al 2049 sono quelli per cui l'economia mondiale è già impegnata e che questi superano di gran lunga i costi necessari per mitigare le emissioni in linea con l'obiettivo di 2 °C dell'accordo di Parigi sul clima (Fig. 1). Questa valutazione è complementare alle analisi formali dei costi e dei benefici netti associati al passaggio da un percorso di emissione a un altro, che in genere rilevano che i benefici netti della mitigazione emergono solo nella seconda metà del secolo⁵. Il nostro semplice confronto tra l'entità dei danni e i costi di mitigazione chiarisce che ciò è dovuto principalmente al fatto che i danni sono indistinguibili tra gli scenari di emissioni, ovvero impegnati, fino a metà secolo (Fig. 1) e che sono in realtà già molto più grandi dei costi di mitigazione. Per semplicità, e grazie alla disponibilità di dati, confrontiamo i danni con i costi di mitigazione a livello globale. Le stime regionali dei costi di mitigazione possono far luce ulteriormente sugli incentivi nazionali per la mitigazione a cui i nostri risultati già accennano, di rilevanza per la politica climatica internazionale. Sebbene questi danni siano commessi da una prospettiva di mitigazione, l'adattamento può fornire un'opportunità per ridurli. Inoltre, la forte divergenza dei danni dopo la metà del secolo ribadisce i chiari benefici della mitigazione da una prospettiva puramente economica, come evidenziato in studi precedenti^{1,4,6,24}.

Metodi

Dati climatici storici

I totali storici giornalieri di temperatura e precipitazioni a 2 m (in mm) sono ottenuti per il periodo 1979-2019 dal database W5E5. Il set di dati W5E5 proviene da ERA-5, una rianalisi all'avanguardia di osservazioni storiche, ma è stato corretto per i bias applicando la versione 2.0 dei dati di forzatura WATCH ai dati di rianalisi ERA-5 e ai dati sulle precipitazioni dalla versione 2.3 del Global Precipitation Climatology

intercomparison project (ISIMIP). In particolare, questi dati storici sono stati utilizzati per correggere le proiezioni climatiche future da CMIP-6 (vedere la sezione seguente), assicurando coerenza tra la distribuzione del meteo giornaliero storico su cui sono stati stimati i nostri modelli empirici e le proiezioni climatiche utilizzate per stimare i danni futuri. Questi dati sono disponibili al pubblico dal database ISIMIP. Vedere i riferimenti [7,8](#) per i test di robustezza dei modelli empirici alla scelta dei prodotti di rianalisi dei dati climatici.

Dati climatici futuri

I totali giornalieri di temperatura e precipitazioni a 2 m (in mm) sono tratti da 21 modelli climatici che partecipano al CMIP-6 in uno scenario di emissioni di gas serra elevate (RCP8.5) e basse (RCP2.6) dal 2015 al 2100. I dati sono stati corretti per distorsione e ridimensionati statisticamente a una griglia comune di mezzo grado per riflettere la distribuzione storica di temperatura e precipitazioni giornaliere del set di dati W5E5 utilizzando il metodo di conservazione del trend sviluppato dall'ISIMIP [50](#), [52](#). Pertanto, i dati del modello climatico riproducono eccezionalmente bene i modelli climatologici osservati (Tabella supplementare [5](#)). I dati in griglia sono disponibili al pubblico dal database ISIMIP.

Dati economici storici

I dati economici storici provengono dal database DOSE della produzione economica subnazionale [53](#). Utilizziamo una recente revisione del dataset DOSE che fornisce dati su 83 paesi, 1.660 regioni subnazionali con copertura temporale variabile dal 1960 al 2019. Le unità subnazionali costituiscono la prima divisione amministrativa al di sotto di quella nazionale, ad esempio, gli stati per gli USA e le province per la Cina. I dati provengono da misure del prodotto regionale lordo pro capite (GRPpc) o reddito pro

letteratura precedente ——— e valutiamo la produzione subnazionale reale pro capite convertendo prima i valori dalle valute locali in dollari USA per tenere conto delle divergenti tendenze inflazionistiche nazionali e poi tenendo conto dell'inflazione statunitense utilizzando un deflatore statunitense. In alternativa, si potrebbe prima tenere conto dell'inflazione nazionale e poi convertire tra valute. La Figura [12](#) supplementare dimostra che le nostre conclusioni sono coerenti quando si tiene conto delle variazioni di prezzo in ordine inverso, sebbene l'entità dei danni stimati vari. Vedere la documentazione del dataset DOSE per un'ulteriore discussione di queste scelte. Le conversioni tra valute vengono condotte utilizzando i tassi di cambio del database FRED della Federal Reserve Bank di St. Louis [55](#) e i deflatori nazionali della Banca Mondiale [56](#).

Dati socio-economici futuri

I dati di base sul prodotto interno lordo (PIL) e sulla popolazione in griglia per il periodo 2015-2100 sono tratti dallo scenario intermedio SSP2 (rif. [15](#)). I dati sulla popolazione sono stati ridimensionati a una griglia di mezzo grado dall'ISIMIP seguendo le metodologie dei rif. [57](#), [58](#), che poi aggregiamo al livello subnazionale dei nostri dati economici utilizzando la procedura di aggregazione spaziale descritta di seguito. Poiché le attuali metodologie per ridimensionare il PIL degli SSP utilizzano la popolazione ridimensionata per farlo, le stime pro capite del PIL con una distribuzione realistica a livello subnazionale non sono prontamente disponibili per gli SSP. Pertanto utilizziamo proiezioni del PIL pro capite (PILpc) a livello nazionale per tutte le regioni subnazionali di un dato paese, presupponendo l'omogeneità all'interno dei paesi in termini di PILpc di base. Qui utilizziamo proiezioni che sono state aggiornate per tenere conto dell'impatto della pandemia di COVID-19 sulla traiettoria del reddito futuro, pur rimanendo coerenti con lo sviluppo a lungo termine degli SSP [59](#). La scelta dell'SSP di base altera l'entità dei danni climatici previsti in termini monetari, ma quando valutata in termini di variazione percentuale

pubblico dal database ISMIR. Le serie subnazionali utilizzate in questo studio sono disponibili nei file di replicazione del codice e dei dati.

Variabili climatiche

Seguendo la recente letteratura [3](#), [7](#), [8](#), calcoliamo una serie di variabili climatiche per le quali sono stati identificati empiricamente impatti sostanziali sulla produzione macroeconomica, supportati da ulteriori prove a livello micro per meccanismi sottostanti plausibili. Vedere i riferimenti [7](#), [8](#) per una motivazione estesa per l'uso di queste particolari variabili climatiche e per test empirici dettagliati sulla natura e la robustezza dei loro effetti sulla produzione economica. Per riassumere, questi studi hanno trovato prove di impatti indipendenti sui tassi di crescita economica dalla temperatura media annuale, dalla variabilità giornaliera della temperatura, dalle precipitazioni annuali totali, dal numero annuale di giorni di pioggia e dalle precipitazioni giornaliere estreme. Le valutazioni della variabilità giornaliera della temperatura sono state motivate da prove di impatti sulla produzione agricola e sulla salute umana, nonché dalla letteratura macroeconomica sugli impatti della volatilità sulla crescita quando si manifesta in diverse dimensioni, come la spesa pubblica, i tassi di cambio e persino la produzione stessa [7](#). Le valutazioni degli impatti delle precipitazioni sono state motivate da prove di impatti sulla produttività agricola, sui risultati del lavoro metropolitano e sui conflitti, nonché dai danni causati dalle inondazioni improvvise [8](#). Vedere la Tabella dati estesa [1](#) per riferimenti dettagliati agli studi empirici di questi meccanismi fisici. Gli impatti marcati della variabilità della temperatura giornaliera, delle precipitazioni annuali totali, del numero di giorni di pioggia e delle precipitazioni giornaliere estreme sulla produzione macroeconomica sono stati identificati in modo robusto attraverso diversi set di dati climatici, schemi di aggregazione spaziale, specifiche di tendenze temporali regionali e approcci di clustering di errori. Sono stati inoltre trovati robusti alla considerazione di temperature estreme [7](#), [8](#). Inoltre, queste variabili climatiche sono state identificate

dei risultati alle preoccupazioni di malcomunicanza imperfetta tra variabili climatiche (Sezione 2 dei metodi supplementari), nonché utilizzando criteri informativi (Tabella supplementare 1) per dimostrare che l'inclusione di diverse variabili climatiche ritardate fornisce un compromesso preferibile tra la descrizione ottimale dei dati e la limitazione della possibilità di overfitting.

Calcoliamo queste variabili dalla distribuzione della temperatura giornaliera, $d, T_{x,d}$, e delle precipitazioni, $P_{x,d}$, a livello di cella della griglia, x , sia per i dati climatici storici che per quelli futuri. Oltre alla temperatura media annuale, $\bar{T}_{x,y}$, e alle precipitazioni totali annuali, $P_{x,y}$, calcoliamo le misure annuali, y , della variabilità della temperatura giornaliera, $\tilde{T}_{x,y}$:

$$\tilde{T}_{x,y} = \frac{1}{12} \sum_{m=1}^{12} \sqrt{\frac{1}{D_m} \sum_{d=1}^{D_m} (T_{x,d,m,y} - \bar{T}_{x,m})^2},$$

(1)

il numero di giorni piovosi, $\text{Pw}_{x,y}$:

$$\text{Pw}_{x,y} = \sum_{d=1}^{D_y} H(P_{x,d} - 1 \text{ mm})$$

(2)

e precipitazioni giornaliere estreme:

$$\text{Pext}_{x,y} = \sum_{d=1}^{D_y} H(P_{x,d} - P_{99.9_x}) \times P_{x,d},$$

in cui $T_{x,d,m,y}$ è la temperatura giornaliera specifica della cella della griglia nel mese m e nell'anno y , $\bar{T}_{x,m,y}$ è la temperatura media mensile specifica dell'anno e della cella della griglia, D_m e D_y il numero di giorni in un dato mese m o anno y , rispettivamente, H la funzione a gradini di Heaviside, 1 mm la soglia utilizzata per definire i giorni di pioggia e $P_{99,9,x}$ è il 99,9° percentile delle precipitazioni giornaliere storiche (1979-2019) a livello di cella della griglia. Le unità delle misure climatiche sono gradi Celsius per la temperatura media annuale e la variabilità della temperatura giornaliera, millimetri per la precipitazione annuale totale e le precipitazioni giornaliere estreme e semplicemente il numero di giorni per il numero annuale di giorni di pioggia.

$\bar{T}_{x,m,y}$

Abbiamo anche calcolato le deviazioni standard ponderate dei totali delle precipitazioni mensili, come utilizzato anche nel riferimento [8](#), ma non le includiamo nelle nostre proiezioni poiché abbiamo scoperto che, quando si tengono conto degli effetti ritardati, il loro effetto diventa statisticamente indistinto e viene meglio catturato dalle variazioni delle precipitazioni annuali totali.

Aggregazione spaziale

Aggreghiamo le misure climatiche storiche e future a livello di cella della griglia, nonché il PILpc e la popolazione futuri a livello di cella della griglia, al livello della prima unità amministrativa al di sotto del livello nazionale del database GADM, utilizzando un algoritmo di ponderazione dell'area che stima la porzione di ogni cella della griglia che rientra in un confine amministrativo. Utilizziamo questo come specifica di base in seguito a precedenti scoperte secondo cui l'effetto della ponderazione dell'area o della popolazione a livello subnazionale è trascurabile [7,8](#).

Specifica del modello empirico: modelli di ritardo distribuito a effetti fissi

Seguendo un'ampia gamma di letteratura econometrica sul clima [16](#), [60](#), utilizziamo modelli di regressione panel con una selezione di effetti fissi e tendenze temporali per isolare una variazione plausibilmente esogena con cui massimizzare la fiducia in un'interpretazione causale degli effetti del clima sui tassi di crescita economica. L'uso di effetti fissi regionali, μ_r , tiene conto delle differenze invarianti nel tempo non osservate tra regioni, come le norme climatiche prevalenti e i tassi di crescita dovuti a fattori storici e geopolitici. L'uso di effetti fissi annuali, η_y , tiene conto degli shock annuali invarianti a livello regionale al clima o all'economia globale come l'oscillazione El Niño-Southern o le recessioni globali. Nella nostra specifica di base, includiamo anche tendenze temporali lineari specifiche per regione, $k_r y$, per escludere la possibilità di correlazioni spurie derivanti da comuni tendenze lente nel clima e nella crescita.

La persistenza degli impatti climatici sui tassi di crescita economica è un fattore determinante della portata a lungo termine dei danni. I metodi per dedurre l'entità della persistenza degli impatti sui tassi di crescita hanno in genere utilizzato variabili climatiche ritardate per valutare la presenza di effetti ritardati o dinamiche di recupero [2](#), [18](#). Ad esempio, si consideri di partire da un modello in cui una condizione climatica, $C_{r,y}$, (ad esempio, la temperatura media annuale) influisce sul tasso di crescita, $\Delta \lg \text{grp}_{r,y}$ (la prima differenza del logaritmo del prodotto regionale lordo) della regione r nell'anno y :

$$\Delta \lg \text{grp}_{r,y} = \mu_r + \eta_y + k_r y + \alpha C_{r,y} + \varepsilon_{r,y},$$

(4)

che nel testo principale chiamiamo modello di "effetti di crescita pura". In genere, sono inclusi ulteriori ritardi,

(5)

e l'effetto cumulativo di tutti i termini ritardati viene valutato per valutare la misura in cui gli impatti climatici sui tassi di crescita persistono. Seguendo il rif. [18](#), nel caso in cui,

$$\sum_{L=0}^{NL} \alpha_L < 0 \text{ for } \alpha_0 < 0 \text{ or } \sum_{L=0}^{NL} \alpha_L > 0 \text{ for } \alpha_0 > 0,$$

(6)

l'implicazione è che gli impatti sul tasso di crescita persistono fino a NL anni dopo lo shock iniziale (eventualmente in misura più debole o più forte), mentre se

$$\sum_{L=0}^{NL} \alpha_L = 0,$$

(7)

quindi l'impatto iniziale sul tasso di crescita viene recuperato dopo anni NL e l'effetto è solo uno sul livello di output. Tuttavia, notiamo che tali approcci sono limitati dal fatto che, quando si include un numero insufficiente di ritardi per rilevare un recupero dei tassi di crescita, si può trovare l'equazione (6) soddisfatta e supporre erroneamente che un cambiamento nelle condizioni climatiche influenzi il tasso di crescita indefinitamente. In pratica, dato un record limitato di dati storici, è probabile includere troppi pochi ritardi per concludere con sicurezza in un impatto indefinitamente persistente sul tasso di crescita, in particolare sulle lunghe scale temporali su cui vengono spesso proiettati i danni climatici futuri [2](#), [24](#). Per evitare

$$\ln \text{grp}_{r,y} = \mu_r + \eta_y + k_r y + \alpha C_{r,y} + \varepsilon_{r,y}.$$

(8)

Data la non stazionarietà del livello di output, seguiamo la letteratura [19](#) e stimiamo tale equazione in forma prima differenziata come,

$$\Delta \ln \text{grp}_{r,y} = \mu_r + \eta_y + k_r y + \alpha \Delta C_{r,y} + \varepsilon_{r,y},$$

(8)

che nel testo principale chiamiamo modello di "effetti di livello puri". Questo modello costituisce una specifica di base in cui un cambiamento permanente nella variabile climatica produce un impatto istantaneo sul tasso di crescita e un effetto permanente solo sul livello di output. Includendo variabili ritardate in questa specifica,

$$\Delta \ln \text{grp}_{r,y} = \mu_r + \eta_y + k_r y + \sum_{L=0}^{\text{NL}} \alpha_L \Delta C_{r,y-L} + \varepsilon_{r,y},$$

(9)

siamo in grado di verificare se gli impatti sul tasso di crescita persistono più a lungo di quanto non sia istantaneo valutando se $\alpha_L > 0$ sono statisticamente significativamente diversi da zero. Sebbene questo framework sia anche limitato dalla possibilità di includere troppi pochi ritardi, la scelta di una specifica del modello di base in cui gli impatti sul tasso di crescita non persistono significa che, nel caso di inclusione di troppi pochi ritardi, il framework torna alla specifica di base degli effetti di livello. In quanto tale, questo framework è conservativo rispetto alla persistenza degli impatti e all'entità dei danni futuri. Evita naturalmente ipotesi di persistenza

climatico sui tassi di crescita. Vedere il testo principale per un'ulteriore discussione di questa scelta di specificazione, in particolare sulla sua natura conservativa rispetto alle stime della letteratura precedente, come i riferimenti [2,18](#).

Permettiamo che la risposta ai cambiamenti climatici vari tra le regioni, utilizzando le interazioni delle variabili climatiche con le condizioni climatiche medie storiche (1979-2019) che riflettono gli effetti eterogenei identificati in lavori precedenti [7,8](#). In seguito a questo lavoro precedente, le variabili moderatrici di questi termini di interazione costituiscono la media storica della variabile stessa o della differenza di temperatura stagionale, , o della temperatura media annuale, , nel caso rispettivamente della variabilità della temperatura giornaliera [7](#) e delle precipitazioni giornaliere estreme [8](#). $\hat{T}_r \bar{T}_r$

L'equazione di regressione risultante con N e M variabili ritardate, rispettivamente, è la seguente:

$$\begin{aligned} \Delta \lg \text{grp}_{r,y} = & \mu_r + \eta_y + k_r y + \sum_{L=0}^N (\alpha_{1,L} \Delta \bar{T}_{r,y-L} + \alpha_{2,L} \Delta \bar{T}_{r,y-L} \times \bar{T}_r) \\ & + \sum_{L=0}^N (\alpha_{3,L} \Delta \tilde{T}_{r,y-L} + \alpha_{4,L} \Delta \tilde{T}_{r,y-L} \times \hat{T}_r) \\ & + \sum_{L=0}^M (\alpha_{5,L} \Delta P_{r,y-L} + \alpha_{6,L} \Delta P_{r,y-L} \times P_r) \\ & + \sum_{L=0}^M (\alpha_{7,L} \Delta \text{Pwd}_{r,y-L} + \alpha_{8,L} \Delta \text{Pwd}_{r,y-L} \times \text{Pwd}_r) \\ & + \sum_{L=0}^M (\alpha_{9,L} \Delta \text{Pext}_{r,y-L} + \alpha_{10,L} \Delta \text{Pext}_{r,y-L} \times \bar{T}_r) + \epsilon_{r,y} \end{aligned}$$

(10)

in cui $\Delta \lg \text{grp}_{r,y}$ è il tasso di crescita annuale regionale del GRPpc, misurato come la prima differenza del logaritmo del GRPpc reale, seguendo i lavori precedenti [2,3,7,8](#),

Le stime dei coefficienti di interesse $\alpha_{i,L}$ sono mostrate nella Figura [1](#) dei dati estesi per ritardi $N = M = 10$ e per la nostra scelta preferita del numero di ritardi nelle Figure supplementari [1](#) – [3](#). Nella Figura [1](#) dei dati estesi, gli errori sono mostrati raggruppati a livello regionale, ma per la costruzione delle proiezioni dei danni, eseguiamo il bootstrap a blocchi delle regressioni per regione 1.000 volte per fornire un intervallo di stime dei parametri con cui campionare l'incertezza della proiezione (seguendo i riferimenti [2](#), [31](#)).

Modello di ritardo spaziale

Nella Figura supplementare [14](#), presentiamo i risultati di un modello di ritardo spaziale che esplora il potenziale degli impatti climatici di "riversarsi" in regioni spazialmente vicine. Misuriamo la distanza tra i centroidi di ciascuna coppia di regioni subnazionali e costruiamo ritardi spaziali che prendono la media delle variabili climatiche differenziate per prime e i loro termini di interazione sulle regioni vicine che si trovano a distanze di 0-500, 500-1.000, 1.000-1.500 e 1.500-2.000 km (ritardi spaziali, "SL", da 1 a 4). Per semplicità, valutiamo quindi un modello di ritardo spaziale senza ritardi temporali per valutare gli spillover spaziali degli impatti climatici contemporanei. Questo modello assume la forma:

$$\begin{aligned}
& + \sum_{SL=0}^N (\alpha_{3,SL} \Delta \tilde{T}_{r-SL,y} + \alpha_{4,SL} \Delta \tilde{T}_{r-SL,y} \times \hat{T}_{r-SL}) \\
& + \sum_{SL=0}^N (\alpha_{5,SL} \Delta P_{r-SL,y} + \alpha_{6,SL} \Delta P_{r-SL,y} \times P_{r-SL}) \\
& + \sum_{SL=0}^N (\alpha_{7,SL} \Delta Pwd_{r-SL,y} + \alpha_{8,SL} \Delta Pwd_{r-SL,y} \times Pwd_{r-SL}) \\
& + \sum_{SL=0}^N (\alpha_{9,SL} \Delta Pext_{r-SL,y} + \alpha_{10,SL} \Delta Pext_{r-SL,y} \times \bar{T}_{r-SL}) + \epsilon_{r,y},
\end{aligned}$$

(11)

in cui SL indica il ritardo spaziale di ogni variabile climatica e termine di interazione. Nella Figura supplementare [14](#), tracciamo l'effetto marginale cumulativo di ogni variabile climatica a diverse condizioni climatiche di base sommando i coefficienti per ogni variabile climatica e termine di interazione, ad esempio, per gli impatti della temperatura media come:

$$ME = \sum_{SL=0}^N (\alpha_{1,SL} + \alpha_{2,SL} \bar{T}_{r-SL}).$$

(12)

Questi effetti marginali cumulativi possono essere considerati come l'impatto complessivo dipendente dallo spazio su una singola regione, dato uno shock di un'unità a una variabile climatica in quella regione e in tutte le regioni limitrofe a un dato valore della variabile moderatrice del termine di interazione.

Costruire proiezioni dei danni economici derivanti dai futuri cambiamenti climatici

Costruiamo proiezioni di futuri danni climatici applicando i coefficienti stimati nell'equazione (10) e mostrati nelle Tabelle supplementari 2 – 4 (quando si includono solo ritardi con effetti statisticamente significativi nelle specifiche che limitano l'overfitting; vedere la Sezione 1 dei Metodi supplementari) alle proiezioni di futuri cambiamenti climatici dai modelli CMIP-6. I cambiamenti anno su anno in ciascuna variabile climatica primaria di interesse sono calcolati per riflettere le variazioni anno su anno utilizzate nei modelli empirici. Le medie mobili a 30 anni delle variabili moderatrici dei termini di interazione sono calcolate per riflettere la media a lungo termine delle condizioni climatiche che sono state utilizzate per le variabili moderatrici nei modelli empirici. Utilizzando le medie mobili nelle proiezioni, teniamo conto della vulnerabilità mutevole agli shock climatici in base alle condizioni a lungo termine in evoluzione (le Figure supplementari 10 e 11 mostrano che i risultati sono robusti alla scelta precisa della finestra di questa media mobile). Sebbene queste variabili climatiche non siano differenziate, il fatto che i modelli climatici con aggiustamento dei bias riproducano in modo molto accurato i modelli climatologici osservati in tutte le regioni per queste variabili moderatrici (Tabella supplementare 6) con una diffusione limitata tra i modelli (<3%) esclude la possibilità che questa scelta metodologica introduca un bias o un'incertezza considerevole. Tuttavia, imponiamo dei limiti a queste variabili moderatrici al 95° percentile in cui sono state osservate nei dati storici per impedire l'estrapolazione degli effetti marginali al di fuori dell'intervallo in cui sono state stimate le regressioni. Questa è una scelta prudente che limita l'entità delle nostre proiezioni dei danni.

Le serie temporali delle variabili climatiche primarie e delle variabili climatiche moderatrici vengono quindi combinate con le stime dei parametri del modello empirico per valutare i coefficienti di regressione nell'equazione (10), producendo una serie temporale delle riduzioni annuali del tasso di crescita del GRPpc per un dato scenario di emissione, modello climatico e set di parametri del modello empirico. La serie temporale risultante degli impatti del tasso di crescita riflette quelli che si

cambiano (se non con fluttuazioni casuali anno dopo anno) e quindi la valutazione mediata nel tempo dell'equazione (10) sarebbe zero. Il nostro approccio quindi confronta implicitamente lo scenario futuro del cambiamento climatico con questo scenario di base senza cambiamento climatico.

Le serie temporali degli impatti del tasso di crescita dovuti al futuro cambiamento climatico nella regione r e nell'anno y , $\delta_{r,y}$, vengono quindi aggiunte ai futuri tassi di crescita di base, $\pi_{r,y}$ (in forma di differenza logaritmica), ottenuti dallo scenario SSP2 per produrre traiettorie dei tassi di crescita del GRPpc danneggiato, $\rho_{r,y}$. Queste traiettorie vengono aggregate nel tempo per stimare la futura traiettoria del GRPpc con futuri impatti climatici:

$$\text{GRPpc}_{r,Y} = \text{GRPpc}_{r,2020} \sum_{y=2020}^Y \rho_{r,y} = \text{GRPpc}_{r,2020} \sum_{y=2020}^Y (1 + \pi_{r,y} + \delta_{r,y}),$$

(13)

in cui $\text{GRPpc}_{r,y=2020}$ è il livello logaritmico iniziale di GRPpc. Iniziamo le stime dei danni nel 2020 per riflettere i danni verificatisi dalla fine del periodo per il quale stimiamo i modelli empirici (1979-2019) e per adattare la tempistica delle stime dei costi di mitigazione dalla maggior parte degli IAM (vedi sotto).

Per ogni scenario di emissione, questa procedura viene ripetuta 1.000 volte campionando casualmente dalla selezione di modelli climatici, dalla selezione di modelli empirici con diversi numeri di ritardi (mostrati nelle Figure supplementari 1 – 3 e nelle Tabelle supplementari 2 – 4) e dalle stime bootstrapped dei parametri di regressione. Il risultato è un insieme di traiettorie future GRPpc che riflettono l'incertezza sia del cambiamento climatico fisico sia dell'incertezza strutturale e di campionamento dei modelli empirici.

Stime dei costi di mitigazione

Otteniamo le stime IPCC dei costi aggregati di mitigazione delle emissioni da AR6 Scenario Explorer e Database ospitato da IIASA ²³. In particolare, cerchiamo nell'AR6 Scenarios Database World v1.1 gli IAM che hanno fornito stime del PIL e della popolazione globali sia in base a uno scenario di base SSP2 che in uno scenario SSP2-RCP2.6 per mantenere la coerenza con gli scenari socioeconomici e di emissione delle proiezioni dei danni climatici. Troviamo cinque IAM che forniscono dati per questi scenari, vale a dire MESSAGE-GLOBIOM 1.0, REMIND-MAGPIE 1.5, AIM/GCE 2.0, GCAM 4.2 e WITCH-GLOBIOM 3.1. Di questi cinque IAM, utilizziamo i risultati solo dei primi tre che hanno superato la procedura di verifica IPCC per la riproduzione delle traiettorie storiche di emissioni e clima. Stimiamo quindi i costi di mitigazione globali come la differenza percentuale nel PIL pro capite globale tra la baseline SSP2 e lo scenario di emissione SSP2-RCP2.6. Nel caso di uno di questi IAM, le stime dei costi di mitigazione iniziano nel 2020, mentre nel caso di altri due, i costi di mitigazione iniziano nel 2010. Le stime dei costi di mitigazione prima del 2020 in questi due IAM sono per lo più trascurabili e la nostra scelta di iniziare il confronto con le stime dei danni nel 2020 è prudente rispetto al peso relativo dei danni climatici rispetto ai costi di mitigazione per questi due IAM.

Disponibilità dei dati

I dati sulla produzione economica e i dati climatici ERA-5 sono disponibili al pubblico rispettivamente su <https://doi.org/10.5281/zenodo.4681306> (rif. ⁶²) e <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>. I dati sui costi di mitigazione sono disponibili al pubblico su <https://data.ene.iiasa.ac.at/ar6/#/downloads>. I dati climatici ed economici elaborati, nonché tutti gli altri dati necessari per la riproduzione dei risultati, sono disponibili nel repository pubblico <https://doi.org/10.5281/zenodo.10562951> (rif. ⁶³).

Disponibilità del codice

Cronologia delle modifiche

24 giugno 2024 Una correzione a questo articolo è stata pubblicata:

<https://doi.org/10.1038/s41586-024-07732-2>

Riferimenti

1. Glanemann, N., Willner, SN e Levermann, A. L'accordo di Parigi sul clima supera il test costi-benefici. *Nat. Commun.* **11**, 110 (2020).
 2. Burke, M., Hsiang, SM & Miguel, E. Effetto non lineare globale della temperatura sulla produzione economica. *Nature* **527**, 235–239 (2015).
 3. Kalkuhl, M. & Wenz, L. L'impatto delle condizioni climatiche sulla produzione economica. Evidenza da un panel globale di regioni. *J. Environ. Econ. Manag.* **103**, 102360 (2020).
 4. Moore, FC e Diaz, DB Gli impatti della temperatura sulla crescita economica giustificano una politica di mitigazione rigorosa. *Nat. Clim. Change* **5**, 127–131 (2015).
 5. Drouet, L., Bosetti, V. & Tavoni, M. Benefici economici netti di scenari ben al di sotto dei 2°C e incertezze associate. *Oxf. Open Clim. Change* **2**, kgac003 (2022).
 6. Ueckerdt, F. et al. Il limite di riscaldamento economicamente ottimale del pianeta. *Earth Syst. Dyn.* **10**, 741–763 (2019).
-

8. Kotz, M., Levermann, A. & Wenz, L. L'effetto dei cambiamenti delle precipitazioni sulla produzione economica. *Nature* **601**, 223–227 (2022).
9. Kousky, C. Informare l'adattamento climatico: una revisione dei costi economici dei disastri naturali. *Energy Econ.* **46**, 576–592 (2014).
10. Harlan, SL et al. in *Climate Change and Society: Sociological Perspectives* (a cura di Dunlap, RE e Brulle, RJ) 127–163 (Oxford Univ. Press, 2015).
11. Bolton, P. et al. *Il cigno verde* (BIS Books, 2020).
12. Alogoskoufis, S. et al. *ECB Economy-wide Climate Stress Test: metodologia e risultati* (Banca centrale europea, 2021).
13. Weber, EU Cosa determina la percezione del cambiamento climatico? *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change* **1**, 332–342 (2010).
14. Markowitz, EM e Shariff, AF Cambiamento climatico e giudizio morale. *Nat. Clim. Change* **2**, 243–247 (2012).
15. Riahi, K. et al. I percorsi socioeconomici condivisi e le loro implicazioni in termini di energia, uso del suolo ed emissioni di gas serra: una panoramica. *Glob. Environ. Change* **42**, 153–168 (2017).

17. Kolstad, CD e Moore, FC Stima degli impatti economici del cambiamento climatico utilizzando le osservazioni meteorologiche. *Rev. Environ. Econ. Policy* **14**, 1–24 (2020).

18. Dell, M., Jones, BF e Olken, BA Shock termici e crescita economica: evidenze dell'ultimo mezzo secolo. *Am. Econ. J. Macroecon.* **4**, 66–95 (2012).

19. Newell, RG, Prest, BC e Sexton, SE La relazione PIL-temperatura: implicazioni per i danni del cambiamento climatico. *J. Environ. Econ. Manag.* **108**, 102445 (2021).

20. Kikstra, J. S. et al. The social cost of carbon dioxide under climate-economy feedbacks and temperature variability. *Environ. Res. Lett.* **16**, 094037 (2021).

21. Bastien-Olvera, B., Granella, F. & Moore, F. Persistent effect of temperature on GDP identified from lower frequency temperature variability. *Environ. Res. Lett.* **17**, 084038 (2022).

22. Eyring, V. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.* **9**, 1937–1958 (2016).

23. Byers, E. et al. AR6 scenarios database. *Zenodo* <https://zenodo.org/records/7197970> (2022).

25. Kotz, M., Wenz, L. & Levermann, A. Footprint of greenhouse forcing in daily temperature variability. *Proc. Natl Acad. Sci.* **118**, e2103294118 (2021).
26. Myhre, G. et al. Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming. *Sci. Rep.* **9**, 16063 (2019).
27. Min, S.-K., Zhang, X., Zwiers, F. W. & Hegerl, G. C. Human contribution to more-intense precipitation extremes. *Nature* **470**, 378–381 (2011).
28. England, M. R., Eisenman, I., Lutsko, N. J. & Wagner, T. J. The recent emergence of Arctic Amplification. *Geophys. Res. Lett.* **48**, e2021GL094086 (2021).
29. Fischer, E. M. & Knutti, R. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nat. Clim. Change* **5**, 560–564 (2015).
30. Pfahl, S., O’Gorman, P. A. & Fischer, E. M. Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. *Nat. Clim. Change* **7**, 423–427 (2017).
31. Callahan, C. W. & Mankin, J. S. Globally unequal effect of extreme heat on economic growth. *Sci. Adv.* **8**, eadd3726 (2022).

-
33. Callahan, C. W. & Mankin, J. S. National attribution of historical climate damages. *Clim. Change* **172**, 40 (2022).
-
34. Burke, M. & Tanutama, V. Climatic constraints on aggregate economic output. National Bureau of Economic Research, Working Paper 25779. <https://doi.org/10.3386/w25779> (2019).
-
35. Kahn, M. E. et al. Long-term macroeconomic effects of climate change: a cross-country analysis. *Energy Econ.* **104**, 105624 (2021).
-
36. Desmet, K. et al. Evaluating the economic cost of coastal flooding. National Bureau of Economic Research, Working Paper 24918. <https://doi.org/10.3386/w24918> (2018).
-
37. Hsiang, S. M. & Jina, A. S. The causal effect of environmental catastrophe on long-run economic growth: evidence from 6,700 cyclones. National Bureau of Economic Research, Working Paper 20352. <https://doi.org/10.3386/w2035> (2014).
-
38. Ritchie, P. D. et al. Shifts in national land use and food production in Great Britain after a climate tipping point. *Nat. Food* **1**, 76–83 (2020).
-
39. Dietz, S., Rising, J., Stoerk, T. & Wagner, G. Economic impacts of tipping points in the climate system. *Proc. Natl Acad. Sci.* **118**, e2103081118 (2021).
-

41. Carleton, T. et al. Valuing the global mortality consequences of climate change accounting for adaptation costs and benefits. *Q.J. Econ.* **137**, 2037–2105 (2022).
42. Bastien-Olvera, B. A. et al. Unequal climate impacts on global values of natural capital. *Nature* **625**, 722–727 (2024).
43. Malik, A. et al. Impacts of climate change and extreme weather on food supply chains cascade across sectors and regions in Australia. *Nat. Food* **3**, 631–643 (2022).
44. Kuhla, K., Willner, S. N., Otto, C., Geiger, T. & Levermann, A. Ripple resonance amplifies economic welfare loss from weather extremes. *Environ. Res. Lett.* **16**, 114010 (2021).
45. Schleypen, J. R., Mistry, M. N., Saeed, F. & Dasgupta, S. Sharing the burden: quantifying climate change spillovers in the European Union under the Paris Agreement. *Spat. Econ. Anal.* **17**, 67–82 (2022).
46. Dasgupta, S., Bosello, F., De Cian, E. & Mistry, M. Global temperature effects on economic activity and equity: a spatial analysis. European Institute on Economics and the Environment, Working Paper 22-1 (2022).
47. Neal, T. The importance of external weather effects in projecting the macroeconomic impacts of climate change. UNSW Economics Working Paper 2023-09 (2023).

49. Hersbach, H. et al. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **146**, 1999–2049 (2020).
50. Cucchi, M. et al. WFDE5: bias-adjusted ERA5 reanalysis data for impact studies. *Earth Syst. Sci. Data* **12**, 2097–2120 (2020).
51. Adler, R. et al. *The New Version 2.3 of the Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Analysis Product* 1072–1084 (University of Maryland, 2016).
52. Lange, S. Trend-preserving bias adjustment and statistical downscaling with ISIMIP3BASD (v1.0). *Geosci. Model Dev.* **12**, 3055–3070 (2019).
53. Wenz, L., Carr, R. D., Kögel, N., Kotz, M. & Kalkuhl, M. DOSE – global data set of reported sub-national economic output. *Sci. Data* **10**, 425 (2023).
54. Gennaioli, N., La Porta, R., Lopez De Silanes, F. & Shleifer, A. Growth in regions. *J. Econ. Growth* **19**, 259–309 (2014).
55. Board of Governors of the Federal Reserve System (US). U.S. dollars to euro spot exchange rate. <https://fred.stlouisfed.org/series/AEXUSEU> (2022).
56. World Bank. GDP deflator. <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.DEFL.ZS> (2022).

-
58. Murakami, D. & Yamagata, Y. Estimation of gridded population and GDP scenarios with spatially explicit statistical downscaling. *Sustainability* **11**, 2106 (2019).
-
59. Koch, J. & Leimbach, M. Update of SSP GDP projections: capturing recent changes in national accounting, PPP conversion and Covid 19 impacts. *Ecol. Econ.* **206** (2023).
-
60. Carleton, T. A. & Hsiang, S. M. Social and economic impacts of climate. *Science* **353**, aad9837 (2016).
-
61. Bergé, L. Efficient estimation of maximum likelihood models with multiple fixed-effects: the R package FENmlm. DEM Discussion Paper Series 18-13 (2018).
-
62. Kalkuhl, M., Kotz, M. & Wenz, L. DOSE - The MCC-PIK Database Of Subnational Economic output. *Zenodo* <https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.4681305> (2021).
-
63. Kotz, M., Wenz, L. & Levermann, A. Data and code for “The economic commitment of climate change”. *Zenodo* <https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.10562951> (2024).
-
64. Dasgupta, S. et al. Effects of climate change on combined labour productivity and supply: an empirical, multi-model study. *Lancet Planet. Health* **5**, e455–e465 (2021).
-

-
66. Zhao, C. et al. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proc. Natl Acad. Sci.* **114**, 9326–9331 (2017).
-
67. Wheeler, T. R., Craufurd, P. Q., Ellis, R. H., Porter, J. R. & Prasad, P. V. Temperature variability and the yield of annual crops. *Agric. Ecosyst. Environ.* **82**, 159–167 (2000).
-
68. Rowhani, P., Lobell, D. B., Linderman, M. & Ramankutty, N. Climate variability and crop production in Tanzania. *Agric. For. Meteorol.* **151**, 449–460 (2011).
-
69. Ceglar, A., Toreti, A., Lecerf, R., Van der Velde, M. & Dentener, F. Impact of meteorological drivers on regional inter-annual crop yield variability in France. *Agric. For. Meteorol.* **216**, 58–67 (2016).
-
70. Shi, L., Kloog, I., Zanobetti, A., Liu, P. & Schwartz, J. D. Impacts of temperature and its variability on mortality in New England. *Nat. Clim. Change* **5**, 988–991 (2015).
-
71. Xue, T., Zhu, T., Zheng, Y. & Zhang, Q. Declines in mental health associated with air pollution and temperature variability in China. *Nat. Commun.* **10**, 2165 (2019).
-
72. Liang, X.-Z. et al. Determining climate effects on US total agricultural productivity. *Proc. Natl Acad. Sci.* **114**, E2285–E2292 (2017).
-

-
74. Damania, R. The economics of water scarcity and variability. *Oxf. Rev. Econ. Policy* **36**, 24–44 (2020).
-
75. Davenport, F. V., Burke, M. & Diffenbaugh, N. S. Contribution of historical precipitation change to US flood damages. *Proc. Natl Acad. Sci.* **118**, e2017524118 (2021).
-
76. Dave, R., Subramanian, S. S. & Bhatia, U. Extreme precipitation induced concurrent events trigger prolonged disruptions in regional road networks. *Environ. Res. Lett.* **16**, 104050 (2021).
-

Acknowledgements

We gratefully acknowledge financing from the Volkswagen Foundation and the Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH on behalf of the Government of the Federal Republic of Germany and Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ).

Funding

Open access funding provided by Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) e.V.

Author information

Authors and Affiliations

Research Domain IV, Research Domain IV, Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany

Maximilian Kotz, Anders Levermann & Leonie Wenz

Institute of Physics, Potsdam University, Potsdam, Germany

Contributions

All authors contributed to the design of the analysis. M.K. conducted the analysis and produced the figures. All authors contributed to the interpretation and presentation of the results. M.K. and L.W. wrote the manuscript.

Corresponding author

Correspondence to [Leonie Wenz](#).

Ethics declarations

Competing interests

The authors declare no competing interests.

Peer review

Peer review information

Nature thanks Xin-Zhong Liang, Chad Thackeray and the other, anonymous, reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. [Peer reviewer reports](#) are available.

Additional information

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Extended data figures and tables

[**Extended Data Fig. 1 Constraining the persistence of historical climate impacts on economic growth rates.**](#)

precipitation (c), the number of wet days (d) and extreme daily precipitation (e) on sub-national economic growth rates. Point estimates show the effects of a 1 °C or one standard deviation increase (for temperature and precipitation variables, respectively) at the lower quartile, median and upper quartile of the relevant moderating variable (green, orange and purple, respectively) at different lagged periods after the initial shock (note that these are not cumulative effects). Climate variables are used in their first-differenced form (see main text for discussion) and the moderating climate variables are the annual mean temperature, seasonal temperature difference, total annual precipitation, number of wet days and annual mean temperature, respectively, in panels a–e (see [Methods](#) for further discussion). Error bars show the 95% confidence intervals having clustered standard errors by region. The within-region R^2 , Bayesian and Akaike information criteria for the model are shown at the top of the figure. This figure shows results with ten lags for each variable to demonstrate the observed levels of persistence, but our preferred specifications remove later lags based on the statistical significance of terms shown above and the information criteria shown in Extended Data Fig. 2. The resulting models without later lags are shown in Supplementary Figs. 1–3.

[Extended Data Fig. 2 Incremental lag-selection procedure using information criteria and within-region \$R^2\$.](#)

Starting from a panel-based fixed-effects distributed lag model estimating the effects of climate on economic growth using the real historical data (as in equation (4)) with ten lags for all climate variables (as shown in Extended Data Fig. 1), lags are incrementally removed for one climate variable at a time. The resulting Bayesian and Akaike information criteria are shown in a–e and f–j, respectively, and the within-region R^2 and number of observations in k–o and p–t, respectively. Different rows show the results when removing lags from different climate variables, ordered from top to bottom as annual mean temperature, daily temperature variability, total annual precipitation, the number of wet days and extreme annual precipitation. Information criteria show minima at approximately four lags for precipitation variables and ten to eight for temperature variables, indicating that including these

Climate variables causes overfitting.

Extended Data Fig. 3 Damages in our preferred specification that provides a robust lower bound on the persistence of climate impacts on economic growth versus damages in specifications of pure growth or pure level effects.

Estimates of future damages as shown in Fig. 1 but under the emission scenario RCP8.5 for three separate empirical specifications: in orange our preferred specification, which provides an empirical lower bound on the persistence of climate impacts on economic growth rates while avoiding assumptions of infinite persistence (see main text for further discussion); in purple a specification of ‘pure growth effects’ in which the first difference of climate variables is not taken and no lagged climate variables are included (the baseline specification of ref. 2); and in pink a specification of ‘pure level effects’ in which the first difference of climate variables is taken but no lagged terms are included.

Extended Data Fig. 4 Climate changes in different variables as a function of historical interannual variability.

Changes in each climate variable of interest from 1979–2019 to 2035–2065 under the high-emission scenario SSP5-RCP8.5, expressed as a percentage of the historical variability of each measure. Historical variability is estimated as the standard deviation of each detrended climate variable over the period 1979–2019 during which the empirical models were identified (detrending is appropriate because of the inclusion of region-specific linear time trends in the empirical models). See Supplementary Fig. 13 for changes expressed in standard units. Data on national administrative boundaries are obtained from the GADM database version 3.6 and are freely available for academic use (<https://gadm.org/>).

Extended Data Fig. 5 Contribution of different climate variables to overall committed damages.

a, Climate damages in 2049 when using empirical models that account for all climate variables, changes in annual mean temperature only or changes in both annual mean

respectively). **D**, The cumulative marginal effects of an increase in annual mean temperature of 1 °C, at different baseline temperatures, estimated from empirical models including all climate variables or annual mean temperature only. Estimates and uncertainty bars represent the median and 95% confidence intervals obtained from 1,000 block-bootstrap resamples from each of three different empirical models using eight, nine or ten lags of temperature terms.

Extended Data Fig. 6 The difference in committed damages between the upper and lower quartiles of countries when ranked by GDP and cumulative historical emissions.

Quartiles are defined using a population weighting, as are the average committed damages across each quartile group. The violin plots indicate the distribution of differences between quartiles across the two extreme emission scenarios (RCP2.6 and RCP8.5) and the uncertainty sampling procedure outlined in [Methods](#), which accounts for uncertainty arising from the choice of lags in the empirical models, uncertainty in the empirical model parameter estimates, as well as the climate model projections. Bars indicate the median, as well as the 10th and 90th percentiles and upper and lower sixths of the distribution reflecting the very likely and likely ranges following the likelihood classification adopted by the IPCC.

Extended Data Table 1 A summary of several physical mechanisms that plausibly underlie the impact of the different climate variables on macroeconomic growth, with references to empirical evidence

Extended Data Table 2 Regression results for the historical effects of different climate variables on sub-national economic growth rates in the period 1979–2019

Extended Data Table 3 A comparison of the magnitude of estimated economic damage from future climate change across recent panel-based

Supplementary Information

Peer Review File

Rights and permissions

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Reprints and permissions

About this article

Cite this article

Kotz, M., Levermann, A. & Wenz, L. The economic commitment of climate change. *Nature* **628**, 551–557 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07219-0>

Received

25 January 2023

Accepted

21 February 2024

Published

17 April 2024

Issue Date

18 April 2024

Scarica PDF

Share this article

Anyone you share the following link with will be able to read this content:

Get shareable link

Provided by the Springer Nature SharedIt content-sharing initiative

Subjects

[Economics](#) • [Environmental economics](#) • [Environmental health](#) • [Interdisciplinary studies](#) • [Projection and prediction](#)

This article is cited by

[Quantifying international public finance provision needs for the new UN climate finance goal](#)

Andreas Sieber & Iskander Erzini Vernoit
npj Climate Action (2024)

[The Climate Data for Adaptation and Vulnerability Assessments and the Spatial Interactions Downscaling Method](#)

Andre Geraldo de Lima Moraes & Sajad Khoshnood Motlagh
Scientific Data (2024)

[Global economic impact of weather variability on the rich and the poor](#)

Lennart Quante, Sven N. Willner ... Anders Levermann
Nature Sustainability (2024)

[Going beyond averages](#)

Matteo Coronese
Nature Climate Change (2024)

Scarica PDF

Christophe Reder, Beniamino Carregari & Davide Conso

Rivista di economia evolutiva (2024)

Natura (*Natura*) | ISSN 1476-4687 (online) | ISSN 0028-0836 (versione cartacea)