

Pubbllichiamo la traduzione di questo articolo molto rilevante sul tema del cambiamento climatico, uscito su Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS).

FINALE DI PARTITA SUL CLIMA: ESPLORARE GLI SCENARI CATASTROFICI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI

**Luke Kemp^{a,b,*}, Chi Xu^c, Joanna Depledge^d, Kristie L. Ebi^e, Goodwin Gibbins^f,
Timothy A. Kohler^{g,h,i}, Johan Rockström^j, Marten Scheffer^k,
Hans Joachim Schellnhuber^{i,l}, Will Steffen^m, and Timothy M. Lentonⁿ**

^a Centre for the Study of Existential Risk, University of Cambridge, United Kingdom;

^b Centre for the Study of Existential Risk, e Darwin College, University of Cambridge, United Kingdom;

^c School of Life Sciences, Nanjing University, China;

^d Cambridge Centre for Environment, Energy and Natural Resource Governance, University of Cambridge, , United Kingdom;

^e Center for Health and the Global Environment, University of Washington, Seattle, USA;

^f Future of Humanity Institute, University of Oxford, United Kingdom;

^g Department of Anthropology, Washington State University, Pullman, USA;

^h Santa Fe Institute, Santa Fe, USA;

ⁱ Cluster of Excellence ROOTS – Social, Environmental, and Cultural Connectivity in Past Societies, Christian-Albrechts-Universität, Kiel, Germany;

^j Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany;

^k Department of Environmental Sciences, University of Wageningen, The Netherlands;

^l Earth System Science Department, Tsinghua University, Beijing, China;

^m Fenner School of Environment and Society, The Australian National University, Canberra, Australia;

ⁿ Global Systems Institute, University of Exeter, United Kingdom

Sommario

Una gestione prudente del rischio richiede di prendere in considerazione gli scenari che rappresentano i casi peggiori. Eppure, riguardo ai cambiamenti climatici, tali futuri potenziali sono poco compresi. I cambiamenti climatici di origine antropica potrebbero causare un collasso della società su scala globale o un'eventuale estinzione dell'umanità? Fino a oggi questo è rimasto un argomento pericolosamente inesplorato. Tuttavia, ci sono buoni motivi per sospettare che i cambiamenti climatici possano provocare una catastrofe globale. Analizzare i meccanismi alla base di queste conseguenze estreme potrebbe contribuire a galvanizzare l'azione, migliorare la resilienza e fornire informazioni ai decisori politici, anche riguardo alle misure di emergenza. Accenniamo alle conoscenze attuali sulle probabilità di cambiamenti climatici estremi, trattiamo del perché è di importanza vitale capire i casi peggiori, mostriamo i motivi per cui preoccuparsi di sviluppi catastrofici, definiamo i

termini chiave e proponiamo un programma di ricerca. Il programma prende in esame quattro grandi domande: 1) Che possibilità hanno i cambiamenti climatici di innescare eventi di estinzione di massa? 2) Quali sono i meccanismi che possono causare nell'umanità morbilità e mortalità di massa? 3) Quali sono i punti deboli delle società umane rispetto ai rischi a cascata innescati dai cambiamenti climatici, come quelli derivanti da conflitti, instabilità politica e rischi finanziari sistemici? 4) Come sintetizzare utilmente queste molteplici evidenze – insieme ad altri pericoli globali – in una “valutazione integrata della catastrofe”? È ora che la comunità scientifica affronti la sfida di una migliore comprensione dei cambiamenti climatici catastrofici.

Parole chiave: *cambiamenti climatici catastrofici; cambiamenti climatici; traiettorie del sistema Terra; Antropocene; punti critici.*

IdA



* Per contatti: ltk27@cam.ac.uk.

CLIMATE ENDGAME: EXPLORING CATASTROPHIC CLIMATE CHANGE SCENARIOS

Abstract

Prudent risk management requires consideration of bad-to-worst-case scenarios. Yet, for climate change, such potential futures are poorly understood. Could anthropogenic climate change result in worldwide societal collapse or even eventual human extinction? At present, this is a dangerously underexplored topic. Yet there are ample reasons to suspect that climate change could result in a global catastrophe. Analyzing the mechanisms for these extreme consequences could help galvanize action, improve resilience, and inform policy, including emergency responses. We outline current knowledge about the likelihood of extreme climate change, discuss why understanding bad-to worst cases is vital, articulate

reasons for concern about catastrophic outcomes, define key terms, and put forward a research agenda. The proposed agenda covers four main questions: 1) What is the potential for climate change to drive mass extinction events? 2) What are the mechanisms that could result in human mass mortality and morbidity? 3) What are human societies' vulnerabilities to climate triggered risk cascades, such as from conflict, political instability, and systemic financial risk? 4) How can these multiple strands of evidence – together with other global dangers – be usefully synthesized into an “integrated catastrophe assessment”? It is time for the scientific community to grapple with the challenge of better understanding catastrophic climate change.

Keyword: *catastrophic climate change; climate change; Earth system trajectories; Anthropocene; tipping elements.*

Introduzione

Quanto possono peggiorare i cambiamenti climatici? Già nel 1988 la dichiarazione scaturita dalla Conferenza di Toronto, che rappresenta una pietra miliare, descriveva le conseguenze ultime dei cambiamenti climatici come potenzialmente “secondo solo a una guerra nucleare globale”. Nonostante l'allarme lanciato decenni fa, la catastrofe climatica è relativamente poco studiata e pochissimo compresa.

La possibilità di impatti catastrofici dipende dalla magnitudine e dalla velocità dei cambiamenti climatici, dai danni inflitti ai sistemi planetari e umani, e dalla vulnerabilità e dalla reattività dei sistemi colpiti. Gli estremi di questi fenomeni, come un aumento brusco delle temperature e gli impatti a cascata, non sono stati esaminati a sufficienza. Come notato dall'IPCC, il Comitato Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici, sono state realizzate poche stime quantitative degli impatti globali aggregati derivanti da un riscaldamento di 3°C o più (1). Anche un'analisi testuale dei rapporti dell'IPCC ha mostrato che gli studi relativi ad aumenti di 3°C o più sono troppo poco rappresentati in relazione alla loro probabilità (2). L'analisi indica anche che nel tempo l'oggetto degli studi contenuti nei rapporti dell'IPCC si sia spostato verso aumenti di 2°C o inferiori <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2022EF002876>. La ricerca si è concentrata sugli impatti degli aumenti di temperatura di 1,5°C e 2°C, e sono pochi gli studi su gli impatti climatici potrebbero ripercuotersi a cascata o innescare crisi più grandi.

Una valutazione accurata dei rischi dovrebbe considerare come questi si diffondono, interagiscono, si amplificano e vengono aggravati dalle reazioni uma-

ne (3), ma neanche le più semplici analisi dei “rischi compositi” generati dall'interazione dei rischi climatici con le cause dei cambiamenti climatici vengono usate a sufficienza. Eppure, è così che i rischi si concretizzano nel mondo reale. Per esempio, un ciclone distrugge le infrastrutture elettriche rendendo la popolazione vulnerabile a una successiva ondata di calore letale (4). Recentemente abbiamo visto rischi compositi emergere tra i cambiamenti climatici e la pandemia di COVID-19 (5). Come sottolineato dall'IPCC, i rischi climatici stanno diventando più complessi e difficili da gestire e si stanno ripercuotendo a cascata in diverse regioni e in diversi settori (6).

Perché ci si è concentrati sui valori più bassi di riscaldamento e su analisi semplici dei rischi? Un motivo è lo standard di riferimento degli obiettivi internazionali: l'obiettivo dell'Accordo di Parigi di limitare il riscaldamento ben al di sotto dei 2°C, con l'aspirazione di 1,5°C. Un'altra ragione è che la scienza del clima tende a “peccare di scarsa drammaticità” (7), a non essere allarmista, e a questo si aggiunge il processo dell'IPCC basato sul consenso (8). Le valutazioni complesse dei rischi, pur essendo più realistiche, sono anche le più difficili.

Questa cautela è comprensibile, eppure è inadeguata ai rischi e ai danni potenziali. Sappiamo che l'aumento delle temperature ha una distribuzione “coda grassa”: eventi estremi con bassa probabilità e alto impatto (9). È probabile che i danni non siano lineari e abbiano code ancora più pesanti (10). La posta è troppo alta per astenersi dall'esaminare gli scenari ad alto impatto e bassa probabilità. La pandemia di COVID-19 ha sottolineato il bisogno di tenere in considerazione e prepararci a rischi globali infrequenti ad

alto impatto e ai pericoli sistemici che possono derivarne. Una gestione prudente dei rischi richiede di valutare scrupolosamente gli scenari dei casi peggiori. Il programma di ricerca “Finale di partita sul clima” (Climate endgame) che abbiamo proposto mira a esplorare direttamente i rischi peggiori associati ai cambiamenti climatici di origine antropica. Per presentarlo riassumiamo le evidenze sulla probabilità di cambiamenti estremi, vediamo perché è di importanza vitale esplorare gli scenari relativi ai casi peggiori, suggeriamo motivi di preoccupazione per una catastrofe, definiamo i termini chiave e poi spieghiamo i quattro aspetti fondamentali del programma di ricerca.

I cambiamenti climatici peggiori

Nonostante trent'anni di sforzi ed alcuni progressi nell'ambito della Convenzione Quadro della Nazioni Unite sul Cambiamento Climatico (UNFCCC), le emissioni di gas serra di origine antropica continuano ad aumentare. Anche senza considerare le risposte ai cambiamenti climatici peggiori, l'attuale traiettoria avvia il mondo a un aumento della temperatura tra 2,1°C e 3,9°C entro il 2100 (11). Se tutti i contributi determinati a livello nazionale (NDC) per gli anni Trenta di questo secolo fossero rispettati, ci si aspetta entro il 2100 un riscaldamento di 2,4°C (da 1,9°C a 3,0°C). Mantenere tutti gli impegni a lungo termine e raggiungere questi obiettivi potrebbe ridurre a 2,1°C (da 1,7°C a 2,6°C) (12). Persino queste assunzioni ottimistiche portano a traiettorie pericolose per il sistema Terra. Temperature di oltre 2°C sopra i valori preindustriali non si sono viste sulla superficie terrestre dal Pleistocene (o da più di 2,6 milioni di anni fa) (13).

Anche se le emissioni di gas serra di origine antropica cominciassero a diminuire presto, non sarebbe esclusa la possibilità futura di alte concentrazioni di gas serra o di cambiamenti climatici estremi, in particolare dopo il 2100. Ci sono dei feedback nel ciclo del carbonio e potenziali punti critici che potrebbero generare alte concentrazioni di gas serra (14), che spesso non rientrano nei modelli. Alcuni esempi comprendono lo scioglimento del permafrost artico che rilascia metano e CO₂ (15), l'emissione di carbonio dovuta a intense siccità e a incendi in Amazzonia (16), e l'evidente rallentamento dei feedback mitiganti come la capacità naturale di assorbimento del carbonio (17, 18). Questi feedback probabilmente non saranno proporzionali al riscaldamento, come a volte si assume. Invece, cambiamenti improvvisi e/o irreversibili possono innescarsi al raggiungimento di una certa soglia di temperatura. Tali cambiamenti sono evidenti negli archivi geologici della Terra, e il loro impatto ha avuto ricadute a cascata sui sistemi climatici-ecologici-so-

ciali interconnessi (19). Particolarmente preoccupante è una “cascata di punti critici” nella quale più elementi critici (“tipping elements”) interagiscono in modo tale che il superamento di una soglia accresce le probabilità di superarne un'altra (20). L'aumento di temperatura è fortemente dipendente dalle dinamiche globali del sistema Terra, non solo dalla traiettoria delle emissioni di origine antropica.

Nei modelli esistenti è evidente la possibilità che si raggiungano punti critici e alte concentrazioni nonostante una diminuzione delle emissioni di origine antropica. La variabilità tra gli ultimi modelli climatici del Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) porta ad una sovrapposizione fra i diversi scenari. Per esempio, il risultato del quartile superiore (75°) dello scenario “A metà strada” (Shared Socioeconomic Pathway 3-7.0, o SSP3-7.0) è significativamente più caldo del quartile inferiore (25°) dello scenario con le emissioni più alte (SSP5-8.5). Le differenze di temperatura regionali tra i modelli possono superare valori tra 5°C e 6°C, in particolare nelle zone polari, nelle quali è possibile un superamento di diversi punti critici (si veda l'Appendice nel Materiale Supplementare).

Ci sono feedback ancora più incerti che, nel caso peggiore, potrebbero amplificare gli impatti fino a una transizione irreversibile a uno stato di “Terra serra riscaldata” (21) (sebbene feedback negativi potrebbero contribuire ad attenuare gli impatti sul sistema Terra). In particolare, i poco compresi feedback legati alle nubi potrebbero innescare un riscaldamento globale improvviso e irreversibile (22). Tali effetti rimangono inesplorati e in gran parte costituiscono “incognite ignote” ancora speculative e da scoprire. Per esempio, recenti simulazioni suggeriscono un'improvvisa scomparsa dei banchi di stratocumuli a concentrazioni di CO₂ che potrebbero essere raggiunte entro la fine del secolo, causando un riscaldamento globale aggiuntivo di circa 8°C (23). Grandi incertezze riguardo a sorprese pericolose sono un motivo per farle diventare prioritarie invece di trascurarle.

Recenti scoperte sulla sensibilità climatica all'equilibrio (ECS) (14, 24) sottolineano che la magnitudine dei cambiamenti climatici sarebbe incerta anche se conoscessimo le concentrazioni di gas serra future. Secondo l'IPCC, la nostra stima migliore per l'ECS è un aumento della temperatura di 3°C per raddoppio della CO₂ con un range “probabile” tra 2,5°C e 4°C (tra il 66% e 100% di probabilità). Dato che un ECS inferiore a 1,5°C è stato di fatto escluso, rimane un 18% di probabilità che possa essere superiore a 4,5°C (14). La distribuzione dell'ECS ha una “coda grassa”, con una probabilità di valori molto alti superiore a quella per valori molto bassi.

C'è un'incertezza significativa anche riguardo al futuro delle emissioni di gas serra di origine antropica. Il Representative Concentration Pathway 8.5 (RCP8.5, ora SSP5-8.5), il percorso con le emissioni più alte utilizzato negli scenari dell'IPCC, è quello che più si avvicina alle emissioni globali fino a oggi (25). Questo potrebbe non essere lo scenario che ci aspetta, a causa della forte riduzione dei prezzi delle energie rinnovabili e delle risposte politiche (26). Eppure, restano motivi di cautela. Per esempio, c'è un'incertezza significativa su variabili chiave come la domanda di energia e la crescita economica. È plausibile che tassi di crescita economica più alti possano portare ad un aumento del 35% della probabilità dello scenario RCP8.5 (27).

Perché esplorare la catastrofe climatica?

Perché ci servono informazioni riguardo a plausibili casi peggiori? Per prima cosa, la gestione dei rischi e un solido processo decisionale in condizioni di incertezza richiedono una conoscenza dei casi estremi. Per esempio, il criterio Minimax (minimizzazione della massima perdita possibile) valuta le politiche in base ai loro risultati peggiori (28). È un approccio particolarmente appropriato per le aree caratterizzate da incertezze e “rischi estremi” elevati [NdR: il termine “tail risks” è stato tradotto con “rischi estremi”, ad indicare i rischi molto rilevanti associati a bassi livelli di probabilità che sono rappresentati dalle code delle distribuzioni di probabilità delle variabili climatiche, come temperature o precipitazioni intense]. La traiettoria delle emissioni, le concentrazioni future, il riscaldamento futuro e gli impatti futuri sono tutti caratterizzati da incertezza. Cioè, non possiamo oggettivamente assegnare delle probabilità ai diversi esiti (29). I danni climatici rientrano nell'ambito della “profonda incertezza”: non conosciamo le probabilità relative ai diversi esiti, l'esatta catena di cause ed effetti che li precede e nemmeno l'estensione, la tempistica o la desiderabilità di questi esiti (30). L'incertezza, profonda o no, è un motivo di cautela e vigilanza, non di noncuranza.

Gli impatti catastrofici, anche se improbabili, hanno importanti implicazioni per l'analisi economica, la creazione di modelli e le risposte della società (31, 32). Per esempio, il riscaldamento estremo e i danni conseguenti possono fare aumentare significativamente i costi sociali del carbonio (31). Comprendere le vulnerabilità e le risposte delle società umane può fornire informazioni ai decisori politici per prevenire crisi sistemiche. Alcuni indicatori delle variabili chiave possono fornire segnali di allerta tempestivi (33).

Conoscere i casi peggiori può costringere ad agire, come successe per l'idea di “inverno nucleare” che nel

1983 galvanizzò la preoccupazione dei cittadini e gli sforzi per un disarmo nucleare. Esplorare scenari di rischi gravi e temperature più elevate potrebbe consolidare un rinnovato impegno a rispettare un limite tra 1,5°C e 2°C, in quanto opzione “meno spiacevole” (34).

Comprendere gli scenari climatici catastrofici può anche fornire informazioni utili alle azioni politiche, comprese le misure di emergenza e di “ultima spiaggia” come la gestione della radiazione solare (SRM) e l'iniezione di aerosol nella stratosfera (SAI) per riflettere la luce solare (35). Il fatto di ricorrere o no a tali misure dipende dai profili di rischio degli scenari di cambiamento climatico e di SRM. Una recente analisi del potenziale rischio catastrofico della SAI ha rilevato che gli impatti diretti e sistemici non sono stati sufficientemente studiati (36). Il pericolo principale sembra derivare dallo “shock finale”: un improvviso e rapido riscaldamento nel caso di un arresto del sistema SAI. Quindi la SAI cambia la distribuzione dei rischi: l'esito mediano potrebbe essere migliore per il cambiamento climatico che sta compensando, ma la sua “coda grassa” potrebbe essere peggiore del riscaldamento (36).

Una comprensione più corretta dei cambiamenti climatici catastrofici faciliterebbe altri interventi. A livello internazionale, per esempio, potrebbe esserci “un trattato sui rischi estremi”: un accordo o protocollo che attiva impegni e procedure più stringenti quando si raggiungono indicatori di un cambiamento brusco potenziale.

Il potenziale per una catastrofe climatica

Ci sono 4 motivi cruciali per cui preoccuparsi della possibilità di una catastrofe climatica globale. Primo, ci sono gli avvertimenti che ci vengono dalla storia. In passato i cambiamenti climatici (sia regionali che globali) hanno avuto un ruolo nel collasso o nella trasformazione di numerose società (37), e in ognuno dei cinque eventi di estinzione di massa nella storia della Terra verificatisi nel Fanerozoico (38). L'attuale spinta data dal carbonio si sta verificando a una velocità che non ha precedenti nella storia geologica, entro la fine del secolo le concentrazioni potrebbero superare soglie che hanno innescato precedenti estinzioni di massa (39, 40). Gli scenari peggiori nel rapporto dell'IPCC prevedono per il XXII secolo temperature che sono state così alte all'inizio dell'Eocene, ribaltando nell'arco di due secoli 50 milioni di anni con climi più freddi (41).

Questo è particolarmente allarmante, dato che le società umane si sono adattate localmente a una specifica nicchia climatica. L'inizio di società agricole urbanizzate su larga scala risale al passaggio al clima

stabile dell'Olocene circa 12.000 anni fa (42). Da allora la densità della popolazione umana ha avuto un picco all'interno di una ristretta fascia di variazione delle temperature, con media annuale di circa 13°C. Persino oggi i centri economicamente più produttivi delle attività umane sono concentrati in queste aree (43). Gli impatti cumulativi del riscaldamento potrebbero superare la capacità di adattamento delle società.

Secondo, i cambiamenti climatici potrebbero innescare direttamente altri rischi catastrofici, come quello di conflitti internazionali, o di aumento della diffusione di malattie infettive o ripercussioni di vario genere. Questi fattori potrebbero essere potenti moltiplicatori delle minacce estreme.

Terzo, i cambiamenti climatici potrebbero esacerbare le vulnerabilità e causare stress multipli indiretti (come danni economici, perdita di suolo e insicurezza idrica e alimentare) che si fondono dando origine a malfunzionamenti contemporanei a livello sistemico. Questo è il percorso del rischio sistemico. Durante questi "guasti sincronizzati" tendono a verificarsi delle crisi che si estendono oltre i confini di paesi e sistemi, come successo con la crisi finanziaria globale del 2007-2008 (44). È plausibile che un improvviso cambiamento del clima possa innescare guasti sistemici che porterebbero al crollo delle società in tutto il mondo.

C'è un netto potenziale di rischio climatico sistemico: gli stati e le comunità più vulnerabili continueranno a subire gli impatti peggiori in un mondo in via di riscaldamento, e questo porterà a un esacerbarsi delle disuguaglianze. La figura 1 mostra come la densità di popolazione prevista si interseca con gli estremi di una temperatura media annuale (TMA) superiore ai 29°C (temperature simili sono attualmente limitate allo

0,8% della superficie del suolo terrestre). Utilizzando lo scenario medio-alto delle emissioni e della crescita demografica (SSP3-7.0 per le emissioni, e SSP3 per la crescita demografica), entro il 2070 si prevede che circa due miliardi di persone vivranno in queste aree estremamente calde. Attualmente ci vivono solo 30 milioni di persone, principalmente nel deserto del Sahara e sulla costa del Golfo persico (43).

Le temperature estreme combinate con alti tassi di umidità possono influenzare negativamente la produttività di coloro che lavorano all'aperto e la resa delle principali coltivazioni di cereali. Queste condizioni di calore letale potrebbero colpire in maniera significativa le aree popolate nell'Asia meridionale e sudoccidentale (47).

La figura 2 esamina un calore estremo da un punto di vista politico, sovrapponendo le proiezioni degli scenari SSP3-7.0 o SSP5-8.5 di una TMA >29°C intorno al 2070, e il Fragile States Index (una misurazione dell'instabilità degli stati). Colpisce la sovrapposizione degli stati attualmente vulnerabili e delle aree che in futuro subiranno un riscaldamento estremo. Se nei prossimi decenni non si porrà seriamente rimedio all'attuale fragilità politica, potrebbe crearsi una fascia di instabilità con gravi ramificazioni potenziali.

Infine, i cambiamenti climatici potrebbero minare irreparabilmente la possibilità per l'umanità di riprendersi da un altro cataclisma, come per una guerra nucleare. Potrebbero cioè creare significativi rischi latenti (Tabella 1): impatti magari gestibili in tempi di stabilità diventano terribili durante la reazione a, o la ripresa da, una catastrofe. Queste diverse cause di preoccupazione per una catastrofe sono correlate e devono essere esaminate contemporaneamente.

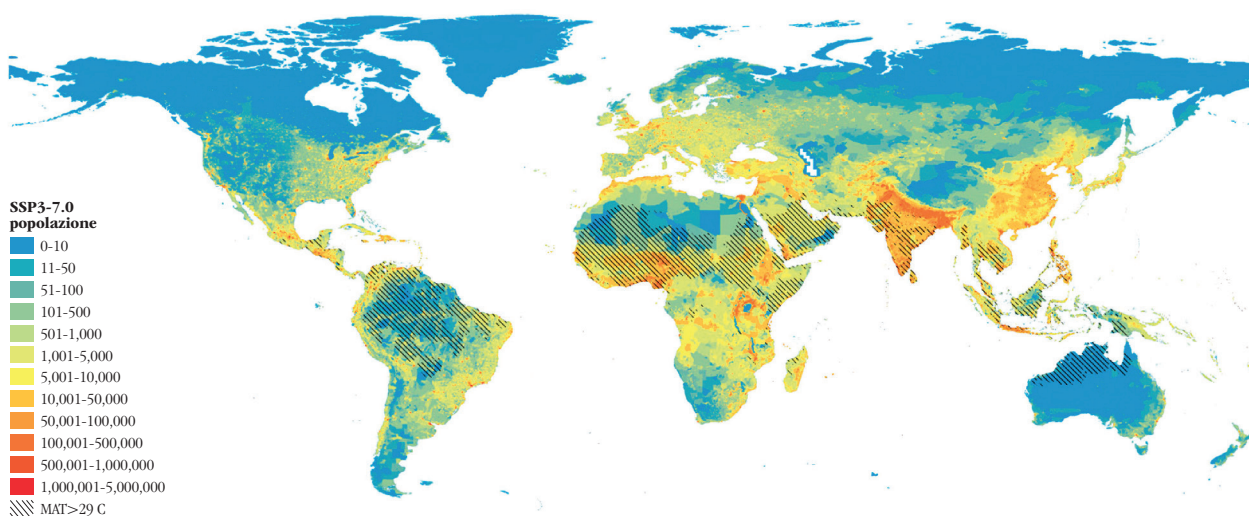


Figura 1. Sovrapposizione tra la distribuzione della popolazione e il calore estremo nel futuro. I dati del modello CMIP6 [da nove modelli GCM disponibili nel database WorldClim (45)] sono stati usati per calcolare la temperatura media annua (TMA) nello scenario SSP3-7.0 in un periodo intorno al 2070 (2060-2080) insieme alle proiezioni demografiche Shared SSP3 fino al 2070 circa (46). Le aree ombreggiate rappresentano le zone in cui la TMA supera i 29°C, mentre i colori nella topografia rappresentano le varie densità di popolazione.

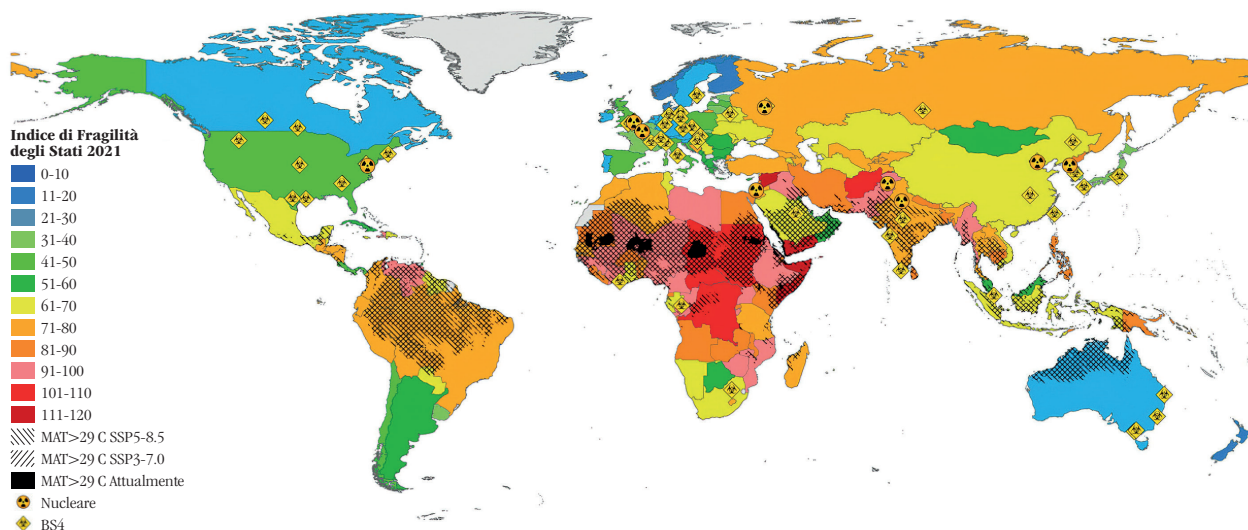


Figura 2. Calore e fragilità: sovrapposizione tra la fragilità degli stati, il calore estremo e il pericolo di catastrofi nucleari e biologiche. I dati del modello GCM [dal database WorldClim (45)] sono stati utilizzati per calcolare i tassi di riscaldamento annuale medio negli scenari SSP3-7.0 e SSP5-8.5. Questo si traduce in un aumento delle temperature di 2,8°C entro il 2070 circa (48) per lo scenario SSP3-7.0 e di 3,2°C per lo scenario SSP5-8.5. Le parti ombreggiate identificano regioni in cui la MAT supera i 29°C. Queste proiezioni sono sovrapposte con il Fragile State Index (FSI) (49). Questo è necessariamente un valore grezzo, perché il FSI stima solo i livelli di fragilità attuali. Sebbene le misurazioni della fragilità e della stabilità siano messe in discussione e hanno dei limiti, il FSI fornisce uno degli indici più solidi. La figura mostra anche le capitali degli stati con armi nucleari e la dislocazione dei laboratori di massimo contenimento Biosafety Level 4 (BS4), dove vengono maneggiati i patogeni più pericolosi al mondo. Questi vengono forniti come indicatore grezzo per il pericolo di catastrofi nucleari e biologiche.

Definire i termini chiave

Sebbene gli scenari relativi ai casi peggiori rimangono poco esplorati nella letteratura scientifica, le affermazioni che etichettano i cambiamenti climatici come catastrofici non sono inconsuete. Il segretario generale delle Nazioni Unite, António Guterres, li ha definiti una “minaccia esistenziale”. Studi accademici avvertono che è probabile che un riscaldamento oltre i 5°C sia “più che catastrofico” (50) e che oltre i 6°C rappresenti “una indiscutibile catastrofe globale” (9).

L’attuale dibattito sulla catastrofe climatica è indebolito da una terminologia poco chiara. Il termine “cambiamenti climatici catastrofici” non è stato ancora definito in modo condiviso. Un rischio esistenziale è solitamente definito come un rischio che causa una perdita a lungo termine, duratura e significativa di potenziale umano (51, 52). La definizione esistente è profondamente ambigua e richiede un dibattito nella società nonché di definire quali siano i valori umani basilari, validi nel lungo termine. (52). Mentre un’esplorazione democratica dei valori è benvenuta, non è necessario conoscere i percorsi verso la catastrofe umana o l’estinzione della specie (52). Per ora la definizione esistente non fornisce solide fondamenta per un’indagine scientifica. Sugeriamo definizioni operative più chiare di tali termini nella Tabella 1, un primo passo nella creazione di un lessico per le calamità globali. Alcuni di questi termini, come quelli riferiti a ciò che costituisce un “rischio plausibile” o “contribuisce significativamente”, sono necessariamente ambigui.

Altri, come definire cosa sia una soglia del 10% o 25% della popolazione globale, sono parzialmente arbitrari (il 10% è inteso come una soglia per perdite con dei precedenti storici e il 25% inteso come una decrescita senza precedenti; vedere il *Materiale Supplementare* per approfondimenti). Occorrono ulteriori ricerche per affinare queste definizioni. Le soglie inerenti ai rischi globali di catastrofi e decimazioni sono intese a livello euristico generico e non come confini numerici. Anche altri fattori, come la morbilità e le perdite culturali ed economiche, devono essere considerati.

Noi definiamo il rischio come la probabilità che l’esposizione agli impatti e alle risposte dei cambiamenti climatici produca conseguenze avverse per i sistemi umani o ecologici. Nell’ambito del programma “Finale di partita sul clima” siamo particolarmente interessati alle conseguenze catastrofiche. Ogni rischio è composto da quattro fattori determinanti: pericolosità, esposizione, vulnerabilità e risposta (3). Abbiamo posto un riscaldamento globale di 3°C o più entro la fine del secolo come marcatore di cambiamenti climatici estremi. Questa soglia è stata scelta per quattro motivi: un tale aumento di temperatura supera abbondantemente gli obiettivi stabiliti a livello internazionale; inoltre, “motivi di preoccupazione” dell’IPCC sono classificati come rischio “alto” o “molto alto” tra i 2°C e i 3°C; ci sono sostanzialmente dei rischi maggiori di cambiamenti auto-amplificanti che renderebbero impossibile limitare il riscaldamento a 3°C; e questi livelli sono legati ad un’ancora maggiore incertezza sugli impatti.

Tabella 1. Definizione dei termini chiave nel programma “Finale di partita sul clima”.

Termine	Definizione
Rischio latente	Rischio inattivo in certe condizioni e attivo in altre.
Cascata di rischi	Catena di rischi che si verifica quando un impatto avverso innesca una serie di rischi collegati (3).
Rischio sistemico	Il potenziale per singole rotture o dissesti di ripercuotersi a cascata generando un crollo dell'intero sistema.
Cambiamenti climatici estremi	Aumento della temperatura superficiale media di 3°C o più entro il 2100.
Rischio di estinzione	Probabilità di un'estinzione della specie umana entro un determinato arco temporale.
Minaccia di estinzione	Un fattore plausibile e significativo che contribuisce al rischio di estinzione totale.
Fragilità di una società	Probabilità che danni minori interagiscano creando un rischio di catastrofe globale o di estinzione a causa delle vulnerabilità delle società, dei rischi a cascata e di risposte inadeguate.
Collasso della società	Una significativa frammentazione socio-politica e/o fallimento degli Stati insieme a una perdita di capitale e di identità del sistema relativamente rapida, duratura e significativa; può portare ad aumenti di mortalità e morbilità su larga scala.
Rischio di catastrofe globale	La probabilità di una perdita del 25% della popolazione globale e di gravi guasti ai sistemi essenziali globali (come quello alimentare) entro un certo arco temporale (anni o decenni).
Minaccia di catastrofe globale	Fattore plausibile che contribuisce significativamente al rischio di catastrofe globale; la probabilità che i cambiamenti climatici possono essere una minaccia di catastrofe globale può essere denominata “cambiamenti climatici catastrofici”.
Rischio di decimazione globale	La probabilità di una perdita del 10% (o più) della popolazione globale e gravissimi guasti ai sistemi globali essenziali (come quello alimentare) entro un certo arco temporale (anni o decenni).
Minaccia di decimazione globale	Un fattore plausibile che contribuisca significativamente al rischio di decimazione globale.
Territorio del finale di partita	Livelli di riscaldamento globale e di fragilità della società che con sufficiente probabilità possono rendere i cambiamenti climatici una minaccia di estinzione.
Caso peggiore di riscaldamento	Il più alto livello di riscaldamento plausibile empiricamente e teoricamente.

Le ricerche fondamentali fino a oggi

I tentativi più accurati di studiare direttamente o esaminare in maniera esaustiva come i cambiamenti climatici potrebbero portare all'estinzione dell'umanità o a una catastrofe globale sono entrati in libri di divulgazione come *The Uninhabitable Earth* (53) e *Our Final Warning* (10). Quest'ultimo, un'analisi degli impatti climatici a diversi gradi, conclude che un aumento della temperatura globale di 6°C “metta in pericolo persino la sopravvivenza gli esseri umani come specie” (10).

Sappiamo che i rischi per la salute peggiorano con l'aumento delle temperature (54). Per esempio, a temperature più elevate c'è già una crescente probabilità di “tracollo delle regioni-granaio” (e conseguente impennata dei prezzi del cibo) (55). Per le quattro principali regioni produttrici di mais (responsabili dell'87% della produzione mondiale) la probabilità di perdite nella produzione superiori al 10% balza dal 7% annuale con un aumento di temperature di 2°C, all'86% con un aumento di 4°C (56). L'IPCC segnala, nel Sesto Rapporto di Valutazione, che tra il 50% e il 75% della popolazione globale potrebbe essere esposta a condizioni climatiche che ne minacciano l'esistenza entro la fine del secolo a causa di calore e umidità estremi (6). Altre informazioni sulle ricerche chiave riguardanti i cambiamenti climatici estremi sono riportate nel Materiale Supplementare.

I rapporti dell'IPCC riassumono una letteratura

scientifica peer-reviewed riguardante i cambiamenti climatici, gli impatti e la vulnerabilità, e la mitigazione. Nonostante nel contributo del Working Group 1 al Sesto Rapporto siano stati identificati 15 elementi potenzialmente instabili nella biosfera, negli oceani e nella criosfera, molti soggetti a soglie che determinano cambiamenti irreversibili, le pubblicazioni disponibili per valutare gli scenari catastrofici sono pochissime. La sintesi più rilevante sono i “motivi di preoccupazione” pubblicati a partire dal 2001 dal Working Group II dell'IPCC. Queste sintesi intendono fornire informazioni utili a determinare quale sia la “pericolosa interferenza di origine antropica” con il sistema climatico, che l'UNFCCC ha l'obiettivo di prevenire. Le cinque tipologie di preoccupazioni sono gli ecosistemi unici e minacciati; la frequenza e severità degli eventi climatici estremi; la distribuzione globale e l'equilibrio degli impatti; gli impatti economici ed ecologici totali; e le transizioni improvvise e irreversibili su larga scala. Ogni valutazione dell'IPCC ha rilevato maggiori rischi in corrispondenza di più bassi aumenti della temperatura media globale. Nel sesto Rapporto, i rischi per tutti e cinque i motivi di preoccupazione sono stati identificati come molto alti per un aumento delle temperature tra 1,2°C e 4,5°C. Nel Quinto Rapporto per lo stesso intervallo di temperature i rischi erano molto alti soltanto per due di questi (6). Ora rischi per le cinque categorie di preoccupazioni sono già “alti” o “molto alti” per un riscaldamento compreso tra 2°C e 3°C (57).

Un esempio di programma di ricerca: stati estremi del sistema Terra, mortalità di massa, fragilità delle società e valutazioni integrate della catastrofe climatica

Suggeriamo un programma di ricerca per i cambiamenti climatici catastrofici che si concentri su quattro filoni chiave:

- Comprendere dinamiche e impatti a lungo termine dei cambiamenti climatici estremi.
- Esplorare i percorsi dipendenti dal clima in tema di morbilità e mortalità.
- Studiare la fragilità sociale: le vulnerabilità, i rischi a cascata e le risposte ai rischi.
- Sintetizzare i risultati della ricerca in “valutazioni integrate della catastrofe”.

Il programma trae informazioni e si basa sui modelli di valutazione integrata che sono stati adattati per valutare meglio i danni su larga scala. È già stato identificato un range di punti critici (58-60), con effetti che variano da un 10% di possibilità di raddoppiare i costi sociali del carbonio (61) fino a un aumento di otto volte del suo prezzo ottimale (60). Questo richiama risultati precedenti riguardanti l'influenza dei rischi estremi (31). Anche le assunzioni dei modelli influenzano fortemente i risultati, per esempio i tassi di sconto, i tassi di crescita esogena, la propensione al rischio e le funzioni di danno.

I modelli non comprendono aspetti vasti e importanti che vengono evidenziati nel programma di ricerca: gli impatti a lungo termine dei cambiamenti climatici estremi, i percorsi verso la morbilità e la mortalità di massa e i rischi a cascata e sistemici che gli impatti di un clima estremo potrebbero innescare. Un progresso in questi ambiti permetterebbe di avere modelli e funzioni di danno più realistici e contribuirebbe a fornire stime dirette delle vittime (62), nonché una misurazione morale non-economica del rischio. Sollecitiamo la comunità dei ricercatori a sviluppare modelli integrati concettuali e semiquantitativi delle catastrofi climatiche.

Infine, invitiamo altri studiosi a esaminare e migliorare il programma che proponiamo.

Stati estremi del sistema Terra.

Dobbiamo comprendere gli stati potenziali a lungo termine del sistema Terra in caso di cambiamenti climatici estremi. Questo significa mappare differenti scenari di “Terra serra surriscaldata” (21) o altri scenari estremi come regimi di circolazione alternativi o ampi e irreversibili cambiamenti della copertura glaciale e del livello dei mari. Questa ricerca richiederà di tenere in considerazione le dinamiche climatiche a

lungo termine e i loro impatti su altri processi a livello planetario. Le ricerche indicano che i precedenti eventi di estinzione di massa si verificarono a causa degli effetti del superamento di una soglia nel ciclo del carbonio che noi potremmo superare nel corso di questo secolo (40, 63). Gli impatti che hanno avuto un ruolo chiave nelle precedenti estinzioni di massa, come l'ipossia e l'anossia degli oceani, potrebbero intensificarsi sul più lungo periodo (40, 64).

Studiare i potenziali punti critici e i cambiamenti irreversibili “obbligati” del sistema climatico ed ecologico è essenziale. Per esempio, i modelli della calotta glaciale antartica indicano diversi punti critici che mostrano isteresi (65). Si è scoperto che a circa 2°C di riscaldamento globale si innesca la perdita irreversibile della calotta glaciale antartica occidentale, e l'attuale configurazione della calotta non potrebbe essere ripristinata nemmeno se le temperature tornassero ai livelli attuali. Con un aumento della temperatura globale tra 6°C e 9°C potrebbe iniziare una lenta e irreversibile perdita della calotta glaciale antartica orientale, con un innalzamento del livello del mare di oltre 40 metri (65). Sarebbero utili anche studi analoghi sulla calotta glaciale della Groenlandia, il permafrost e la vegetazione terrestre. Identificare tutti i potenziali elementi critici del sistema Terra è fondamentale, tenendo conto dei più ampi confini planetari, come la biodiversità che influenzerà i punti critici (66), i feedback esterni al sistema climatico, e come gli elementi critici possano ripercuotersi a cascata l'uno sull'altro (67).

Morbilità e mortalità di massa.

I potenziali fattori che contribuiscono alla morbilità e alla mortalità indotte dal clima sono molti, ma è probabile che i “quattro cavalieri” del “finale di partita sul clima” siano la fame e la malnutrizione, gli eventi climatici estremi, i conflitti, e le malattie trasmesse da vettori. Saranno aggravati da ulteriori impatti come la mortalità dovuta all'inquinamento dell'aria e l'innalzamento del livello del mare. Questi andamenti richiedono ulteriori studi. Persino il calcolo empirico delle vittime dirette di stress termico è così impegnativo che negli Stati Uniti sono sistematicamente sottostimate (68). Una valutazione della letteratura su salute e cambiamenti climatici dal 1985 al 2013 (con una revisione sommaria fino al 2017) ha mostrato che su 2.143 articoli solo 189 (il 9%) comprendevano una discussione dedicata a impatti più estremi sulla salute o a rischi sistemici (legati a migrazioni, fame o conflitti) (69). I modelli raramente includono anche risposte adattative. Quindi le stime globali sulla mortalità sono incerte.

Come è possibile valutare meglio il fattore della morbilità e della mortalità di massa? 1) Identificando i pe-

ricoli composti attraverso modellizzazioni del basso dei sistemi e delle vulnerabilità (70) e rigorosi stress test sul grado di preparazione (71). 2) Applicando i modelli a scenari con temperature più elevate e periodi temporali più lunghi. 3) Integrando i rischi a cascata e i rischi sistemici (vedere la sezione seguente) nella valutazione dei rischi per la salute, per esempio incorporando la morbilità e la mortalità risultanti da un'impennata dei prezzi dei generi alimentari.

Fragilità della società: vulnerabilità, rischi a cascata e risposte ai rischi.

Le valutazioni del rischio più complesse sono generalmente più realistiche. I fattori determinanti del rischio non sono solo i pericoli, le vulnerabilità e le esposizioni, ma anche le risposte (3, 72). Una valutazione del rischio completa deve considerare gli impatti del clima, l'esposizione differenziata, le vulnerabilità sistemiche, le risposte delle società e degli attori e gli effetti a catena nelle varie nazioni e nei vari settori (73), che potrebbero potenzialmente portare a crisi sistemiche. Nei casi peggiori un effetto domino a spirale potrebbero aggravare continuamente il rischio iniziale.

I rischi a cascata per le società potrebbero comprendere conflitti, malattie e cambiamenti politici, e crisi economiche. I cambiamenti climatici hanno una relazione complessa con i conflitti, e tra i ruoli che potrebbero ricoprire c'è probabilmente quello di fattore di rischio (74), specialmente nelle zone di preesistenti conflitti etnici (75). Potrebbero influenzare la diffusione e la trasmissione di malattie infettive, come anche la propagazione e la gravità di diverse infezioni zoonotiche (76), creando le condizioni per nuovi focolai e infezioni (6, 77). Le epidemie possono, a loro volta, causare impatti a cascata, come nel caso del COVID-19. L'esposizione a stress ecologici e disastri naturali è un fattore determinante per la "tenuta" culturale delle società (rigorosità delle regole, rispetto della tradizione e severità delle punizioni) (78). La letteratura riguardante i danni economici mediati causati dai cambiamenti climatici è abbondante, ma non lo è altrettanto quella sui rischi estremi finanziari, come la possibilità di crisi finanziarie globali.

Si potrebbe attingere a studi passati per esaminare i rischi per la società. Cambiamenti climatici regionali relativamente piccoli sono stati collegati a trasformazioni e persino al collasso di società del passato (79, 80), forse per una diminuzione della loro resilienza e il superamento di punti critici. Ci sono alcune evidenze di rallentamenti cruciali nelle società prima del loro collasso (81, 82). Però bisogna essere attenti nel trarre delle lezioni da casi di studio premoderni. La preistoria e la storia dovrebbero essere studiate per determinare non solo come le società del passato so-

no state influenzate da specifici pericoli climatici, ma come questi effetti differiscono col cambiare delle società, per esempio per quanto riguarda la densità della popolazione, la disuguaglianza nella distribuzione della ricchezza e il regime di governance. Un tale contesto permetterà di esaminare le società passate e attuali mediante un solo sistema di analisi (37).

Nel lavoro sulla sensibilità delle società dovranno essere considerate le caratteristiche e le vulnerabilità di un mondo moderno e globalizzato, nel quale il sistema alimentare e dei trasporti possono assorbire shock. Sistemi così grandi e interconnessi hanno già delle fonti di fragilità intrinseche, in particolare se le reti sono relativamente omogenee, con pochi nodi dominanti altamente connessi a tutti gli altri (83). Altre importanti vulnerabilità attuali comprendono la rapida diffusione della cattiva informazione e della disinformazione. Questi rischi epistemici creano serie preoccupazioni per le crisi della sanità pubblica (84) e hanno già ostacolato l'azione climatica. La figura 3 è una rappresentazione semplificata di alto livello di come si propagano i rischi a cascata.

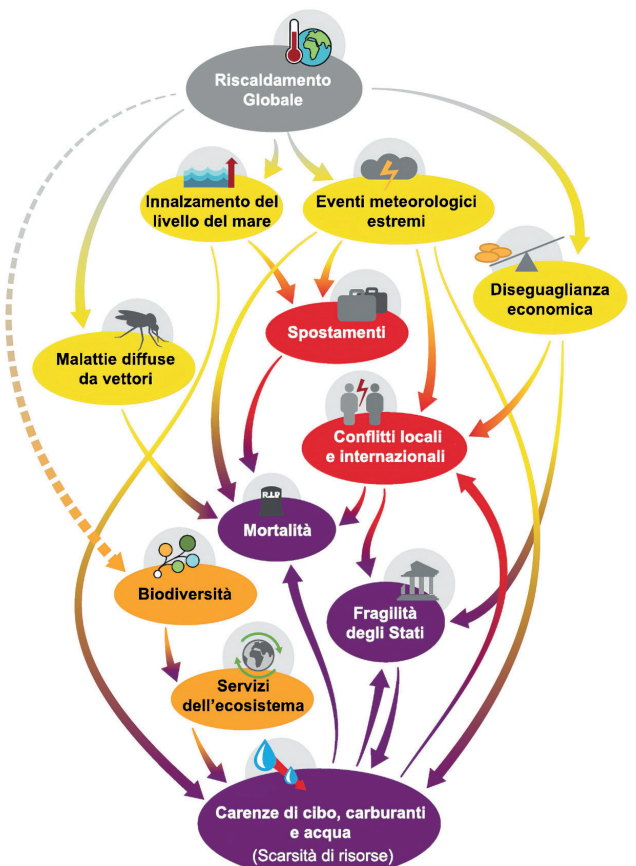


Figura 3. Fattori di tracollo a cascata nel clima globale. Questo è un diagramma a loop causale nel quale una linea completa rappresenta una polarità positiva (per esempio, un feedback amplificante, non necessariamente positivo in senso normativo) e una linea tratteggiata denota una polarità negativa (cioè un feedback mitigante). Si rimanda al materiale supplementare per gli approfondimenti.

Valutazione integrata della catastrofe.

I cambiamenti climatici produrranno un mondo con cambiamenti in ecosistemi, nella geopolitica e nella tecnologia. Potremmo addirittura vedere “guerre calde” – conflitti tra grandi potenze amplificati dalla tecnologia per contendersi budget di carbonio sempre più ridotti, impatti climatici o esperimenti di gestione della radiazione solare? Simili sviluppi e scenari devono essere tenuti in considerazione per comporre un’immagine completa dei pericoli legati al clima. I cambiamenti climatici potrebbero rafforzare altre minacce che interagiscono tra loro, compresi un aumento della disuguaglianza, gli stress demografici, la cattiva informazione, nuove armi di distruzione e il superamento dei limiti planetari (85). Ci sono anche shock naturali, come eruzioni solari ed eruzioni vulcaniche ad alto impatto che presentano possibili sincronismi letali (86). È di importanza vitale studiarli, e una serie di “scenari catastrofici standardizzati” faciliterebbe la valutazione.

L’analisi sistematica del parere degli esperti, la mappatura dei sistemi e gli scenari partecipativi sono strumenti promettenti per capire queste ripercussioni a cascata (73). Per alcune di queste aree di interesse esistono progetti di ricerca che potrebbero essere finanziati (87).

L’approccio all’integrazione può essere di vario tipo. Le meta-analisi e le sintesi dei risultati delle ricerche potrebbero fornire dati utili per mappare le interazioni tra i rischi attraverso una mappatura causale, l’analisi dei pareri degli esperti e mediante approcci modellistici basati di dinamica dei sistemi. Un recente studio ha mappato le evidenze della relazione tra cambiamenti climatici, insicurezza alimentare e contributi al collasso della società (mortalità, conflitti ed emigrazione) basandosi su 41 studi (88).

Una strada particolarmente promettente è quella di riproporre i modelli complessi esistenti per studiare i rischi a cascata. La rete che ne risulta potrebbe essere prova valutata mediante uno “stress test” con scenari catastrofici standardizzati. Questo consentirebbe di va-

lutare quali settori possono subire crisi di approvvigionamento, tracolli, o risposte drastiche (come il divieto di esportare generi alimentari). Sono stati sviluppati dei modelli complessi per aiutare a comprendere i disastri sistemici su larga scala del passato, come la crisi finanziaria globale del 2007-2008 (89): alcuni di essi potrebbero essere riconfigurati per esplorare la natura potenziale di una crisi climatica globale.

È improbabile che un crollo dei sistemi si verifichi simultaneamente su scala globale; è più probabile che si verifichi a livello regionale e si propaghi a cascata. Sebbene l’obiettivo sia quello di studiare i rischi di una catastrofe climatica a livello globale, è indispensabile incorporare la conoscenza sui danni a livello regionale.

I rischi potenzialmente catastrofici legati ai cambiamenti climatici sono difficili da quantificare, persino all’interno dei modelli. Ogni forma di modellizzazione che abbiamo menzionato potrebbe fornire una migliore comprensione dei percorsi del rischio sistemico, e suggerire linee guida probabilistiche approssimative. Eppure, a partire dai risultati si potrebbero sviluppare strumenti argomentativi per valutare il potenziale di sviluppi catastrofici a vari livelli di aumento della temperatura (90). Sarebbero strumenti da inserire in metodi deliberativi aperti e democratici con un approccio equo, inclusivo ed efficace al processo decisionale (91). Approcci simili potrebbero avvalersi dei processi decisionali in condizioni di incertezza, come il principio di minimizzazione della massima perdita possibile o ordinare le decisioni sulla base della somma pesata dei migliori e peggiori risultati, come suggerito nella rassegna sulla biodiversità di Dasgupta (92).

Un Rapporto Speciale dell’IPCC sui cambiamenti climatici catastrofici

L’IPCC deve ancora concentrare la sua attenzione sui cambiamenti climatici catastrofici. Nessuno dei 14 rapporti speciali pubblicati finora se n’è occupato. Per il settimo ciclo di valutazione dell’IPCC è stato proposto un rapporto speciale sui “punti critici”, e noi suggeriamo di ampliarlo a tutti gli aspetti fondamentali dei cambiamenti climatici catastrofici, come sembra possibile dalla procedura decisionale dell’IPCC (93). Un simile rapporto potrebbe studiare come i feedback del sistema Terra potrebbero alterare le traiettorie delle temperature, e se queste alterazioni siano irreversibili.

Potrebbe altresì contribuire a stimolare ulteriori ricerche, proprio come successe con il rapporto speciale “Global warming of 1.5 °C” (94) che aveva suscitato nell’opinione pubblica un’ondata di preoccupazione per la gravità degli impatti causati da variazioni più basse della temperatura. L’impatto di un rapporto sui cambiamenti climatici catastrofici potrebbe essere an-



Foto: Image by Hans from Pixabay

cora più marcato. Potrebbe richiamare l'attenzione sulla posta in gioco in gioco con gli scenari peggiori. È fondamentale un finanziamento per la ricerca sui cambiamenti climatici peggiori e catastrofici.

Sarà fondamentale anche la comunicazione efficace dei risultati della ricerca. I messaggi che fanno paura possono essere controproducenti e indurre una paralisi (95), ma l'evidenza riguardo ai messaggi di speranza rispetto a quelli di paura è incerta, persino nelle meta-analisi (96, 97). Il ruolo delle emozioni è complesso, ed è necessario adeguare il messaggio ai diversi tipi di pubblico a cui è rivolto (98). Una rassegna recente del dibattito sul clima ha evidenziato l'importanza di evitare polarizzazioni politiche, di selezionare messaggeri affidabili e di scegliere contesti efficaci (99). Questo tipo di considerazioni sarà fondamentale per assicurare una discussione civica utile e accurata.

Riferimenti bibliografici

1. Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, C. B. Field et al., Eds. (Cambridge University Press, 2014).
2. F. U. Jehn, M. Schneider, J. R. Wang, L. Kemp, L. Breuer, Betting on the best case: Higher end warming is underrepresented in research. *Environ. Res. Lett.* 16, 084036 (2021).
3. N. P. Simpson et al., A framework for complex climate change risk assessment. *One Earth* 4, 489-501 (2021).
4. T. Matthews, R. L. Wilby, C. Murphy, An emerging tropical cyclone-deadly heat compound hazard. *Nat. Clim. Chang.* 9, 602-606 (2019).
5. C. A. Phillips et al., Compound climate risks in the COVID-19 pandemic. *Nat. Clim. Chang.* 10, 586-588 (2020).
6. Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, H.O. Pörtner et al., Eds. (Cambridge University Press, 2022).
7. K. Brysse, N. Oreskes, J. O'Reilly, M. Oppenheimer, Climate change prediction: Erring on the side of least drama? *Glob. Environ. Change* 23, 327-337 (2013).
8. M. Oppenheimer et al., *Discerning Experts: The Practices of Scientific Assessment for Environmental Policy* (University of Chicago Press, 2019).
9. G. Wagner, M. L. Weitzman, *Climate Shock: The Economic Consequences of a Hotter Planet* (Princeton University Press, 2015).
10. M. Lynas, *Our Final Warning: Six Degrees of Climate Emergency* (Harper Collins, 2020).
11. P. R. Liu, A. E. Raftery, Country-based rate of emissions reductions should increase by 80% beyond nationally determined contributions to meet the 2 °C target. *Commun. Earth Environ.* 2, 1-29 (2021).
12. Climate Action Tracker, 2100 warming projections. Climate Action Tracker. Accessed 1 March 2022. <https://climateactiontracker.org/global/temperatures>.
13. M. Willeit, A. Ganopolski, R. Calov, V. Brovkin, Mid-Pleistocene transition in glacial cycles explained by declining CO₂ and regolith removal. *Sci. Adv.* 5, eaav7337 (2019).
14. V. Masson-Delmotte et al., *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge University Press, 2021).
15. S. M. Natali et al., Large loss of CO₂ in winter observed across the northern permafrost region. *Nat. Clim. Chang.* 9, 852-857 (2019).
16. Y. Yang et al., Post-drought decline of the Amazon carbon sink. *Nat. Commun.* 9, 3172 (2018).

Conclusioni

Ci sono molte evidenze del fatto che i cambiamenti climatici potrebbero diventare catastrofici e che potremmo entrare nella fase "finale di partita" anche con livelli modesti di riscaldamento. Capire i rischi estremi è importante per un processo decisionale robusto, dalla preparazione alla considerazione delle risposte di emergenza. Questo richiede di esplorare non solo gli scenari con temperature più alte, ma anche la possibilità che gli impatti climatici contribuiscano a rischi sistemici e a rischi a cascata. Pensiamo che sia giunto il momento di analizzare seriamente i modi migliori per espandere i nostri orizzonti di ricerca al fine di coprire tutto questo campo. Affrontare un futuro di cambiamenti climatici in accelerazione senza guardare agli scenari dei casi peggiori è, se va bene, una gestione ingenua del rischio, e se va male una follia letale. ■

17. M. R. Raupach et al., The declining uptake rate of atmospheric CO₂ by land and ocean sinks. *Biogeosciences* 11, 3453-3475 (2014).
18. W. Hubau et al., Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. *Nature* 579, 80-87 (2020).
19. V. Brovkin et al., Past abrupt changes, tipping points and cascading impacts in the Earth system. *Nat. Geosci.* 14, 550-558 (2021).
20. A. K. Klose, N. Wunderling, R. Winkelmann, J. F. Donges, What do we mean, 'tipping cascade'? *Environ. Res. Lett.* 16, 125011 (2021).
21. W. Steffen et al., Trajectories of the Earth system in the Anthropocene. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 115, 8252-8259 (2018).
22. M. Popp, H. Schmidt, J. Marotzke, Transition to a moist greenhouse with CO₂ and solar forcing. *Nat. Commun.* 7, 10627 (2016).
23. T. Schneider, C. M. Kaul, K. G. Pressel, Possible climate transitions from breakup of stratocumulus decks under greenhouse warming. *Nat. Geosci.* 12, 163-167 (2019).
24. S. C. Sherwood et al., An assessment of Earth's climate sensitivity using multiple lines of evidence. *Rev. Geophys.* 58, e2019RG000678 (2020).
25. C. R. Schwalm, S. Glendon, P. B. Duffy, RCP8.5 tracks cumulative CO₂ emissions. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 117, 19656-19657 (2020).
26. Z. Hausfather, G. P. Peters, Emissions—The 'business as usual' story is misleading. *Nature* 577, 618-620 (2020).
27. P. Christensen, K. Gillingham, W. Nordhaus, Uncertainty in forecasts of long-run economic growth. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 115, 5409-5414 (2018).
28. H. Kunreuther et al., Risk management and climate change. *Nat. Clim. Chang.* 3, 447-450 (2013).
29. F. H. Knight, Risk, Uncertainty and Profit (Hart, Schaffner and Marx, 1921).
30. R. Dittrich, A. Wreford, D. Moran, A survey of decision-making approaches for climate change adaptation: Are robust methods the way forward? *Ecol. Econ.* 122, 79-89 (2016).
31. S. Dietz, High impact, low probability? An empirical analysis of risk in the economics of climate change. *Clim. Change* 108, 519-541 (2011).
32. M. L. Weitzman, Fat-tailed uncertainty in the economics of catastrophic climate change. *Rev. Environ. Econ. Policy* 5, 275-292 (2011).
33. T. M. Lenton, Early warning of climate tipping points. *Nat. Clim. Chang.* 1, 201-209 (2011).
34. A. Jordan et al., Going beyond two degrees? The risks and opportunities of alternative options. *Clim. Policy* 13, 751-769 (2013).
35. C. Field et al., Reflecting Sunlight: Recommendations for Solar Geoengineering Research and Research Governance (National Academies Press, 2021).
36. A. Tang, L. Kemp, A fate worse than warming? Stratospheric aerosol injection and catastrophic risk. *Front. Clim. Sci.* 3, 1-17 (2021).
37. T. A. Kohler, M. Rockman, The IPCC: A primer for archaeologists. *Am. Antiq.* 85, 627-651 (2020).
38. P. Brannen, The Ends of the World: Volcanic Apocalypses, Lethal Oceans, and Our Quest to Understand Earth's Past Mass Extinctions (Ecco, 2017).
39. D. H. Rothman, Characteristic disruptions of an excitable carbon cycle. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 116, 14813-14822 (2019).
40. D. H. Rothman, Thresholds of catastrophe in the Earth system. *Sci. Adv.* 3, e1700906 (2017).
41. K. D. Burke et al., Pliocene and Eocene provide best analogs for near-future climates. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 115, 13288-13293 (2018).
42. P. J. Richerson, R. Boyd, R. L. Bettinger, Was agriculture impossible during the Pleistocene but mandatory during the Holocene? A climate change hypothesis. *Am. Antiq.* 66, 387-411 (2001).
43. C. Xu, T. A. Kohler, T. M. Lenton, J. C. Svenning, M. Scheffer, Future of the human climate niche. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 117, 11350-11355 (2020).
44. T. Homer-Dixon et al., Synchronous failure: The emerging causal architecture of global crisis. *Ecol. Soc.* 20, 6 (2015).
45. WorldClim, WorldClim-Global Climate Data: Free climate data for ecological modeling and GIS. Accessed 17 December 2020. <https://www.worldclim.com/node/1>.
46. International Institute for Applied Systems Analysis, SSP Database (shared socioeconomic pathways) (Version 2.0). Accessed 17 December

2020. <https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=about>.
47. J. S. Pal, E. A. B. Eltahir, Future temperature in southwest Asia projected to exceed a threshold for human adaptability. *Nat. Clim. Chang.* 6, 197-200 (2016).
 48. M. Meinshausen et al., The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Clim. Change* 109, 213-241 (2011).
 49. Fund for Peace, Fragile States Index 2021. Accessed 12 April 2022. <https://fragilestatesindex.org/>.
 50. Y. Xu, V. Ramanathan, Well below 2 °C: Mitigation strategies for avoiding dangerous to catastrophic climate changes. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 114, 10315-10323 (2017).
 51. T. Ord, *The Precipice: Existential Risk and the Future of Humanity* (Bloomsbury, 2020).
 52. C. Z. Cremer, L. Kemp, Democratising risk: In search of a methodology to study existential risk. SSRN [Preprint] (2021). Accessed 1 March 2022. <https://ssrn.com/abstract=3995225>.
 53. D. Wallace-Wells, *The Uninhabitable Earth* (Crown, 2019).
 54. K. L. Ebi et al., Health risks of warming of 1.5°C, 2°C, and higher, above pre-industrial temperatures. *Environ. Res. Lett.* 13, 063007 (2018).
 55. F. Gaupp, J. Hall, S. Hochrainer-Stigler, S. Dadson, Changing risks of simultaneous global breadbasket failure. *Nat. Clim. Chang.* 10, 54-57 (2020).
 56. M. Tigchelaar, D. S. Battisti, R. L. Naylor, D. K. Ray, Future warming increases probability of globally synchronized maize production shocks. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 115, 6644-6649 (2018).
 57. Z. Zommers et al., Burning embers: Towards more transparent and robust climate-change risk assessments. *Nat. Rev. Earth Environ.* 1, 516-529 (2020).
 58. S. Dietz, J. Rising, T. Stoerk, G. Wagner, Economic impacts of tipping points in the climate system. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 118, e2103081118 (2021).
 59. T. S. Lontzek, Y. Cai, K. L. Judd, T. M. Lenton, Stochastic integrated assessment of climate tipping points indicates the need for strict climate policy. *Nat. Clim. Chang.* 5, 441-444 (2015).
 60. Y. Cai, T. M. Lenton, T. S. Lontzek, Risk of multiple interacting tipping points should encourage rapid CO2 emission reduction. *Nat. Clim. Chang.* 6, 520-528 (2016).
 61. M. Lenzen et al., The Global MRIO Lab—Charting the world economy. *Econ. Syst. Res.* 29, 158-186 (2017).
 62. J. Nolt, Casualties as a moral measure of climate change. *Clim. Change* 130, 347-358 (2015).
 63. D. H. Rothman, Characteristic disruptions of an excitable carbon cycle. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 116, 14813-14822 (2019).
 64. J. L. Penn, C. Deutsch, J. L. Payne, E. A. Sperling, Temperature-dependent hypoxia explains biogeography and severity of end-permian marine mass extinction. *Science* 362, eaat1327 (2018).
 65. J. Garbe, T. Albrecht, A. Levermann, J. F. Donges, R. Winkelmann, The hysteresis of the Antarctic Ice Sheet. *Nature* 585, 538-544 (2020).
 66. J. Rockström et al., Opinion: We need biosphere stewardship that protects carbon sinks and builds resilience. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 118, e2115218118 (2021).
 67. N. Wunderling, J. F. Donges, J. Kurths, R. Winkelmann, Interacting tipping elements increase risk of climate domino effects under global warming. *Earth Syst. Dyn.* 12, 601-619 (2021).
 68. K. R. Weinberger, D. Harris, K. R. Spangler, A. Zanobetti, G. A. Wellenius, Estimating the number of excess deaths attributable to heat in 297 United States counties. *Environ. Epidemiol.* 4, e096 (2020).
 69. C. D. Butler, Climate change, health and existential risks to civilization: A comprehensive review (1989-2013). *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15, 2266 (2018).
 70. J. Zscheischler et al., Future climate risk from compound events. *Nat. Clim. Chang.* 8, 469-477 (2018).
 71. K. L. Ebi et al., Stress testing the capacity of health systems to manage climate change-related shocks and stresses. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15, 2370 (2018).
 72. A. Reisinger et al., “The concept of risk in the IPCC Sixth Assessment Report: A summary of cross-working group discussions” (International Panel on Climate Change, 2020).
 73. A. J. Challinor et al., Transmission of climate risks across sectors and borders. *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 376, 20170301 (2018).

74. K. J. Mach et al., Climate as a risk factor for armed conflict. *Nature* 571, 193-197 (2019).
75. C.F. Schleussner, J. F. Donges, R. V. Donner, H. J. Schellnhuber, Armed-conflict risks enhanced by climate-related disasters in ethnically fractionalized countries. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 113, 9216-9221 (2016).
76. R. Rupasinghe, B. B. Chomel, B. Martinez-López, Climate change and zoonoses: A review of the current status, knowledge gaps, and future trends. *Acta Trop.* 226, 106225 (2022).
77. R. Gibb, L. H. V. Franklinos, D. W. Redding, K. E. Jones, Ecosystem perspectives are needed to manage zoonotic risks in a changing climate. *BMJ* 371, m3389 (2020).
78. M. J. Gelfand et al., Differences between tight and loose cultures: A 33-nation study. *Science* 332, 1100-1104 (2011).
79. E. H. Cline, 1177 B.C.: The Year Civilization Collapsed: Revised and Updated (Princeton University Press, 2021).
80. D. D. Zhang et al., Climatic change, wars and dynastic cycles in China over the last millennium. *Clim. Change* 76, 459-477 (2006).
81. M. Scheffer, E. H. van Nes, D. Bird, R. K. Bocinsky, T. A. Kohler, Loss of resilience preceded transformations of pre-Hispanic Pueblo societies. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 118, e2024397118 (2021).
82. M. Scheffer, Anticipating societal collapse; Hints from the Stone Age. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 113, 10733-10735 (2016).
83. M. Scheffer et al., Anticipating critical transitions. *Science* 338, 344-348 (2012).
84. L. Kemp et al., Emerging Technologies and Dual-Use Concerns: A Horizon Scan for Global Public Health (World Health Organization, 2021).
85. W. Steffen et al., Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347, 736-748 (2015).
86. L. Mani, A. Tzachor, P. Cole, Global catastrophic risk from lower magnitude volcanic eruptions. *Nat. Commun.* 12, 4756 (2021).
87. K. J. Mach et al., Directions for research on climate and conflict. *Earths Futur.* 8, EF001532 (2020).
88. C. E. Richards, R. C. Lupton, J. M. Allwood, Reframing the threat of global warming: An empirical causal loop diagram of climate change, food insecurity and societal collapse. *Clim. Change* 164, 49 (2021).
89. F. Caccioli, P. Barucca, T. Kobayashi, Network models of financial systemic risk: A review. *J. Comput. Soc. Sci.* 1, 81-114 (2018).
90. S. O. Hansson, G. Hirsch Hadorn, Eds., The Argumentative Turn in Policy Analysis: Reasoning about Uncertainty (Springer International, 2016).
91. H. Landemore, Open Democracy: Reinventing Popular Rule for the Twenty-First Century (Princeton University Press, 2020).
92. P. Dasgupta, The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review (HM Treasury, 2021).
93. Intergovernmental Panel on Climate Change, "Decision framework for special reports, methodology reports and technical papers (amended in September 2008)" (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2008).
94. Intergovernmental Panel on Climate Change, Global Warming of 1.5 °C (Cambridge University Press, 2021).
95. M. Hulme, Is it too late (to stop dangerous climate change)? An editorial. *WIREs Clim. Chang.* 11, e619 (2019).
96. G.J. Y. Peters, R. A. C. Ruiter, G. Kok, Threatening communication: A critical re-analysis and a revised meta-analytic test of fear appeal theory. *Health Psychol. Rev.* 7, S8-S31 (2013).
97. M. B. Tannenbaum et al., Appealing to fear: A meta-analysis of fear appeal effectiveness and theories. *Psychol. Bull.* 141, 1178-1204 (2015).
98. D. A. Chapman, B. Lickel, E. M. Markowitz, Reassessing emotion in climate change communication. *Nat. Clim. Chang.* 7, 850-852 (2017).
99. R. M. Colvin et al., Learning from the climate change debate to avoid polarisation on negative emissions. *Environ. Commun.* 14, 23-35 (2019).

Ringraziamenti

Copyright © 2022 gli Autori. Pubblicato l'1 agosto 2022 da PNAS. Questo articolo open access è distribuito sotto licenza Creative Commons Attribution License 4.0 (CC BY). Il materiale supplementare è disponibile online all'indirizzo <http://www.pnas.org/lookup/suppl/doi:10.1073/pnas.2108146119/-/DCSupplemental>. Traduzione di Erminio Cella. Revisione di Sylvie Coyaud e Stefano Caserini.