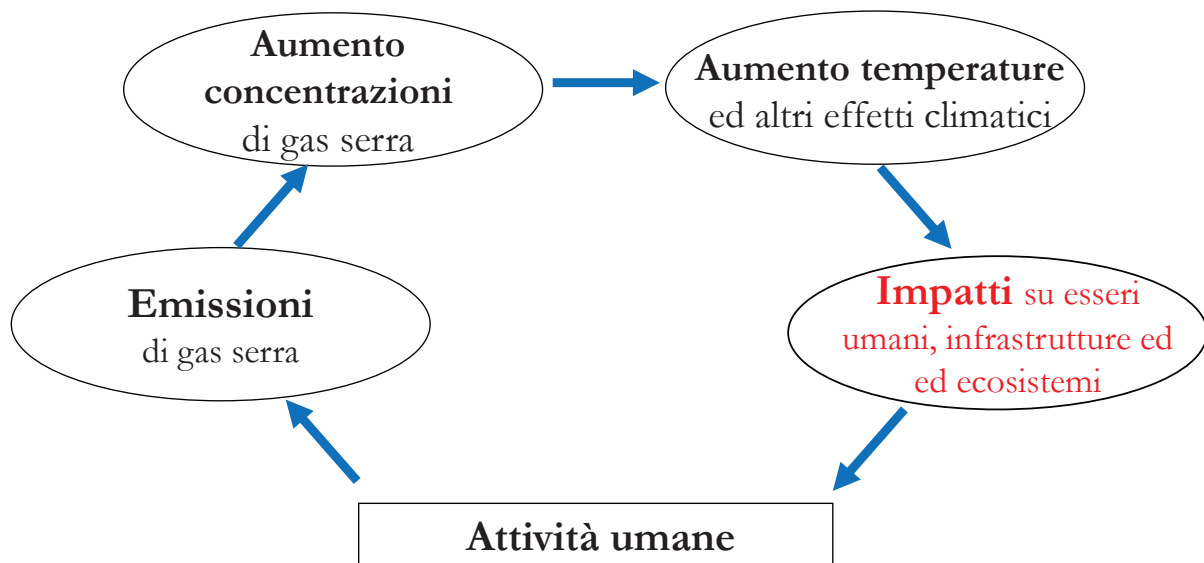


**Rischi di discontinuità su grande scala,
rischi composti e a cascata**



I principali impatti dei cambiamenti climatici

- Ondate di calore
 - Eventi meteorologici estremi /1: siccità
 - Eventi meteorologici estremi /2: precipitazioni intense
 - Incendi
 - Riduzione dei ghiacci (alpini, banchisa artica, calotte polari)
 - Aumento del livello del mare
 - Riduzione della biodiversità
 - Altre cose importanti
-
- **Una valutazione aggregata degli impatti**
 - **Rischi di discontinuità su grande scala**
 - **Rischi composti e a cascata**

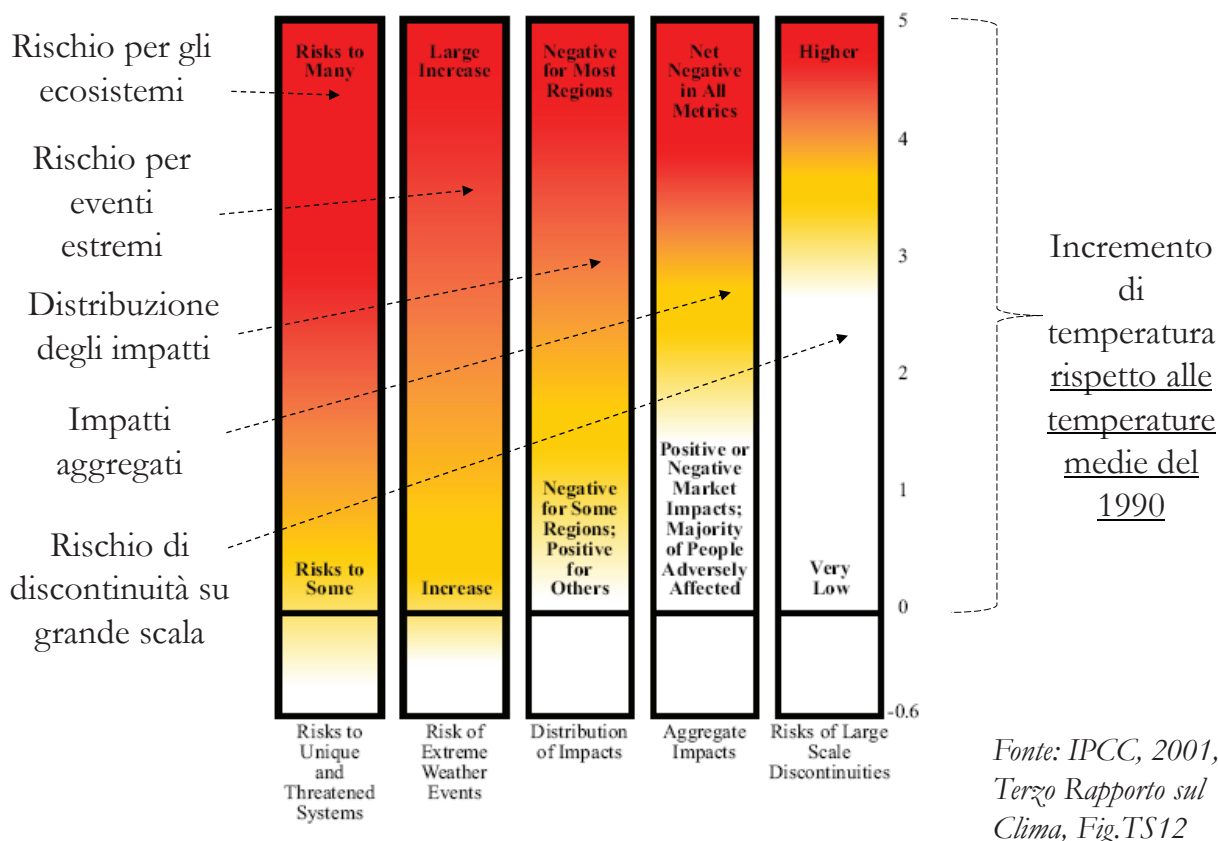
Le braci ardenti: una valutazione aggregata degli impatti

“*burning embers diagram*” (diagramma della brace ardente): un metodo per rappresentare in modo aggregato il rischio di 5 tipologie di impatti, 5 motivi di preoccupazione (“reasons for concerns”).

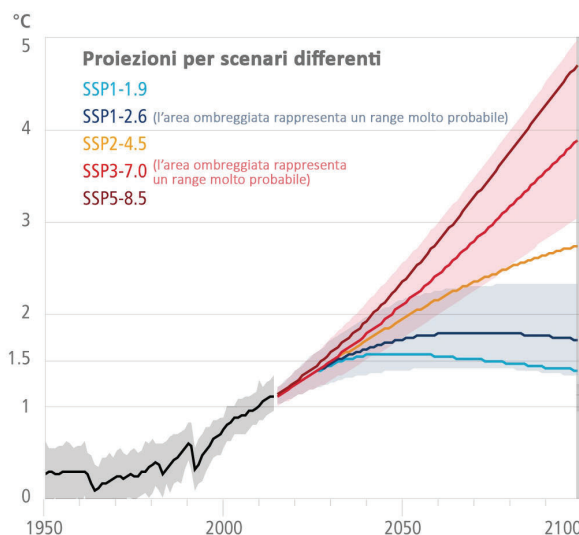
- **Rischi per gli ecosistemi** (estinzione specie, habitat unici, biodiversità)
- **Rischi per eventi estremi** (danni alla salute, ai beni, all’ambiente dall’ aumento della frequenza degli eventi estremi di calore e precipitazioni)
- **Distribuzione degli impatti** (su salute, disponibilità acqua, produzioni agricole)
- **Impatti aggregati** (aggregazione degli impatti economici in diversi settori)
- **Rischi di discontinuità su grande scala** (stabilità calotte glaciali, riduzione significativa della circolazione termoalina)

Vista l’impossibilità di quantificare il livello di rischio per impatti molto complessi e caratterizzati da elevate incertezze, la stima è una valutazione fatta dagli esperti dei singoli settori (“expert judgment”), sulla base di quanto pubblicato nella letteratura scientifica.

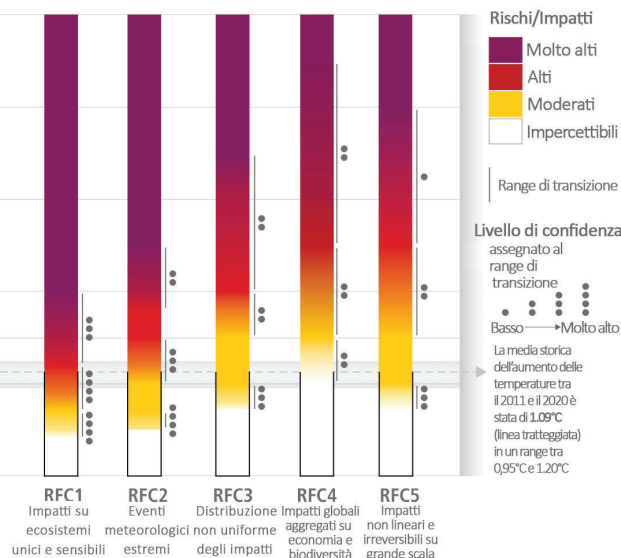
“Motivi di preoccupazione” per gli impatti dei cambiamenti climatici



(a) Cambiamento della temperatura superficiale globale
Aumento relativo al periodo 1850- 1900



(b) Motivi di Preoccupazione (RFC)
Valutazione di impatti e rischi per un adattamento modesto o nullo

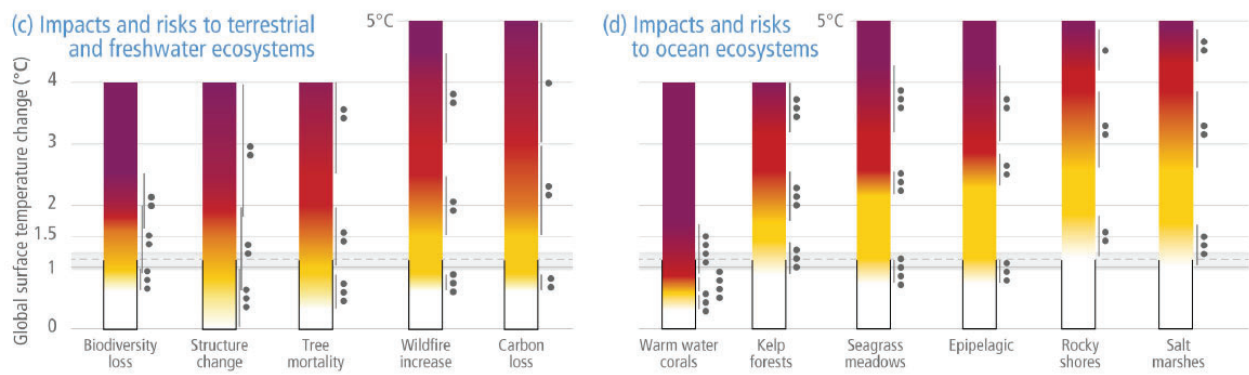


Fonte: IPCC, 2022, AR6-WG2, SPM3

L'AR6-WG2 ha aggiornato la figura riassuntiva sugli impatti attesi per i diversi livelli di temperatura.

«I rischi e gli impatti negativi previsti e le relative perdite e danni derivanti dai cambiamenti climatici aumentano con ogni incremento del riscaldamento globale (confidenza molto alta)».

Fonte: IPCC, 2022, AR6-WG2, SPM



Fonte: IPCC, 2022, AR6-WG2, SPM3

Per ogni livello di riscaldamento futuro, le valutazioni effettuate nell'AR6 indicano rischi molto superiori a quelli indicati nell'AR5.

Gli impatti a lungo termine previsti sono fino a molte volte superiori a quelli attualmente osservati (confidenza elevata).

Fonte: IPCC, 2022, AR6-WG2, SPM

«I rischi climatici e non climatici interagiranno sempre più, creando rischi composti e a cascata più complessi e difficili da gestire (confidenza alta)»

Fonte: IPCC, 2022, AR6-SYR, SPM

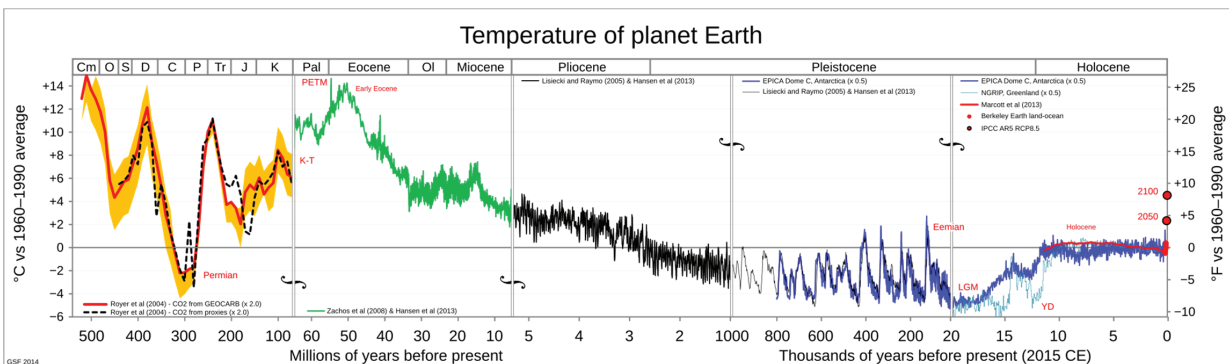
Rischi di discontinuità su grande scala

- La paleoclimatologia mostra come nel passato ci siano stati sia cambiamenti costanti e lineari delle temperature e di altri parametri climatici, sia cambiamenti più repentini e non reversibili.
- La possibilità di evoluzioni non lineari e non reversibili, di discontinuità nell'evoluzione del sistema climatico è un tema di grande interesse ma ancora caratterizzato da grandi incertezze.
- La rapidità del cambiamento va sempre vista in una prospettiva climatologica: sono variazioni che durano decenni e secoli; non settimane, mesi o anni.



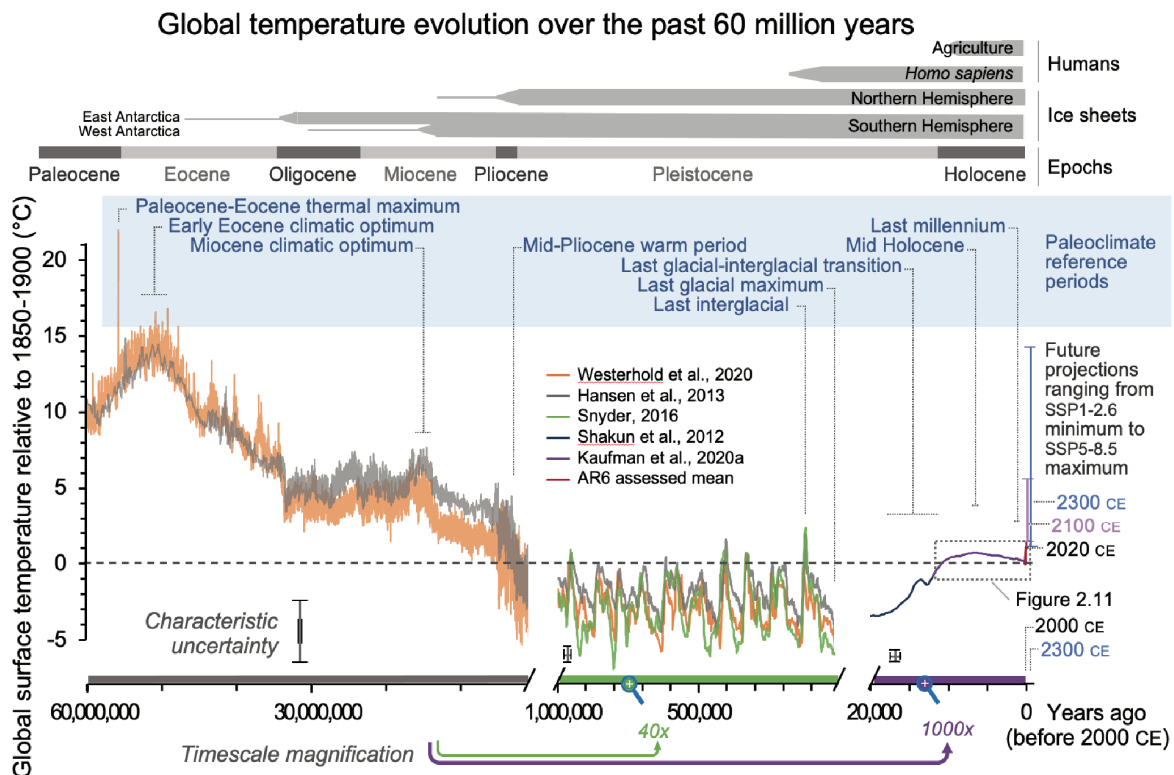
Irreversibilità

- Anche l'irreversibilità va valutata in relazione alla scala temporale della climatologia. Una variazione si considera “irreversibile” se persiste per millenni. In tempi più lunghi, il sistema può comunque modificarsi e tornare alle condizioni iniziali.
- Il superamento di una certa soglia “di non ritorno” può comportare variazioni per alcuni secoli o millenni, ma il sistema può tornare nelle condizioni iniziali su tempi più lunghi.

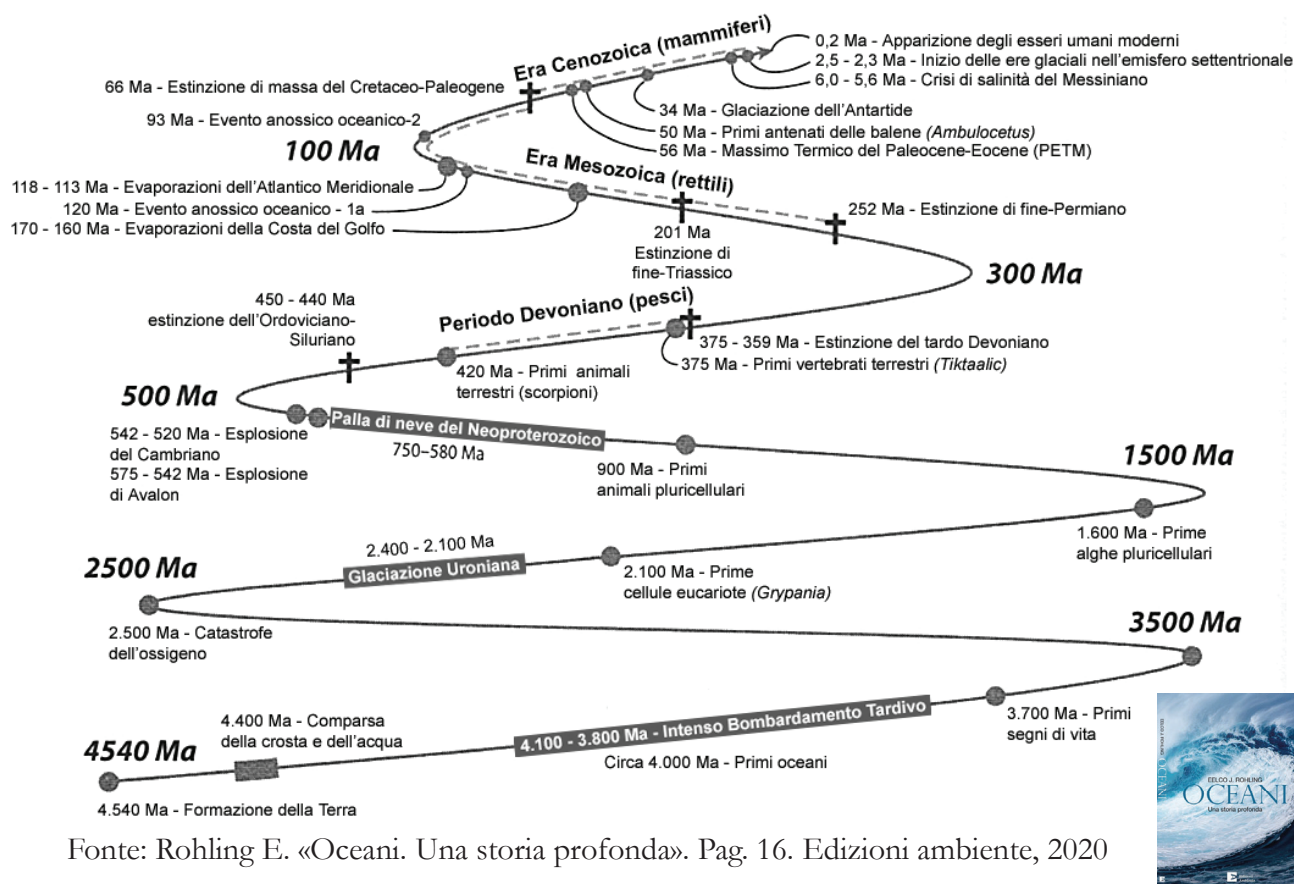


Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:All_palaetemps.png

Irreversibilità



Fonte: IPCC-AR6, WG1, Cross-Chapter Box 2.1, Figure 1



Estinzione di fine Permiano (252,3 milioni di anni fa)

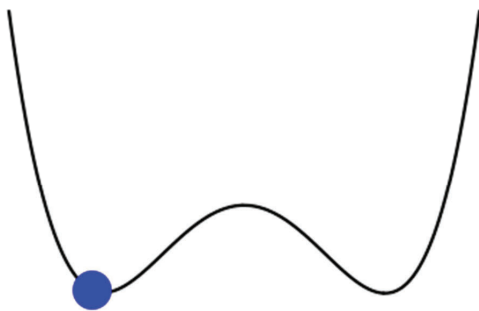
....si verificò un forte evento di acidificazione. I dati ricavati dagli isotopi del boro indicano un drastico abbassamento del pH, tra 0,6 e 0,7 unità di pH in circa 10.000 anni. Questo evento di acidificazione coinvolse un secondo rilascio di carbonio esterno, in cui il tasso delle emissioni potrebbe essere stato simile a quello delle emissioni di origine antropica attuali. Va però sottolineato che il tasso di acidificazione (fino a 0,7 unità di pH registrato in 10.000 anni) fu comunque molto inferiore all'abbassamento (0,5 unità di pH in circa 250 anni, entro il 2100) che potrebbe essere causato dall'acidificazione di origine antropica. Indipendentemente da questo, l'acidificazione di fine Permiano evidenzia chiaramente il fatto che le emissioni di carbonio esterno superarono ampiamente qualsiasi capacità di compensazione degli oceani dell'epoca. Il risultante picco di acidificazione diede il via alla fase più letale del periodo di estinzione. Morirono tutti gli organismi calcificatori, creatori di barriere coralline, presenti negli oceani. Gli attuali coralli calcificatori derivano tutti dagli sviluppi che iniziarono subito dopo l'evento di estinzione di fine Permiano.

Definizioni

- “*tipping point*”: una soglia critica oltre la quale una piccola perturbazione può alterare qualitativamente lo stato di un sistema, portandolo in uno stato qualitativamente diverso.
- “*tipping elements*”: componenti su grande scala del sistema climatico terrestre per cui l’attività umana potrebbe portare a un superamento di una soglia critica (tipping point).
- «*Abrupt climate change*»: un cambiamento improvviso su larga scala nel sistema climatico che avviene nell’arco di pochi decenni o meno, che persiste per almeno alcuni decenni e provoca impatti sostanziali sui sistemi umani e/o naturali.

Tipping point

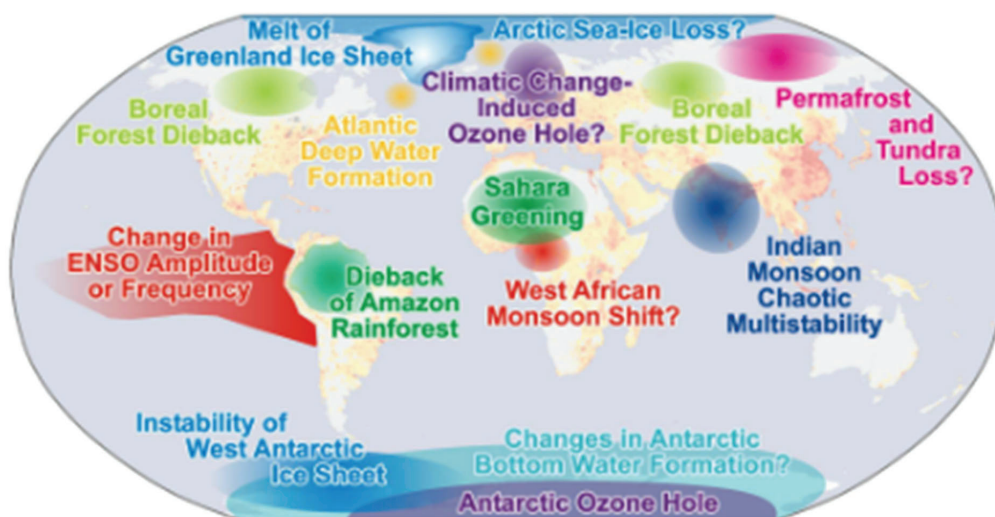
Definizione dell’IPCC: una soglia critica oltre la quale un sistema si riorganizza, spesso in modo brusco e/o irreversibile



Il superamento di un tipping point porta a una situazione in cui il sistema è in un nuovo equilibrio stabile

Tipping element

Lo sforzo della comunità scientifica è non solo di identificare gli elementi potenzialmente instabili del sistema climatico (“tipping element”), ma di descrivere quantitativamente, in termini di aumento della temperatura media globale, la posizione delle “soglie” (chiamate “tipping point”).



Fonte: Lenton T.M. et al. (2008) *Tipping elements in the Earth's climate system. Proceedings of the National Academy of Science*,

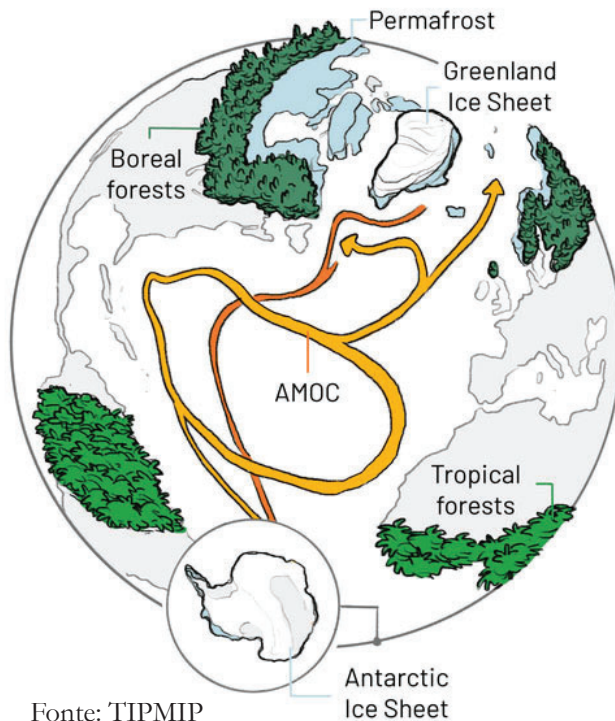
Esempio di conseguenze dal superamento delle soglie per alcuni “tipping elements” presenti nel sistema climatico

Tipping element	Fenomeno	Conseguenze
Ghiaccio marino dell'Artico	fusione	temperature medie globali più elevate e ricadute sugli ecosistemi
Calotta glaciale della Groenlandia	fusione – destabilizzazione	innalzamento di 7 metri del livello del mare e temperature medie mondiali più elevate
Calotta glaciale dell'Antartico occidentale	fusione – destabilizzazione	innalzamento di 5 metri del livello del mare e temperature medie mondiali più elevate
Corrente oceanica atlantica (AMOC)	riduzione e poi blocco	alterazione della Corrente del Golfo e alterazioni termiche in Europa e scala globale
El Niño / La Niña	modifica della frequenza e dell'intensità	alterazione dei meccanismi meteorologici, più intensi fenomeni di siccità (es. sud-est asiatico)
Foresta boreale	inaridimento	importanti cambiamenti negli ecosistemi boreali, perdita di biodiversità
Foresta amazzonica	inaridimento	grave modifica degli ecosistemi e perdita di biodiversità, riduzione delle piogge
Monsoni estivi indiani	modifica della frequenza e dell'intensità	fenomeni di intensa siccità e modifica dei meccanismi meteorologici
Monsoni dell'Africa occidentale	modifica della frequenza e dell'intensità	cambiamenti nel Sahara/Sahel e modifica meccanismi meteorologici

Per approfondire: Lenton T.M. et al. (2008) *Tipping elements in the Earth's climate system. PNAS, vol. 105*

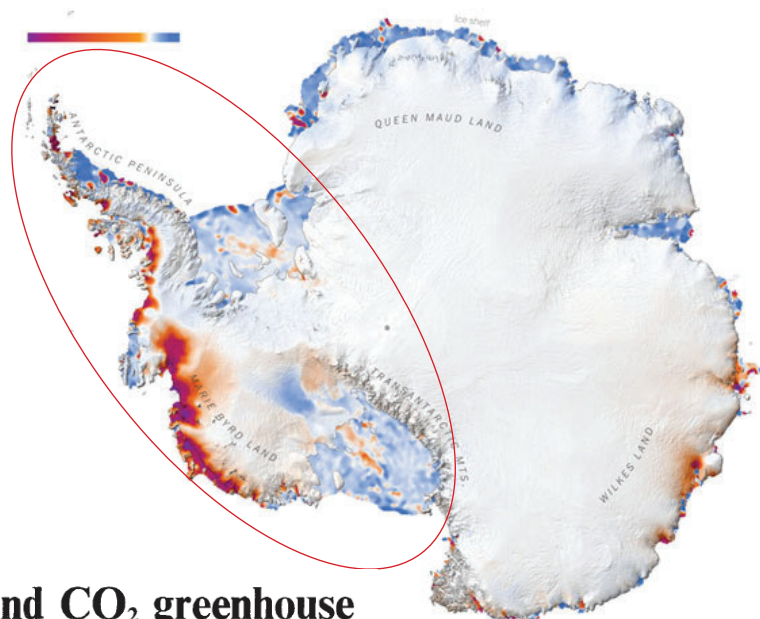
Tipping Points Modelling Intercomparison Project (TIPMIP)

<http://tipmip.org/>



- Deglaciazione della Calotta glaciale antartica occidentale (WAIS) → 5 m livello del mare
- Deglaciazione della calotta glaciale della Groenlandia (GIS) → +7 m livello del mare
- Capovolgimento meridionale della circolazione atlantica (AMOC) → forte riduzione delle temperature nel nord Europa
- Fusione permafrost → emissione di CH_4
- Inaridimento foreste pluviali tropicali
- Inaridimento foreste boreali

WAIS



West Antarctic ice sheet and CO_2 greenhouse effect: a threat of disaster

J. H. Mercer

Institute of Polar Studies, The Ohio State University, Columbus, Ohio 43210

If the global consumption of fossil fuels continues to grow at its present rate, atmospheric CO_2 content will double in about 50 years. Climatic models suggest that the resultant greenhouse-warming effect will be greatly magnified in high latitudes. The computed temperature rise at lat 80°S could start rapid deglaciation of West Antarctica, leading to a 5 m rise in sea level.

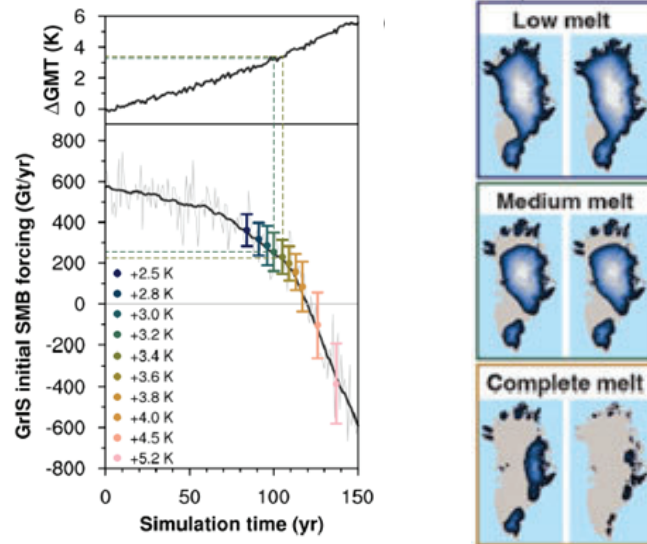
Nature Vol. 271 26 January 1978

Critical slowing down suggests that the western Greenland Ice Sheet is close to a tipping point

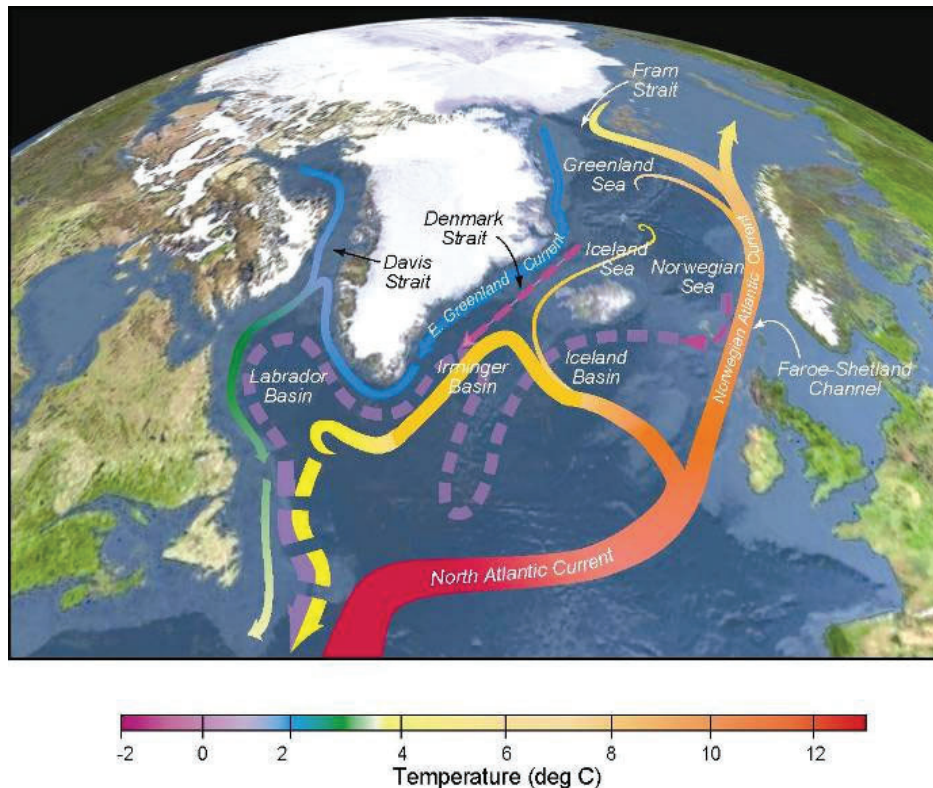
Niklas Boers^{a,b,c,d,1} and Martin Rypdal^a

A topographically controlled tipping point for complete Greenland ice sheet melt

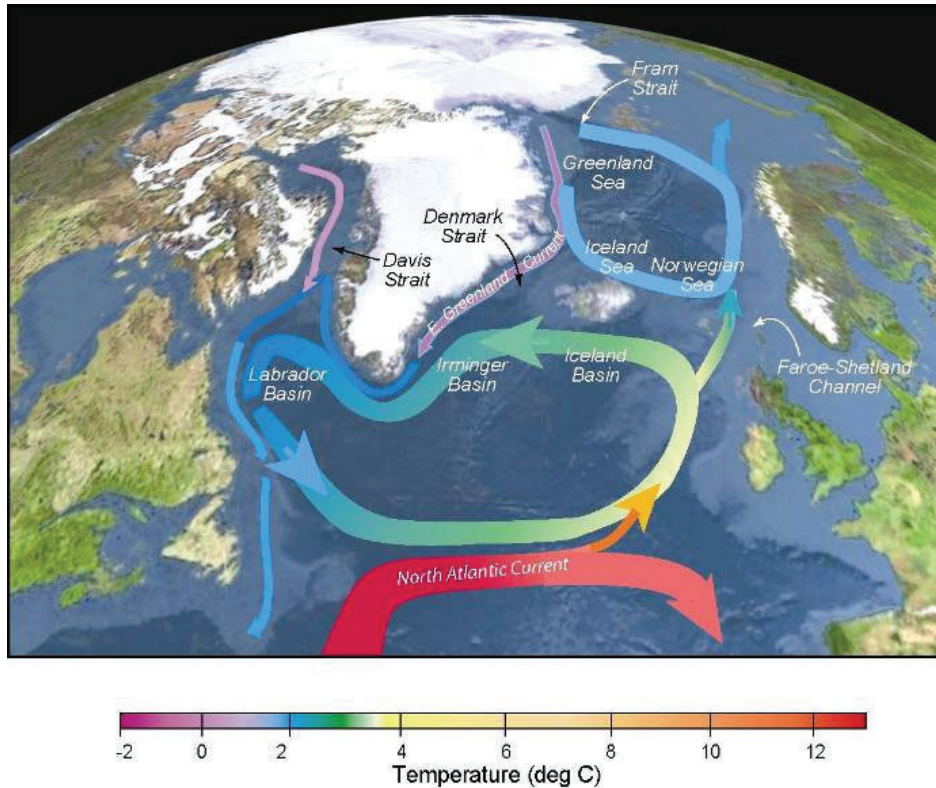
Michele Petrini^{1,2}, Meike D. W. Scherrenberg³, Laura Muntjewerf^{4,5}, Miren Vizcaino⁶, Raymond Sellevold⁷, Gunter R. Leguy⁸, William H. Lipscomb⁸, and Heiko Goelzer¹



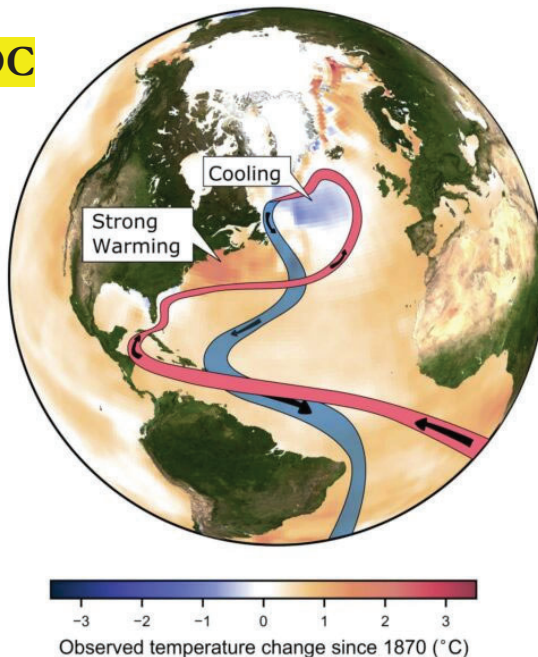
La fusione dei ghiacci della Groenlandia può determinare una modifica della temperatura e della salinità dell'acqua del Nord Atlantico, che influisce sulla Corrente del Golfo



Secondo la paleoclimatologia, la variazione della circolazione termoalina dell'Oceano Atlantico ha già subito alterazioni nel passato, verso la fine dell'ultima glaciazione, per effetto della fusione dei ghiacci della calotta artica.



AMOC



AMOC, Atlantic Meridional Overturning Circulation, in italiano «capovolgimento meridionale della circolazione atlantica», è il termine scientifico per indicare l'intera circolazione oceanica che trasporta acqua e calore verso nord, e di cui una parte è la ben nota "Corrente del golfo", responsabile del clima mite alle alte latitudini dell'Europa occidentale

Schema dell'AMOC: l'acqua calda scorre verso nord (flusso rosso), affonda alle latitudini settentrionali e poi ritorna come una corrente fredda e profonda verso sud (flusso blu). La figura mostra il cambiamento della temperatura della superficie del mare dal 1870, sulla base delle osservazioni oceaniche, tra cui l'impronta digitale del rallentamento dell'AMOC, una "macchia fredda" (azzurra) nel Nord Atlantico subpolare e l'eccessivo riscaldamento a nord della Corrente del Golfo

Secondo gli studi più recenti, il «collasso» dell'AMOC potrebbe portare a enormi raffreddamenti nella parte che oggi gode degli effetti benefici della corrente del golfo, il nord europa (UK, Irlanda e Scandinavia)

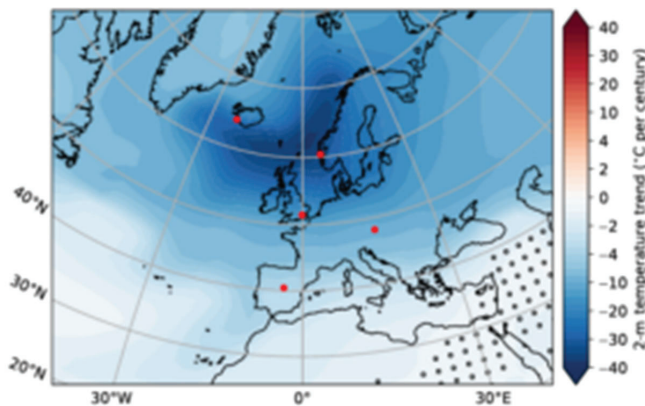
SCIENCE ADVANCES | RESEARCH ARTICLE

OCEANOGRAPHY

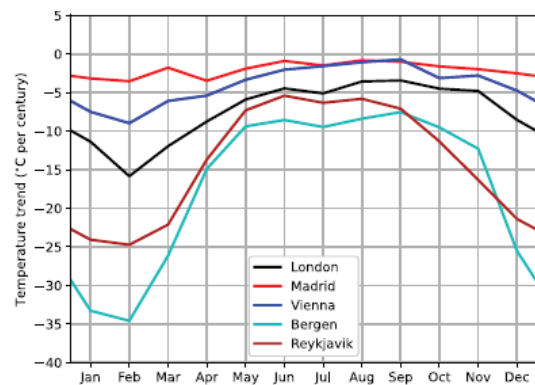
Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course

René M. van Westen*, Michael Kliphuis, Henk A. Dijkstra

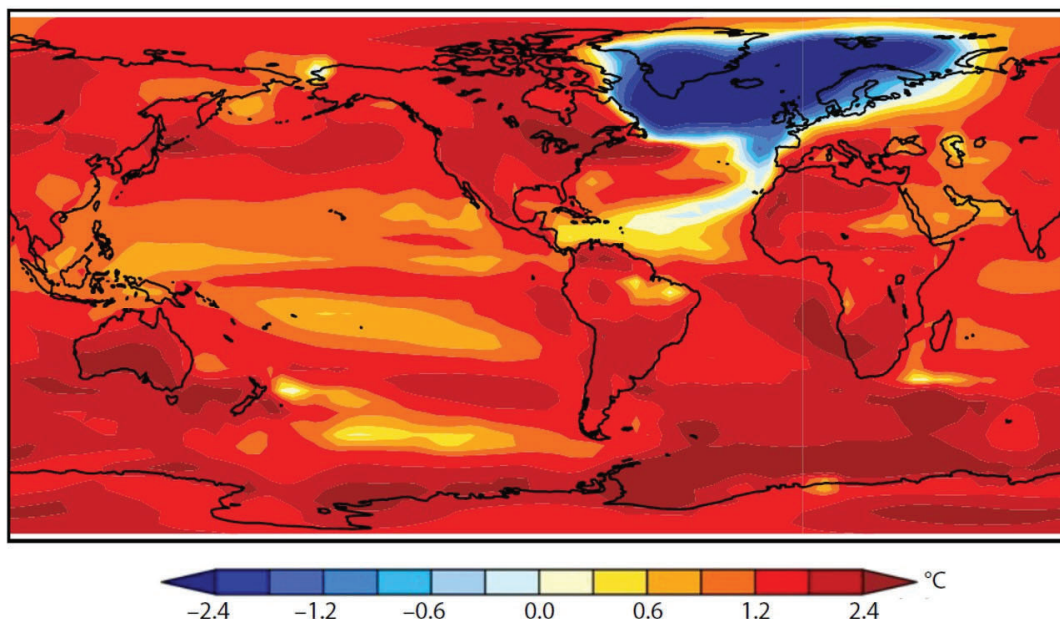
Variazione di temperatura in febbraio



Variazione di temperatura (°C/secolo)



Il raffreddamento accentuato della parte più a nord dell'Europa che si avrebbe per effetto del blocco dell'AMOC porterebbe ad una redistribuzione di quel calore più a sud.

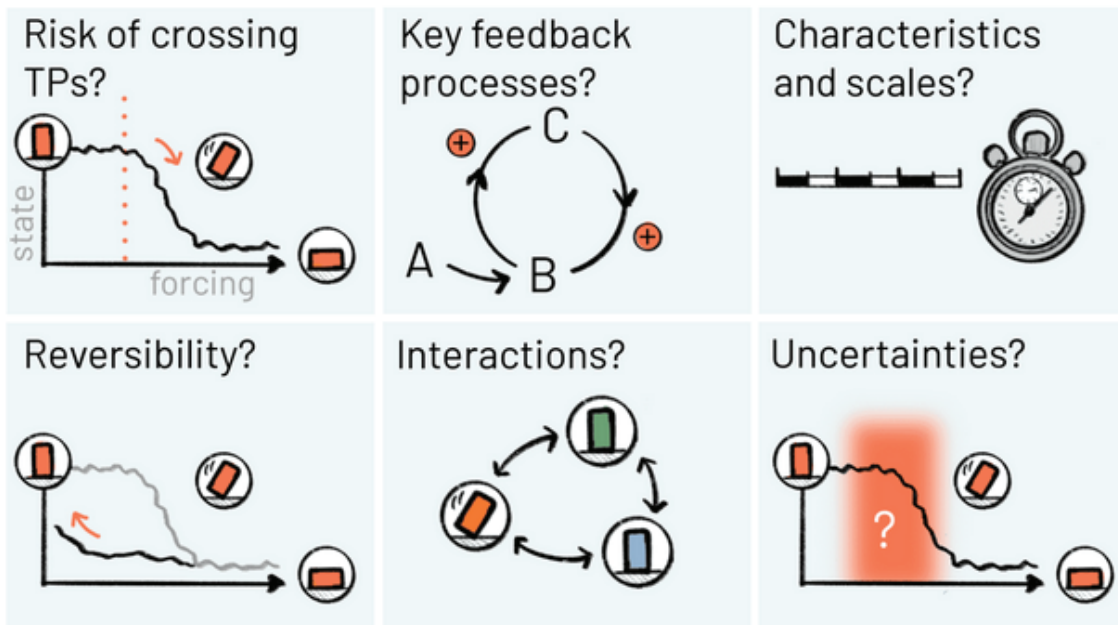


Is the Atlantic Overturning Circulation Approaching a Tipping Point?

Stefan Rahmstorf, Oceanography, 37, 2024

I punti cruciali della ricerca scientifica in corso

- Qual è il rischio di superamento dei tipping points?
- Quali sono i feedback in grado di portare al di superamento dei tipping points?
- Interazioni fra i tipping points?



Fonte: TIPMIP

Rischi composti e a cascata

Rischi composti: *derivano dall'interazione di diversi tipi di fattori pericolosi, coincidenti o sequenziali*

Esempio: un ciclone distrugge le infrastrutture elettriche → la popolazione diventa più vulnerabile a una successiva ondata di calore

Fonte: AR6-WG2 IPCC, glossario

*Climatic and non-climatic risks will increasingly interact, creating **compound and cascading risks** that are more complex and difficult to manage (high confidence).*

Fonte: IPCC, 2022, AR6-SYR, SPM

*«Gli impatti e i rischi del cambiamento climatico stanno diventando sempre più complessi e difficili da gestire. Si verificheranno simultaneamente molteplici pericoli climatici, e molteplici rischi climatici e non climatici interagiranno, con conseguente aumento del rischio complessivo e di **rischi a cascata** tra settori e regioni. Alcune risposte al cambiamento climatico comportano nuovi impatti e rischi. (alta confidenza)*

Fonte: IPCC, 2022, AR6-WG2, SPM

Impatti a cascata: *si verificano quando un pericolo estremo genera una sequenza di eventi secondari nei sistemi naturali e umani che determinano sconvolgimenti fisici, naturali, sociali o economici, per cui l'impatto risultante è significativamente maggiore dell'impatto iniziale. Gli impatti a cascata sono complessi e multidimensionali.*



Le valutazioni complesse dei rischi, pur essendo più realistiche, sono anche le più difficili.

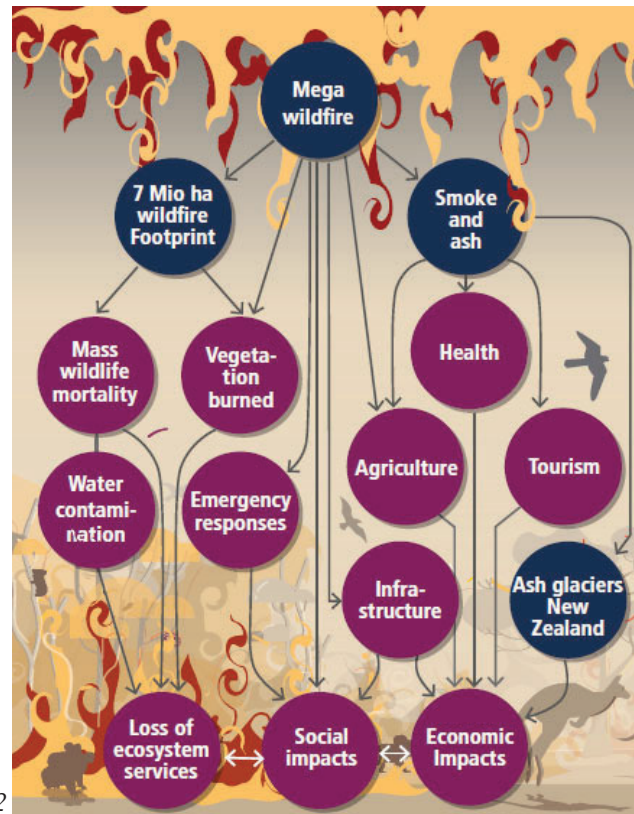


Esempio di rischi composti e a cascata : mega incendi in Australia

Impatti a cascata, composti e transfrontalieri sulla mortalità delle persone, sulla salute fisica e mentale, sull'attività economica, sui beni edificati, sugli ecosistemi e sulla mortalità di massa delle specie



Fonte: IPCC-AR6, WG2, FIG TS2



*fumo e cenere
trasportati sui
ghiacciai in
Nuova
Zelanda*

Definizioni dell'IPCC

Rischio: il potenziale di conseguenze negative per i sistemi umani o ecologici. Nel contesto degli impatti dei cambiamenti climatici, i rischi derivano da interazioni dinamiche tra i **pericoli** legati al clima, l'**esposizione** e la **vulnerabilità** del sistema umano o ecologico interessato

Pericolo (hazard): il potenziale che si verifichi un evento o un trend, naturale indotto dall'uomo, che può causare la perdita di vite umane, lesioni o altri impatti sulla salute, nonché danni e perdite a proprietà, infrastrutture, mezzi di sussistenza, fornitura di servizi, ecosistemi e risorse ambientali.

Esposizione: la presenza di persone, specie o ecosistemi, funzioni ambientali, servizi, infrastrutture, attività socioeconomiche e culturali, che possono risentire negativamente degli cambiamenti climatici

Vulnerabilità: la propensione o predisposizione ad essere influenzato negativamente. La vulnerabilità dipende da numerosi fattori, tra cui la sensibilità o la suscettibilità al danno e la mancanza di capacità di farvi fronte e di adattarsi.

Pericolo:
aumento del
livello del mare

Esposizione:
presenza di persone



Vulnerabilità:
quota sul livello del mare

Gli impatti dei cambiamenti climatici non sono distribuiti in modo uniforme

I paesi più poveri, e i più poveri all'interno dei paesi più poveri, sono i più vulnerabili ai cambiamenti climatici

Gli impatti sono più pesanti – una quota più rilevante dell'economia è in settori economici che sono sensibili ai cambiamenti climatici (siccità, inondazioni)

Minore capacità di adattamento: per via di carenze finanziarie, istituzionali, capacità tecnologiche e accesso ad informazioni e conoscenze

Il cambiamento climatico aumenterà le disuguaglianze sull'aspettativa di vita, l'accesso al cibo e all'acqua pulita e ad altre risorse

Le proiezioni del cambiamento climatico indicano una diminuzione della disponibilità d'acqua in molte aree aride o semi aride, con l'aumento della popolazione con scarsità d'acqua, nonché una diminuzione della produttività agricola nei tropici e nelle aree sub-tropicali anche per bassi aumenti di temperatura.

Climatic change and rural–urban migration: The case of sub-Saharan Africa

Climate change-induced migration and violent conflict

Climate change, human security and violent conflict

Linkages among climate change, crop yields and Mexico–US cross-border migration

Climate change in the Fertile Crescent and implications of the recent Syrian drought

Università di Parma – Anno Accademico 2025-2026

Corso di cambiamenti climatici

Prof. Stefano Caserini

**Rischi di discontinuità su grande scala,
rischi composti e a cascata**

Commentary

The risk of a hothouse Earth trajectory

William J. Ripple,^{1,2,10} Christopher Wolf,^{3,10,*} Johan Rockström,⁴ Katherine Richardson,⁵ Nico Wunderling,^{4,6,9} Jillian W. Gregg,³ Thomas Westerhold,⁷ and Hans Joachim Schellnhuber⁸

¹Department of Forest Ecosystems and Society, Oregon State University, Corvallis, OR, USA

²Conservation Biology Institute, Corvallis, OR, USA

³Terrestrial Ecosystems Research Associates (TERA), Corvallis, OR, USA

⁴Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Member of the Leibniz Association, P.O. Box 601203, 14412 Potsdam, Germany

⁵Globe Institute, Faculty of Health, University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark

⁶Center for Critical Computational Studies (C3S), Goethe University, 60629 Frankfurt am Main, Germany

⁷Center for Marine Environmental Sciences - MARUM, University Bremen, Bremen, Germany

⁸International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria

⁹Senckenberg Research Institute and Natural History Museum, Member of the Leibniz Association, 60325 Frankfurt am Main, Germany

¹⁰These authors contributed equally

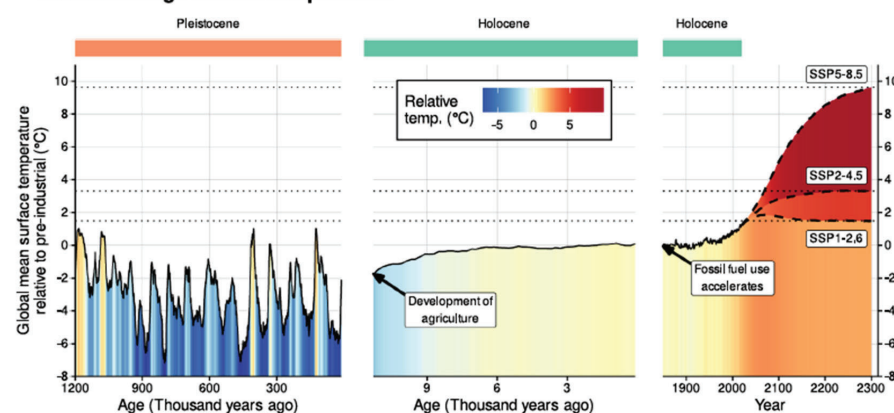
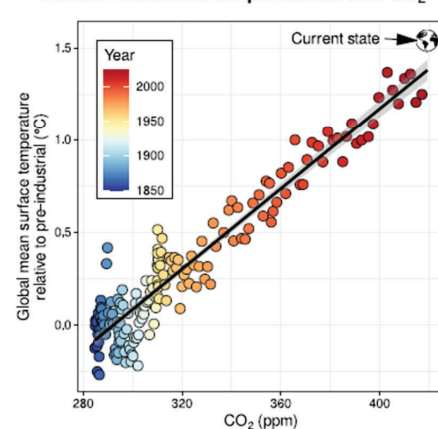
*Correspondence: chrisgraywolf@gmail.com

<https://doi.org/10.1016/j.oneear.2025.101565>

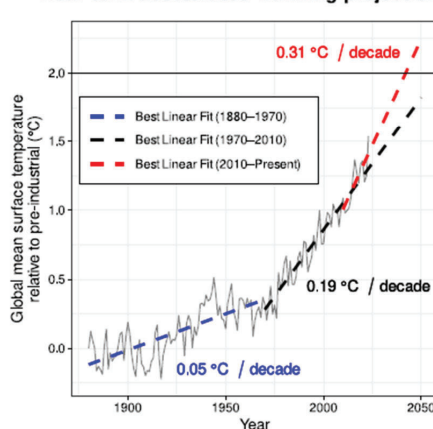
Earth's climate is now departing from the stable conditions that supported human civilization for millennia. Crossing critical temperature thresholds may trigger self-reinforcing feedbacks and tipping dynamics that amplify warming and destabilize distant Earth system components. Uncertain tipping thresholds make precaution essential, as crossing them could commit the planet to a hothouse trajectory with long-lasting and potentially irreversible consequences.

35

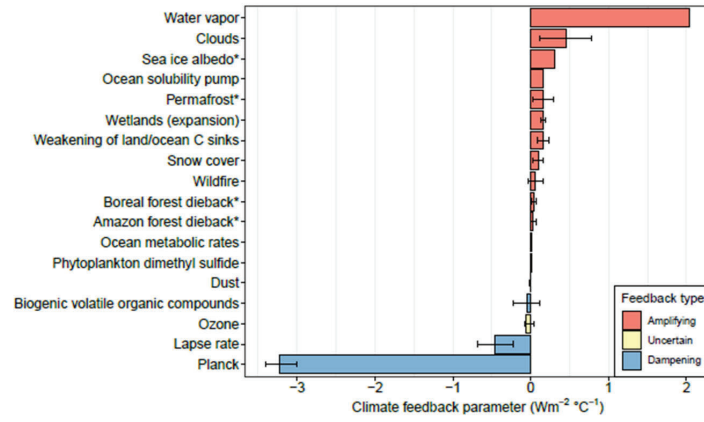
A Global average surface temperature

B Modern historical temperatures and CO₂

C Near-term accelerated warming projection



A Climate feedback



B Tipping elements

