

Annalisa Cherchi
Susanna Corti

CLIMA 2050

La matematica e la fisica per il futuro
del sistema Terra

a cura
di Stefano Dalla Casa



Nel video *Il clima che verrà: modelli e scenari nell'ultimo rapporto IPCC*,
le autrici raccontano la loro esperienza di lavoro all'interno del gruppo
intergovernativo sul cambiamento climatico delle Nazioni Unite.
Scarica la app GUARDA! e inquadrami



ZANICHELLI

Diritti riservati

I diritti di pubblicazione, riproduzione, comunicazione, distribuzione, trascrizione, traduzione, noleggio, prestito, esecuzione, elaborazione in qualsiasi forma o opera, di memorizzazione anche digitale e di adattamento totale o parziale su supporti di qualsiasi tipo e con qualsiasi mezzo (comprese le copie digitali e fotostatiche), sono riservati per tutti i paesi. L'acquisto della presente copia dell'opera non implica il trasferimento dei suddetti diritti né li esaurisce.

Fotocopie e permessi di riproduzione

Le fotocopie per uso personale (cioè privato e individuale, con esclusione quindi di strumenti di uso collettivo) possono essere effettuate, nei limiti del 15% di ciascun volume, dietro pagamento alla S.I.A.E. del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Tali fotocopie possono essere effettuate negli esercizi commerciali convenzionati S.I.A.E. o con altre modalità indicate da S.I.A.E.

Per le riproduzioni ad uso non personale (ad esempio: professionale, economico, commerciale, strumenti di studio collettivi, come dispense e simili) l'editore potrà concedere a pagamento l'autorizzazione a riprodurre un numero di pagine non superiore al 15% delle pagine del presente volume. Le richieste vanno inoltrate a

CLEARedi Centro Licenze e Autorizzazioni per le Riproduzioni Editoriali
Corso di Porta Romana, n. 108
20122 Milano
e-mail autorizzazioni@clearedi.org e sito web www.clearedi.org

L'editore, per quanto di propria spettanza, considera rare le opere fuori del proprio catalogo editoriale. La loro fotocopia per i soli esemplari esistenti nelle biblioteche è consentita, anche oltre il limite del 15%, non essendo concorrenziale all'opera. Non possono considerarsi rare le opere di cui esiste, nel catalogo dell'editore, una successiva edizione, né le opere presenti in cataloghi di altri editori o le opere antologiche. Nei contratti di cessione è esclusa, per biblioteche, istituti di istruzione, musei e archivi, la facoltà di cui all'art. 71 - ter legge diritto d'autore. Per permessi di riproduzione, diversi dalle fotocopie rivolgersi a ufficiocontratti@zanichelli.it

Licenze per riassunto, citazione e riproduzione parziale a uso didattico con mezzi digitali

La citazione, la riproduzione e il riassunto, se fatti con mezzi digitali, sono consentiti (art. 70 bis legge sul diritto d'autore), limitatamente a brani o parti di opera,

a) esclusivamente per finalità illustrative a uso didattico, nei limiti di quanto giustificato dallo scopo non commerciale perseguito.

(La finalità illustrativa si consegue con esempi, chiarimenti, commenti, spiegazioni, domande, nel corso di una lezione);

b) sotto la responsabilità di un istituto di istruzione, nei suoi locali o in altro luogo o in un ambiente elettronico sicuro, accessibili solo al personale docente di tale istituto e agli alunni o studenti iscritti al corso di studi in cui le parti di opere sono utilizzate;

c) a condizione che, per i materiali educativi, non siano disponibili sul mercato licenze volontarie che autorizzano tali usi.

Zanichelli offre al mercato due tipi di licenze di durata limitata all'anno scolastico in cui le licenze sono concesse:

A) licenze gratuite per la riproduzione, citazione o riassunto di una parte di opera non superiore al 5%. Non è consentito superare tale limite del 5% attraverso una pluralità di licenze gratuite;

B) licenze a pagamento per la riproduzione, citazione, riassunto parziale ma superiore al 5% e comunque inferiore al 40% dell'opera.

Per usufruire di tali licenze occorre seguire le istruzioni su www.zanichelli.it/licenzeeducative

L'autorizzazione è strettamente riservata all'istituto educativo licenziatario e non è trasferibile in alcun modo e a qualsiasi titolo.

Diritto di TDM

L'estrazione di dati da questa opera o da parti di essa e le attività connesse non sono consentite, salvi i casi di utilizzazioni libere ammessi dalla legge. L'editore può concedere una licenza. La richiesta va indirizzata a tdm@zanichelli.it

File per sintesi vocale

L'editore mette a disposizione degli studenti non vedenti, ipovedenti, disabili motori o con disturbi specifici di apprendimento i file pdf in cui sono memorizzate le pagine di questo libro. Il formato del file permette l'ingrandimento dei caratteri del testo e la lettura mediante software screen reader. Le informazioni su come ottenere i file sono su www.zanichelli.it/scuola/bisogni-educativi-speciali

Grazie a chi ci segnala gli errori

Segnalate gli errori e le proposte di correzione su www.zanichelli.it/correzioni. Controlleremo e inseriremo le eventuali correzioni nelle ristampe del libro. Nello stesso sito troverete anche l'errata corrige, con l'elenco degli errori e delle correzioni.

Realizzazione editoriale:

- Collana ideata da: Federico Tibone e Lisa Vozza
- Coordinamento editoriale: Elena Bacchilega, Stefano Dalla Casa, Lucia Sanna Bissani
- Redazione: Veronica Vannini
- Progetto grafico: Falcinelli & Co.
- Impaginazione: Francesca Ponti
- Disegni e grafici: Chiara Maccaferri
- Ricerca iconografica: Stefano Dalla Casa
- Composizione delle formule: Nuova Monograf snc, Bologna

Copertina:

- Progetto grafico: Falcinelli & Co.
- Artwork: Falcinelli & Co.
- Impaginazione: Francesca Ponti
- Immagine di copertina: OJO Images/iStock Photo

Prima edizione: ottobre 2022

Ristampa:

5 4 3 2 1 2022 2023 2024 2025 2026

Stampa: Grafica Ragno

Via Lombardia 25, 40064 Tolara di Sotto - Ozzano Emilia (Bologna)

per conto di Zanichelli editore S.p.A.

Via Innerio 34, 40126 Bologna

INDICE

1. Si fa presto a dire clima... 5
Per capire che cos'è il clima e come cambia, consideriamo lo studio del Sistema Terra attraverso le osservazioni, le ricostruzioni e i modelli basati sulle leggi fisiche.
2. Il clima del prossimo futuro 33
Non possiamo sapere che tempo farà a Bologna il 1° marzo 2050, eppure sappiamo che quasi certamente la temperatura media globale sarà più alta di 1,5 °C rispetto al periodo 1850-1900. Ecco il perché di questo (apparente) paradosso.
3. La fisica e la matematica del clima 59
Conosciamo le equazioni dell'atmosfera, eppure prevedere il clima non è come prevedere il moto di una cometa. Il motivo è che abbiamo a che fare con un sistema caotico.
4. Cambiamenti climatici vicini e lontani 85
Il riscaldamento è globale, ma i cambiamenti climatici cambiano da regione a regione, e per alcune le proiezioni indicano mutamenti drastici. È il caso anche del nostro Mediterraneo.
5. Le conseguenze dei cambiamenti climatici 109
Perché alcuni cambiamenti sono già irreversibili e come sappiamo che il riscaldamento globale aumenta frequenza e intensità degli eventi estremi.

CAPITOLO QUINTO

Le conseguenze dei cambiamenti climatici

Il cambiamento climatico in atto, che è il risultato del riscaldamento globale in corso da un secolo e mezzo a questa parte, non avviene in modo uniforme in tutto il mondo. Ci sono caratteristiche specifiche nel modo in cui l'aumento di temperatura e le variazioni delle precipitazioni si distribuiscono nelle varie regioni del pianeta. Tali caratteristiche sono legate alla *soglia* di riscaldamento globale raggiunta. La figura 14 a pagina seguente descrive bene questo aspetto, mostrandoci come si distribuisce la variazione di temperatura osservata con un livello di riscaldamento globale pari a 1 grado rispetto al periodo 1850-1900 (si tratta del riscaldamento globale raggiunto se si considera la media dei primi vent'anni del XXI secolo).

Ci sono luoghi del pianeta dove la temperatura si arrampica in alto più velocemente, altri che sono in linea con la media, e poi c'è il punto freddo

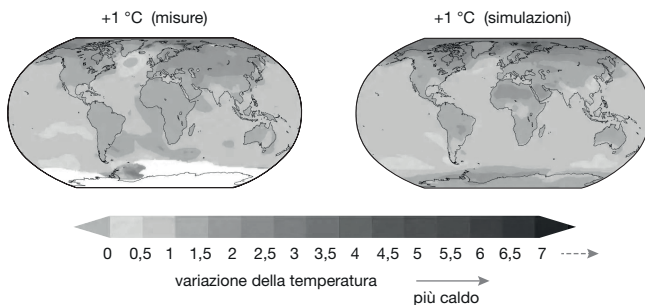


Figura 14. Un grado di riscaldamento globale medio non corrisponde a un riscaldamento uniforme. Immagine: adattata da IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*.

nell'oceano Atlantico, subito a sud della Groenlandia, di cui abbiamo parlato nel capitolo precedente, che presenta una diminuzione di temperatura. Più in generale si può notare che la regione artica (abbiamo già visto perché) si riscalda più di altre regioni, che le aree terrestri sono più calde della superficie dell'oceano e che l'emisfero settentrionale si riscalda più dell'emisfero australe. Il riquadro a destra della figura ci mostra invece lo stesso riscaldamento simulato dai modelli climatici (si tratta della media di tante simulazioni, eseguite con molti modelli di ultima generazione). Le caratteristiche principali nella distribuzione del riscaldamento sul pianeta sono riprodotte in maniera soddisfacente. Ci sono differenze e regioni in cui questo riscaldamento è sovra o sottostimato, per esempio nell'Europa centrale e nella regione del punto freddo atlantico. Comunque, al di là di queste inesattezze, possiamo dire che le simulazioni modellistiche ci forniscono una buona rappresentazione della realtà

e che i modelli climatici costituiscono uno strumento valido (anche se migliorabile) per guardare oltre il presente, per così dire...

Abbiamo visto che per guardare «oltre» si utilizzano scenari climatici che prospettano percorsi socioeconomici diversi, che a loro volta comportano una diversa evoluzione delle concentrazioni di gas serra in atmosfera, da qui fino alla fine del XXI secolo. Per ogni scenario sono eseguite proiezioni climatiche modellistiche per vedere cosa ci aspetta nel caso che questo diventi realtà. L'uso degli scenari per distinguere le alternative che abbiamo di fronte è tutt'ora la maniera più comune di guardare alle proiezioni modellistiche. D'altronde è stato recentemente mostrato che è possibile identificare alcune caratteristiche fondamentali negli effetti dei cambiamenti climatici, in particolare variazioni in temperatura e precipitazione, che dipendono dal livello di riscaldamento globale e non dipendono dalla «strada» che si segue per raggiungere quella data soglia di temperatura globale (velocemente nel caso di scenari estremi o più lentamente nel caso di scenari con concentrazioni di gas serra che crescono più lentamente). Il fatto che le regioni artiche si riscaldino più rapidamente del resto del pianeta è una di queste caratteristiche, così come la differenza di riscaldamento che contraddistingue le grandi masse continentali e gli oceani.

Se guardiamo bene la figura 14 vediamo che le aree a uguale riscaldamento (contraddistinte dallo stesso colore) hanno una certa «forma», ovvero descrivono un «motivo». In inglese questa forma-mo-

tivo è descritta da una parola ad ampio spettro, così ampio che risulta per lo più intraducibile in italiano: *pattern*. Il *pattern* descrive una caratteristica fondamentale di una forma riconoscibile all'occhio e che l'occhio cataloga come appartenente allo stesso gruppo di forme. In generale a questo gruppo di forme, con caratteristiche simili e ben identificabili, viene dato un nome che rappresenta tutta la «famiglia». Per cui esiste il gruppo «alberi», il gruppo «montagne», il gruppo «cavalli» e così via. Ogni gruppo è rappresentato da un esemplare tipo dello stesso, il «modello albero», il «modello montagna», il «modello cavallo» e così via. Questa catalogazione, basata su caratteristiche che accomunano le forme, può essere fatta in maniera sistematica istruendo algoritmi predisposti alla *pattern recognition*, ovvero il riconoscimento di forme (nello spazio) e/o sequenze (nel tempo), e anche ovviamente sequenze di forme. Ora, nel caso del riscaldamento globale, sappiamo che lo stesso livello di riscaldamento globale (per esempio 2 gradi) prodotto con scenari diversi (raggiunto cioè in momenti diversi nel tempo: molto presto per scenari con alte emissioni, molto tardi per scenari più sostenibili) produce gli stessi *pattern* di cambiamento globale per quanto riguarda le variazioni in temperatura e precipitazione. Per cui, possiamo fissare delle *soglie di riscaldamento globale* e, come spiegato nel secondo capitolo, possiamo verificare quali sono le caratteristiche spaziali corrispondenti a questa soglia di riscaldamento, ovvero verificare che «forma» ha, come è distribuito nelle varie regioni del pianeta.

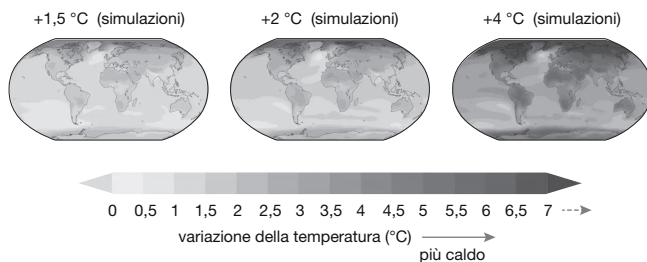


Figura 15. Variazioni della temperatura sul pianeta previste dai modelli a diversi livelli di riscaldamento. Immagine: adattata da IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*.

In altre parole, quando i *pattern* di cambiamento sono robusti, come nel caso di temperatura e precipitazione che presentano «forme» di una solidità davvero sorprendente, l'impatto del riscaldamento globale sulle singole regioni può essere valutato per tutti i livelli di riscaldamento globale, per tutti i periodi di tempo futuri e per tutti gli scenari.

Nella figura 15 possiamo vedere le caratteristiche spaziali delle variazioni in temperatura previste dai modelli climatici per soglie di riscaldamento globale rispettivamente di 1,5, 2 e 4 gradi. Vediamo che i *pattern* che descrivono le variazioni sono molto simili fra loro; quello che cambia in maniera drastica, a seconda della soglia di riscaldamento globale, è l'entità del cambiamento, ovvero l'ampiezza dell'anomalia di temperatura. Per esempio, in linea con quanto già accaduto fino a 1 grado di riscaldamento, si prevede che le alte latitudini dell'emisfero settentrionale si riscaldano più del resto del pianeta, da due a quattro volte il livello del riscaldamento globale. Un fenomeno, come

abbiamo visto, denominato amplificazione polare artica. Questa caratteristica è ben evidente nelle tre simulazioni, la principale differenza è che mentre per una soglia di 1,5 gradi l'Artico si riscalderà di circa 3 gradi, se il livello di soglia di riscaldamento globale è 4 gradi, allora l'Artico salirà di circa 8.

Il riscaldamento è più forte sulla terraferma che sull'oceano, e nell'emisfero settentrionale rispetto all'emisfero meridionale, con un riscaldamento minore sull'Atlantico settentrionale subpolare centrale e sul Pacifico più meridionale. Le differenze dipendono da diversi fattori, compreso il modo in cui le aree terrestri e oceaniche assorbono e trattengono il calore, e il fatto che l'area occupata dalle terre emerse è molto maggiore nell'emisfero settentrionale rispetto all'emisfero meridionale. Anche la circolazione oceanica gioca un ruolo, favorendo od ostacolando il riscaldamento in alcune regioni piuttosto che in altre. Nell'emisfero australe sono previsti *pattern* di riscaldamento relativamente elevato per il Sud America subtropicale, l'Africa meridionale e l'Australia. Anche in questo caso è evidente nei riquadri la grande somiglianza fra i *pattern* di variazione di temperatura nei tre diversi livelli di riscaldamento globale. Troviamo sempre le stesse «forme», ma i valori, ovvero l'entità dell'anomalia, aumentano con la soglia di riscaldamento considerata.

I cambiamenti delle precipitazioni (che abbiamo visto nella figura 10 nel secondo capitolo) sono anch'essi proporzionali al livello di riscaldamento globale, sebbene le incertezze siano maggiori rispetto

al cambiamento di temperatura. Alle alte latitudini, sia dell'emisfero australe sia di quello settentrionale, sono previsti aumenti delle precipitazioni mentre il pianeta continua a riscaldarsi, con cambiamenti più ampi previsti a livelli più elevati di riscaldamento globale. Lo stesso vale per i tropici e gran parte delle regioni monsoniche. Al contrario, si prevede un inaridimento generale nelle regioni subtropicali, in particolare nel Mediterraneo, nell'Africa meridionale e in parti dell'Australia, del Sud America e del Nord America sudoccidentale, nonché nell'Atlantico subtropicale e in parti dell'Oceano Indiano e del Pacifico subtropicale. Alcune di queste regioni, come l'Africa meridionale e il Mediterraneo, sono già secche e calde; quindi, il riscaldamento globale è destinato a rendere queste condizioni più estreme.

In sintesi: il cambiamento climatico non riguarderà tutte le parti del globo in modo uniforme. Piuttosto, è possibile identificare *pattern* caratteristici nel cambiamento di temperatura e precipitazioni che interesseranno le varie regioni del mondo. Sappiamo che l'entità di tali cambiamenti sarà tanto maggiore quanto più alto sarà il livello di soglia raggiunto.

Quando gli estremi si sommano

Negli ultimi decenni gli *estremi climatici* e *meteorologici* sono aumentati in intensità e frequenza. Questo segnale è chiaro e compreso nella letteratura scientifica. Come conseguenza del riscaldamento

to globale causato dall'attività umana le ondate di calore sono diventate più intense e più frequenti in quasi tutte le terre emerse dalla seconda metà del xx secolo. Alcuni estremi di temperatura che sono stati registrati di recente non si sarebbero verificati senza l'influenza antropica sul cambiamento climatico recente. Lo stesso vale per le ondate di calore marine e gli eventi precipitativi intensi: sono aumentati in intensità e frequenza, e questo cambiamento è dovuto all'influenza umana. Le proiezioni confermano questo andamento. In particolare, ogni mezzo grado di riscaldamento globale raggiunto aumenta l'intensità e la frequenza degli estremi di calore, così come degli eventi precipitativi intensi e degli eventi siccitosi. Pensiamo agli eventi estremi legati alla temperatura che si verificavano ogni 10 anni nel periodo 1850-1900: adesso la loro frequenza è aumentata di circa 2,8 volte. Significa che con un grado in più a livello globale, gli stessi eventi che accadevano una volta ogni 10 anni ora accadono quasi 3 volte ogni 10 anni. Se proiettiamo questi dati nel futuro, con un riscaldamento globale di 1,5 °C, 2 °C o 4 °C la frequenza di questi eventi sarà rispettivamente di 4,1, 5,6 o 9,4 volte. Ovvero, eventi che nel secolo scorso si verificavano una volta ogni dieci anni, ora ce li aspettiamo ogni tre anni e mezzo. Per ogni mezzo grado di aumento di temperatura la frequenza di accadimento aumenta, arrivando a ogni 2 anni con un aumento di temperatura globale di 2 °C; addirittura ogni anno con un aumento di temperatura di 4 °C.

Altri eventi estremi più rari, con frequenza di accadimento di 1 volta ogni 50 anni, adesso possono avere una frequenza di uno ogni 10 anni. In uno scenario estremo, con un aumento di temperatura globale di 2 °C o 4 °C possono arrivare alla frequenza di uno ogni 4 anni o 1 ogni anno e mezzo. In generale, le proiezioni indicano che aumenterà maggiormente la frequenza degli eventi considerati più rari. Questo riguarda anche gli eventi estremi legati alle precipitazioni, che possono essere o precipitativi intensi o siccitosi. In questo caso un evento che accadeva una volta ogni 10 anni, accade oggi 1,3 volte, e le proiezioni indicano un aumento di frequenza pari 1,5, 1,7 e 2,7 volte con una proiezione di aumento di temperatura globale di 1,5 °C, 2 °C e 4 °C. Ovvero, quegli eventi precipitativi intensi, che oggi accadono poco più di una volta ogni 10 anni, arriveranno a una frequenza di quasi 2 volte con 2 °C di riscaldamento globale e di quasi 3 volte con il doppio dell'aumento di temperatura globale. Per quanto riguarda gli eventi di tipo siccitoso, la frequenza aumenterà di più. Infatti, eventi di tipo siccitoso che adesso accadono quasi 2 volte ogni 10 anni arriveranno a una frequenza di oltre 2 volte ogni 10 anni con un aumento di temperatura di 2 °C, e di oltre 4 volte ogni 10 anni con un aumento di temperatura globale di 4 °C. Accanto all'aumento dell'intensità e della frequenza degli eventi estremi, dalla metà del xx secolo abbiamo anche un aumento di *eventi estremi composti*. Pensiamo per esempio alle ondate di calore che si combinano con eventi siccitosi, con-

dizioni meteorologiche particolarmente favorevoli allo svilupparsi di incendi (per esempio caldo, secco e ventoso), o mareggiate intense che si combinano con eventi precipitativi intensi o fiumi in piena. In questi eventi diversi fattori si combinano e aumentano il rischio ambientale. Ecco, in quasi tutte le regioni del globo la loro combinazione diventa più probabile con l'aumentare del livello di riscaldamento globale. Tra questi, le ondate di calore combinate con eventi siccitosi, o anche eventi estremi che avvengono nello stesso momento in località diverse, sono destinati a diventare più frequenti a un livello di riscaldamento globale di 2 °C rispetto a quanto accadrebbe con un livello di riscaldamento globale di 1,5 °C. Aumenteranno anche gli eventi estremi di calore che possono avere conseguenze importanti per l'agricoltura o la salute. Nelle aree costiere, la combinazione di mareggiate con gli eventi precipitativi intensi o fiumi in piena rendono le inondazioni più probabili.

In un mondo globalmente più caldo rispetto al presente di 1,5 °C, gli eventi precipitativi intensi con associate inondazioni saranno più intensi e frequenti soprattutto in Africa e Asia, nel Nord America e in Europa. Parallelamente gli eventi siccitosi, sia quelli associati a una diminuzione delle piogge sia quelli associati a un aumento dell'evaporazione dal suolo, saranno più frequenti nelle aree continentali. A 2 °C i risultati delle proiezioni climatiche sono più robusti, e predicono eventi precipitativi estremi associati a inondazioni più frequenti e intensi nelle piccole isole del Pacifico,

in buona parte del Nord America e in Europa. In diverse regioni dell'Africa, del Sud America e dell'Europa aumenteranno la frequenza e la gravità degli eventi siccitosi come conseguenza dell'aumento della temperatura e della diminuzione di acqua nel suolo.

Quei cambiamenti climatici che sono ormai irreversibili

Nei capitoli precedenti abbiamo descritto alcuni dei cambiamenti che osserviamo dall'analisi dei dati passati, e alcuni che si evincono dalle proiezioni climatiche future. Abbiamo parlato di cambiamenti di temperatura, di precipitazione, e degli estremi a essi associati, ma abbiamo parlato anche di cambiamenti nelle caratteristiche dell'oceano, o del livello medio del mare, e anche della copertura di ghiaccio (sia marino sia continentale). Vogliamo sottolineare che alcuni dei cambiamenti che sono stati osservati, o che sono evidenti dalle proiezioni climatiche del prossimo futuro, possono essere già considerati irreversibili per centinaia o anche migliaia di anni. Ovvero sono già iniziati dei cambiamenti con chiare conseguenze, che non possono cambiare in direzione, nemmeno se smettessimo all'istante di emettere anidride carbonica e altri gas serra in atmosfera.

L'aumento della temperatura globale nell'oceano, i processi di acidificazione nei suoi strati più

profondi, e anche la diminuzione di ossigeno¹⁰ che stiamo osservando ora continueranno per i prossimi secoli, se non per migliaia di anni a venire. Continueranno a tassi che dipendono da come riusciremo a contenere le emissioni di gas serra, ma continueranno anche se azzerassimo le emissioni oggi. Il primo motivo è legato all'inerzia termica degli oceani: servono tempi molto lunghi per gli aggiustamenti e gli equilibri in temperatura e salinità. Il secondo è legato a meccanismi di *feedback*, che in alcuni casi hanno già messo in moto eventi che vanno avanti indipendentemente dal fattore scatenante iniziale. Ci sono poi importanti effetti legati all'accumulo dei gas serra: le conseguenze sul riscaldamento globale che abbiamo oggi derivano dalle emissioni che si sono accumulate nel passato, come quello che accadrà nel futuro dipende da quanto già si è accumulato più quello che continuerà ad accumularsi, soprattutto per tutti i sistemi e i processi che hanno tempi di aggiustamento più lenti.

I processi che hanno portato alla diminuzione della copertura di ghiaccio continentale (per esempio in Groenlandia, ma anche in alcune aree dell'Antartide) avranno conseguenze per centinaia, se non migliaia di anni. In un futuro con livelli di riscaldamento globale di 2 o 3 °C, ci si

¹⁰ L'acidificazione è dovuta al fatto che gli oceani assorbono più anidride carbonica, questa partecipa a reazioni chimiche che liberano ioni idrogeno, facendo aumentare il pH; l'ossigeno disciolto tende a diminuire perché più l'acqua è calda e meno ne può assorbire.

aspetta che il ghiaccio continentale in Groenlandia e nella parte occidentale dell'Antartide sarà completamente perso, e non tornerà per migliaia di anni. La probabilità che la copertura di ghiaccio continentale sparisca in quelle regioni è, tanto per cambiare, tanto maggiore quanto maggiore è il livello di riscaldamento globale raggiunto. Con un riscaldamento globale superiore ai 3 °C non si perderà solo la copertura di ghiaccio continentale della parte occidentale, ma quella di tutto l'Antartide. Anche questa perdita, se avviene, sarà irreversibile per migliaia di anni a seguire. Per qualunque scenario considerato, le proiezioni indicano che il livello medio del mare continuerà a crescere. Ci sono incertezze sull'esatto valore di questo aumento perché ci sono incertezze sulle conseguenze e sui processi legati alla fusione dei ghiacciai continentali. Resta il fatto che il solo riscaldamento degli strati oceanici, inclusi quelli più profondi (che hanno dei tassi di riscaldamento molto lenti) portano a un progressivo e continuo aumento del livello medio del mare con cui dovremo fare i conti in tutte le aree costiere e nelle isole. Alcune delle stime di crescita per il futuro sono comprensibili e giustificate dalle conoscenze dei dati del passato, anche lontano. Per esempio, le informazioni sul Pliocene, milioni di anni fa, quando la temperatura media globale era dai 2 °C ai 4 °C più alta del periodo di riferimento. Le proiezioni per la metà del secolo indicano aumenti di livello medio del mare globale tra 0,18 e 0,23 m. Questi valori aumentano nell'intervallo 0,38-0,77 m se guardiamo

alle proiezioni fino alla fine del XXI secolo. Come abbiamo detto l'incertezza dipende dalla possibile distruzione della calotta di ghiaccio marina, dall'instabilità delle scogliere di ghiaccio marino intorno all'Antartide, o da cambiamenti più rapidi di quanto indicato nelle proiezioni climatiche del bilancio di massa superficiale e della dinamica di perdita di ghiaccio della Groenlandia. Se andiamo alle proiezioni oltre la fine del XXI secolo, il livello medio del mare globale continuerà a crescere per centinaia e migliaia di anni perché continuerà uno scambio di calore con gli strati più profondi dell'oceano, oltre che per la perdita di massa dei ghiacciai continentali, e il livello raggiunto rimarrà alto per migliaia di anni a seguire. A prescindere dai dettagli dei numeri con i quali dovremo confrontarci, le potenziali conseguenze e necessità di allerta e attenzione per tutte le aree costiere del pianeta, con livelli di rischio più o meno elevati, sono chiari. Gli impatti dei cambiamenti climatici possono avere conseguenze irreversibili per ecosistemi, biodiversità e la società in generale. Questi impatti portano gli esseri viventi oltre la loro capacità di adattarsi ai cambiamenti. Per gli ecosistemi alcune delle perdite sono già irreversibili, come l'estinzione di numerose specie. Altre si avvicinano a essere irreversibili, come le conseguenze dello scioglimento dei ghiacci continentali di cui abbiamo parlato prima: pensiamo agli ecosistemi e agli insediamenti umani in Artide e Antartide, o nelle aree montane.

E se accadesse all'improvviso?

Ci sono cambiamenti climatici oramai irreversibili dovuti a processi che si mettono in moto lentamente e che (allo stesso modo) si arrestano altrettanto lentamente. Con una tale lentezza che, considerando scale temporali paragonabili alla durata media della vita umana, possono considerarsi irreversibili. Ora ci si chiede se esistono cambiamenti climatici di questa natura (irreversibili o reversibili su scale di tempo lunghissime) che possono avvenire all'improvviso e molto velocemente. In altre parole, ci sono elementi nel sistema climatico che sono suscettibili a svolte improvvise, cambiamenti bruschi, punti critici, o punti di non ritorno?

In generale si definisce *punto critico* in un sistema dinamico lo stato in cui piccole sollecitazioni impresses al sistema danno luogo a variazioni molto grandi, repentine e in alcuni casi irreversibili, tanto da scatenare effetti a cascata. La presenza di punti critici significa che in tale sistema (anche molto complesso come, per esempio, il sistema climatico) esistono processi non lineari, ovvero processi in cui non c'è una semplice relazione proporzionale fra causa ed effetto. L'irreversibilità di tali punti critici significa che se la sollecitazione (la spinta) che ha scatenato la transizione del sistema attraverso il punto critico viene rimossa, il sistema non ritorna dove si trovava prima, ma resta dove è precipitato.

Nel caso del sistema climatico troviamo la definizione di *punto di svolta* (e di elementi soggetti a possibili punti di svolta) nel glossario dell'ulti-

mo rapporto dell'IPCC, intitolato *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*:

Si definisce cambiamento climatico improvviso (*abrupt climate change*) un cambiamento climatico su larga scala che si verifica nell'arco di pochi decenni (o in tempo inferiore) e persiste (o si prevede che persista) per almeno alcuni decenni provocando sostanziali impatti sulla società umana e/o l'ambiente naturale. Tale cambiamento è considerato irreversibile rispetto alla scala temporale in cui esso è avvenuto se il ripristino delle condizioni originali tramite l'azione di processi naturali richiede un tempo sostanzialmente più lungo del precedente. A questa definizione si aggiunge a corollario quella relativa ai punti di svolta (*tipping points*). Un punto di svolta è una soglia critica oltre la quale il sistema si riorganizza, spesso bruscamente e/o irreversibilmente. Mentre un elemento di svolta (*tipping element*) è una componente del Sistema Terra suscettibile a punti di svolta.

Nei precedenti rapporti IPCC, a partire dal terzo uscito circa venti anni fa nel 2001, era stato stimato il rischio di catastrofici punti di svolta climatici (quelli che provocano eventi a cascata) in funzione del livello di riscaldamento globale. Vent'anni fa si pensava che il rischio sarebbe stato molto grande al raggiungimento di una soglia critica intorno a cinque gradi di riscaldamento globale. Ma il successivo rapporto, uscito nel 2009, stimava la soglia di rischio intorno ai 3 gradi, e nel quinto rapporto del 2014 la stima scendeva a 2,5 gradi. Valutazioni più recenti suggeriscono tuttavia che un rischio non trascurabile di raggiungere punti di non ritorno esiste già, anche nell'intervallo che sta fra gli 1 e 2 gradi di riscaldamento. In altre parole,

potremmo trovarci già non troppo lontano da un precipizio. Ma dove sono nascosti i precipizi del sistema climatico? Quali, quanti e quanto sono vicini e pericolosi? Possiamo tenerli d'occhio?

Gli elementi del sistema climatico soggetti a punti di svolta (e perciò quelli da tenere sotto osservazione) non sono pochi. Fra questi possiamo contare il ghiaccio marino e quello terrestre, le calotte glaciali, i flussi oceanici, la AMOC, le foreste tropicali e il permafrost.

La *calotta glaciale della Groenlandia* contiene acqua a sufficienza per aumentare il livello del mare globale di alcuni metri e il suo scioglimento sta accelerando. La maggior parte dello scioglimento si verifica sulla superficie del ghiaccio a causa dell'aumento delle temperature, ma poiché l'altezza della calotta glaciale si riduce, la superficie è esposta all'aria più calda a quote inferiori, il che accelera ulteriormente lo scioglimento. Dal 1992 al 2018 la calotta ha perso quasi quattro trilioni di tonnellate di ghiaccio. Anche se non è probabile che la sua disintegrazione sia improvvisa, potrebbe arrivare un punto oltre il quale il suo eventuale collasso sarà irreversibile per millenni.

La *calotta glaciale dell'Antartide occidentale* è vulnerabile al collasso perché si trova su un substrato roccioso sotto il livello del mare, che è perciò influenzato dal riscaldamento dell'oceano. Uno studio del 2018 ha rilevato che questa calotta ha perduto quasi 58,5 miliardi di tonnellate all'anno tra il 1992 e il 1997 e ben 175 miliardi di tonnellate tra il 2012 e il 2017. Il ghiacciaio Thwaites sul Mare

di Amundsen dell'Antartide occidentale ha perso un trilione di tonnellate di ghiaccio dall'inizio degli anni 2000: è possibile che sia destinato a un collasso irreversibile, che potrebbe minacciare gran parte della calotta antartica occidentale e aumentare il livello del mare globale di mezzo metro o più. Se si arriverà a 3 gradi di riscaldamento globale si prevede un'accelerazione fortissima nella perdita di ghiaccio antartico, ma non è escluso che il punto di svolta per lo scioglimento dell'intera calotta occidentale possa essere raggiunto con soglie inferiori di riscaldamento globale.

La AMOC, come abbiamo visto nel capitolo precedente, è una delle principali correnti oceaniche globali e ha un ruolo fondamentale per la regolazione del clima. L'acqua salata fredda, che è densa e pesante, affonda in profondità nell'oceano in corrispondenza del Nord Atlantico e si sposta lungo il fondo fino a salire in superficie di nuovo vicino all'equatore, di solito nel Pacifico e nell'Oceano Indiano. Il calore del Sole riscalda l'acqua e con l'evaporazione diventa più salata. L'acqua calda e salata risale la costa attraverso la corrente del Golfo, riscaldando la costa orientale degli Stati Uniti e l'Europa occidentale. Una volta che l'acqua rilascia il suo calore e raggiunge il Nord Atlantico, diventa di nuovo fredda e densa e il ciclo continua. Ma quando i ghiacciai e le calotte glaciali si sciolgono, aggiungono acqua dolce e meno densa al Nord Atlantico, e ciò impedisce all'acqua di affondare e ne inibisce la circolazione. I modelli climatici prevedono che il continuo riscaldamento globale porterà

a un indebolimento della AMOC dal 25 al 45% entro il 2100. Se la AMOC si spegnesse, causerebbe un raffreddamento significativo lungo la costa orientale degli Stati Uniti e dell'Europa occidentale. Ciò, a sua volta, altererebbe i *pattern* di precipitazione e aumenterebbe il livello del mare: potrebbe anche potenzialmente innescare altri punti di non ritorno. E il fenomeno risulterebbe quasi irreversibile, ovvero ci vorrebbero centinaia di anni per un pieno recupero della circolazione. Sebbene ci siano ancora molte incertezze, alcuni studi suggeriscono che il punto di non ritorno della AMOC potrebbe essere raggiunto tra 3 °C e 5,5 °C di riscaldamento.

La *foresta pluviale amazzonica*, ovvero la foresta pluviale tropicale più grande del mondo, immagazzina circa 200 miliardi di tonnellate di carbonio, pari a circa cinque anni di emissioni globali di carbonio dovute alla combustione di combustibili fossili, e ospita milioni di specie di piante e fauna selvatica. L'umidità delle piogge dell'Amazzonia ritorna nell'atmosfera dal suolo attraverso l'evaporazione e dalle piante attraverso la traspirazione. Questo processo autosufficiente contribuisce alla formazione di nuvole e pioggia. A causa del disboscamento, dell'allevamento, dell'estrazione mineraria, dell'agricoltura e degli incendi, l'Amazzonia ha perso circa il 17% della sua copertura arborea e, all'attuale tasso di deforestazione, potrebbe raggiungere una perdita del 27% entro il 2030. Se una percentuale consistente (secondo alcuni studi basterebbe il 25%) della foresta amazzonica venisse eliminata si arriverebbe a superare il punto di

svolta. Meno alberi significherebbero meno evapotraspirazione e, senza precipitazioni sufficienti per sostenersi, l'Amazzonia potrebbe iniziare a morire. In altre parole, parti della foresta pluviale potrebbero trasformarsi in una savana, un ecosistema più secco caratterizzato da praterie e pochi alberi. Nel processo verrebbero rilasciate in atmosfera decine e decine di gigatonnellate di CO₂ che contribuirebbero ulteriormente al riscaldamento globale. Il superamento di questo punto critico comporterebbe anche la perdita della biodiversità e minaccerebbe la vita di 30 milioni di persone, molte delle quali indigene, che dipendono dalla foresta pluviale per sopravvivere. Vi è molta incertezza a proposito del *tipping point* dell'Amazzonia: potrebbe essere uno o potrebbero essere molteplici. Sappiamo che l'ecosistema ha una notevole capacità di adattamento, ma incendi e siccità potrebbero causare cambiamenti locali capaci di diffondere le condizioni di essiccazione ad altre regioni a causa di una riduzione complessiva dell'umidità. Il 28% della parte orientale dell'Amazzonia sta già perdendo più carbonio di quanta ne stia assorbendo a causa della deforestazione.

Il *permafrost* è un terreno che rimane congelato per due o più anni consecutivi, composto da roccia, suolo, sedimenti e ghiaccio. Parte del permafrost è rimasto congelato per decine o centinaia di migliaia di anni. Si trova nelle terre dell'emisfero settentrionale senza ghiacciai: parti della Siberia, dell'Alaska, del Canada settentrionale e del Tibet. Nell'emisfero australe, c'è permafrost in alcune parti della

Patagonia, dell'Antartide e delle Alpi meridionali della Nuova Zelanda. Si pensa che 1400 miliardi di tonnellate di carbonio siano congelate nel permafrost dell'Artico. A causa dell'amplificazione polare artica questa regione si sta riscaldando a una velocità doppia rispetto alla media del pianeta: è già più calda di 2 °C rispetto al periodo 1850-1900. E quando il permafrost si riscalda e si scongela, i microrganismi escono dal letargo e scompongono il carbonio organico nel suolo, rilasciando CO₂ e metano, e quindi contribuendo a un ulteriore riscaldamento del pianeta e a un ulteriore scioglimento di altro permafrost. Lo scongelamento del carbonio del permafrost è già stato osservato nell'Artico e i modelli climatici prevedono che gran parte del permafrost poco profondo (sotto i 3 m di profondità) in tutto l'Artico si scioglierebbe con un riscaldamento globale da moderato a elevato (2-4 °C). Sebbene i processi che regolano la formazione e la fusione del permafrost siano complessi, ora sono inclusi nei modelli di ultima generazione che rappresentano le interazioni tra il clima e il ciclo del carbonio. Le proiezioni di questi modelli stimano che lo scioglimento del permafrost sia equivalente a 14-175 miliardi di tonnellate di biossido di carbonio rilasciate per 1 °C di riscaldamento globale. È tanto, è poco? Per darvi un'idea, nel 2019 le attività umane hanno rilasciato nell'atmosfera circa 40 miliardi di tonnellate di anidride carbonica. Quando si stima la quantità totale di emissioni a noi consentite per stabilizzare il clima a un dato livello di riscaldamento globale, ovvero il bilancio del carbonio residuo,

sembra che il riscaldamento «extra» causato dallo scongelamento del permafrost sia abbastanza forte da dover essere considerato. Tuttavia, i modelli non identificano alcuna quantità di riscaldamento in cui il disgelo del permafrost possa rappresentare un «punto di non ritorno» o una soglia nel sistema climatico che porterebbe a un riscaldamento globale incontrollato.

Quando la probabilità è bassa, ma il rischio è alto...

I precedenti rapporti dell'IPCC hanno cercato soprattutto di definire sviluppi del clima futuro caratterizzati, per ogni scenario considerato, da un'alta probabilità di accadimento sia per quanto riguarda il riscaldamento della superficie terrestre sia per il cambiamento climatico a questo associato. Tuttavia, per valutare completamente i rischi legati al cambiamento climatico bisogna considerare anche cambiamenti improbabili (o addirittura molto improbabili) che però producono variazioni molto grandi nel sistema climatico e sono associati a rischi elevati per la società e gli ecosistemi. Per esempio, grandi variazioni di temperatura, precipitazione, innalzamento del livello dei mari, scioglimento dei ghiacciai e delle calotte. L'ultimo rapporto ha provato perciò a considerare anche quelle «narrazioni» legate, a parità di scenario, a proiezioni climatiche che prevedono un riscaldamento molto maggiore di quello della media dei modelli. Lo scopo è quello di «esplorare lo spa-

zio del rischio futuro» anche al di fuori di quello che è considerato l'intervallo più probabile. In altre parole, ci si è chiesti: è giusto non considerare affatto proiezioni climatiche con probabilità molto bassa, se il loro impatto, nel caso improbabile (ma possibile) che si verificassero, sarebbe devastante? Sappiamo bene che se la probabilità è piccola, ma se il danno conseguente è enorme, allora il rischio, che può essere definito in termini proporzionali al prodotto fra probabilità e danno, diventa elevato. Nel caso delle proiezioni climatiche, se il danno fosse talmente enorme da implicare (per esempio) la scomparsa di intere aree abitabili del pianeta, allora anche narrazioni con una probabilità minima (ma diversa da zero) devono essere considerate e presentate all'attenzione della società.

In questo contesto si è visto che i modelli climatici che prevedono (a parità di scenario) un riscaldamento al di fuori del limite superiore dell'intervallo ritenuto più probabile mostrano variazioni di temperatura e precipitazione che differiscono sostanzialmente dalla media di tutti i modelli. In particolare, se si considerano gli scenari con alto contenuto di CO₂, questi modelli ad alta sensibilità climatica mostrano un riscaldamento diffuso di oltre 6 °C sulla maggior parte delle regioni terrestri extratropicali e parti dell'Amazzonia. Nell'Artico, le temperature medie annuali aumentano di oltre 10 °C rispetto a quelle attuali, corrispondenti a circa il 30% in più rispetto alla migliore stima del riscaldamento. Ma anche per scenari con un contenuto di CO₂ «calmierato» i modelli con narrazio-

ni estreme mostrano in media un riscaldamento di 2-3 °C rispetto alle condizioni odierne in gran parte dell'Eurasia e del Nord America (circa il 40% in più rispetto alla migliore stima del riscaldamento) e più di 4 °C di riscaldamento rispetto al presente nella regione artica nell'ultimo ventennio del XXI secolo. Per quanto riguarda la precipitazione, i modelli mostrano anomalie molto più intense e vaste in estensione geografica (sia positive sia negative). In altre parole, le narrazioni climatiche estreme mostrano un segnale grossomodo consistente con quello della media dei modelli, ma molto amplificato. E descrivono, anche nel caso di scenari a moderato contenuto di CO₂, una Terra con grandi porzioni di aree continentali difficilmente abitabili, con un grande aumento in frequenza e intensità di eventi estremi e un'espansione delle regioni aride e semi-aride.

Ma questa canicola sarà colpa del cambiamento climatico?

Ogni volta che si verifica un evento estremo, che sia una tempesta eccezionale o un'ondata di calore, agli esperti viene fatta sempre la stessa domanda: questo specifico evento è causato dal cambiamento climatico? Di solito rispondono che il quesito è, per così dire, mal posto. Quando si verificano eventi meteorologici e climatici estremi, sia l'esposizione sia la vulnerabilità svolgono un ruolo importante nel determinare l'entità e gli impatti del

disastro risultante. In quanto tale, è difficile attribuire un disastro specifico direttamente al cambiamento climatico. Tuttavia, la scienza relativamente nuova dell'*attribuzione degli eventi* consente agli scienziati di assegnare aspetti di specifici eventi meteorologici e climatici estremi a determinate cause. Gli scienziati non possono affermare direttamente se un particolare evento è stato causato dal cambiamento climatico, poiché gli estremi si verificano naturalmente e qualsiasi evento meteorologico e climatico specifico è il risultato di un complesso mix di fattori umani e naturali. Però è possibile quantificare l'importanza relativa delle influenze umane e naturali sull'entità e sulla probabilità di specifici eventi meteorologici estremi. Tali informazioni sono importanti per pianificare la riduzione del rischio, poiché una migliore conoscenza delle variazioni nella probabilità e nell'entità di eventi estremi rilevanti consente una migliore quantificazione dei rischi di incorrere in eventi catastrofici. Ciò viene fatto stimando e confrontando la probabilità o l'entità dello stesso tipo di evento tra il clima attuale e un mondo che rappresenta un periodo ipotetico dell'impossibilità, ovvero quello in cui i gas serra atmosferici sono rimasti ai livelli del periodo 1850-1900.

La figura 16 alla pagina seguente illustra questo approccio e ci mostra che la probabilità di incorrere in temperature estreme differisce tra un clima con gas serra relativi al periodo di riferimento 1850-1900 (curva tratteggiata) e il clima attuale (curva piena) per una regione rappresentativa.

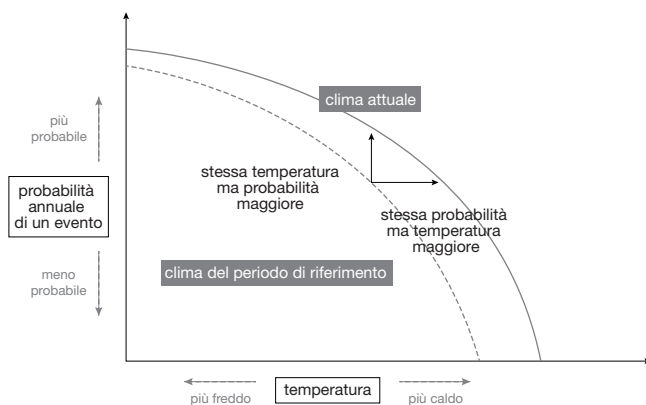


Figura 16. Frequenza a intensità di un evento estremo oggi rispetto al periodo di riferimento.

L'asse orizzontale riporta l'intervallo di temperature estreme, mentre l'asse verticale mostra la probabilità annuale che si verifichi l'evento a una certa temperatura. Spostandosi verso destra stiamo andando verso estremi sempre più caldi, che sono più rari (meno probabili). Per questo motivo entrambe le probabilità diminuiscono spostandosi in questa direzione. Se ora ci fissiamo a una certa temperatura possiamo valutare la probabilità che quell'evento estremo si verifichi nei due casi. Vediamo che un evento estremo con una certa temperatura è diventato più probabile nel clima attuale rispetto a quello del periodo di riferimento (come mostrato dalla freccia verticale). D'altronde un evento che sarebbe avvenuto con una certa probabilità nel clima del XIX secolo, ha la stessa probabilità di accadere nel clima attuale solo se... è diventato più estremo! Ovvero più caldo: lo vediamo seguendo

la freccia tratteggiata in orizzontale. In altre parole, gli eventi estremi sono diventati meno estremi (cioè avvengono più spesso).

Le simulazioni dei modelli climatici sono spesso utilizzate per stimare la probabilità di un evento specifico in climi corrispondenti a scenari diversi. La variazione dell'entità e della probabilità dell'evento estremo in un clima (per esempio quello attuale) rispetto a un altro (per esempio il clima di riferimento) è attribuita in base alla differenza tra le caratteristiche dei due scenari. In questo caso la differenza corrisponde agli effetti delle attività umane. Aumenti di probabilità e magnitudine «attribuibili» sono stati identificati in modo coerente per molti estremi caldi. Sono stati riscontrati aumenti attribuibili all'influenza umana anche per alcuni eventi di precipitazioni estreme, inclusi gli uragani, ma questi risultati sono diversi a seconda delle tipologie di eventi. In altri casi, grandi variazioni naturali nel sistema climatico impediscono di attribuire all'influenza umana cambiamenti nella probabilità o nell'entità di uno specifico estremo. Inoltre, l'attribuzione di determinate classi di condizioni meteorologiche estreme (come il numero e l'intensità dei tornado) va oltre le capacità di modellizzazione attuale e la comprensione teorica. Cambiamenti attribuibili possono emergere per altri tipi di estremi all'aumentare del segnale di riscaldamento.

In conclusione, il riscaldamento globale causato dall'attività umana ha provocato cambiamenti in un'ampia varietà di recenti eventi meteorologici

estremi. Forti aumenti di probabilità e magnitudo, attribuibili all'influenza umana, sono stati riscontrati per molte ondate di caldo e temperature estreme in tutto il mondo.