

ROBERTO BUIZZA
SCUOLA UNIVERSITARIA SUPERIORE SANT'ANNA, PISA

Il cambiamento climatico accelera: per limitarlo, dobbiamo decarbonizzare drasticamente e rapidamente

Climate change accelerates: to control it, we must decarbonize drastically and quickly

Abstract. Il continuo utilizzo dei combustibili fossili e lo sfruttamento della terra continuano a causare un accumulo di gas serra in atmosfera, ed una conseguente accelerazione del riscaldamento globale. Riscaldamento che causa lo scioglimento dei ghiacci e l'innalzamento del livello dei mari, ed un aumento della frequenza e dell'intensità di fenomeni meteorologici estremi. Eventi responsabili di danni sempre più sostanziali agli ecosistemi e alle comunità, che colpiscono maggiormente i Paesi che hanno limitate risorse per adattarsi al clima che cambia e per fronteggiare gli eventi estremi, e che, tra l'altro, quasi sempre hanno contributo meno all'accumulo dei gas serra in atmosfera. Accumulo di gas serra di cui sono responsabili i Paesi che più si sono arricchiti grazie all'utilizzo di combustibili fossili per la produzione di energia, e allo sfruttamento della terra, come dimostra i legami tra consumo di energia ed accumulo di capitale: gli Stati Uniti d'America ed i Paesi dell'Europa. In questo capitolo analizzeremo alcuni aspetti fondamentali del cambiamento climatico antropico, con l'obiettivo di fornire una visione oggettiva su quello che sta accadendo, basata sulle osservazioni aggiornate e sullo stato della conoscenza. Discuteremo della continua crescita delle emissioni di gas serra, e del contributo alle emissioni accumulate dal 1850 ad oggi dai diversi Paesi. Analizzeremo quindi lo stato del clima della terra, e se sia possibile contenere il riscaldamento futuro al di sotto dei 2.0°C, una degli obiettivi dell'Accordo di Parigi del 2015. Discuteremo quindi di due obiettivi di riduzione delle emissioni di gas serra, e di quale percentuale si dovrebbero ridurre le emissioni per raggiungerli. Parleremo quindi della riduzione delle emissioni di gas serra in diversi settori, in particolare nella produzione di energia, e della necessità di investimenti annuali del 2-3% del Prodotto Interno Lordo per raggiungere zero emissioni nette entro il 2050. Non esiste un livello accettabile di riscaldamento globale: più sale, e maggiori saranno i danni a ecosistemi e comunità. Per limitare il riscaldamento e quindi questi danni, dobbiamo ridurre le emissioni di gas serra drasticamente e rapidamente.

Abstract. The continuous use of fossil fuels and land exploitation continue to cause an accumulation of greenhouse gases in the atmosphere, and a consequent acceleration of global warming. Warming that causes ice to melt and sea level to rise, and an increase in the frequency and intensity of extreme weather events. Events responsible for the rising damages to ecosystems and communities, which affect more the countries that have limited resources to adapt to the changing climate and to cope with extreme events, and which, among other things, have almost always contributed less to the accumulation of greenhouse gases in the atmosphere. Accumulation of greenhouse gases for which the countries that have become wealthier thanks to the use of fossil fuels for energy production and land exploitation, are responsible, as demonstrated by the links between energy consumption and capital accumulation: the United States of America and the countries of Europe. In this chapter we will analyse some fundamental aspects of anthropogenic climate change, with the aim of providing an objective view of what is happening, based on updated observations

Il cambiamento climatico accelera: per limitarlo, dobbiamo decarbonizzare drasticamente e rapidamente

and the state of knowledge. We will discuss the continuous growth of greenhouse gas emissions, and the contribution to the accumulated emissions from 1850 to today by different countries. We will then analyse the state of the earth's climate, and whether it is possible to limit future warming to below 2.0°C, one of the goals of the 2015 Paris Agreement. We will then discuss two greenhouse gas emission reduction targets, and what percentage emissions should be reduced to achieve them. We will then talk about the reduction of greenhouse gas emissions in different sectors, particularly in energy production, and the need for annual investments of 2-3% of Gross Domestic Product to achieve net zero emissions by 2050. There is no acceptable level of global warming: the higher it gets, the greater the damage to ecosystems and communities. To limit warming and therefore this damage, we need to reduce greenhouse gas emissions drastically and quickly.

Keywords: Cambiamento climatico; Emissioni di gas serra; CO₂; Responsabilità; Mitigazione del cambiamento climatico.

Keywords: Climate change; Greenhouse gas emissions; CO₂; Responsibility; Climate change mitigation.

1. *Origine antropica del cambiamento climatico in atto.*

Dall'inizio dell'era industriale (diciamo dal 1850) l'uomo sta cambiando il clima della Terra sostanzialmente in tempi estremamente rapidi. Le cause principali di questo cambiamento antropico sono l'utilizzo dei combustibili fossili (carbone, olio combustibile e gas metano) per generare energia, l'industria, il trasporto e il riscaldamento e/o raffreddamento delle case, e lo sfruttamento della terra (agricoltura ed allevamenti).

Il continuo utilizzo dei combustibili fossili e lo sfruttamento della terra continuano a causare l'aumento delle emissioni di gas serra ed il loro accumulo in atmosfera. Accumulo che causa il cambiamento climatico, evidente dal continuo aumento della temperatura media globale del pianeta, che a sua volta causa lo scioglimento dei ghiacci e l'innalzamento del livello dei mari. Riscaldamento che causa anche un aumento della frequenza e dell'intensità di fenomeni meteorologici estremi: precipitazioni intense, ondate di calore e siccità, tempeste di vento. Eventi responsabili di danni sempre più sostanziali agli ecosistemi e alle comunità, morti e danni alle infrastrutture, ed una riduzione della biodiversità. Danni che colpiscono maggiormente i Paesi che hanno limitate risorse per adattarsi al clima che cambia e per fronteggiare gli eventi estremi, e

che, tra l'altro, quasi sempre hanno contributo meno all'accumulo dei gas serra in atmosfera. Accumulo di gas serra di cui sono responsabili i Paesi che più si sono arricchiti grazie all'utilizzo di combustibili fossili per la produzione di energia, e allo sfruttamento della terra, come dimostra i legami tra consumo di energia ed accumulo di capitale: gli Stati Uniti d'America ed i Paesi dell'Europa.

L'affermazione che l'uomo è la causa principale del cambiamento climatico in atto è basata sul confronto dell'evoluzione del clima negli ultimi cent'anni e nel passato più lontano¹.

Se consideriamo gli ultimi 800.000 anni fino al 1850, le oscillazioni naturali della concentrazione della CO₂ e della temperatura sono legate al susseguirsi di 8 periodi più freddi, legati alle glaciazioni, ed 8 periodi più caldi, inter-glaciali: oscillazioni causate da leggere modifiche dell'orbita terrestre che hanno influenzato l'insolazione estiva ad alte latitudini. Modifiche legate a tre tipi di variazioni: variazioni dell'eccentricità dell'orbita con un ciclo di 100.000 anni, variazioni dell'inclinazione dell'asse di rotazione terrestre con un ciclo di 41.000 anni, e precessioni del perielio, il giorno in cui la Terra è più vicina al sole, che progredisce di circa 1,7 giorni ogni 100 anni. In termini di concentrazione di CO₂, dobbiamo andare indietro nel tempo fino a 2,5 milioni di anni fa' per trovare valori simili a quelli degli ultimi 7 anni, superiori a 400 parti per milione (ppm). Gli ultimi rapporti dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), ed in particolare i Summaries for Policy Makers (SPC) associati ad ogni rapporto, forniscono un ottimo aggiornamento sullo stato del clima, impatti ed adattamento². Per un aggiornamento sullo

¹ T.R. ANDERSON, E. HAWKINS, P.D. JONES, *CO₂, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models*, in «Endeavour», 40 (3), 2016, pp. 178-187 (doi: <https://doi.org/10.1016/j.endeavour.2016.07.002>).

² IPCC, *Summary for Policymakers. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2021, Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> (Accessed in November 2024); ; IPCC, *Climate Change. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2022, Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/> (Accessed in November 2024); IPCC, *Climate Change. Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2022, Cambridge University Press, Cambridge <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/> (Accessed in November 2024).

Il cambiamento climatico accelera: per limitarlo, dobbiamo decarbonizzare drasticamente e rapidamente

stato del clima in Europa, si suggerisce di consultare gli “European State of the Climate” che vengono pubblicati ogni anno da Copernicus Climate Change Service (vedi, ad esempio, C3S 2023 per l’ultimo aggiornamento).

Negli ultimi 800,000 anni e prima del 1850, la concentrazione di CO₂ ha oscillato sostanzialmente tra 200 e 300 ppm, con variazioni dell’ordine di 100 ppm su tempi molto lunghi, di migliaia o decine di migliaia di anni, mentre le variazioni più recenti sono accadute su tempi estremamente più rapidi, di decine di anni. Ad esempio, da circa il 1960 ad oggi abbiamo assistito ad un aumento della concentrazione di CO₂ di circa 100 ppm; una variazione estremamente veloce, accaduta in soli 65 anni. In termini di anomalia della temperatura media globale, dobbiamo andare indietro nel tempo fino a 2,5 milioni di anni fa’ per trovare valori simili a quelli degli ultimi anni, e dobbiamo andare indietro nel tempo fino alle ere glaciali che si sono succedute tra 800.000 e 15.000 anni fa’ per trovare variazioni di temperatura media globale dell’ordine di quelle che abbiamo osservato dal 1850 ad oggi, di circa 1,5°C. Ma le ricostruzioni del clima passato indicano che le variazioni del passato lontano sono accadute su tempi molto lunghi, di migliaia di anni, mentre dal 1850 ad oggi abbiamo assistito ad un riscaldamento medio globale di circa 1,5 °C, una variazione estremamente più veloce.

Dal confronto delle variazioni naturali della concentrazione di CO₂ e della temperatura del passato si nota che queste due variabili variano in quasi-sincronia. Se consideriamo gli ultimi 800.000 anni, durante i periodi glaciali le concentrazioni di gas serra sono basse, mentre nei periodi interglaciali le concentrazioni sono più elevate. Vi sono indicazioni di uno sfasamento temporale tra le fluttuazioni delle concentrazioni di CO₂ atmosferica e le fluttuazioni del volume di ghiaccio immagazzinato nelle calotte glaciali continentali, con variazioni del volume di ghiaccio (e quindi la temperatura) che anticipano variazioni della concentrazione della CO₂, che ci porta a concludere che le variazioni di CO₂ siano state causate alle variazioni della dimensione delle calotte glaciali. Le fluttuazioni di CO₂ andrebbero a rinforzare le variazioni di temperatura: più la temperatura media globale si raffredda e più ghiaccio si forma, più la CO₂ diminuisce, e dato che questo riduce l’effetto serra dell’atmosfera, più la temperatura diminuisce.

Sempre sulla relazione tra le variazioni naturali della concentrazione della CO₂ e della temperatura, il 4° rapporto di IPCC³ riporta che è molto probabilmente legato ad una serie di meccanismi che hanno agito di concerto: processi nell'atmosfera, nell'oceano, nei sedimenti marini e sulla terraferma, e la dinamica del ghiaccio marino e delle calotte glaciali deve essere considerato.

In generale, queste variazioni naturali mostrano che le temperature globali e le concentrazioni di gas serra siano accoppiate ed agiscano in modo da rinforzare il loro impatto. Ad esempio, al termine di un periodo glaciale, un piccolo aumento della temperatura causato dall'aumento della quantità di energia solare che arriva sulla superficie terrestre (dato che lo scioglimento dei ghiacci riduce l'albedo, e quindi riduce la quantità di energia solare riflessa verso lo spazio) porta a un aumento delle concentrazioni di gas serra a causa di un maggiore rilascio di gas dagli oceani e dai continenti. L'aumento della concentrazione di gas serra, a sua volta, porta a un aumento della temperatura, che rinforza il riscaldamento. In sostanza i due processi si rafforzano a vicenda. Si ritiene che processi di rinforzo simili ma con segno opposto siano attivi durante l'inizio delle glaciazioni.

Ma diverso è quello che stiamo osservando dal 1850 ad oggi. Le variazioni legate alle azioni della specie umane sono la causa dell'aumento della concentrazione di gas serra in atmosfera, che hanno portato al cambiamento climatico antropico in atto.

Nelle prossime sezioni, analizzeremo alcuni aspetti fondamentali del cambiamento climatico antropico, con l'obiettivo di fornire una visione aggiornata al tempo in cui scrivo questo capitolo (dicembre 2024) su quello che sta accadendo. Discuteremo della continua crescita delle emissioni di gas serra, e del contributo alle emissioni accumulate dal 1850 ad oggi dai diversi Paesi. Analizzeremo quindi lo stato del clima della terra, e se sia possibile contenere il riscaldamento futuro al di sotto dei 2.0°C, una degli obiettivi dell'Accordo di Parigi del 2015. Discuteremo quindi di due obiettivi di riduzione delle

³ IPCC. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, 2007, Geneva, Switzerland, 104 pp. Available from the IPCC (https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf) (Accessed in November 2024).

Il cambiamento climatico accelera: per limitarlo, dobbiamo decarbonizzare drasticamente e rapidamente

emissioni di gas serra, e di quale percentuale si dovrebbero ridurre le emissioni per raggiungerli. Parleremo quindi della riduzione delle emissioni di gas serra in diversi settori, in particolare nella produzione di energia, e della necessità di investimenti annuali del 2-3% del Prodotto Interno Lordo per raggiungere zero emissioni nette entro il 2050.

2. La crescita delle emissioni di gas serra (CO_2 e CH_4) dal 1850

I due principali gas serra emessi dai processi di combustione sono l'anidride carbonica (CO_2) ed il metano (CH_4). Le emissioni di gas serra vengono espresse in termini di massa di CO_2 , quantità calcolata traducendo l'impatto degli altri gas serra in termini dell'impatto di quantità ‘equivalenti’ di CO_2 . Dato che il metano causa un effetto serra maggiore della CO_2 , tenendo conto nella conversione anche il diverso tempo di residenza in atmosfera dei due gas, 1 kg di CH_4 viene tradotto in 28 kg di CO_2 .

Come conseguenza del continuo aumento delle emissioni di gas serra (Fig. 1), l'accumulo di CO_2 e di CH_4 in atmosfera continua a crescere (Fig. 2). Se consideriamo gli ultimi 62 anni, nel 1960 le emissioni di gas serra erano circa 22 Gt CO_2 -eq, nel 1990 circa 37 Gt CO_2 -eq e nel 2024 circa 54 Gt CO_2 -eq. A causa delle continue emissioni, la concentrazione di CO_2 in atmosfera è passata da circa 320 ppm nel 1962, a 345 ppm nel 1990 e 425 ppm nel 2024. Per il metano, nel 1990 la concentrazione in atmosfera era circa 1.715 ppb (parti per miliardo), e nel 2022 ha raggiunto circa 1.912 ppb (asse verticale di destra), con una crescita relativa nel periodo 1985-2021 maggiore di quella della CO_2 . Se sommiamo le emissioni globali annuali di gas serra, troviamo che tra il 1850 ed il 2022 sono state immesse in atmosfera circa 3.450 Gt CO_2 -eq. Metà di queste emissioni sono state emesse nei primi 124 anni, tra il 1850 ed il 1983, e l'altra metà nei successivi 38 anni, tra il 1984 ed il 2022, a conferma dell'accelerazione nelle emissioni globali.

Esiste una relazione lineare tra le immissioni di gas serra in atmosfera e la concentrazione di CO_2 osservata, che indica che ad ogni ulteriore immissione in atmosfera di 100 Gt CO_2 -eq di gas serra corrisponde un aumento della concentrazione di CO_2 di circa 4,2 ppm. Tale relazione può essere utilizzata come un semplice modello predittivo per la futura concentrazione di CO_2 in atmosfera. Se teniamo conto che la

concentrazione di CO₂ nel giugno 2024 è stata di circa 425 ppm, e se assumiamo che tra il 2022 ed oggi le emissioni annuali di gas serra siano continue ad essere circa 54 Gt CO₂-eq, entro il 2060 avremo superato un valore di concentrazione di gas serra in atmosfera di 500 ppm, dato che in 36 anni avremo immesso in atmosfera altri 1.944 Gt CO₂-eq di gas serra (36 x 54), e che questi indurranno un aumento della concentrazione di CO₂ di circa 82 ppm (1.944 x 4,2 / 100). Tale stima assume che le foreste e gli oceani continueranno ad assorbire la stessa percentuale di gas serra, e non diminuiranno questa loro capacità di controllo fondamentale a causa del cambiamento climatico stesso.

È interessante sottolineare che la riduzione delle emissioni globali di gas serra del 3.7% nel 2020 legata all'impatto della pandemia Covid ha portato ad una riduzione della concentrazione di CO₂ in atmosfera nel 2022 di circa 1,8 Gt CO₂-eq. Tale riduzione è quindi stata compensata da una crescita nel 2021 del 3,8%, che ha portato il valore delle emissioni globali nel 2021 a quasi lo stesso valore del 2019 (54.6 Gt CO₂-eq). Nel 2022, rispetto al 2021 le emissioni globali sono salite del 0.8%. La Fig. 2 mostra che tali variazioni non hanno avuto impatti sostanziali sulla concentrazione di CO₂ o di CH₄ in atmosfera.

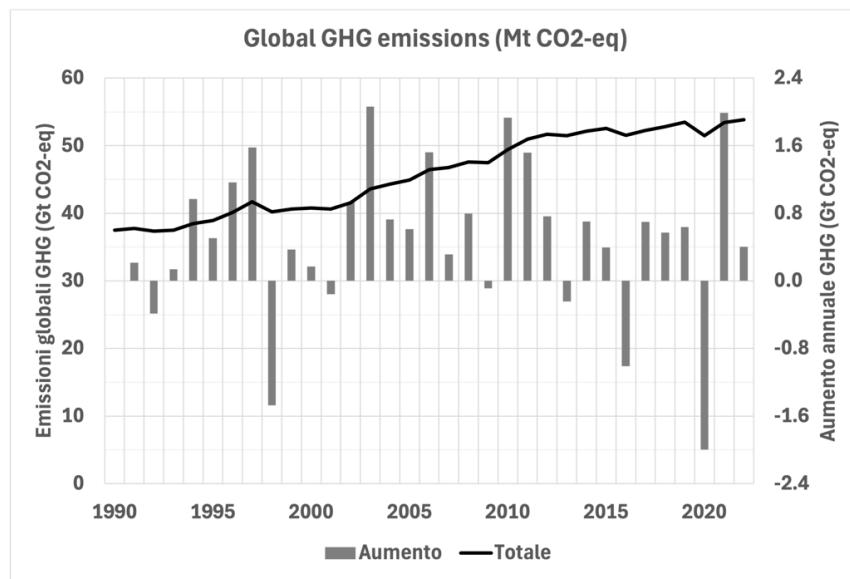


Figura 1. Emissioni globali di gas serra, espresse in giga-tonnellate di CO₂-equivalente (1 giga-tonnellata sono 10⁹ tonnellate) tra il 1990 ed il 2022 (linea continua, riferite all'asse verticale di sinistra), ed aumento annuale delle emissioni (barre grigie, riferite all'asse verticale di destra. (Dati da Our World in Data, aggiornati nel giugno 2024; <https://ourworldindata.org/>.)

Il cambiamento climatico accelera: per limitarlo, dobbiamo decarbonizzare drasticamente e rapidamente

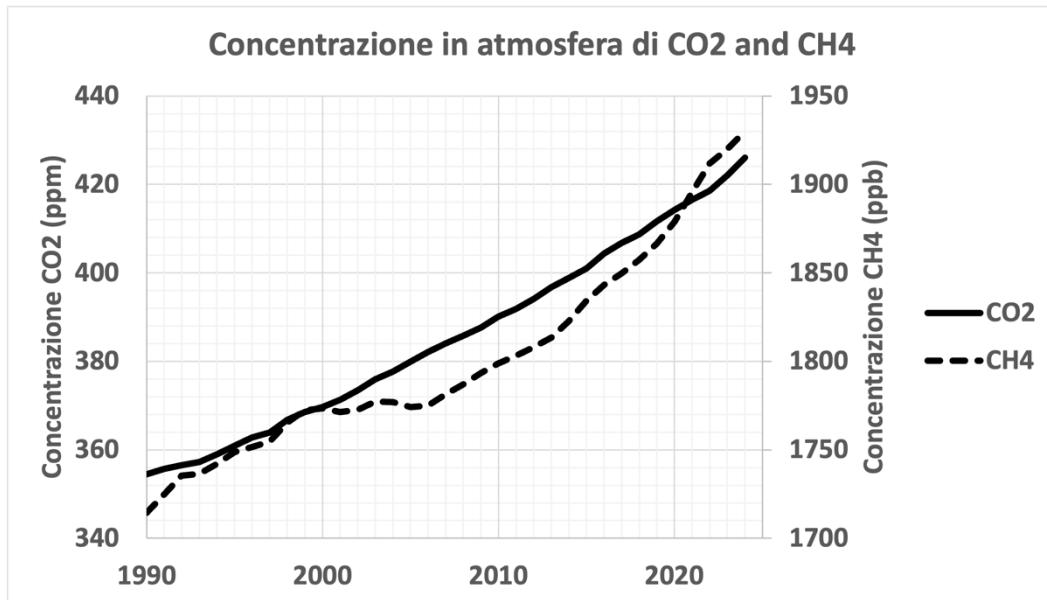


Figura 2. Concentrazione in atmosfera di CO₂, misurata in parti-per-milione (ppm; linea continua; asse verticale a sinistra) e di CH₄, misurata in parti-per-miliardo (ppb; linea tratteggiata; asse verticale di destra), tra il 1990 ed il 2024. (Dati 1990-2022 da Our World in Data, aggiornati nel giugno 2024; <https://ourworldindata.org>; dati 2023 e 2024 dal Global Monitoring Laboratory NOAA di Mauna Loa, <https://gml.noaa.gov/>.)

3. Emissioni di gas serra per Paese

Passiamo ora ad analizzare tre misure diverse delle emissioni di diversi Paesi e/o regioni del mondo: le emissioni totali accumulate in due periodi, 1850-2022 e 1990-2022; le emissioni totali nel 2022, e le emissioni totali per persona nel 2022 (mentre scrivo, *Our World in Data* riporta le emissioni fino al 2022). Le emissioni totali per persona sono una misura delle emissioni più ‘giusta’ delle emissioni totali, perché, in un mondo dove la produzione di energia avviene ancora per l’80% bruciando combustibili fossili, quantificano quanta energia ogni singolo cittadino dei diversi Paesi ha avuto a disposizione.

	Emissioni totali accumulate di gas serra (Gt CO₂-eq)		Emissioni totali (Gt CO₂- eq)	Popolazione (milioni, %)	Emiss- pp (t CO₂- eq)
	1850-2022	1990-2022	2022	2022	2022
Mondiali	3.450 (100,0%)	1.511 (100,0%)	53,8 (100,0%)	7.951 (100,0%)	6,8
EU27	411 (11,9%)	136 (9,0%)	3,3 (6,1%)	448 (5,6%)	7,5
Italia	33 (1,0%)	33 (1,0%)	0,4 (0,7%)	16 (1,0%)	6,5
Cina	419 (12,1%)	284 (18,8%)	13,9 (25,8%)	1.412 (17,8%)	9,9
USA	628 (18,2%)	213 (14,1%)	6,0 (11,1%)	333 (4,2%)	18,0
India	169 (4,9%)	85 (5,6%)	4,0 (7,4%)	1.417 (1,8%)	2,9
Africa	277 (8,0%)	136 (9,0%)	4,7 (8,7%)	1.480 (18,6%)	3,3

Tabella 1. Emissioni di gas serra globali, dell'Unione Europea dei 27 Paesi, dell'Italia, della Cina, degli Stati Uniti d'America, dell'India e dell'Africa. Le colonne 2-3 riportano le emissioni totali accumulate in due periodi, 1850-2022 e 1990-2022 (in Gt CO₂-eq). Le colonne 4-5-6 riportano le emissioni totali di gas serra nel 2022 (in Gt CO₂-eq), la popolazione nel 2022 (in milioni) e le emissioni totali per persona nel 2022 (t CO₂-eq). (Dati da 'Our World In Data', estratti nel giugno 2024; <https://ourworldindata.org/>.)

Le emissioni accumulate in un periodo di tempo di decine di anni è una metrica importante per calcolare il contributo di un Paese al riscaldamento globale in atto, dato che una molecola di CO₂ rimane in atmosfera per centinaia di anni, ed una molecola di CH₄ per decine di anni (il valore esatto del tempo di permanenza in atmosfera dipende dai processi dominanti che rimuovono questi gas dall'atmosfera). Così come il riscaldamento odierno è legato all'accumulo di gas serra, principalmente la CO₂, nelle decadi passate, il riscaldamento futuro è determinato sia dall'accumulo delle emissioni del passato che dall'accumulo delle emissioni future. Si tende a calcolare l'accumulo su varie decine di anni: nel nostro caso abbiamo considerato due periodi, 1850-2022 e 1990-2022. Il primo periodo è importante perché ci permette di capire il contributo relativo dei diversi Paesi allo stato del clima attuale, mentre il secondo periodo ci fornisce un

Il cambiamento climatico accelera: per limitarlo, dobbiamo decarbonizzare drasticamente e rapidamente

confronto basato sugli ultimi tre decenni dal 1990, anno che viene spesso utilizzato come un anno di riferimento quanto si definiscono obiettivi di riduzione delle emissioni.

La Tabella 1 mostra come, a livello globale, negli ultimi 33 anni (1990-2022) sono state immesse in atmosfera 1,511 Gt CO₂-eq, mentre nei precedenti 140 anni (1850-1989) sono state emesse 1,939 Gt CO₂-eq: una indicazione molto chiara del fatto che la maggior parte delle emissioni sono avvenute nei tempi più recenti. Si noti inoltre come il contributo relativo delle diverse regioni del mondo cambi nel tempo: mentre su tutto il periodo USA (con il 18,2%) è il Paese con il contributo maggiore all'accumulo, la Cina (con il 18,8%) è il maggiore contribuente negli ultimi 33 anni. Si noti anche come il contributo dell'EU27 è calato nel secondo periodo rispetto al periodo totale (dall'11,9% al 9%), mentre il contributo dell'India è salito (dal 4,9% and 5,6%). I valori delle emissioni totali nel 2022 confermano la Cina come il maggiore contribuente oggi (25,8%), seguita da USA (11,1%) e EU27 (6,1%). Infine, notare che l'Africa, con circa 3 volte la popolazione dell'EU27 (1.480 e 448 milioni di persone), da' un contributo minore dell'EU27 alle emissioni accumulate dal 1850 al 2022, e oggi contribuisce similmente a EU27.

Se guardiamo le emissioni per persona nel 2022, notiamo l'enorme disparità tra i diversi Paesi, con USA con 18 tCO₂-eq per persona, Cina con 9,9, EU27 con 7,5: tutti valori più alti della media mondiale delle emissioni per persona di 6,8 tCO₂-eq. Notare che le emissioni per persona per l'India e per l'Africa, Paesi che assieme hanno una popolazione di quasi 3 miliardi di persone, rimangono molto basse, con 2,9 e 3,3 tCO₂-eq. Questi numeri indicano che ad oggi le emissioni per persona dei singoli Paesi variano di un fattore 10+ tra i Paesi che emettono di più (l'Australia, ad esempio, con 23,2 tCO₂-eq per persona) e di meno (l'India con 2,9 tCO₂-eq per persona, le Filippine con 2,4, e la Nigeria con 2,0).

Se consideriamo l'Italia, nel periodo 1850-2022 ha emesso 1% delle emissioni globali. Nel 2022, con circa lo 0,7 % della popolazione mondiale, le emissioni per persona per ogni italiano sono state 6,5 tCO₂-eq per persona, un valore leggermente più basso della media globale (6,8 tCO₂-eq) e di quella EU27 (7,5 tCO₂-eq), ma comunque più alta di

moltissimi altri Paesi quali l'India e l'Africa. Numeri che confermano che noi cittadini italiani abbiamo dato il nostro contributo al riscaldamento climatico in linea con la percentuale relativa della nostra popolazione, e continuiamo a darlo.

4. *Lo stato del clima della Terra*

Come conseguenza della continua crescita delle emissioni e dell'accumulo di gas serra in atmosfera, la temperatura media globale continua a crescere, dal 2000 di circa 0,28°C ogni 10 anni, e localmente anche di multipli (2, 3, nelle regioni polari fino a 5) di questo valore.

Il riscaldamento annuale viene spesso riportato in termini di anomalia di temperatura, cioè di differenza tra la temperatura media dell'anno rispetto alla media su un periodo di riferimento che copre molti anni. Nella Fig. 3, la linea tratteggiata mostra l'anomalia annuale di temperatura superficiale tra il 1980 ed il 2024 rispetto al periodo pre-industriale (1850-1900). Se consideriamo, ad esempio, il 2023 ed il 2024, troviamo un'anomalia della temperatura media globale di 1,48 °C e di 1,61°C. Le due linee rette nere mostrano l'approssimazione lineare che interpola in maniera ottimale l'evoluzione delle anomalie in due periodi temporali di circa 20 anni, 1980-2001 e 2002-2024; dalla pendenza di queste linee rette possiamo calcolare il riscaldamento medio ogni 10 anni: 0,11°C per il primo periodo e 0,28°C per il secondo periodo.

La differenza tra i due valori indica un'accelerazione del riscaldamento medio globale di un fattore 2,5 negli ultimi 20 anni. La linea grigia che oscilla tra -0,2°C e 0,2°C è la differenza tra la linea tratteggiata e le due linee rette: indica l'impatto sulla temperatura media globale delle variazioni naturali del clima, legate ad esempio a fenomeni accoppiati El Niño/La Niña, a variazioni della circolazione atmosferica o oceanica a grande scala, o a grandi eruzioni vulcaniche che immettono in atmosfera un'enorme quantità di particolato che causa un raffreddamento. Le oscillazioni naturali hanno un valore medio zero ed una deviazione standard di 0,11°C, ed hanno massimo valore assoluto (nel 2024) di 0,23°C. Sono quindi più piccole in valore assoluto sia del riscaldamento medio globale che nel 2024 è arrivato a 1,61°C, che del riscaldamento osservato tra il 1980 ed il 2024 di

Il cambiamento climatico accelera: per limitarlo, dobbiamo decarbonizzare drasticamente e rapidamente

circa 1°C. Quindi, in sostanza, se consideriamo il rapporto tra 0,23 e 1,61, troviamo che le attività umane sono la causa principale del riscaldamento globale, come viene riportato da decenni nei rapporti di IPCC.

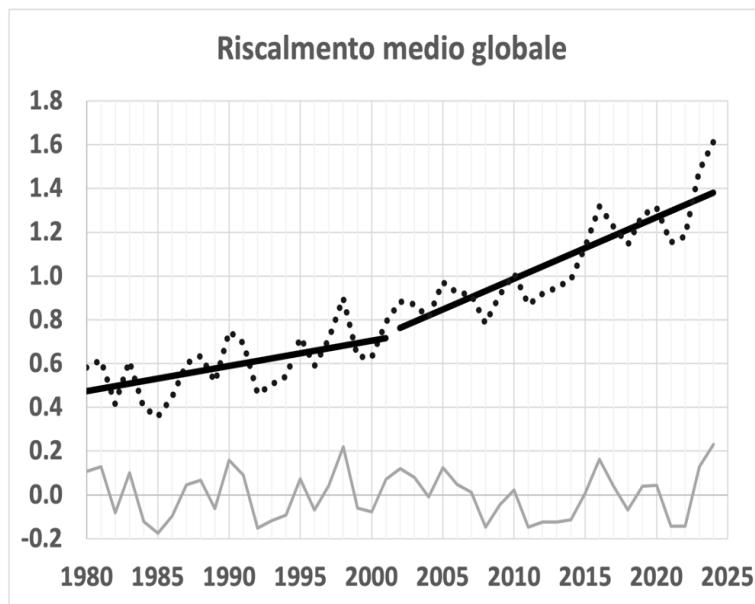


Figura 3. Anomalia della temperatura annuale media globale (linea tratteggiata) calcolata rispetto alla media del periodo pre-industriale (1850-1900), dal 1980 al 2024. Le due linee rette indicano l’evoluzione lineare tra il 1980-2001 ed il 2002-2024, e la linea grigia mostra la differenza tra l’anomalia annuale e l’evoluzione lineare (vedi il testo per maggiori dettagli). (Dati da Copernicus Climate Change Service, estratti il luglio 2024; link: <https://climate.copernicus.eu>.)

L'aumento della temperatura media globale sta causando l'innalzamento dei livelli dei mari e lo scioglimento dei ghiacci. Dal 2006, si osserva un'accelerazione anche dell'innalzamento del livello dei mari di un fattore 2,5, da +1,4mm l'anno nelle decadi precedenti il 2006 a +3,6mm⁴. Accelerazione che viene in parte spiegata dal riscaldamento delle acque ed in parte dallo scioglimento continuo dei ghiacci sulle terre

⁴ R.S. NEREM, B.D. BECKLEY, J.T. FASULLO, G.T. MITCHUM, *Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era*. Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), 115 (9), 2018, pp. 2022-2025 (doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1717312115>).

ferme⁵. I ghiacci ai Poli continuano a ritirarsi e a ridursi in spessore⁶: nell'ultimo anno l'estensione dei ghiacci di entrambe le calotte polari hanno raggiunto valori minimi, e/o vicini ai minimi storici.

Un altro effetto dell'aumento della temperatura media è l'aumento della frequenza e dell'intensità di eventi estremi, quali ondate di calore e siccità, o piogge e alluvioni. I casi estremi che hanno colpito l'Emilia-Romagna in Italia nel 2023 e 2024, e la regione di Valentia in Spagna nel 2024 sono esempi di questo tipo di eventi, la cui frequenza ed intensità aumenta con il riscaldamento globale. Vai studi basati su osservazioni delle precipitazioni su vari decenni indicano che In molte regioni del mondo le piogge tendono ad essere sempre più concentrate in periodi più brevi, durante i quali sono più intense.

Le leggi della fisica ci aiutano a capire perché un mondo più caldo è caratterizzato sia da ondate di calore sempre più intense e lunghe, e siccità, sia da piogge molto più intense ed alluvioni più frequenti. L'aumento dell'intensità è legato al fatto che un'atmosfera più calda è in grado di contenere maggiori quantità di vapore d'acqua, e quindi masse d'aria che si raffreddano possano causare a precipitazioni più intense. Un'atmosfera più calda è anche un sistema più energetico, e quindi fenomeni come zone di bassa pressione e cicloni possono intensificarsi maggiormente, ed essere quindi associati a vento più intensi e distruttivi.

5. *Il cambiamento climatico è dovuto alle attività umane.*

A supporto dell'affermazione condivisa dalla maggior parte degli scienziati del mondo esperti del sistema Terra (fisici, chimici, oceanografi, meteorologi, matematici del clima)

⁵ B. TALUKDER, R. MATTHEW, G.W. VANLOON, M.J. BUNCH, K.W. HIPEL, J. ORBINSKI, *Melting of Himalayan glaciers and planetary health. Current Opinion* in «Environmental Sustainability», 50, 2021, pp. 98-108 (doi: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2021.02.002>).

⁶ T.M. LENTON, H. HELD; E. KRIEGLER, J.W. HALL, W. LUCHT, S. RAHMSTORF, H.J SCHELLNHUBER, *Tipping elements in the Earth's climate system* in *Proceedings of the National Academy of Sciences* (PNAS), 105 (6), 2006, pp.1786-1793 (doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.0705414105>); T.M. LENTON, *Arctic Climate Tipping Points*, in «AMBIO», 41, 2012, pp. 10–22 (doi: <https://doi.org/10.1007/s13280-011-0221-x>); K.A. NAUGHTEN, P.R. HOLLAND, J. DE RYDT, *Unavoidable future increase in West Antarctic ice-shelf melting over the twenty-first century*, in «Nature Climate Change». 13, 2023, pp. 1222–1228. (doi: <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01818-x>).

Il cambiamento climatico accelera: per limitarlo, dobbiamo decarbonizzare drasticamente e rapidamente

che le emissioni di gas serra legate all'utilizzo dei combustibili fossili sono la causa principale del cambiamento climatico, cito i seguenti fatti:

- Esperimenti di laboratorio dimostrano che, se all'interno di un volume si continua ad aumentare la concentrazione di gas serra, tale volume irradiato dalle onde emesse da un corpo con la stessa temperatura della Terra si scalda sempre di più;
- La crescita della concentrazione di gas serra in atmosfera dall'era pre-industriale (1850-1900) ad oggi è consistente con la combustione dei combustibili fossili (carbone, olio combustibile e metano) bruciati nello stesso periodo;
- Analisi teoriche delle forzanti radiative delle diverse componenti dell'atmosfera, e delle loro variazioni, indicano che, anche tenendo conto delle incertezze dei calcoli, il riscaldamento osservato è principalmente dovuto alle attività umane che hanno causato un aumento della concentrazione dei gas serra e del particolato;
- La diminuzione della concentrazione di ossigeno in atmosfera dall'era pre-industriale ad oggi è anche lei consistente con la combustione dei combustibili fossili (carbone, olio combustibile e metano) bruciati nello stesso periodo;
- Esperimenti numerici con modelli del sistema Terra del clima mostrano che la ricostruzione del clima dal 1850 ad oggi è possibile solo se si tiene conto dell'aumento della concentrazione di gas serra in atmosfera: se si mantiene per tutto il periodo la stessa concentrazione di gas serra del 1850 non si riesce a ricostruire il riscaldamento osservato.

Sull'ultimo punto, sottolineo che, anche se i modelli del sistema Terra non sono perfetti, sono sufficientemente accurati per aiutarci a capire l'evoluzione del clima passato e a prevedere la sua evoluzione futura. Il fatto stesso che riescano a ricostruire il clima del passato è una prova che forniscono risultati rilevanti per lo studio del clima. In termini di previsioni del clima futuro, come abbiamo discusso nei capitoli precedenti, anche con le loro incertezze, riescono a descrivere in modo sufficientemente chiaro quali siano i possibili scenari di temperatura media globale e variazioni a grande scala, e la probabilità che occorrono.

6. È possibile limitare il riscaldamento a 2,0°C gradi?

L'unico modo per limitare il riscaldamento futuro è di ridurre immediatamente e sostanzialmente le emissioni dei gas serra in atmosfera (CO₂ e CH₄). Infatti, ad oggi metodi alternativi alla riduzione delle emissioni come l'assorbimento e l'immagazzinamento dei gas serra ('Carbon Capture and Storage', CCS) si sono dimostrati capaci di assorbire solo piccole percentuali delle emissioni su cui agiscono. Stime attuali dicono che nel futuro, anche nella migliore delle ipotesi in cui si riesca a migliorare le capacità di assorbimento e di immagazzinamento di CO₂, potranno assorbire tra il 5% ed il 10% delle emissioni globali. Inoltre, si stima che anche i sistemi naturali di assorbimento di gas serra ('Natural Based Solutions', NBS), ad esempio legati alla re-forestazione, potranno contribuire ad un ulteriore assorbimento al massimo del 10% delle emissioni globali. Queste stime indicano che, anche nelle ipotesi più ottimiste, CCS e NBS saranno in grado di assorbire e rimuovere al massimo il 20% delle emissioni, e che quindi occorre ridurre di almeno l'80% le emissioni attuali se si vuole raggiungere l'obiettivo di zero emissioni nette.

L'IPCC⁷ ha discusso in dettaglio la quantità di emissioni da ridurre per limitare il riscaldamento globale al di sotto di 1,5 o 2,0 °C e i potenziali vantaggi di rimanere al di sotto della soglia più bassa delle due concordate durante la Conferenza delle Parti del Quadro Nazionale delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici del 2015, a Parigi⁸. Purtroppo, la prima soglia è stata raggiunta in termini di anomalia globale media annua, dato che il 2023 è stato più caldo di 1,48 °C e si prevede che il 2024 sarà più caldo di qualche decimo di grado rispetto al 2023.

Per rispondere alla domanda se sia possibile limitare il riscaldamento a meno di 2,0°C, possiamo utilizzare la relazione quasi-lineare che lega la concentrazione di CO₂ in

⁷ IPCC, Special Report. *Global warming of 1.5° degrees. Summary for Policy Makers*; 2018. On line https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf. (Accessed in November 2024).

⁸ Si veda per la dichiarazione concordata United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), *Adoption of the Paris Agreement* (document ref. # FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1), p. 32. Accessibile dal sito UNFCCC <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>. (Accessed in November 2024).

Il cambiamento climatico accelera: per limitarlo, dobbiamo decarbonizzare drasticamente e rapidamente

atmosfera ed il riscaldamento misurato dall'anomalia di temperatura, e/o la relazione quasi-lineare che lega l'accumulo di gas serra in atmosfera e l'anomalia di temperatura. La Fig. 4 mostra tali relazioni lineari stimate dedotte contrastando le osservazioni del periodo 1980-2024, entrambe caratterizzate da un coefficiente di correlazione maggiore dell'85%. Se consideriamo la relazione tra l'accumulo di gas serra in atmosfera e l'anomalia di temperatura, la pendenza della retta mostrata nel grafico è di 0,0005: quindi ad ogni ulteriore immissione in atmosfera di 1.000 Gt CO₂-eq di gas serra associa un riscaldamento medio di 0,5°C. Se invece consideriamo la relazione tra concentrazione di CO₂ in atmosfera e l'anomalia di temperatura, la pendenza della retta mostrata nel grafico è di 0,011, che indica che ad un aumento della concentrazione di CO₂ di 45 ppm è associato un riscaldamento medio di 0,5°C.

Si noti che parlato di associazione e non di causalità, dato che da questo tipo di grafici si possono solo individuare relazioni di associazioni ma non di causa-effetto. Ma se teniamo applichiamo le leggi della fisica (vedi anche la discussione qui sopra), possiamo concludere che queste relazioni quasi-lineari di fatto confermano una relazione causale tra l'aumento dell'accumulo delle emissioni di gas serra in atmosfera, e/o il conseguente aumento della concentrazione di CO₂ in atmosfera, e l'aumento della temperatura media globale.

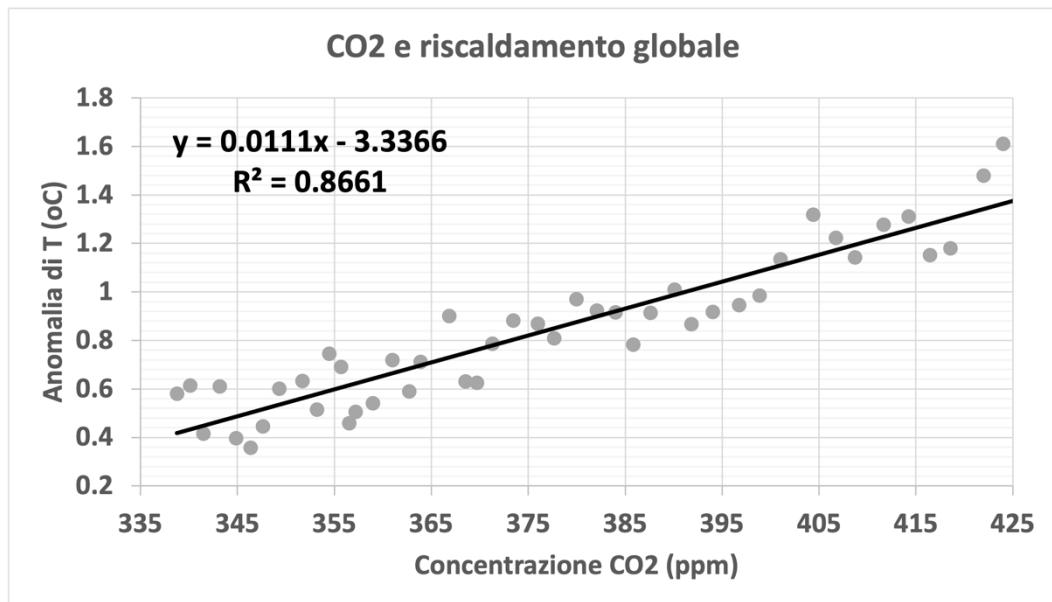
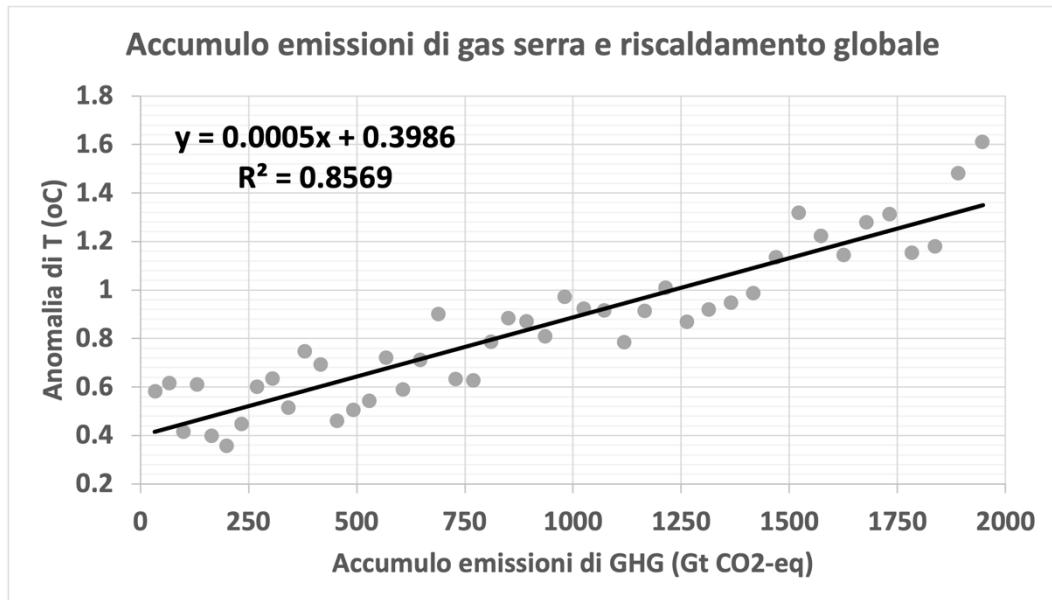


Figura 4. Il pannello superiore mostra la relazione tra il riscaldamento medio globale e l'accumulo delle emissioni di gas serra tra il 1980 ed il 2024 (in Gt CO₂-eq; asse orizzontale). I simboli grigi indicano, per ogni anno, l'accumulo delle emissioni globali e l'anomalia della temperatura media globale. Il pannello inferiore mostra la relazione tra il riscaldamento medio globale e la concentrazione della CO₂ in atmosfera (in ppm; asse orizzontale). Nei due pannelli, la linea retta indica la relazione quasi-lineare tra le due variabili. (Dati di concentrazione di CO₂ da NOAA/Mauna Loa Observatory; dati di emissioni di gas serra globali da Our World in Data; dati di riscaldamento medio globale da Copernicus Climate Change Service).

Il cambiamento climatico accelera: per limitarlo, dobbiamo decarbonizzare drasticamente e rapidamente

Le due relazioni lineari:

$$T_{anom} = 0,0005 \cdot Acc_{emiss} + 0,3986$$

$$T_{anom} = 0,0111 \cdot CO_2 - 3,3366$$

possono essere utilizzate per stimare i limiti massimi delle ulteriori emissioni di gas serra in atmosfera, e/o dell'aumento della concentrazione di gas serra, al di sopra dei quali assisteremo ad un riscaldamento medio globale al di sopra di 2,0°C.

Nel 2024 il riscaldamento medio globale ha raggiunto 1,61 °C: quindi l'ulteriore emissione di 800 Gt di gas serra porteranno ad un ulteriore riscaldamento di 0,4°C ($0,4=0,0005 \times 800$), e quindi al raggiungimento di 2,0 °C. Se nei prossimi anni continueremo, come nel 2022, ad emettere circa 54 Gt CO₂-eq di gas serra, in circa 14 anni avremo emesso ulteriori 800 Gt CO₂-eq di gas serra. Se utilizziamo la seconda relazione, possiamo calcolare che un ulteriore aumento di 40 ppm della concentrazione di CO₂ porterà il riscaldamento medio globale a 2,0°C. Queste due proiezioni sono consistenti con le osservazioni dell'aumento della concentrazione di CO₂ in atmosfera, che indicano che negli ultimi anni sono state emesse in atmosfera circa 50 Gt CO₂-eq e la concentrazione è aumentata di circa 2,5 ppm. Quindi, l'ulteriore emissione di 800 Gt CO₂-eq porterebbe un aumento di concentrazione della concentrazione di CO₂ di 40 ppm [$40=(2,5 \times 800)/50$], e quindi un aumento della temperatura media globale di 0,44°C ($0,44=0,0111 \times 40$).

7. Obiettivi di riduzione delle emissioni al 2030 e 2050

La figura 5 mostra le emissioni di gas serra globali, dell'Unione Europea dei 27 Paesi, dopo Brexit, e dell'Italia, dal 1990 al 2022 (avevamo già riportato le emissioni globali tra il 1990 ed il 2022 nella Fig. 1), e tre proiezioni delle emissioni future fino al 2050.

Nel periodo 1990-2022 le emissioni globali siano cresciute in media del 0,5%, e nel 2022 avevano raggiunto il 144% del valore del 1990. Per l'Unione Europea (dei 27 Paesi, EU27), durante lo stesso periodo le emissioni sono diminuite in media del 1,2%, e nel 2022 avevano raggiunto il 70% del valore del 1990. Per l'Italia, durante lo stesso periodo

le emissioni sono diminuite in media dello 0,5%, e nel 2022 hanno raggiunto il 77% del valore del 1990.

Se consideriamo l'obiettivo dell'Unione Europea 'Fit-for-55' (FF55) di ridurre le emissioni nel 2030 al 55% del livello del 1990, per soddisfarlo l'EU27 tra il 2023 ed il 2030 deve ridurle in media del 5% l'anno (Fig. 5, pannello medio, linea tratteggiata), circa 4 volte più rapidamente di quanto le abbia ridotte nel periodo 2013-2022 (riduzione dell'1,2%). Una riduzione di solo l'1,2% (Fig. 5, pannello medio, linea punteggiata) porterebbe le emissioni globali della EU27 nel 2030 al 63% del valore del 1990, quindi ad una riduzione del 37% e non del 55%. Il terzo scenario (Fig. 5, pannello medio, linea tratteggiata con i valori minori) mostra le emissioni EU27 se venissero ridotte in media ogni anno del 12,5%: tale riduzione porterebbe sia a soddisfare l'obiettivo FF55, che a portare le emissioni molto vicine a net-zero nel 2050.

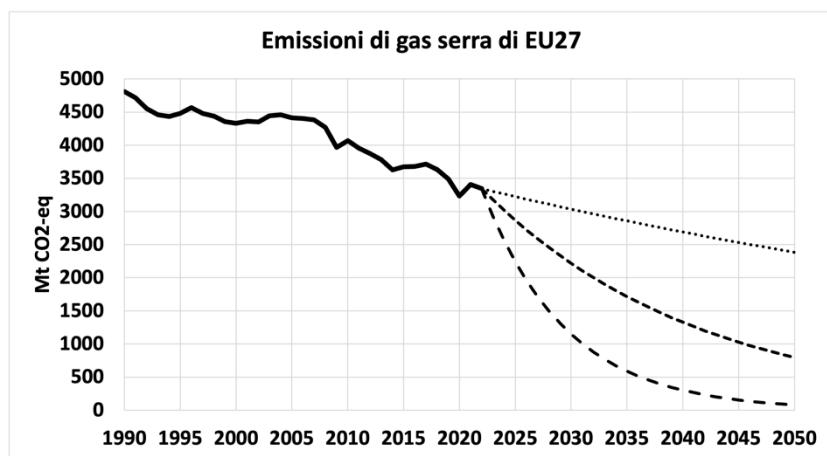
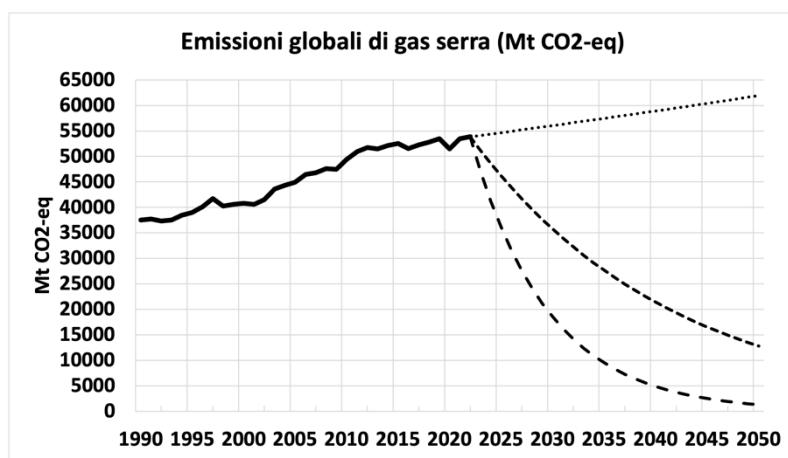
Consideriamo ora l'Italia. Se nei prossimi anni continuerà a ridurre le emissioni come nel periodo 2013-2022 dello 0,5% l'anno, nel 2030 le sue emissioni saranno il 73% di quelle del 1990 (Fig. 5, pannello inferiore, linea punteggiata). Per raggiungere l'obiettivo FF55, tra il 2023 ed il 2030 dovrebbe ridurre le emissioni in media di almeno il 5% l'anno (Fig. 5, pannello inferiore, linea tratteggiata), 10 volte più rapidamente di quanto le abbia ridotte negli ultimi 10 anni. Una riduzione del 12,5% (Fig. 5, pannello inferiore, linea tratteggiata con i valori minori) porterebbe le emissioni dell'Italia nel 2050 vicino a net-zero.

Se consideriamo le emissioni globali, negli ultimi 10 anni sono cresciute in media annualmente dello 0,5%: se nei prossimi anni continueranno così (Fig. 5, pannello superiore, linea punteggiata), nel 2050 raggiungeranno 62 Gt CO₂-eq., mentre per raggiungere l'obiettivo FF55 tra il 2023 ed il 2030 dovrebbero essere ridotte del 12,5% (Fig. 5, pannello superiore, linea tratteggiata con i valori minori).

Parliamo ora dell'obiettivo 'net-zero', che ambisce a raggiungere zero emissioni nette di CO₂ entro il 2050. Anche se questo obiettivo si riferisce solo alle emissioni di CO₂ e non dei gas serra, è interessante analizzare a che livello di emissioni di gas serra si arriverebbe nel 2050 con una riduzione del 5% o del 12,5%. La Fig. 5 mostra anche che,

Il cambiamento climatico accelera: per limitarlo, dobbiamo decarbonizzare drasticamente e rapidamente

a livello globale, una riduzione del 5% l'anno dal 2023 al 2050 porterebbe le emissioni globali di gas serra nel 2050 a circa 12 Gt CO₂-eq (una riduzione dell'82% rispetto ai 37 Gt CO₂-eq emessi nel 1990), mentre una riduzione del 12,5% le porterebbe a 1 Gt CO₂-eq, un valore molto vicino a zero. Per l'Unione Europea e l'Italia, una riduzione del 5% porterebbe le emissioni, rispettivamente, a 0,8 Gt CO₂-eq (una riduzione dell'82% rispetto ai 4,7 Gt CO₂-eq 1990) e a 0,09 Gt (una riduzione dell'82% rispetto ai 0,5 Gt CO₂-eq del 1990). Per tutte e tre le regioni, quindi, riduzioni annuale medie di meno del 5% lascerebbero le emissioni nel 2050 a valori troppo alti e lontani da 'net-zero'.



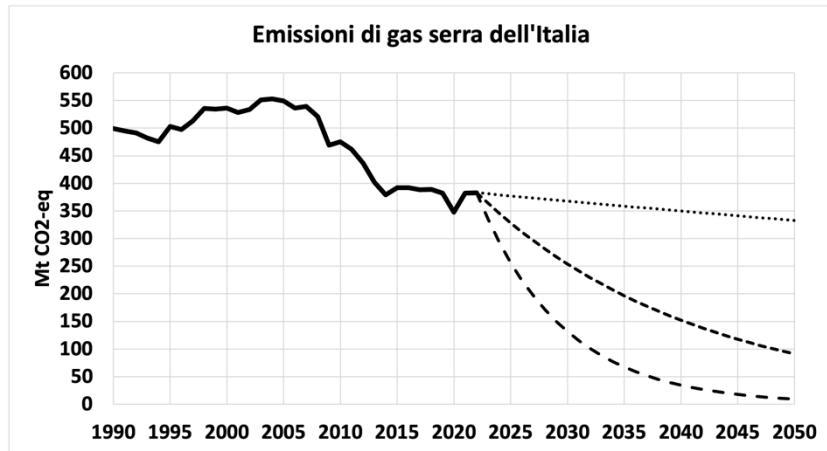


Figura 5. Emissioni di gas serra (in Mt CO₂-eq) globali (pannello superiore), dell'Unione Europea (27 Paesi, pannello medio) e dell'Italia (pannello inferiore). La linea continua mostra le emissioni tra il 1990 ed il 2022 riportate da Our World in Data; le altre tre linee tratteggiate mostrano i valori che le emissioni raggiungerebbero se dal 2023 al 2050 in tre diversi scenari: come nel periodo 2013-2022 (linea punteggiata), riduzione media annua del 5% (linea tratteggiata) e riduzione media annua del 12,5% (linea tratteggiata con i valori minori). (Dati tra il 1990-2022 da Our World in Data, OWID, estratte nel giugno 2024: <https://ourworldindata.org.>).

8. Abbiamo le tecnologie per sostituire i combustibili fossili

Abbiamo le tecnologie per disaccoppiare la produzione di energia e la crescita economica, dalle emissioni di gas serra. Un rapporto pubblicato nel 2023 da Energy Transition Commission (ETC: <https://www.energy-transitions.org>) conclude che, nel lungo termine, ci sono risorse sufficienti di tutti i materiali, di spazi sulla terra ferma, e di acqua, per supportare la decarbonizzazione. Suggerisce inoltre che la domanda accumulata di materiali potrebbe essere ridotta con un miglior riciclo dei materiali, e ulteriori sviluppi tecnologici.

A parte pochi settori che richiedono un'intensità energetica molto alta (ad esempio, l'industria del ferro e dell'acciaio, che contribuisce a circa il 7% delle emissioni totali, ed il trasporto aereo, che contribuisce a circa il 3% delle emissioni totali), per cui le soluzioni esistono ma sono o troppo costose o ancora in fase di sviluppo, per tutte le altre attività umane abbiamo soluzioni. Soluzioni che vengono già implementate oggi, anche se troppo lentamente, e che potrebbero nel giro di 10-15 anni ridurre le emissioni in linea con gli

Il cambiamento climatico accelera: per limitarlo, dobbiamo decarbonizzare drasticamente e rapidamente

obiettivi discussi qui sopra, FF55 e net-zero. Queste soluzioni possono portare anche notevoli riduzioni dei costi.

Ad esempio, se consideriamo sia le stime di costo che di emissioni di gas serra sul ciclo di vita, vediamo che, oggi, investire in impianti eolici o fotovoltaici, ha il duplice vantaggio di avere i valori minori di entrambi. Consideriamo la produzione di elettricità (Tabella 2): Lazard confronta il ‘levelized cost of energy’ per diverse sorgenti di energia, e riporta che la produzione di energia elettrica con centrali eoliche o solari hanno il costo più basso (Tabella 2)⁹. Questi costi sono stati calcolati tenendo conto della vita dell’impianto di produzione in diverse regioni del mondo. Per ogni tipologia, il rapporto include una stima del valore minimo e massimo. Notare come il nucleare risulti la tipologia più cara, e solare ed eolico le due tecnologie più economiche. In termini di emissioni di gas serra sul ciclo di vita di una centrale di produzione elettrica, United Nations Economic Commission for Europe¹⁰ riporta che centrali eoliche o solari hanno i valori minore (Tabella 2).

	Levelized cost of energy (\$/MWh)	Lifecycle GHG emissions (kg CO2-eq/MWh)
<i>Nucleare</i>	141-221	6-6.5
<i>Carbone</i>	68-166	753-1095 (149-470 with CCS)
<i>Gas</i>	39-101	400-500 (92-121 with CCS)
<i>Idroelettrico</i>	50-100	6-140
<i>Eolico</i>	24-75	8-23
<i>Solare</i>	24-96	8-82

Tabella 2. Costo dell’energia (in \$/MWh; da Lazard 2023) ed emissioni di gas serra calcolate sul ciclo di vita (in kg CO₂-eq/MWh; da UNECE 2022) per l’energia prodotta da centrali nucleari, a carbone, a gas, idroelettriche, eoliche o solari.

⁹ LAZARD *Levelized Cost of Energy, LCOE+*, Lazard, 2023, p. 57. (www.lazard.com).

¹⁰ UNECE, Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources. UNECE, 2022, p. 108. <https://unece.org>.

Sostanzialmente quasi tutte le attività umane contribuiscono alle emissioni di gas serra, e quindi tutte vanno de-carbonizzate per raggiungere gli obiettivi FF55 e net-zero. Nel trasporto, investimenti che potenzino il trasporto pubblico e lo rendano elettrico, e che supportino una mobilità elettrica diffusa possono portare ad una riduzione sostanziale delle emissioni di gas serra, con co-benefici per la salute, dato che veicoli elettrici non emettono il particolato fine emesso dai motori a combustione che causa malattie vascolari e respiratorie.

Se consideriamo le emissioni di gas serra per riscaldare o raffreddare gli edifici, investimenti per isolare meglio termicamente gli edifici, in modo da ridurre la domanda di energia necessaria per scaldarli o raffreddarli, e nuove tecnologie al posto delle caldaie a combustione porterebbero ad una riduzione delle emissioni. I processi industriali vanno resi più efficienti, in modo da riuscire a generare le stesse unità di prodotto con meno energia. In generale, una riduzione dei consumi per persona aiuterebbe a ridurre le emissioni: evitando acquisti non necessari, si avrebbe un impatto sostanziale sulla domanda dei prodotti, e quindi sulla domanda di energia e di materiali, sul trasporto, e quindi sulle emissioni.

L'agricoltura e lo sfruttamento della terra (quindi sia la coltivazione delle piante che l'allevamento del bestiame) deve essere riformata per ridurre le emissioni: ad esempio, pratiche di coltivazione biologica porterebbero ad una riduzione delle emissioni di protossido di azoto. Un utilizzo più efficiente dell'irrigazione, una riduzione del trasporto portando la produzione più vicino al consumo, ed una riduzione dei rifiuti (che nel 2019 hanno contributo al 3% delle emissioni globali di gas serra, quanto il settore dell'aviazione), porterebbero ad una riduzione delle emissioni di gas serra. Pensando agli allevamenti, una riduzione sostanziale del consumo di carne contribuirebbe sostanzialmente ad una riduzione delle emissioni di gas serra da parte degli allevamenti, ed una minore necessità di colture per allevare gli animali (European Feed Manufacturers' Federation, FEFAC stima che, globalmente, circa il 50% delle terre coltivate viene utilizzato per sfamare gli animali di allevamento).

Il cambiamento climatico accelera: per limitarlo, dobbiamo decarbonizzare drasticamente e rapidamente

9. Investire il 2-3% del PNL per la decarbonizzazione

Nel 2019, il Comitato sul Cambiamento Climatico del Regno Unito ha stimato¹¹ che se ogni Paese che contribuisce maggiormente alle emissioni di gas serra (Stati Uniti d'America, Canada, Australia, Europa, Cina, Russia) investisse circa il 2-3% del Prodotto Nazionale Lordo (PNL) ogni anno, si raggiungerebbe l'obiettivo di zero-emissioni-nette entro il 2050. Questa percentuale è simile ad una stima riportata nel V^o Assessment Report del Intergovernmental Panel on Climate Change¹². Energy Transition Commission¹³ ha stimato che questo obiettivo possa essere raggiunto anche per i settori in cui è più difficile ridurre le emissioni.

Investimenti nazionali del 2-3% del PNL sono necessari per dotare i Paesi delle infrastrutture necessarie per un mondo de-carbonizzato, e accelerare la trasformazione. Per permettere a chi decide di utilizzare un'auto elettrica di avere accesso a stazioni di ricarica alimentate da energia prodotta senza emissioni di gas serra, e a chi decide di utilizzare il trasporto pubblico invece che l'auto privata di avere accesso ad un servizio efficiente e resiliente. O di avere una rete di trasporto elettrico in grado di bilanciare domanda ed offerta di elettricità in un futuro caratterizzato da un sistema di produzione e consumo distribuito, e non, come oggi, di un sistema di produzione localizzato in poche, grandi centrali di produzione. Così come agli inizi del 1900 investimenti statali in strade, ponti, gallerie, ha favorito la domanda di autovetture, ed il passaggio dalla mobilità prevalentemente animale ad una basata su veicoli a motore e combustione, oggi sono necessari investimenti statali in infrastrutture per passare dalla società basata su energia dai combustibili fossili ad una società basata su energie alternative.

Notare che investire ogni anno il 2-3% del PNL da oggi al 2050 per de-carbonizzare può avere grandi co-benefici anche dal punto di vista della sicurezza. Di fatti, oltre a ridurre una delle cause delle guerre, le migrazioni causate dal cambiamento climatico, ridurrebbe anche una seconda causa delle guerre, la volontà di controllare l'accesso a

¹¹ CLIMATE CHANGE COMMITTEE, *Net Zero – Technical Report*', 2019, pp 302 online: www.theccc.org.uk.

¹² IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change. 5th Assessment Report, Synthesis Report, Summary for Policymakers*, 2014, p. 31. (<https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>) (Accessed in November 2024).

¹³ ENERGY TRANSITION COMMISSION (ETC), *Material and resource requirements for the energy transition. Published by the Energy Transition Commission*, 2023, p. 30, (<https://www.energy-transitions.org>).

fonti di energia convenzionale. Questo legame tra la volontà dei Paesi di garantirsi un accesso ai combustibili fossili e i conflitti era stato messo in evidenza molto chiaramente da Daniel Yergin nel suo libro *The Prize. The Epic Quest for Oil, Money and Power*¹⁴, dove ha documentato tale legame analizzando le guerre degli ultimi 150 anni. Logicamente, quindi, così come una dipendenza dai combustibili fossili è stato un elemento che ha favorito tensioni e guerra, un'indipendenza può eliminare una delle principali ragioni che portano ai conflitti. Notare che questo legame tra il cambiamento climatico e i conflitti era stato uno dei motivi chiave per cui il Nobel Prize Committee nel 2007 aveva deciso di assegnare il Nobel per la Pace a IPCC e al vice-presidente degli Stati Uniti d'America di allora, Al Gore.

Un'altra indicazione del rapporto costo/benefici della decarbonizzazione viene da *IPCC*¹⁵ che riporta che i costi legati alla limitazione del riscaldamento al di sotto dei 2 °C sono più bassi dei benefici economici legati alla riduzione degli impatti del cambiamento climatico. Questo rapporto mette anche in evidenza i co-benefici che possono derivare da una riduzione delle emissioni in termini dei ‘Sustainable Development Goals’ (SDGs), e parla della necessità di mantenere un legame molto stretto tra le politiche di riduzione dei rischi legati al cambiamento climatico (politiche sia di mitigazione che di adattamento), e la promozione sia di uno sviluppo sostenibile che di una maggiore giustizia sociale. Giustizia sociale che deve tradursi nel mettere a disposizione dei Paesi meno sviluppati, che molto spesso hanno contribuito meno degli altri alle emissioni di gas serra e sono più a rischio degli impatti del cambiamento climatico, risorse e tecnologie per aiutarli a svilupparsi economicamente ed essere quindi in grado di adattarsi ed affrontare il problema del cambiamento climatico, e di ridurre le loro emissioni garantendo lo sviluppo economico. Un articolo appena pubblicato sulla rivista *Nature*¹⁶ basato su circa 1.600

¹⁴ D. YERGIN, *The Prize. The Epic Quest for Oil, Money and Power*, New York, Simon & Schuster Ltd, 1990.

¹⁵ IPCC, *Climate Change. Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, 2022. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/> (Accessed in November 2024).

¹⁶ M. KOTS et al, *The economic commitment of climate change*, in «Nature», 628, 2024, pp. 551-557.

Il cambiamento climatico accelera: per limitarlo, dobbiamo decarbonizzare drasticamente e rapidamente

rapporti da diverse regioni del mondo degli ultimi 40 anni, riporta che i danni che hanno colpito queste regioni sono 6 volte più alti delle stime degli investimenti necessari per contenere il riscaldamento futuro al di sotto dei 2,0°C.

Senza una riduzione rapida e sostanziale delle emissioni sarà impossibile raggiungere una maggiore giustizia sociale, dato che l'impatto del cambiamento climatico è molto più evidente sui Paesi meno sviluppati. Così come va tenuto conto che senza una maggiore giustizia sociale sarà impossibile raggiungere l'obiettivo di net-zero: una crescita dell'ingiustizia sociale, ed una mancanza di risorse economiche e sociali aumenterebbero la vulnerabilità e ridurrebbero ancora di più la capacità di molti Paesi a adattarsi al cambiamento climatico e ad implementare politiche di mitigazione. Occorre lavorare per garantire progressi sia nella riduzione delle emissioni che delle ingiustizie sociali, ed evitare che progressi in uno causi peggioramenti nell'altro.

10. *Conclusioni*

Mai come dopo il periodo pre-industriale (1850-1900) la concentrazione di gas serra in atmosfera e la temperatura media globale sono aumentate così rapidamente, di circa 100 ppm in 75 anni e di circa 1,6 °C in 125 anni. L'analisi del clima passato della Terra indica che, nel passato, una concentrazione in atmosfera di 400 ppm di CO₂ era stata superata solo circa 2,5 milioni di anni fa. Questo valore è stato superato di nuovo nel 2015, e nel 2024 la concentrazione di CO₂ in atmosfera ha raggiunto 427 ppm. Dal periodo pre-industriale ad oggi, la temperatura media della Terra è salita di circa 1,6°C. Esistono delle relazioni quasi-lineari tra le emissioni di gas serra e il riscaldamento medio globale. Relazioni legate all'impatto radiativo dei gas serra, che ci permettono di stimare i livelli di riscaldamento medio globale del futuro sulla base delle emissioni di gas serra previste. Se le applichiamo, possiamo stimare che è possibile contenere il riscaldamento medio globale al di sotto di 2,0°C solo con diminuzioni rapide e sostanziali delle emissioni di gas serra. Viceversa, se globalmente continuiamo ad emettere come nel 2022 circa 54 Gt CO₂-eq di gas serra, raggiungeremo 2,0°C entro il 2040.

Se confrontiamo il contributo dei diversi Paesi all'accumulo di emissioni di gas serra tra il 1850-2022, vediamo che gli Stati Uniti d'America (18%), l'Unione Europea (12%) e la Cina (12%) hanno contribuito maggiormente. L'Italia, con, nel 2022, circa lo 0.7% della popolazione mondiale, ha causato circa l'1% dell'accumulo di gas serra.

In termini di emissioni di gas serra per persona, continua ad esistere un'enorme disparità tra i Paesi, legata al fatto che pochi Paesi con maggiori ricchezze hanno utilizzato e continuano ad utilizzare molta più energia e combustibili fossili di altri. I Paesi che hanno contribuito meno all'accumulo di gas serra sono spesso quelli con minore ricchezza, e sono quelli che subiscono maggiormente l'impatto del riscaldamento climatico, sostanzialmente perché hanno meno risorse a disposizione per adattarsi al cambiamento, e prepararsi ad affrontare l'aumento della frequenza ed intensità degli eventi estremi legati al cambiamento climatico.

Concludo sottolineando che, anche se sono necessarie sia azioni di mitigazione che di adattamento, la priorità deve essere data alle azioni di mitigazione per evitare che il clima continui a riscaldarsi, e componenti del sistema Terra che determina il clima possano subire transizioni quasi-irreversibili, e quindi la frequenza ed intensità degli eventi estremi che causano i maggiori danni alle comunità e agli ecosistemi non crescano. È errato pensare che finanziando azioni di adattamento si possa continuare ad utilizzare combustibili fossili (carbone, olio combustibile e gas metano) e ad emettere gas serra, e rimandare azioni di mitigazione al futuro.

10. *Alcune ultime considerazioni mentre andiamo in stampa (gennaio 2026)*

Vorrei aggiungere qualche ultimo aggiornamento su alcuni aspetti discussi in questo contributo mentre andiamo in stampa, a gennaio 2026:

- *Le emissioni globali di gas serra continuano a crescere* - Il database Edgar della Commissione Europea (<https://edgar.jrc.ec.europa.eu>) ha recentemente riportato che le emissioni di CO₂ nel 2024 sono aumentate dell'1,3% rispetto al 2023, e prevede che le emissioni nel 2025 saranno circa l'1,1% superiori rispetto al 2024.

Il cambiamento climatico accelera: per limitarlo, dobbiamo decarbonizzare drasticamente e rapidamente

- *La concentrazione globale di gas serra nell'atmosfera ha raggiunto nuovi livelli* - L'Osservatorio della NOAA di Mauna-Loa riporta sul proprio sito web che a maggio 2025 si sono registrati i livelli più alti di concentrazione di CO₂ nell'atmosfera mai registrati (~ 431 ppm).
- *Il riscaldamento globale continua ad aumentare, nonostante il 2025 sia caratterizzato da condizioni fredde tropicali del Pacifico (La Niña)* - il Copernicus Climate Change Service dell'Unione Europea ha dichiarato a gennaio che il 2025 è il terzo anno più caldo, dopo il 2024 ed il 2023, con un valore medio molto vicino al 2023.
- *I progressi verso il raggiungimento degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) delle Nazioni Unite restano lontani* – Questo è stato riportato alla fine di giugno 2025 nella 10^a edizione del Rapporto sullo Sviluppo Sostenibile, pubblicato dalla Rete delle Soluzioni per lo Sviluppo Sostenibile delle Nazioni Unite (SDSN): con meno del 20% degli obiettivi previsti per il 2030, le medie globali mascherano nette disparità tra regioni e paesi nei progressi degli SDG.
- *L'impatto del riscaldamento globale sulla salute ha raggiunto livelli record* - Il Lancet Countdown 2025 sulla salute e il cambiamento climatico, prodotto in collaborazione con l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), ha riportato che 12 dei 20 indicatori chiave che monitorano le minacce sanitarie hanno raggiunto livelli record, mostrando come l'inattività climatica stia costando vite, mettendo sotto pressione i sistemi sanitari e minando le economie.
- *Più persone si preoccupano del cambiamento climatico di quanto pensiamo* – In un articolo del 2024 pubblicato su *Science Advances*, Madalina Vlasceanu e colleghi hanno intervistato 59.000 persone in 63 paesi. L'86% delle persone ha concordato che è necessario agire per ridurre l'impatto potenziale del cambiamento climatico: anche nel paese con il livello di accordo più basso, il 73% ha concordato che è necessaria un'azione.
- *La produzione di energia rinnovabile ha superato il carbone come principale fonte di energia nell'ottobre 2025* – Ember Energy lo ha riportato nell'ottobre 2025, ma ha anche affermato che, mentre i paesi in via di sviluppo, in particolare la Cina, guidano

la carica sull'energia pulita, le nazioni più ricche come Stati Uniti e UE si affidano più che prima ai combustibili fossili che riscaldano il pianeta per la generazione di elettricità. L'Agenzia Internazionale dell'Energia (IAE, <https://www.iea.org>) ha riferito che la produzione di elettricità da fonti rinnovabili dovrebbe aumentare del 60% dal 2024 al 2030 – da 9.900 a 16.200 TWh.

- *Il numero di veicoli elettrici venduti nel 2025 ha raggiunto i 20 milioni, circa il 25% del mercato globale* – Questo è stato riportato da Ember Energy e dall'IAE alla fine del 2025, con proiezioni per il 2026 che la percentuale di vendite continua a crescere. E Our World in Data riporta che nel 2024 la percentuale di veicoli elettrici in uso ha raggiunto il 32% in Norvegia, il 13% in Norvegia e l'11% in Cina, con una media globale del 4,5%.
- *La COP30, tenutasi in Brasile nel novembre 2025 ha ottenuto risultati contrastanti* – il Segretario Generale delle Nazioni Unite, My Gutierrez, ha dichiarato: *'Non posso fingere che la COP30 abbia fornito tutto ciò che è necessario. Il divario tra dove siamo e ciò che la scienza richiede rimane pericolosamente ampio. Capisco che molti possano sentirsi delusi – soprattutto i giovani, i Popoli Indigeni e chi vive il caos climatico. La realtà del superamento è un avvertimento netto: ci stiamo avvicinando a punti di svolta pericolosi e irreversibili.'*
- *Un numero crescente di persone è colpito da guerre e conflitti* – Le statistiche di Our World in Data mostrano che, a livello globale, il numero annuo di morti nei conflitti armati è passato da meno di 50.000 tra il 2001 e il 2010 a oltre 150.000 tra il 2021 e il 2024.

In sostanza, malgrado i continui rapporti di IPCC e le riunioni della COP, il mondo ha, per ora, scelto di rallentare la decarbonizzazione, diminuendo quindi la probabilità di limitare il riscaldamento globale nel 2100 sotto i 2,0°C. Purtroppo, anche i progressi verso il raggiungimento degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile delle Nazioni Unite sono troppo lenti.

Il cambiamento climatico accelera: per limitarlo, dobbiamo decarbonizzare drasticamente e rapidamente

Dal punto di vista positivo, c'è una maggiore consapevolezza della necessità di affrontare il cambiamento climatico, e si possono rilevare progressi in qualche Paese ed in qualche ambito (ad esempio nella produzione di energia rinnovabile e nella mobilità elettrica). Occorre costruire su questa consapevolezza, ed affinare tutti gli strumenti a nostra disposizione per riuscire a realizzare la transizione verso un mondo più giusto, sostenibile, e decarbonizzato.