

## CLIMATE CHANGE 2021 – LE BASI FISICO-SCIENTIFICHE: I MESSAGGI PRINCIPALI DEL RAPPORTO

*A cura del Focal Point IPCC per l'Italia\**

### Lo stato attuale del clima

*Rispetto al Quinto rapporto di valutazione dell'IPCC (AR5) sono migliorate le stime basate sulle osservazioni e le informazioni dagli archivi paleoclimatici, che forniscono una visione completa di ogni componente del sistema climatico e dei suoi cambiamenti fino ad oggi. Nuove simulazioni dei modelli climatici, nuove analisi e metodi che combinano numerose evidenze, portano ad una migliore comprensione dell'influenza umana su un'ampia gamma di variabili climatiche, compresi gli estremi meteo-climatici.*

È inequivocabile che l'influenza umana ha riscaldato l'atmosfera, l'oceano e le terre emerse. Si sono verificati cambiamenti diffusi e rapidi nell'atmosfera, nell'oceano, nella criosfera e nella biosfera.

- Gli aumenti osservati nelle concentrazioni di gas serra (greenhouse gases, GHG) dal 1750 circa sono inequivocabilmente causati da attività umane. Dal 2011 le concentrazioni in atmosfera hanno continuato ad aumentare, raggiungendo nel 2019 medie annuali di 410 ppm per l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), 1.866 ppb per il metano (CH<sub>4</sub>), e 332 ppb per il protossido di azoto (N<sub>2</sub>O).
- La temperatura superficiale globale nel periodo 2001-2020 è stata di 0,99°C superiore a quella del periodo 1850-1900, ed è stata più alta di 1,09°C nel periodo 2011-2020 rispetto al periodo 1850-1900, con aumenti maggiori sulla terraferma (1,59°C) rispetto all'oceano (0,88°).
- Le precipitazioni globali medie sulla terraferma sono aumentate dal 1950, e più rapidamente a partire dagli anni '80. L'influenza umana ha probabilmente contribuito al pattern di cambiamento delle precipitazioni dalla metà del XX° secolo, e ha molto probabilmente contribuito al pattern di cambiamento della salinità dell'oceano superficiale.
- L'influenza umana è la causa principale del ritiro dei ghiacciai a livello globale dagli anni '90, della diminuzione del ghiaccio. Questa diminuzione è di circa il 40% in settembre (mese

del minimo annuale). Inoltre, le attività umane hanno contribuito alla diminuzione della copertura nevosa primaverile dell'emisfero settentrionale dal 1950 e allo scioglimento superficiale osservato della calotta glaciale della Groenlandia negli ultimi due decenni.

- Lo strato superficiale dell'oceano (0-700 m) si è riscaldato a partire dagli anni '70 e le emissioni di CO<sub>2</sub> causate dall'uomo sono la causa dell'attuale acidificazione globale dell'oceano superficiale.
- Il livello medio del mare globale è aumentato di 0,20 m tra il 1901 e il 2018 e il tasso medio di innalzamento è stato di 1,3 mm yr<sup>-1</sup> tra il 1901 e il 1971. Le attività umane sono la principale causa di questo innalzamento. Recentemente tra il 2006 e il 2018 il tasso di innalzamento ha raggiunto i 3,7 mm per anno.
- Le zone climatiche si sono spostate verso il polo in entrambi gli emisferi, ed il periodo vegetativo si è allungato in media fino a due giorni per decennio dagli anni '50 alle medie latitudini in entrambi gli emisferi.
- L'influenza umana ha riscaldato il clima a un ritmo (velocità) senza precedenti negli ultimi 2000 anni.

La portata dei recenti cambiamenti nel sistema climatico è senza precedenti da molti secoli e molte migliaia di anni.

- Nel 2019, le concentrazioni atmosferiche di CO<sub>2</sub> sono state le più alte degli ultimi 2 milioni di anni, e le concentrazioni di CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O erano le più alte degli ultimi 800.000 anni. Dal 1750, gli aumenti delle concentrazioni di CO<sub>2</sub> (47%) e CH<sub>4</sub> (156%) superano di gran lunga i cambiamenti naturali plurimillenni tra periodi glaciali e interglaciali degli ultimi 800.000 anni.
- La temperatura superficiale globale è aumentata più velocemente a partire dal 1970 che in qualsiasi altro periodo di 50 anni degli ultimi 2000 anni. Durante il decennio 2011-2020 le temperature hanno superato quelle del più recente periodo caldo multi-centenario, circa 6500 anni fa.
- Nel periodo 2011-2020, la media annuale dell'area di ghiaccio marino artico ha raggiunto il

\* <https://ipccitalia.emcc.it/>

livello più basso dal 1850. Nel periodo tardo estivo è stata inferiore a qualsiasi altro periodo degli ultimi 1000 anni. La natura globale del ritiro dei ghiacciai a partire dagli anni '50 è senza precedenti negli ultimi 2000 anni.

- Il livello medio del mare è aumentato più velocemente a partire dal 1900 che in ogni secolo precedente degli ultimi 3000 anni. L'oceano si è riscaldato più velocemente nell'ultimo secolo che dalla fine dell'ultima deglaciazione (circa 11.000 anni fa).

I cambiamenti climatici stanno già influenzando molti estremi meteorologici e climatici, come ondate di calore, precipitazioni intense, siccità e cicloni tropicali, in ogni regione del mondo, e si sono rafforzate rispetto *al precedente Rapporto di Valutazione dell'IPCC (AR5)* le prove che attribuiscono queste variazioni negli estremi all'influenza umana.

- Gli estremi di caldo (incluse le ondate di calore) sono diventati più frequenti e più intensi nella maggior parte delle terre emerse a partire dagli anni '50 del XX secolo, mentre gli estremi di freddo (incluse le ondate di freddo) sono diventati meno frequenti e meno gravi; il cambiamento climatico indotto dall'uomo è il principale motore di questi cambiamenti. Alcuni recenti estremi di caldo osservati nell'ultimo decennio sarebbero stati estremamente improbabili senza l'influenza umana sul sistema climatico.
- Le ondate di calore marine sono raddoppiate in frequenza dagli anni '80.
- La frequenza e l'intensità degli eventi di precipitazione intensa sono aumentate a partire dagli anni '50 sulla maggior parte delle terre emerse.
- In alcune regioni, è aumentata la siccità agricola ed ecologica<sup>[1]</sup> per via dell'aumento dell'evapotraspirazione dei terreni.
- La diminuzione delle precipitazioni monsoniche terrestri globali dagli anni '50 agli anni '80 è in parte attribuita alle emissioni di aerosol

nell'emisfero settentrionale causate dall'uomo, ma gli aumenti da allora sono dovuti all'aumento delle concentrazioni di gas serra e alla variabilità interna su scala decennale o pluri-decennale;

- È probabile che la percentuale di forti cicloni tropicali (categoria 3-5) sia aumentata negli ultimi quattro decenni, e che la latitudine in cui i cicloni tropicali nel Pacifico settentrionale occidentale raggiungono il picco di intensità si sia spostata verso nord.
- L'influenza umana ha aumentato la probabilità di eventi estremi combinati<sup>[2]</sup> a partire dagli anni '50.

Una migliore conoscenza dei processi climatici, delle evidenze paleoclimatiche e della risposta del sistema climatico all'aumento del forzante radiativo fornisce una migliore stima della sensibilità climatica all'equilibrio di 3°C con un intervallo ridotto rispetto *al precedente Rapporto di Valutazione dell'IPCC (AR5)*.

- Il forcing radiativo causato dall'uomo che ha riscaldato il sistema climatico è di 2,72 W m<sup>-2</sup> nel 2019 rispetto al 1750. Questo riscaldamento è dovuto principalmente all'aumento delle concentrazioni di gas serra, in parte ridotto dal raffreddamento dovuto all'aumento delle concentrazioni di aerosol.
- Il tasso medio osservato di riscaldamento del sistema climatico è aumentato da 0,50 W m<sup>-2</sup> per il periodo 1971-2006, a 0,79 W m<sup>-2</sup> per il periodo 2006-2018.
- Il riscaldamento del sistema climatico ha causato l'aumento del livello medio del mare a livello globale attraverso la perdita di ghiaccio terrestre e l'espansione termica dovuta al riscaldamento degli oceani. L'espansione termica giustifica il 50% dell'innalzamento del livello del mare nel periodo 1971-2018, mentre la perdita di ghiaccio dai ghiacciai ha contribuito per il 22%, le calotte di ghiaccio per il 20% e i cambiamenti nell'immagazzinamento delle acque terrestri per l'8%.

[1] *Siccità agricola ed ecologica (a seconda del bioma interessato): un periodo con un deficit anormale di umidità del suolo, dato dalla carenza combinata di precipitazioni e dall'eccesso di evapotraspirazione, che, durante la stagione di crescita, compromette la produzione agricola o il funzionamento dell'ecosistema in generale. I cambiamenti osservati durante le siccità meteorologiche (deficit di precipitazioni) e idrologiche (deficit di flusso) sono distinti da quelli delle siccità agricola ed ecologica.*

[2] *Gli eventi estremi composti sono la combinazione di più fattori trainanti che contribuiscono al rischio sociale o ambientale. Esempi includono ondate di calore e siccità concomitanti, inondazioni composte (per esempio, un'ondata di maltempo in combinazione con piogge e/o flussi fluviali estremi), condizioni meteorologiche di incendio composte (per esempio, una combinazione di condizioni di caldo, secco e vento), o estremi concomitanti in luoghi diversi.*

## Possibili futuri climatici

*Cinque nuovi scenari di emissioni sono stati usati per esplorare la risposta climatica a una gamma più ampia di GHG, usi del suolo e inquinanti atmosferici rispetto a quelli valutati nel precedente Rapporto di Valutazione dell'IPCC (AR5). Questi scenari guidano le proiezioni dei modelli climatici e tengono conto dell'attività solare e vulcanica.*

È atteso che la temperatura superficiale globale continuerà ad aumentare almeno fino alla metà del secolo in tutti gli scenari di emissioni considerati. Il riscaldamento globale di 1,5°C e 2°C sarà superato durante il corso del XXI° secolo a meno che non si verifichino nei prossimi decenni profonde riduzioni delle emissioni di CO<sub>2</sub> e di altri gas serra.

- Rispetto al periodo 1850-1900, la temperatura superficiale globale media nel 2081-2100 sarà molto probabilmente più alta di 1,0°C-1,8°C nello scenario di emissioni di GHG molto basso (SSP1-1,9), di 2,1°C-3,5°C nello scenario intermedio (SSP2-4,5) e di 3,3°C-5,7°C nello scenario di emissioni molto alto (SSP5-8,5). L'ultima volta che la temperatura superficiale globale ha superato i 2,5°C è stato più di 3 milioni di anni fa.
- I 2°C verrebbero superati durante il XXI° secolo negli scenari di emissioni di GHG alti (SSP3-7.0 e SSP5-8.5) e molto probabilmente anche nello scenario intermedio (SSP2-4.5). Negli scenari di emissioni di GHG bassi, è estremamente improbabile che il riscaldamento globale di 2°C venga superato nello scenario SSP1-1.9, e improbabile nello scenario SSP1-2.6<sup>[3]</sup>. Il superamento dei 2°C nel medio termine (2041-2060) è molto probabile nello scenario di emissioni di GHG molto elevate (SSP5-8.5), e probabile negli scenari di emissioni intermedie ed elevate.
- Il riscaldamento globale di 1,5°C (rispetto al 1850-1900) verrebbe superato nel corso del XXI secolo negli scenari intermedio, alto e molto alto (SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5, rispettivamente). Nel breve termine (2021-2040) è molto probabile che 1.5°C venga superato nello scenario di emissioni molto alte (SSP5-8,5), è pro-

babile che venga superato negli scenari intermedio e alto (SSP2-4,5 e SSP3-7,0). È probabile che non venga superato nello scenario di emissioni di GHG basse (SSP1-2,6) ed è ancora più probabile che non venga raggiunto nello scenario di emissioni molto basse (SSP1-1,9). Inoltre, nello scenario a emissioni molto basse (SSP1-1.9), c'è una probabilità superiore al 50% che la temperatura superficiale globale scenda nuovamente al di sotto di 1,5°C verso la fine del XXI secolo, con un superamento temporaneo di non più di 0,1°C al di sopra di 1,5°C.

- La temperatura superficiale globale in ogni singolo anno può variare al di sopra o al di sotto della tendenza a lungo termine indotta dall'uomo, a causa della sostanziale variabilità naturale<sup>[4]</sup>. Il verificarsi di singoli anni con variazioni di temperatura media globale al di sopra di un certo livello, ad esempio 1,5°C o 2°C, relative al periodo 1850-1900 non implica che questo livello di riscaldamento globale sia stato raggiunto.

Molti cambiamenti nel sistema climatico diventano più grandi in relazione diretta all'aumento del riscaldamento globale. Questi includono l'aumento della frequenza e dell'intensità degli estremi caldi, delle ondate di calore marine, delle forti precipitazioni, della siccità agricola ed ecologica in alcune regioni, della proporzione di cicloni tropicali intensi, della riduzione del ghiaccio marino artico, della copertura nevosa e del permafrost.

- È certo che la superficie terrestre continuerà a riscaldarsi più di quella oceanica (di 1,4/ 1,7 volte di più) e che l'Artico continuerà a riscaldarsi a una velocità due volte superiore rispetto a quella della temperatura superficiale globale.
- Con ogni ulteriore incremento del riscaldamento globale, i cambiamenti negli estremi continueranno ad aumentare. Ad esempio, ogni 0,5°C in più di riscaldamento globale provoca aumenti chiaramente percepibili dell'intensità e della frequenza degli estremi di caldo, comprese le ondate di calore e le forti precipitazioni, nonché siccità agricola ed ecologica in alcune regioni. Alcuni eventi estremi avranno aumenti senza precedenti anche con un ulteriore riscaldamento.

[3] *SSP1-1.9 e SSP1-2.6 sono scenari che iniziano nel 2015 e hanno emissioni di GHG molto basse e basse ed emissioni di CO<sub>2</sub> che diminuiscono fino allo zero netto intorno al 2050, seguiti da vari livelli di emissioni negative di CO<sub>2</sub>.*

[4] *La variabilità naturale si riferisce alle fluttuazioni climatiche che si verificano senza alcuna influenza umana, cioè la variabilità interna combinata con la risposta a fattori naturali esterni come le eruzioni vulcaniche, i cambiamenti nell'attività solare e, su scale temporali più lunghe, gli effetti orbitali e la tettonica a placche.*

to globale anche a 1,5°C rispetto al periodo pre-industriale.

- Si prevede che alcune regioni alle medie latitudini e semi-aride e la regione del monzone sudamericano, vedranno il più alto aumento della temperatura media dei giorni più caldi (di circa 1,5/2 volte il tasso di riscaldamento globale). L'Artico sperimenterà il più alto aumento della temperatura media dei giorni più freddi (di circa 3 volte il tasso di riscaldamento globale).
- È molto probabile che, con un ulteriore riscaldamento globale, eventi di forte precipitazione si intensifichino e diventino più frequenti nella maggior parte delle regioni. Su scala globale, si prevede che gli eventi estremi di precipitazione giornaliera si intensificheranno di circa il 7% per ogni 1°C di riscaldamento globale. La proporzione di cicloni tropicali intensi (categorie 4-5) e le velocità del vento di picco dei cicloni più intensi aumenteranno su scala globale.
- Si prevede che un ulteriore riscaldamento amplifichi ulteriormente lo scioglimento del permafrost, la perdita della copertura nevosa stagionale, del ghiaccio terrestre e del ghiaccio marino artico. È probabile che l'Artico sarà praticamente privo di ghiaccio marino a settembre almeno una volta prima del 2050, con occorrenze più frequenti per livelli di riscaldamento più elevati.

Si prevede che un continuo riscaldamento globale intensifichi ulteriormente il ciclo dell'acqua su scala globale, compresa la sua variabilità, le precipitazioni monsoniche e la gravità degli eventi di precipitazione e siccitosi.

- Il ciclo globale dell'acqua continuerà ad intensificarsi con l'aumento della temperatura globale; le precipitazioni e i flussi d'acqua superficiali dovrebbero diventare più variabili nella maggior parte delle regioni terrestri, sia a scala stagionale, che di anno in anno. Si prevede che le precipitazioni terrestri medie annuali aumenteranno dello 0-5% nello scenario di emissioni GHG molto basse (SSP1-1.9), e dell'1-13% nello scenario di emissioni molto alte (SSP5-8.5) entro il 2081-2100 rispetto al 1995-2014. Si prevede che le precipitazioni aumenteranno alle alte latitudini, nel Pacifico equatoriale e in alcune regioni monsoniche, ma diminuiranno in alcune regioni subtropicali e in aree limitate dei tropici.
- Un clima più caldo intensificherà gli eventi meteorologici e climatici molto umidi e molto sec-

chi, con implicazioni per inondazioni o siccità, ma la localizzazione e la frequenza di questi eventi dipendono dai cambiamenti nella circolazione atmosferica regionale.

- Si prevede che le precipitazioni monsoniche aumentino nel medio-lungo termine su scala globale, in particolare nell'Asia meridionale e sudorientale, nell'Asia orientale e nell'Africa occidentale, tranne che nell'estremo ovest del Sahel.

Negli scenari in cui aumentano le emissioni di CO<sub>2</sub>, si prevede che i serbatoi di carbonio oceanici e terrestri saranno meno efficaci nel rallentare l'accumulo della CO<sub>2</sub> in atmosfera.

- Sulla base delle proiezioni dei modelli, nello scenario intermedio che stabilizza le concentrazioni atmosferiche di CO<sub>2</sub> durante questo secolo (SSP2-4.5), i tassi di CO<sub>2</sub> assorbiti dalla terra e dagli oceani dovrebbero diminuire nella seconda metà del XXI secolo. Negli scenari di emissioni di GHG bassi e molto bassi (SSP1-2.6, SSP1-1.9), la terra e gli oceani iniziano ad assorbire meno carbonio in risposta al calo delle concentrazioni atmosferiche di CO<sub>2</sub> e, nello scenario SSP1-1.9, diventano una debole fonte netta di emissioni entro la fine del secolo.
- L'ampiezza dei feedback tra i cambiamenti climatici e il ciclo del carbonio diventa più grande ma anche più incerta negli scenari ad alte emissioni di CO<sub>2</sub>. Ulteriori risposte degli ecosistemi al riscaldamento non ancora completamente riflesse nei modelli climatici (come i flussi di CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> dalle zone paludose, il disgelo del permafrost e gli incendi) potrebbero aumentare ulteriormente le concentrazioni di questi gas in atmosfera.

Molti cambiamenti dovuti alle emissioni di GHG passate e future sono irreversibili per secoli o millenni, in particolar modo i cambiamenti nell'oceano, nelle calotte glaciali e nel livello del mare.

- Le emissioni passate di GHG dal 1750 porteranno l'oceano globale ad un riscaldamento futuro. La stratificazione dell'oceano superiore, l'acidificazione e la deossigenazione degli oceani continueranno ad aumentare nel XXI secolo, a tassi variabili a seconda dalle emissioni future, e sono potenzialmente irreversibili per secoli e millenni.
- I ghiacciai montani e polari sono destinati a continuare a sciogliersi per decenni/secoli. La per-

dita di carbonio dal permafrost in seguito al suo disgelo è irreversibile su scale temporali centenarie. La continua perdita di ghiaccio nel corso del XXI secolo è virtualmente certa per la calotta glaciale della Groenlandia e probabile per la calotta glaciale antartica. Conseguenze a bassa probabilità e alto impatto (derivanti da processi di instabilità della calotta glaciale caratterizzati da profonda incertezza che in alcuni casi raggiungerebbero punti critici<sup>[5]</sup>) potrebbero risultare in un forte aumento della perdita di ghiaccio dalla calotta antartica per secoli in scenari di emissioni elevate di GHG.

- Il livello medio globale del mare continuerà ad aumentare nel corso del XXI secolo. Rispetto al 1995-2014, l'aumento sarà probabilmente di 0,28-0,55 m entro il 2100 nello scenario di emissioni di GHG molto basse (SSP1-1.9), e 0,63-1,01 m nello scenario di emissioni molto elevate (SSP5-8.5). Entro il 2150 l'aumento è di 0,37-0,86 m nello scenario molto basso (SSP1-1.9) e di 0,98-1,88 m nello scenario molto elevato (SSP5-8.5). Un innalzamento intorno a 2m entro il 2100 e 5 m entro il 2150 in uno scenario di emissioni di gas serra molto alto (SSP5-8.5) non può essere escluso.
- Nel lungo termine, il livello del mare è destinato ad aumentare per secoli/millenni a causa del continuo riscaldamento profondo degli oceani e dello scioglimento delle calotte glaciali, e rimarrà elevato per migliaia di anni. Nei prossimi 2000 anni, il livello medio globale del mare potrebbe aumentare di circa 2-3 m se il riscaldamento sarà limitato a 1,5°C e di 2-6 m se sarà limitato a 2°C.

### Informazioni climatiche per la valutazione del rischio e l'adattamento a livello regionale

*Le informazioni legate alla fisica del clima considerano il modo in cui il sistema climatico risponde all'interazione tra influenza umana, fattori naturali e variabilità interna. Queste conoscenze, incluse conseguenze a bassa probabilità e alto impatto, forniscono informazioni ai servizi climatici per la valutazione dei rischi climatici e la pianificazione dell'adattamento. Le informazioni fisiche sulla fisica*

[5] *Si parla di conseguenze a bassa probabilità e ad alto impatto quando la probabilità di verificarsi è bassa o non ben nota, ma l'impatto potenziale sulla società e sugli ecosistemi potrebbe essere alto. Un punto critico (tipping point) è una soglia critica oltre la quale un sistema si riorganizza, spesso in modo brusco e/o irreversibile.*

*del clima a scala globale, regionale e locale sono sviluppate sulla base di molteplici evidenze, tra cui osservazioni, risultati dei modelli climatici e strumenti diagnostici sviluppati su misura.*

I fattori naturali e la variabilità interna<sup>[6]</sup> regoleranno i cambiamenti causati dall'uomo, in particolare modo su scala regionale e nel breve termine, con effetti minimi sul riscaldamento globale di lungo periodo. Queste modulazioni su scale temporali decennali o multi-decennali sono importanti da considerare nella pianificazione dell'intera gamma di possibili cambiamenti.

- La temperatura superficiale globale registrata storicamente evidenzia che la variabilità su scala decennale ha potenziato e mascherato i cambiamenti sottostanti causati dall'uomo nel lungo termine, e questa variabilità continuerà in futuro. Per esempio, la variabilità interna su scala decennale e le variazioni dei driver solari e vulcanici hanno parzialmente mascherato il riscaldamento globale superficiale causato dall'uomo nel periodo 1998-2012, con distinzioni regionali e stagionali pronunciate. Tuttavia, il riscaldamento del sistema climatico è continuato durante questo periodo, e ciò si riflette nel continuo riscaldamento dell'oceano e nell'aumento di estremi caldi nelle aree continentali
- I cambiamenti causati dall'uomo previsti nelle condizioni climatiche medie e nei driver di impatto climatico (CID)<sup>[7]</sup>, inclusi gli estremi, saranno o amplificati o attenuati dalla variabilità interna. Un raffreddamento a breve termine, in qualsiasi luogo, sarebbe consistente con l'aumento della temperatura superficiale globale dovuto all'influenza umana.
- La variabilità interna è stata in gran parte responsabile dell'amplificazione e dell'attenuazione dei cambiamenti causati dall'uomo nelle precipitazioni medie da decennali a multi-decennali osservate in molte regioni terrestri.

[6] *I principali fenomeni di variabilità interna includono El Niño-Southern Oscillation, la variabilità su scala decennale del Pacifico e la variabilità multidecennale dell'Atlantico attraverso la loro influenza regionale.*

[7] *I driver di impatto climatico (CID) sono condizioni fisiche del sistema climatico (ad esempio, medie, eventi, estremi) che influenzano un elemento della società o degli ecosistemi. A seconda della tolleranza del sistema, i CID e i loro cambiamenti possono essere dannosi, benefici, neutri, o un misto di entrambi a seconda degli elementi del sistema e delle regioni con cui interagiscono.*

- Sulla base delle evidenze paleoclimatiche e storiche, è probabile che si verifichi nel corso del XXI° secolo almeno una grande eruzione vulcanica esplosiva. Tale eruzione ridurrebbe la temperatura superficiale globale e le precipitazioni, specialmente sulla terraferma, per uno-tre anni, altererebbe la circolazione monsonica globale, modificherebbe le precipitazioni estreme e cambierebbe molte CID. Tale evento andrebbe a mascherare temporaneamente e parzialmente il cambiamento climatico causato dall'uomo.

Con un ulteriore riscaldamento globale, si prevede che ogni regione sperimenterà sempre più cambiamenti concomitanti e multipli negli eventi climatici capaci di generare un impatto su società ed ecosistemi (CID). Questi sarebbero più diffusi a 2°C rispetto che a 1,5°C e ancora più diffusi e/o pronunciati per livelli di riscaldamento più elevati.

- In tutte le regioni si prevede un ulteriore aumento di CID caldi e una diminuzione di CID freddi. Ulteriori diminuzioni sono previste nel permafrost, nella neve, nei ghiacciai e nelle calotte glaciali, nei laghi e nel ghiaccio marino artico. Questi cambiamenti saranno maggiori con un riscaldamento globale di 2°C rispetto che a 1,5°C. Per esempio, si prevede che soglie critiche di caldo per l'agricoltura e la salute saranno superate più frequentemente a livelli più alti di riscaldamento globale.
- Con un riscaldamento globale di 1,5°C, si prevede che le precipitazioni forti e le relative inondazioni si intensificheranno e saranno più frequenti nella maggior parte dell'Africa, Asia, Nord America ed Europa. Inoltre, si prevedono delle siccità agricole ed ecologiche più frequenti e/o gravi in alcune regioni di tutti i continenti, tranne l'Asia.
- Con un riscaldamento globale di 2°C e oltre, gli eventi siccitosi e di forte precipitazione aumenteranno e saranno più intensi rispetto a quanto succederà per un aumento di temperatura globale di 1,5 C. Si prevede che le forti precipitazioni e gli eventi alluvionali diventeranno più intensi e frequenti nelle isole del Pacifico, in molte regioni del Nord America e dell'Europa e in alcune regioni dell'Australia e dell'America centrale e meridionale. In diverse regioni dell'Africa, del Sud America e dell'Europa si prevede un aumento della frequenza e/o gravità delle siccità agricole ed ecologiche; aumenti sono previsti anche in Australia, in America centrale e del nord e nei

Caraibi. Si prevede che le precipitazioni medie aumentino in tutte le regioni polari, nel Nord Europa e nel Nord America, nella maggior parte delle regioni asiatiche e in due regioni del Sud America.

- Cambiamenti specifici in alcune regioni includono l'intensificazione dei cicloni tropicali e/o delle tempeste extratropicali, l'aumento delle inondazioni fluviali, la riduzione delle precipitazioni medie e l'aumento dell'aridità e degli incendi.
- L'innalzamento medio regionale del livello del mare continuerà per tutto il XXI secolo, eccetto in poche regioni che hanno sostanziali tassi di sollevamento geologico del terreno.
- A causa dell'innalzamento relativo del livello del mare, si prevede che entro il 2100 eventi estremi che nel recente passato si verificavano una volta ogni 100 anni si verificheranno annualmente in più della metà delle località di misurazione delle maree. L'innalzamento relativo del livello del mare contribuisce all'aumento della frequenza e della gravità delle inondazioni costiere alle quote più basse e all'erosione costiera lungo la maggior parte delle coste sabbiose.
- Le città intensificano il riscaldamento indotto dall'uomo a livello locale, e un'ulteriore urbanizzazione, insieme a temperature estreme più frequenti, aumenterà la gravità delle ondate di calore. L'urbanizzazione aumenta anche le precipitazioni medie e intense, e la conseguente intensità di deflusso. Nelle città costiere, la combinazione di eventi estremi più frequenti a livello del mare e di eventi estremi di pioggia/deflusso dei fiumi renderà più probabili le inondazioni.

Esiti del cambiamento climatico a bassa probabilità, come il collasso della calotta glaciale, bruschi cambiamenti nella circolazione oceanica, alcuni eventi estremi combinati e un riscaldamento notevolmente maggiore di quello stimato non possono essere esclusi e fanno parte della valutazione del rischio.

- Un (poco probabile) riscaldamento molto elevato porterebbe a impatti potenzialmente molto significativi, come ondate di calore più intense e più frequenti, forti precipitazioni e rischi elevati per i sistemi umani ed ecologici.
- La possibilità che si verifichino esiti del cambiamento climatico a bassa probabilità e alto impatto aumenta con livelli più alti di riscaldamento globale. Non si possono escludere cambiamenti improvvisi e superamento di punti cri-

tici del sistema climatico in risposta al riscaldamento, come un forte aumento dello scioglimento della calotta antartica e il deperimento delle foreste.

- È molto probabile che l'Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) si indebolisca nel corso del XXI secolo, in tutti gli scenari di emissione, ed è possibile un brusco collasso prima del 2100. Se tale collasso dovesse verificarsi, questo causerebbe bruschi cambiamenti nell'andamento degli eventi meteo e nel ciclo dell'acqua su scala regionale.
- Eventi naturali imprevedibili e rari, non collegati all'influenza umana sul clima, possono portare a conseguenze a bassa probabilità e alto impatto. Per esempio, una sequenza di grandi eruzioni vulcaniche esplosive nel giro di decenni si è verificata in passato, causando sostanziali perturbazioni del clima globale e regionale per diversi decenni. Tali eventi non possono essere esclusi in futuro, ma a causa della loro intrinseca imprevedibilità non sono inclusi nella serie illustrativa di scenari a cui si fa riferimento nel rapporto.

### Limitare i cambiamenti climatici futuri

*Rispetto al precedente Rapporto di Valutazione dell'IPCC (AR5), sono migliorate le stime dei budget di carbonio rimanenti. Gli scenari futuri possibili includono anche azioni di controllo dell'inquinamento atmosferico per valutare in maniera coerente gli effetti delle varie ipotesi sulle proiezioni climatiche e sull'inquinamento atmosferico. È migliorata la capacità di determinare quando la risposta climatica alle riduzioni delle emissioni si distingue dalla variabilità naturale climatica, inclusa la variabilità interna e le risposte a fattori forzanti naturali.*

Limitare il riscaldamento globale ad un livello specifico richiede una limitazione delle emissioni cumulative di CO<sub>2</sub> che raggiunga emissioni zero nette, insieme a forti riduzioni delle emissioni degli altri gas serra. Forti riduzioni delle emissioni di metano (CH<sub>4</sub>) limiterebbero anche l'effetto di riscaldamento risultante dalla diminuzione dell'inquinamento da aerosol e migliorerebbero la qualità dell'aria.

- C'è una relazione quasi lineare tra le emissioni cumulative di CO<sub>2</sub> antropiche e il riscaldamento globale: ogni 1000 Gt CO<sub>2</sub> di emissioni cumulative di CO<sub>2</sub> la temperatura superficiale globale aumenta di circa 0,45°C (ogni Gt equivale a

un miliardo di tonnellate). Questa quantità è indicata come la risposta transitoria del clima alle emissioni cumulative di CO<sub>2</sub> (TCRE) e implica che raggiungere emissioni antropiche di CO<sub>2</sub> zero nette è un requisito necessario per stabilizzare l'aumento della temperatura globale indotta dall'uomo a qualsiasi livello, ma che limitare l'aumento della temperatura globale a un livello specifico implica limitare le emissioni cumulative di CO<sub>2</sub> entro un budget di carbonio<sup>[8]</sup>.

- Nel periodo 1850-2019, sono state emesse 2390 ± 240 Gt CO<sub>2</sub> di origine antropica.
- Le stime di bilancio del carbonio rimanente sono state rivalutate, e risultano simili al rapporto SR1.5 ma più grandi rispetto *al precedente Rapporto di Valutazione dell'IPCC (AR5)* a causa di miglioramenti nelle metodologie adottate.
- La rimozione antropica di CO<sub>2</sub> (CDR) ha il potenziale di rimuovere la CO<sub>2</sub> dall'atmosfera e di immagazzinarla in modo duraturo nei serbatoi. La CDR mira a compensare le emissioni residue per raggiungere emissioni zero nette di CO<sub>2</sub> o GHG. I metodi di CDR possono avere effetti potenzialmente ad ampio raggio sui cicli biogeochimici e sul clima, e possono avere effetti sulla disponibilità e la qualità dell'acqua, la produzione alimentare e la biodiversità.
- Se la rimozione antropica di CO<sub>2</sub> (CDR) portasse a emissioni globali nette negative, si abbasserebbe la concentrazione atmosferica di CO<sub>2</sub> e si invertirebbe l'acidificazione superficiale degli oceani. Le rimozioni ed emissioni antropiche di CO<sub>2</sub> sarebbero parzialmente compensate rispettivamente dal rilascio e dall'assorbimento di CO<sub>2</sub> da e verso i bacini di carbonio terrestri e oceanici.
- Se si raggiungessero e mantenessero emissioni globali nette negative di CO<sub>2</sub>, l'aumento globale della temperatura superficiale indotto dalla CO<sub>2</sub> sarebbe gradualmente invertito, ma altri cambiamenti climatici continuerebbero nella loro direzione attuale per decenni/ millenni. Per esempio, ci vorrebbero diversi secoli/millenni

[8] *Il termine budget di carbonio si riferisce alla quantità massima di emissioni globali nette cumulative di CO<sub>2</sub> antropogenica che risulterebbe nella limitazione del riscaldamento globale a un dato livello con una data probabilità, tenendo conto dell'effetto di altri forzanti climatici antropogenici. Le emissioni cumulative storiche di CO<sub>2</sub> determinano in larga misura il riscaldamento fino ad oggi, mentre le emissioni future sono responsabili di un ulteriore riscaldamento futuro. Il bilancio del carbonio rimanente indica quanta CO<sub>2</sub> potrebbe ancora essere emessa mantenendo il riscaldamento al di sotto di un livello di temperatura specifico.*

perché il livello medio globale del mare inverte la rotta anche con grandi emissioni nette negative di CO<sub>2</sub>.

- Cambiamenti simultanei nelle emissioni di CH<sub>4</sub>, aerosol e precursori dell'ozono, che contribuiscono anche all'inquinamento atmosferico, portano ad un riscaldamento netto della superficie globale nel breve e nel lungo periodo. Nel lungo termine, questo riscaldamento è inferiore negli scenari che assumono un controllo dell'inquinamento atmosferico combinato con forti e sostenute riduzioni delle emissioni di CH<sub>4</sub>. A causa del breve tempo di vita in atmosfera sia del CH<sub>4</sub> che degli aerosol, questi effetti sul clima si compensano parzialmente a vicenda. Le riduzioni di CH<sub>4</sub> contribuiscono anche a migliorare la qualità dell'aria riducendo l'ozono superficiale globale.

Gli scenari con emissioni di GHG bassi (SSP1-1.9 e SSP1-2.6) portano in pochi anni ad effetti percepibili sulle concentrazioni di GHG e di aerosol, e sulla qualità dell'aria.

- Le riduzioni delle emissioni nel 2020 associate alle misure per ridurre la diffusione del COVID-19

hanno portato a effetti temporanei ma rilevabili sull'inquinamento atmosferico, e un temporaneo aumento del forcing radiativo totale, dovuto principalmente alle riduzioni del raffreddamento causato dagli aerosol. Le concentrazioni di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera hanno continuato ad aumentare nel 2020, senza una diminuzione rilevabile del tasso di crescita osservato della CO<sub>2</sub>.

- Le riduzioni delle emissioni di GHG portano anche a miglioramenti nella qualità dell'aria. Tuttavia, nel breve termine (2021-2040), anche negli scenari con una forte riduzione dei GHG, questi miglioramenti non sono sufficienti a raggiungere le linee guida sulla qualità dell'aria dell'Organizzazione Mondiale della Sanità in molte regioni inquinate. Gli scenari con riduzioni mirate delle emissioni di inquinanti atmosferici portano a miglioramenti più rapidi nella qualità dell'aria rispetto alle riduzioni delle sole emissioni di GHG nei primi anni, ma a partire dal 2040, sono previsti miglioramenti maggiori negli scenari che combinano gli sforzi per ridurre sia gli inquinanti atmosferici che le emissioni di GHG.

