

Filippo Giorgi,

International Centre for Theoretical Physics, Italia

giorgi@ictp.it

Abstract. Il sistema climatico terrestre è un sistema complesso e non lineare, la cui evoluzione futura non può essere prevista in modo deterministico, ma solo stimata in termini probabilistici attraverso scenari di emissione e simulazioni modellistiche. In questo quadro, il rischio associato al cambiamento climatico può essere definito come l'interazione tra probabilità di eventi meteoroclimatici, esposizione e vulnerabilità. Le evidenze osservative e le proiezioni modellistiche indicano un aumento senza precedenti delle concentrazioni di gas serra e della temperatura media globale (IPCC, 2021), con conseguente intensificazione del ciclo idrologico, incremento della frequenza e severità degli eventi estremi, fusione dei ghiacciai e innalzamento del livello del mare. Le aree urbane e costiere risultano particolarmente esposte, mentre regioni quali il Mediterraneo si configurano come hotspot climatici, caratterizzati da un riscaldamento superiore alla media globale. La riduzione del rischio richiede un approccio integrato che combini mitigazione delle emissioni e politiche di adattamento su scala locale, al fine di evitare il superamento di punti di non ritorno del sistema climatico e mantenere i rischi entro soglie compatibili con lo sviluppo sostenibile.

Parole chiave: Rischio climatico; Eventi estremi; Vulnerabilità; Esposizione; Adattamento; Mitigazione.

Il sistema climatico terrestre è formato da diverse componenti che interagiscono fra di loro in maniera non-lineare: atmosfera, oceani, biosfera, criosfera e litosfera (tramite il vulcanismo). A queste, dall'inizio dell'era industriale, o il cosiddetto Antropocene, dobbiamo aggiungere l'antroposfera, cioè la società umana. Ciascuna di queste componenti, poi, è essa stessa un sistema complesso, non-lineare e caotico, cosa che rende il sistema Terra uno dei più complessi studiati dalla scienza odierna. Questa complessità intrinseca rende di fatto impossibile prevedere in maniera deterministica l'evoluzione del clima futuro. A questo riguardo, per esempio, nessuno può prevedere come si evolveranno i forzanti esterni del clima, come le emissioni di gas serra dovute allo sviluppo socio-economico della società, le eruzioni vulcaniche o l'attività del sole. L'obiettivo della "previsione" cli-

matica non è dunque quello di prevedere con accuratezza l'evoluzione del clima, ma di stimare il ventaglio di possibili condizioni climatiche future in risposta a ipotesi plausibili (chiamate scenari) di evoluzioni future dei forzanti esterni (per esempio gli scenari di emissione di gas serra). Questo processo deve anche incorporare il contributo della variabilità naturale interna del sistema climatico legata alla sua natura non-lineare e caotica. Ai possibili stati climatici futuri si può poi assegnare una certa probabilità usando tecniche per lo più basate sull'uso di insiemi di molte simulazioni di clima futuro con diversi modelli climatici, scenari di emissione e condizioni iniziali delle componenti più lente del sistema climatico (e.g. gli oceani). In altre parole, l'obiettivo della "previsione" climatica non è di simulare quale sarà l'evoluzione precisa del clima futuro ma di riprodurre il più accuratamente possibile la distribuzione di probabilità di tutte le plausibili evoluzioni.

Il concetto di rischio legato al cambiamento climatico va dunque considerato all'interno di questo contesto. In generale, il rischio viene definito come l'intersezione (o il prodotto) di tre variabili (Fig. 1): la probabilità di un certo impatto meteoroclimatico; l'esposizione di un soggetto a questo impatto; e la vulnerabilità del soggetto esposto all'impatto considerato. La probabilità di impatto meteoroclimatico può poi essere decomposta nella probabilità che accada un certo evento meteoroclimatico moltiplicata per l'impatto di questo evento sul territorio. Infatti, eventi ad alta probabilità ma basso impatto possono dare lo stesso contributo al rischio di eventi ad alto impatto ma bassa probabilità. Se una sola delle quantità che compongono il rischio è bassa o nulla, allora il rischio è basso o nullo. Per esempio, potrebbe esserci una alta probabilità di eventi piovosi

Climate Change Risk

Abstract. The Earth's climate system is a complex and non-linear system, whose future evolution cannot be predicted deterministically but only estimated probabilistically through emission scenarios and climate model simulations. Within this framework, climate change risk can be defined as the interaction among the probability of weather and climate events, exposure, and vulnerability. Observational evidence and model projections indicate unprecedented increases in greenhouse gas concentrations and global mean temperature (IPCC, 2021), resulting in hydrological cycle intensification, more frequent and severe extreme events, glacier retreat, and sea-level rise. Urban and coastal areas are particularly exposed, while regions such as the Mediterranean are recognised as climate hotspots, characterised by warming rates above the global average. Risk reduction requires an integrated approach combining emission mitigation

and locally tailored adaptation policies to avoid crossing climate system tipping points, and to keep risks within thresholds compatible with sustainable development.

Keywords: Climate risk; Extreme events; Vulnerability; Exposure; Adaptation; Mitigation.

The Earth's climate system is composed of several interacting components that influence one another in a non-linear manner, namely the atmosphere, the oceans, the biosphere, the cryosphere, and the lithosphere (through volcanism). Since the beginning of the industrial era, often referred to as the Anthropocene, the anthroposphere – that is, human society – must also be considered an integral component of the climate system. Each of these components is itself a complex, non-linear, and chaotic system. As a result,

the Earth system ranks among the most complex objects studied by modern science. This intrinsic complexity makes it effectively impossible to predict the future evolution of climate in a fully deterministic way. For example, the evolution of external climate forcing cannot be accurately foreseen. These include greenhouse gas emissions linked to socio-economic development, volcanic eruptions, and variations in solar activity. The objective of climate "prediction" is, therefore, not to forecast the precise evolution of climate. Rather, it is to estimate the range of possible future climatic conditions in response to plausible assumptions about the evolution of external forcing, commonly referred to as scenarios (for example, greenhouse gas emission scenarios). This process must also account for the internal natural variability of the climate system, which arises

con impatto di carattere alluvionale in una certa area, ma se nessuno vive in questa area (cioè si ha esposizione 0), o se i soggetti a questi eventi alluvionali hanno una tecnologia tale da non subire danni (cioè si ha 0 vulnerabilità), allora il rischio è nullo. Ne consegue che per ridurre il rischio associato al cambiamento climatico si può ridurre la probabilità di occorrenza di eventi meteorologici estremi tramite la mitigazione (vedi sotto), si può ridurre l'esposizione, per esempio non costruire edifici ai margini di fiumi che possano esondare, o diminuire la vulnerabilità, per esempio costruendo edifici più resistenti. Anche se il clima futuro non può essere previsto in maniera deterministica, le osservazioni e le simulazioni climatiche (che vengono solitamente chiamate "proiezioni" di clima futuro) ci danno diverse indicazioni su come alcune caratteristiche del sistema climatico stanno cambiando e continueranno a cambiare in risposta al riscaldamento globale. A questo riguardo, va chiarito che esiste ormai un larghissimo, se non quasi unanime, consenso all'interno della comunità scientifica che studia il cambiamento climatico che il riscaldamento globale è in atto ed è dovuto per la maggior parte alle emissioni di gas serra da attività umane, in primis le emissioni di anidride carbonica dall'uso di combustibili fossili e le emissioni di metano dall'uso di allevamenti intensivi e dalle perdite durante il processo di estrazione. Dall'inizio del ventesimo secolo, la concentrazione di anidride carbonica in atmosfera è aumentata di circa 50% e quella di metano è più che raddoppiata. In risposta a questi aumenti la temperatura globale è salita di circa 1.25 °C. Per tutte queste quantità le velocità di crescita sono senza precedenti almeno negli ultimi 11500 anni (il periodo dell'Olocene) (IPCC, 2021).



Quali sono dunque le modifiche del sistema climatico indotte dal riscaldamento globale che impattano maggiormente la società umana? Ovviamente ce ne sono tante, ma qui ne vogliamo sottolineare alcune che costituiscono forse i rischi maggiori per diversi settori socioeconomici. Una è l'"intensificazione del ciclo idrologico". Una atmosfera più calda è più energetica e può contenere più vapor d'acqua (per la legge di Clausius-Clapeyron). Di conseguenza, in queste condizioni quando piove tende a farlo più intensamente, e questo aumenta la probabilità, e quindi il rischio, di eventi estremi di carattere alluvionale. Al tempo stesso, i modelli ci dicono che la frequenza degli eventi piovosi tende a diminuire con il riscaldamento globale, cioè in media si allungano i periodi secchi, cosa che, insieme alle temperature più elevate, tende ad aumentare la probabilità e il rischio di eventi siccitosi. In altre parole, il riscaldamento globale porta ad un regime di piogge più intense ma meno frequenti. Infatti, osservazioni per gli ultimi 40 anni mostrano come la frequenza di eventi piovosi estremi e di eventi di carattere siccitoso sono

from its non-linear and chaotic nature. Probabilities can then be assigned to potential future climate states using approaches that primarily rely on ensembles of climate simulations. These ensembles combine different climate models, emission scenarios, and initial conditions, particularly for the slower components of the climate system, such as the oceans. In other words, the aim of climate "prediction" is not to reproduce a single, exact future trajectory, but to represent, as accurately as possible, the probability distribution of plausible climate evolution paths. The concept of climate-change risk must, therefore, be understood within this framework. In general, risk is defined as the intersection (or product) of three variables (Fig. 1), precisely the probability of a given meteorological or climatic impact, the exposure of a subject to that impact, and the vulnera-

bility of the exposed subject. The probability of a meteorological or climatic impact can be further decomposed into two elements, namely the likelihood of a specific event occurring, and the magnitude of its impact on a given territory. As a result, high-probability, low-impact events may contribute to overall risk in a manner comparable to low-probability, high-impact events. If any one of the three risk components is low or zero, the overall risk is correspondingly low or negligible. For example, a region may experience a high probability of flood-related precipitation events. However, if no one lives in that area (i.e., exposure is zero), or if the exposed population has technologies and infrastructure that prevent damage (i.e., vulnerability is low or zero), the resulting risk remains negligible. Climate-change risk can, therefore, be reduced by acting on any of its

components, precisely by lowering the probability of extreme meteorological events through mitigation (see below), by reducing exposure (for example, by avoiding construction in areas subject to flooding), or by decreasing vulnerability (for instance, through more resilient infrastructure). Although future climate cannot be predicted in a deterministic manner, observations and climate simulations – commonly referred to as climate projections – provide robust indications of how key characteristics of the climate system are changing, and are expected to continue changing in response to global warming. In this context, it is important to emphasise that there is now very broad, if not near-unanimous, scientific consensus that global warming is occurring, and that it is largely driven by greenhouse gas emissions from human activities.

These emissions are primarily associated with carbon dioxide released through fossil fuel combustion and methane emitted by intensive livestock farming, and by leakages during fossil-fuel extraction. Since the early twentieth century, atmospheric carbon dioxide concentrations have increased by approximately 50%, while methane concentrations have more than doubled. In response, global mean surface temperature has risen by about 1.25 °C. For all these variables, the observed rates of change are unprecedented over at least the past 11,500 years, corresponding to the Holocene period (IPCC, 2021). Which climate-system changes induced by global warming have the greatest impact on human society? While many changes are occurring, a subset poses particularly significant risks across multiple socio-economic

in aumento su molte aree del globo (IPCC, 2021). Tra gli effetti più evidenti del riscaldamento globale vi è l'aumento della frequenza e intensità delle ondate di calore, fenomeno che si sta riscontrando su quasi tutte le aree continentali e marine del globo (IPCC, 2021). Basti ricordare le diverse ondate di calore record che hanno colpito l'Europa negli ultimi 25 anni causando decine di migliaia di vittime e ingenti danni all'agricoltura. Un altro importante fenomeno legato al riscaldamento globale è quello della fusione dei ghiacciai continentali e del conseguente innalzamento del livello del mare. La maggior parte dei ghiacciai su tutti i continenti è già in fase di recessione, e in particolare la massa di quasi tutti i ghiacciai delle Alpi Europee è in forte diminuzione. Alcuni studi hanno stimato che anche nello scenario più ottimistico circa il 70% di tutti i ghiacciai Alpini è destinato a scomparire entro la fine del ventunesimo secolo. L'importanza dei ghiacciai risiede nel fatto che essi sono i maggiori serbatoi di acqua dolce sul pianeta, e quindi la loro fusione implica una perdita di questa risorsa che già oggi non è sufficiente per tutta la popolazione mondiale. L'acqua sarà probabilmente il più prezioso dei beni del ventunesimo secolo a causa del quale si potranno sviluppare forti tensioni geopolitiche. I ghiacci marini stanno subendo la stessa sorte dei ghiacciai continentali. Dati da satellite mostrano che la copertura dei ghiacci a fine estate in Artico è diminuita di quasi la metà rispetto agli anni '80, e molti ritengono che avremo un Artico senza ghiaccio a fine estate entro qualche decade. In Antartide la perdita dei ghiacci continentali riguarda per lo più le zone costiere dell'Antartide Occidentale e della penisola Antartica. Queste si manifestano spesso come eventi molto spettacolari di frantumazione di enormi banchise di ghiaccio che dal conti-

nente si estendono sul mare, come quello occorso alla banchisa Larsen B nel marzo del 2002.

L'acqua che fonde dai ghiacciai continentali, insieme con quella proveniente dalle grandi calotte di ghiaccio della Groenlandia e dell'Antartide Occidentale, confluisce negli oceani e contribuisce, insieme con l'espansione termica dell'acqua, all'innalzamento del livello del mare. Questo innalzamento aumenta la frequenza di eventi alluvionali costieri, mareggiate sempre più distruttive e intrusione di acqua marina nel suolo, e quindi costituisce un importante elemento rischio per le aree costiere. L'innalzamento del livello del mare è un tema centrale nell'ambito del dibattito sugli impatti del riscaldamento globale perché una grande e crescente porzione della popolazione mondiale risiede soprattutto nelle grandi aree urbane tropicali di paesi poveri e quindi in condizioni spesso degradate. Questo implica una alta esposizione insieme ad una forte vulnerabilità, che risulta quindi in un alto rischio.

Dall'inizio del ventesimo secolo il livello del mare globale è salito di circa 20 cm, e questo andamento è in fase di accelerazione. Le simulazioni di scenario dell'ultima generazione di modelli climatici danno un possibile innalzamento fino a quasi un metro (IPCC, 2021). Tuttavia, studi recenti indicano che i ghiacci della Groenlandia stanno fondendo ad una velocità maggiore di quello che era stato stimato qualche anno fa, e che questo fenomeno è in fase di forte accelerazione. Se una parte significativa della calotta della Groenlandia dovesse fondere, l'aumento del livello del mare potrebbe raggiungere diversi metri, che avrebbe ovviamente un impatto devastante sulle aree costiere del pianeta.

Infine, un importante aspetto del riscaldamento globale è che i suoi impatti non sono distribuiti in maniera omogenea sul-

sectors. One key process is the so-called *intensification of the hydrological cycle*. A warmer atmosphere is more energetic, and can hold greater amounts of water vapour, as described by the Clausius – Clapeyron relationship. As a consequence, when precipitation occurs, it tends to be more intense. This increases both the probability and the associated risk of extreme flood events. At the same time, climate models indicate that the overall frequency of precipitation events tends to decrease with global warming, resulting in longer dry periods on average. When combined with higher temperatures, this shift increases the probability and risk of drought. In other words, global warming leads to precipitation regimes characterised by less frequent but more intense rainfall. Observations over the past four decades confirm this pattern, showing increasing

frequencies of both extreme precipitation events and drought across many regions of the world (IPCC, 2021). Closely related to these changes is the rise in the frequency and intensity of heatwaves, a phenomenon documented across nearly all continental and marine regions (IPCC, 2021). In Europe, several record-breaking heatwaves over the past 25 years have caused tens of thousands of deaths and substantial agricultural losses. Another major consequence of global warming is the widespread melting of continental glaciers, and the associated rise in sea level. Glaciers on all continents are currently retreating, and the mass of nearly all European Alpine glaciers is declining rapidly. Several studies estimate that, even under the most optimistic scenarios, approximately 70% of Alpine glaciers are likely to disappear by the end of the twenty-first century.

Glaciers are of critical importance because they are the largest reservoirs of freshwater on the planet. Hence, their loss implies a substantial reduction in a resource that is already insufficient to meet global demand. Water scarcity is expected to intensify over the course of the twenty-first century, potentially making freshwater one of the most valuable resources and a source of increasing geopolitical tension.

Sea ice is experiencing a similar decline. Satellite observations show that Arctic summer sea-ice extent has decreased by nearly half, compared to the 1980s, and many studies project the possibility of an ice-free Arctic during late summer within the next few decades.

In Antarctica, ice loss primarily affects the coastal regions of West Antarctica and the Antarctic Peninsula. This loss often manifests as large-scale disinte-

gration events of ice shelves extending from the continent into the ocean, such as the collapse of the Larsen B Ice Shelf in March 2002.

Meltwater from continental glaciers, together with contributions from the Greenland and West Antarctic ice sheets, flows into the oceans and contributes to sea-level rise, along with the thermal expansion of seawater. Rising sea levels increase the frequency of coastal flooding, intensify storm surges, and promote saltwater intrusion into soils. Together, these processes represent a major risk factor for coastal regions.

Sea-level rise is a central issue in assessments of the impact of global warming because a large and growing proportion of the world's population resides in coastal areas. This is particularly true for large tropical cities in low-income countries, where living

la superficie terrestre, ma esistono delle regioni, che vengono chiamate “Zone calde” (o “Hotspots”) che sono particolarmente sensibili al riscaldamento globale per le loro caratteristiche e la loro collocazione geografica. La zona calda per eccellenza è l’Artico dove la temperatura sta salendo ad una velocità che è circa quattro volte maggiore della media globale. La causa principale di questa amplificazione del riscaldamento sull’Artico è il “feedback” o processo di retroazione, del ghiaccio. I processi di retroazione sono essenzialmente dei processi che tendono ad accelerare autoalimentandosi. Nel caso del ghiaccio, questo ha una alta riflettività della luce solare, e quando fonde, scopre la superficie sottostante che in genere ha una riflettività minore. Questo causa un aumento dell’assorbimento della radiazione solare da parte della superficie; quindi, un ulteriore riscaldamento che fonde più ghiaccio, scopre nuova superficie più scura e così via. Una seconda importante zona calda del riscaldamento globale è proprio la regione del Mediterraneo, che si sta riscaldando ad una velocità di 1.5-2 volte la media globale. Nel caso del Mediterraneo, questo è dovuto al fatto che il riscaldamento globale provoca una deviazione verso i poli delle perturbazioni di medie latitudini. Quindi, perturbazioni che normalmente porterebbero pioggia sul Mediterraneo lo fanno invece sul centro e nord Europa. Questo fa sì che sul Mediterraneo si generino condizioni di clima più secche e con meno nuvolosità, con un conseguente aumento delle temperature. Sia le osservazioni per le ultime decadi che le simulazioni con modelli climatici confermano questo andamento verso condizioni molto calde e secche sull’area del Mediterraneo, simili a quanto accaduto nell’estate del 2003. L’importanza della presenza di zone calde nel pianeta è che spesso queste si trovano in aree povere e quin-

di anche molto vulnerabili, come alcune zone dell’Amazzonia, del Centro America o dell’Africa equatoriale, e questo potrebbe causare flussi migratori di portata sempre maggiore.

Dopo avere dato degli esempi dei rischi associati al cambiamento climatico, la domanda si pone di come affrontarli. Come già accennato, possiamo partire dalla definizione di rischio e agire riducendo le sue tre componenti: probabilità di eventi meteorologici ad alto impatto, esposizione agli impatti e vulnerabilità. Partendo da quest’ultimo aspetto, il tema della vulnerabilità è sostanzialmente legato a quello dell’adattamento, e cioè implementare delle politiche tese ad aumentare la resilienza di diversi settori socio-economici agli impatti meteorologici del riscaldamento globale. L’adattamento ha una natura locale, perché gli impatti cambiano da luogo a luogo. Per esempio, nelle zone costiere le politiche di impatto includeranno azioni come la costruzione di barriere costiere per contenere gli effetti di mareggiate e intrusione di acqua salina. In zone agricole interne l’adattamento può coinvolgere una migliore gestione dell’irrigazione o l’uso di culture più resistenti alle alte temperature, mentre in aree fluviali l’innalzamento dei margini dei fiumi aiuterebbero ad evitare esondazioni legate all’aumento di frequenza e intensità di eventi piovosi estremi. Questo tipo di interventi aumenta la resilienza, diminuisce la vulnerabilità e quindi diminuisce il rischio.

Di interesse speciale in questo contesto sono le aree urbane, che sono particolarmente vulnerabili all’aumento di temperatura e ondate di calore a causa dell’effetto “isola di calore”. La ridotta presenza di vegetazione nelle città riduce l’evaporazione, che è uno dei principali meccanismi di raffrescamento del suolo. Questo fa sì che, specialmente durante le stagioni calde e insieme con il calore rilasciato da traffico, impianti di riscaldamento

conditions are often already degraded. The combination of high exposure and high vulnerability in these regions results in elevated climate-related risk. Since the early twentieth century, global mean sea level has risen by approximately 20 cm, and this rise is accelerating. Simulations from the latest generation of climate models project a possible increase of nearly one metre by 2100 (IPCC, 2021). However, recent studies indicate that ice loss from Greenland is occurring more rapidly than previously estimated, and is continuing to accelerate. If a substantial portion of the Greenland ice sheet were to melt, sea-level rise could reach several metres, with potentially devastating consequences for coastal regions worldwide. Finally, an important characteristic of global warming is that its impacts are not evenly distributed across the

Earth’s surface. Certain regions – commonly referred to as hotspots – are particularly sensitive to warming because of their physical properties and geographic location. The Arctic is the most prominent hotspot, with temperatures increasing at approximately four times the global average. This amplified warming is primarily driven by the ice–albedo feedback. Ice has a high reflectivity, but as it melts, it exposes darker underlying surfaces that absorb more solar radiation. This increased absorption leads to further warming and additional ice loss, creating a self-reinforcing cycle. Another major hotspot is the Mediterranean region, which is warming at a rate approximately 1.5–2 times faster than the global average. This enhanced warming is largely driven by a poleward shift of mid-latitude storm tracks under global warming. As a result, weather

systems that would normally bring precipitation to the Mediterranean increasingly affect central and northern Europe instead. Consequently, the Mediterranean region experiences drier conditions, reduced cloud cover, and higher temperatures. Both observational records from recent decades and climate-model simulations consistently indicate a shift toward hotter and drier conditions, similar to those observed during the summer of 2003. The importance of climate hotspots lies in the fact that many are located in low-income and highly vulnerable regions, such as parts of the Amazon, Central America, and equatorial Africa. In these areas, climate impacts may contribute to increasingly large migration flows. Having outlined several climate-change-related risks, the question arises of how these risks can be addressed. As discussed earlier, risk

can be reduced by acting on its three components, namely the probability of high-impact meteorological events, exposure to those impacts, and vulnerability. Starting with vulnerability, this dimension is closely linked to adaptation, defined as the implementation of policies aimed at increasing the resilience of socio-economic sectors to climate-related impacts. Adaptation is inherently local, as climate impacts vary across regions. In coastal areas, adaptation measures may include the construction of coastal barriers to reduce the effects of storm surges and saltwater intrusion. In inland agricultural regions, adaptation strategies may involve improved irrigation management or the adoption of crop varieties that are more resistant to heat stress. In river basins, reinforcing riverbanks can help limit flooding associated with more frequent and

e condizionamento e così via, le temperature nelle aree urbane siano anche di diversi gradi maggiori di quelle delle zone rurali limitrofe. Già oggi esistono metropoli a latitudini tropicali in cui lo stress termico può eccedere per molti giorni la cosiddetta soglia di vivibilità, cioè temperature di 35 °C e umidità relativa del 95%. Al di sopra di queste soglie il corpo umano fa fatica a raffreddarsi e questo causa importanti problemi cardiovascolari che possono portare anche al decesso, come accadde per esempio durante le ondate di calore dell'estate del 2003 in Europa. Molti studi hanno mostrato che le aree di invivibilità così definite si estenderebbero marcatamente in diversi scenari di riscaldamento futuro. Aumentare la resilienza degli ambienti urbani con una architettura che incentivi la creazione di verde urbano o altre tecniche per rinfrescare gli ambienti urbani è quindi una priorità di molte città.

Chiaramente, il problema della vulnerabilità è anche legato a quello della povertà, perché i paesi più poveri sono anche più vulnerabili. Infatti, un indicatore della capacità di adattamento è proprio dato dal logaritmo del prodotto interno lordo pro capite. Quindi un aumento della resilienza delle popolazioni è certamente collegato anche ad uno sviluppo maggiore e delle popolazioni più povere e a una ripartizione più equa delle risorse del pianeta.

Passando al tema dell'esposizione, la riduzione di questa componente del rischio richiede per esempio che non si creino insediamenti umani o altre infrastrutture in aree che possono essere soggette all'impatto di eventi meteorologici estremi. Questo richiede una pianificazione territoriale che tenga conto del rischio legato al cambiamento climatico, un approccio ormai indispensabile vista la situazione attuale del riscaldamento globale. I flussi

migratori in un certo senso possono considerarsi come tentativi di diminuire l'esposizione, ma ovviamente questo crea molti problemi aggiuntivi. Anche in questo caso si riconduce la questione alla dimensione socioeconomica: la riduzione della povertà rappresenta una leva fondamentale per contenere la vulnerabilità.

Come già menzionato il terzo elemento riguardante la riduzione del rischio è legato alla probabilità degli impatti di eventi meteorologici estremi e rientra nel campo della mitigazione ovvero la riduzione delle emissioni di gas serra per contenere il riscaldamento globale nei limiti gestibili con delle appropriate politiche di adattamento. Più le emissioni saranno ridotte, minore sarà il riscaldamento globale e il conseguente aumento di eventi meteorologici impattanti. La mitigazione è il tema centrale delle negoziazioni sul cambiamento climatico. Nell'accordo di Parigi del 2015 si è individuato l'obiettivo di contenere il riscaldamento globale al di sotto dei 2° C rispetto ai valori pre-industriali, ovvero circa 0.75 °C rispetto a quelli attuali. Si è anche individuata una traiettoria che consentirebbe di ottenere questo obiettivo, che richiedeva un picco di emissioni nel 2020 e poi una rapida riduzione fino ad arrivare a 0 emissioni nette nel 2050. L'obiettivo dell'accordo di Parigi è anche quello che consentirebbe al sistema Terra di non raggiungere i punti di non ritorno, come la fusione delle calotte di ghiaccio della Groenlandia e dell'Antartide occidentale, o il collasso della circolazione marina profonda che connette tutti gli oceani del globo (la cosiddetta "conveyor belt"). Questi punti di non ritorno costituirebbero delle modifiche profonde del sistema climatico con enormi impatti sul clima globale e conseguentemente sulla società umana.

La riduzione delle emissioni di gas serra si può ottenere tramite la "transizione ecologica" al cui centro c'è la decarbonizzazio-

intense precipitation events. Together, these interventions enhance resilience, reduce vulnerability, and ultimately lower climate-related risk.

Urban areas deserve particular attention because they are especially vulnerable to rising temperatures and heatwaves as a result of the urban heat-island effect. Reduced vegetation cover limits evapotranspiration, which is one of the primary natural cooling mechanisms. In addition, waste heat from traffic and from heating and cooling systems contributes to further warming. As a result, urban temperatures can exceed those of surrounding rural areas by several degrees, particularly during the warm season. Some tropical megacities already experience levels of thermal stress that exceed the so-called habitability threshold for many days each year. This threshold is commonly defined by air temperatures of approxi-

mately 35 °C combined with relative humidity near 95%. Under such conditions, the human body struggles to dissipate heat efficiently, leading to severe cardiovascular stress and increased mortality, as observed during the European heatwaves of 2003. Numerous studies indicate that areas experiencing these uninhabitable conditions are likely to expand substantially under future warming scenarios. Enhancing urban resilience through climate-responsive architecture, increased urban greenery, and other cooling strategies is, therefore, a priority for many cities. Vulnerability is also closely linked to poverty, as lower-income countries and populations tend to be more exposed and less able to cope with climate impacts. Indeed, adaptive capacity is strongly correlated with the logarithm of per-capita gross domestic product. Enhancing population

resilience is, therefore, closely tied to economic development, and to a more equitable distribution of global resources.

Reducing exposure – the second component of risk – requires, for example, avoiding the development of settlements and infrastructure in areas exposed to extreme climatic impacts. This, in turn, necessitates land-use planning that explicitly incorporates climate-change risk, an approach that is becoming increasingly essential under current warming trends. Migration flows can, in some respects, be interpreted as attempts to reduce exposure, although they introduce significant additional social and political challenges. Once again, reducing poverty emerges as a key strategy for lowering vulnerability and overall climate-related risk. The third component of risk – impact probability – is addressed through

mitigation, defined as the reduction of greenhouse gas emissions to limit global warming to levels that can be managed through adaptation policies. Lower emissions result in less warming and, consequently, in a reduced frequency and intensity of extreme climatic events. Mitigation lies at the core of international climate negotiations. The 2015 Paris Agreement established the objective of limiting global warming to well below 2 °C above pre-industrial levels (approximately 0.75 °C present-day levels). It also outlined a mitigation pathway involving peak emissions around 2020, followed by rapid reductions toward net-zero emissions by 2050.

Achieving this objective would reduce the likelihood of crossing critical climate tipping points, such as large-scale melting of the Greenland and West Antarctic ice sheets, or a collapse of the global

ne del sistema energetico, cioè il passaggio da energia prodotta con combustibili fossili a energia ottenuta da fonti rinnovabili pulite. Va detto comunque che non esiste una soluzione unica al problema della mitigazione, ma piuttosto un mosaico di politiche, che possiamo chiamare “mosaico della sostenibilità”, che comprende opzioni multiple: efficienza energetica, decarbonizzazione del sistema energetico, riforestazione, economia circolare e a km 0, cattura e stoccaggio dell'anidride carbonica, uso del suolo, riduzione degli allevamenti intensivi e degli sprechi alimentari. Questo mosaico va perseguito in tutto il suo potenziale e può essere molto diverso da area ad area a seconda delle diverse esigenze e delle risorse dei diversi paesi.

Purtroppo, siamo ancora lontani dalla traiettoria indicata nell'accordo di Parigi e le emissioni di gas serra sono ancora in aumento. I modelli climatici ci dicono che se si seguirà una traiettoria “business as usual”, cioè continuare ad andare avanti come stiamo facendo ora, potremmo raggiungere un riscaldamento globale di circa 4 °C entro il 2100, che significherebbe una perturbazione del sistema climatico senza precedenti che porterebbe ad uno sconvolgimento del clima della Terra con conseguenze non facilmente prevedibili. Quello che complica il processo di mitigazione è che mentre la conversione ecologica è avviata nei paesi industrializzati dell'Europa e in maniera minore negli Stati Uniti, questa è ancora lontana in molti paesi emergenti che stanno diventando grandi emittenti di gas serra, come la Cina, l'India, il Sudamerica, il sud-est Asiatico e l'Africa. È quindi imperativo che lo sviluppo di questi paesi avvenga in un contesto di economia verde, e per questo è necessario un grande sforzo di cooperazione internazionale tecnologica ed economica. Questo tema è infatti al

centro delle negoziazioni che avvengono nelle annuali Conferences of Parties (COP).

Nonostante ci sia ancora molto lavoro da fare per raggiungere l'obiettivo dell'accordo di Parigi, questo è ancora possibile, ma richiede uno sforzo deciso e soprattutto una implementazione urgente di quelli che abbiamo chiamato mosaici della sostenibilità. L'urgenza è dettata dal fatto che il tempo di vita medio dell'anidride carbonica in atmosfera è molto lungo, ordine di un centinaio di anni, e quindi più si aspetta a diminuire le emissioni, più l'anidride carbonica si accumulerà in atmosfera e più si dovranno implementare misure draconiane in futuro per rimanere entro l'obiettivo dell'accordo di Parigi.

In conclusione, come enfatizzato all'inizio di questo articolo, il sistema Terra è estremamente complesso e non-lineare, specialmente al tempo dell'Antropocene, e quindi è impossibile prevedere con accuratezza come il clima cambierà in futuro. Si possono però valutare i rischi associati alle decisioni che si prenderanno nei prossimi anni in termini di transizione ecologica e mitigazione del cambiamento climatico. Alcuni rischi sono gestibili con politiche di adattamento e cooperazione internazionale, ma bisogna evitare di raggiungere rischi così elevati da costituire una seria minaccia allo sviluppo sostenibile della società come oggi la conosciamo. Abbiamo una scelta di quale traiettoria seguire nel nostro sviluppo e questa scelta è un importante messaggio che lasceremo alle prossime generazioni.

REFERENCES

IPCC (2021). *The Science of Climate change. WGI contribution to the 6th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Masson-Delmotte *et al.* Eds., Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

ocean overturning circulation (the so-called “conveyor belt”). Crossing such thresholds would fundamentally alter the climate system and entail severe consequences for human societies. Greenhouse gas mitigation can be pursued through the so-called ecological transition, which is centred on decarbonising the energy system by shifting from fossil fuels to clean, renewable energy sources. However, no single solution is sufficient. Effective mitigation, instead, requires a “sustainability mosaic” composed of multiple, complementary strategies. These include improvements in energy efficiency, expanded deployment of renewable energy, reforestation, the promotion of circular and local economies, carbon capture and storage, sustainable land-use practices, reductions in intensive livestock farming, and the minimisation of food waste. This mosaic of measures must

be adapted to regional contexts, reflecting differences in local needs, capacities, and resource availability. Unfortunately, current emission trends remain far from the pathway outlined in the Paris Agreement, with global greenhouse gas emissions still increasing. Climate models indicate that a business-as-usual trajectory could result in approximately 4 °C of global warming by 2100. Such a level of warming would represent an unprecedented perturbation of the Earth system, with potentially severe and difficult-to-predict consequences. Mitigation efforts are further complicated by the uneven pace of the ecological transition across regions. While significant progress is underway in parts of Europe and, to a lesser extent, in the United States, mitigation remains limited in many emerging economies that are becoming ma-

ior emitters, including China, India, South America, Southeast Asia, and Africa. Ensuring that development in these regions proceeds within a green-economy framework requires substantial international technological and financial cooperation, which constitutes a central focus of the annual Conferences of the Parties (COP). Although substantial efforts are still required to achieve the goals of the Paris Agreement, these goals remain attainable if decisive action is taken. This is particularly true if sustainability-mosaic strategies are implemented without delay. The urgency of action is underscored by the long atmospheric lifetime of carbon dioxide – on the order of a century. Hence, delays in reducing emissions lead to continued accumulation in the atmosphere, and will require increasingly drastic mitigation measures in the future.

In conclusion, as emphasised at the outset, the Earth system is extremely complex and non-linear, particularly in the Anthropocene. This complexity makes precise prediction of future climate evolution impossible. However, it is possible to assess the risks associated with decisions taken in the coming years regarding the ecological transition and climate-change mitigation. Some risks can be managed through adaptation measures and international cooperation. It is also essential to avoid development pathways that would generate risks so severe as to threaten sustainable societal development as we know it. Therefore, humanity faces a critical choice regarding its future development trajectory. This choice will shape the environmental, social, and economic conditions inherited by future generations.