Introdução ao Desenvolvimento Sustentável



Centro de Desenvolvimento Sustentável UnB

UnB

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil

Introdução ao desenvolvimento sustentável [livro eletrônico] / [editores Tálita Floriano dos Santos...[et al.]]. -- 1. ed. -- Brasília, DF : Centro de Desenvolvimento Sustentável, 2025.
PDF
Outros editores: Cristiane Gomes Barreto, Mauro Guilherme Maidana Cappellaro, José Augusto Drummond.
Bibliografia.
ISBN 978-65-85259-38-5
1. Desenvolvimento sustentável 2. Meio ambiente 3. Sustentabilidade ambiental I. Santos, Tálita Floriano dos. II. Barreto, Cristiane Gomes. III. Cappellaro, Mauro Guilherme Maidana. IV. Drummond, José Augusto.

25-266925 CDD-333.9516

Índices para catálogo sistemático:

1. Meio ambiente : Conservação e proteção 333.9516
Aline Graziele Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

ISBN: 978-65-85259-38-5
9 786585 259385

Expediente

Editores

Tálita Floriano dos Santos

Cristiane Gomes Barreto

Mauro Guilherme Maidana Cappellaro

José Augusto Drummond

Diagramação/Projeto gráfico/Infografia

Lidiane Holanda

Revisão

Stela Máris Zica

Colaboradores

Alessandro Roberto de Oliveira
Alexandre Strapasson
Ana Claudia Sanches Baptista
Ana Karine Pereira
Andrei Cechin
Andrés Burgos
Arnoldo Santos de Lima
Bernardo Carlos Spaulonci Chiachia Matos de Oliveira
Carlos Hiroo Saito
Cristiano Lenzi
Daniela Gonçalves Mattar
Daniela Nogueira
Diego Pereira Lindoso
Doris Sayago
Edel Nazaré Santiago de Moraes
Elimar Pinheiro do Nascimento
Fabiano Toni
Fernando Paiva Scardua
Gleidson Oliveira Silva
Izabel Cristina Bruno Bacellar Zaneti
José Luiz de Andrade Franco
Lígia Chicareli Kawata
Louis Philippe Patrick de Jongh Filho
Marcela Ibiapino
Marilia Telma Manjate
Maurício Amazonas
Nayara Rodrigues Marques
Oscar de Moraes Cordeiro Netto
Paulo Celso dos Reis Gomes
Renata Camargo de Araújo
Renata Távora
Romero Gomes P. da Silva
Saulo Rodrigues Filho
Stéphanie Nasuti
Tahinah Martins
Yasmin Oliveira

INTRODUÇÃO AO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Tálita Floriano dos Santos

Cristiane Gomes Barreto

Mauro Guilherme Maidana Cappellaro

José Augusto Drummond

Universidade de Brasília

Centro de Desenvolvimento Sustentável

Este livro foi patrocinado pela Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (FINATEC)

FINATEC Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos

Centro de Desenvolvimento Sustentável

UnB

SUMÁRIO

PREFÁCIO 5

CARTA DOS EDITORES 14

CONCEITOS INICIAIS 16

1. O ANTROPOCENO E A GRANDE ACELERAÇÃO 17
2. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: A TRAJETÓRIA DE UM CONCEITO 31
3. CIÊNCIA DA SUSTENTABILIDADE 48
4. CRÍTICAS AO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL 59
5. ALTERNATIVAS AO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: O PÓS-DESENVOLVIMENTO 70

FUNDAMENTOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL 82

6. ECOLOGIA E SUSTENTABILIDADE 83
7. ECONOMIA E SUSTENTABILIDADE 93
8. SOCIEDADE E MEIO AMBIENTE 103
9. POLÍTICAS PÚBLICAS E SUSTENTABILIDADE 114

TÓPICOS CONTEMPORÂNEOS 125

10. BIODIVERSIDADE E ÁREAS PROTEGIDAS 126
11. ÁGUA E SUSTENTABILIDADE 135
12. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SUSTENTABILIDADE: PARTE I 142
13. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SUSTENTABILIDADE: PARTE II 152
14. CIDADES SUSTENTÁVEIS 162
15. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS 168
16. ENERGIA E SUSTENTABILIDADE 178
17. EDUCAÇÃO AMBIENTAL 187
18. INJUSTIÇA, RACISMO, DIVERSIDADES E MEIO AMBIENTE 196
19. GÊNERO E SUSTENTABILIDADE 207
20. GOVERNANÇA AMBIENTAL 213
21. REDES E SUSTENTABILIDADE 221
22. ESG: ENVIRONMENTAL, SOCIAL AND GOVERNANCE 230
23. ECOLOGIA INDUSTRIAL OU O USO EFICIENTE DE RECURSOS NATURAIS 240

SEÇÃO

03

TÓPICOS CONTEMPORÂNEOS



12. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SUSTENTABILIDADE: PARTE I

Diego Pereira Lindoso[1]
Alexandre Strapasson[1]
Saulo Rodrigues-Filho[1]

Resumo

As mudanças climáticas são um dos maiores desafios socioambientais globais do século XXI. Mecanismos naturais, internos e externos, interagem de forma complexa e não linear na regulação do sistema climático. Entre os externos estão os ciclos solares e as variações cíclicas da órbita da Terra. Entre os internos estão a atividade vulcânica, oscilações na concentração de gases de efeito estufa na atmosfera e a refletividade da superfície terrestre, em decorrência da expansão e retração dos glaciares polares e alpinos. A partir da Revolução Industrial, a queima de combustíveis fósseis pela espécie humana adicionou um fator não natural à equação. As emissões de gases de efeito estufa, desde então, especialmente o dióxido de carbono (CO_2), intensificaram o efeito estufa, resultando em um aquecimento acelerado que tem levado ao limite ecossistemas e comunidades humanas. Os impactos atuais e esperados para as próximas décadas sugerem que diferentes dimensões da vida humana e a existência das demais formas de vida se encontram em risco se não houver esforços suficientes. Ao final do capítulo, será possível responder às seguintes questões: (i) O que são as mudanças climáticas? (ii) Quais são os mecanismos internos e externos que interferem nas mudanças do clima? (iii) Qual o papel do fator humano nas mudanças climáticas? (iv) Quais os principais impactos esperados das mudanças climáticas antropogênicas?

Introdução

As mudanças climáticas globais são um problema complexo que requer soluções sistêmicas. É preciso entender os seus fundamentos científicos e aspectos históricos. A janela de ação é curta, e responder a esse desafio exige mudanças estruturais profundas na maneira como os sistemas socioeconômicos funcionam e interagem dentro da biosfera. Entender a dimensão do problema e as suas nuances e buscar soluções exige uma abordagem interdisciplinar, envolvendo as mais diferentes áreas do conhecimento, desde as ciências exatas, como matemática, física e química, até ciências sociais e humanidades, como geografia, ciência política, antropologia, entre outras.

Além disso, é preciso adotar uma abordagem transdisciplinar, envolvendo outras formas de saber para além das científicas, incorporando valores e percepções dos atores envolvidos no problema e nas soluções. Isso inclui perspectivas diversas, inclusive a de povos e territórios tradicionais, cujas racionalidades abrangem cosmovisões e formas de interagir com a natureza diferentes das cosmovisões convencionais associadas ao modelo de desenvolvimento eurocêntrico e à política climática internacional. Essas perspectivas podem apresentar ensinamentos importantes para se lidar com a crise ambiental.

1 Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília

O cientista ambiental e de formações afins pode atuar nesse campo como um "profissional da complexidade", um construtor de pontes e redes, articulando saberes e atores em uma perspectiva integrada, ante os desafios das mudanças climáticas. Para isso, é essencial que ele tenha uma visão sistêmica e integrada das suas causas e consequências.

Este capítulo apresenta alguns elementos básicos da ciência do clima com o intuito de elucidar conceitos essenciais e apontar temas-chave. Para obter mais detalhes, existe uma ampla literatura disponível. A referência básica é o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (*IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change*), particularmente os seus últimos relatórios de avaliação (IPCC, 2007, 2014, 2023).

O que são mudanças climáticas?

A percepção das mudanças climáticas como um risco ambiental global é relativamente recente. No entanto, a ciência subjacente tem quase dois séculos de indagações e achados. Isso inclui trabalhos seminais de cientistas, como o químico sueco Svante Arrhenius (1859-1927), a cientista estadunidense Eunice Foote (1819-1888) e o físico britânico John Tyndall (1820-1893). O acúmulo de trabalhos sobre a composição da atmosfera e a sua relação com as temperaturas apontava, desde o final século XIX, a existência do efeito estufa e da participação funcional de certos gases, como o dióxido de carbono (ou gás carbônico). Entretanto o instrumental necessário para observar a complexidade do fenômeno só foi disponibilizado por avanços tecnológicos mais recentes, a partir de meados do século XX.

Mas, afinal, o que são mudanças climáticas? Segundo o IPCC (2018):

> *Mudanças climáticas referem-se a mudanças no estado do clima que podem ser identificadas (por exemplo, por meio de testes estatísticos) por mudanças na média e/ou na variabilidade de suas propriedades e que persistem por um período prolongado, normalmente décadas ou mais (IPCC, 2018, p. 544).*

Portanto, mudanças climáticas consistem em alterações duradouras de padrões do comportamento climático, normalmente identificadas em análises de intervalos de no mínimo 30 anos.[2]

2 Trinta anos é o período mínimo que os cientistas consideram necessário para diferenciar variações e microtendências naturais da dinâmica climática das mudanças consistentes de padrão.

Box 1 – Qual a diferença entre tempo e clima?

É importante diferenciar dois termos que muitas vezes se confundem: clima e tempo. A diferença essencial entre eles diz respeito à escala temporal que cada um tem por referência.

Tempo abrange o comportamento de parâmetros atmosféricos (temperatura, umidade, precipitação, vento, etc.) em intervalos relativamente curtos (de minutos a meses). Trata-se de algo momentâneo. É o objeto de estudo da meteorologia. A sua dinâmica remete à nossa experiência cotidiana na qual observamos e respondemos às mudanças do tempo, ao nos agasalharmos ou levarmos um guarda-chuva antes de sair de casa. Os telejornais, por exemplo, apresentam diariamente a previsão do tempo.

Clima é o objeto de estudo da climatologia e diz respeito ao comportamento das condições atmosféricas em longo prazo (anos, décadas, séculos e milênios). Essas condições se manifestam em padrões de tempo e em variabilidades cíclicas associadas a uma área geográfica específica, como um estado ou uma região. Falamos em clima quando, por exemplo, descrevemos o Distrito Federal (DF) como uma região tropical de altitude, com um regime de precipitação bem definido, marcado por uma estação chuvosa que se inicia em outubro e se prolonga até março, e outra seca, que vai de abril até setembro, reproduzindo a sazonalidade característica da região central do Brasil.

Quanto às causas das mudanças climáticas[3], o IPCC (2018) ressalta:

> *[...] as mudanças climáticas podem ser devidas a processos internos naturais ou forças externas, como modulações dos ciclos solares, erupções vulcânicas e mudanças antrópicas persistentes na composição da atmosfera ou no uso da terra (IPCC, 2018, p. 544).*

A energia que dinamiza o sistema climático da Terra tem a sua origem no Sol. A radiação solar recebida pela Terra é composta de ondas eletromagnéticas de vários comprimentos de onda, principalmente nas faixas do ultravioleta (UV) e da luz visível. Cerca de 30% da radiação total incidente são refletidos de volta ao espaço pela atmosfera e pela superfície terrestre, enquanto 70% são absorvidos por elas. Parte da radiação solar absorvida é reemitida pela superfície na faixa do infravermelho (calor), porém alguns gases presentes na atmosfera conseguem absorver parte desse espectro. Esses gases são chamados gases de efeito estufa (GEE). Os principais são o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e o vapor de água (H_2O).

3 A definição de mudanças climáticas do IPCC é uma definição científica, baseada em estudos da Física do Clima. As Nações Unidas adotam uma definição política, na qual o termo "mudanças climáticas" se refere exclusivamente às mudanças causadas pelas atividades humanas, ou seja, de origem antrópica. Para fins deste capítulo, adotamos a definição científica.

Portanto, o efeito estufa é um fenômeno natural, graças ao qual a temperatura média da superfície terrestre gira em torno de 15ºC, contrastando fortemente com a média global esperada caso o planeta não tivesse atmosfera (-18ºC). As temperaturas globais mais amenas do Holoceno (também conhecido como "ótimo climático"),[4] que cobre os últimos 12 mil anos, foram fundamentais para a expansão da vida na Terra como a conhecemos. Entretanto o recente crescimento da concentração de GEEs na atmosfera tem provocado um aquecimento global. A elevação abrupta e rápida da temperatura terrestre tem alcançado patamares capazes de perturbar o funcionamento dos ecossistemas e da tolerância térmica da parte majoritária da biodiversidade.

Assim, o efeito estufa não é um problema em si, mas, sim, a sua intensificação fora da dinâmica natural. É exatamente isso que as bilhões de toneladas de GEE emitidas pelas atividades humanas têm feito desde a Revolução Industrial. Entretanto, antes de tratar sobre os fatores humanos que influenciam as mudanças climáticas, cabe entender as suas causas naturais, sobretudo para desmistificar os principais fundamentos da variabilidade natural do clima, sobre os quais a ação antrópica tem interferido.

Causas naturais da variabilidade climática

As causas naturais da variação do clima podem ser classificadas como externas ou internas ao sistema terrestre. As externas se referem a fatores que regulam a quantidade de radiação solar que chega ao nosso planeta. Isso decorre da própria fonte de energia: o Sol. A energia do Sol vem das reações de fusão nuclear que ocorrem no interior da estrela. A atividade solar apresenta flutuações típicas, em ciclos que duram cerca de 11 anos, também chamados ciclos de *Schwabe*, relacionados à variação de seu campo magnético, que intercalam momentos de maior e menor atividade. Nos períodos de maior atividade, mais radiação solar chega ao planeta, elevando as temperaturas globais. Nos períodos de menor atividade, menos radiação chega à Terra, reduzindo as temperaturas globais. Ao analisarmos períodos um pouco mais longos, como séculos e milênios, podemos dizer que a atividade solar é relativamente constante, com pequenas flutuações sazonais e baixo impacto sobre a variação da temperatura terrestre.

As variações da órbita terrestre também são fatores importantes. A translação da Terra em torno do Sol não é um círculo perfeito, mas sim uma elipse, embora quase circular, com pontos de maior proximidade (periélio) e distanciamento (afélio) durante o ano. O que é pouco divulgado é que o formato da elipse também varia ao longo do tempo, ora em formatos mais próximos de círculos, ora em formatos mais alongados de elipses. Isso influencia diretamente as distâncias entre a Terra e o Sol, levando a ligeiras variações na intensidade de radiação solar que chega à Terra e na duração das estações. Esse comportamento da trajetória de translação se chama excentricidade e tem ciclos de cerca de 100 mil anos de duração.

Outro elemento orbital importante é o ângulo de inclinação da Terra sobre o seu próprio eixo de rotação (obliquidade). Ele influi sobremaneira a forma como a radiação que chega à Terra é distribuída entre o equador e os polos ao longo do ano. A distribuição desigual, por sua vez, regula a intensidade das estações do ano. A obliquidade terrestre varia em ciclos de cerca de 41 mil anos. Atualmente, esse ângulo é de 23,4 graus. Adicionalmente, a Terra gira em torno de seu próprio eixo de maneira muito semelhante ao movimento de um peão. A direção desse eixo chama-se precessão axial e um ciclo completo de oscilação tem duração de cerca de 26 mil anos. Em

4 O Holoceno é a época atual na escala de tempo geológico, iniciada com o fim do último período glacial. Essa época está dentro do período Quaternário da era Cenozoica. Devido às intensas mudanças causadas pela humanidade em nosso planeta, sobretudo em seus ciclos biogeoquímicos, existe entre cientistas a percepção de que já estaríamos entrando em uma nova época geológica, referida como Antropoceno.

conjunto, estes três ciclos (excentricidade, obliquidade e precessão) são conhecidos como ciclos de Milankovitch, em homenagem ao astrofísico sérvio Milutin Milankovitch (1879-1958), o primeiro a identificá-los e a levantar a hipótese de que as suas alterações regulavam os ciclos glaciares e interglaciares.

Já as causas naturais internas das mudanças climáticas se referem a dinâmicas intrínsecas do sistema terra-oceano-atmosfera, que interferem na quantidade de radiação solar retida pelo planeta. Além da camada de gases de efeito estufa, as erupções vulcânicas lançam na atmosfera aerossóis, que são partículas muito pequenas (coloides), sólidas ou líquidas, tais como fumaça e poeira. Além disso, alguns compostos, como o ácido sulfúrico, podem levar à formação de aerossóis na atmosfera. Os aerossóis funcionam como espelhos suspensos no ar, refletindo a radiação solar incidente de volta para o espaço. Erupções de grande magnitude são capazes de interferir nas temperaturas globais no ano da erupção e nos anos seguintes, reduzindo, no curto prazo, tendências de aquecimento. Por outro lado, alguns tipos de aerossóis, como materiais particulados de combustão de combustíveis, podem ter o efeito inverso, absorvendo mais calor. No entanto, esses efeitos não são persistentes e não explicam mudanças mais prolongadas no sistema climático, como o aumento consistente das temperaturas médias globais registrado nos últimos 200 anos.

Outro aspecto importante para se entender o balanço térmico terrestre é o albedo, que é um coeficiente utilizado para medir a refletividade de uma superfície, expressa pela relação entre a radiação refletida e a radiação total incidente em uma superfície, variando, portanto, de 0,0 (absorção máxima) a 1,0 (refletividade máxima). A grande superfície branca das calotas polares e geleiras no alto das montanhas, por exemplo, funciona como um grande espelho para a radiação solar incidente. Ela reflete a quase totalidade da radiação solar de volta ao espaço (albedo 0,8–0,9), reduzindo a recepção de energia que poderia ser convertida em calor. Em contraposição, as superfícies terrestres e os oceanos, expostos com o derretimento das grandes superfícies de gelo, absorvem a maior parte da radiação solar incidente, emitindo calor e contribuindo para o aquecimento global, que, por sua vez, acelera o derretimento, criando uma retroalimentação positiva na qual o aquecimento global provoca mais aquecimento global. O albedo médio da Terra é de aproximadamente 0,3.

A relação entre as causas naturais e a variação do clima terrestre ao longo das eras pode ser identificada em diferentes testemunhos paleoclimáticos. É possível identificar a presença pretérita de geleiras, por exemplo, analisando acidentes topográficos e as formações geológicas. O estudo dos pólens (palinologia) presentes em sedimentos permite reconstruir as formações vegetais pretéritas. Já o estudo da espessura dos anéis dos troncos de árvores antigas permite inferir períodos secos e úmidos, uma prática denominada dendrocronologia.

Já os testemunhos de gelo obtidos nos polos e nas geleiras alpinas contêm, entre as camadas de neve acumuladas e compactadas ao longo de milhares de anos, bolhas de ar que armazenaram, em pequena escala, relíquias da atmosfera passada. Analisar a composição química do ar dessas bolhas, com uso de um cromatógrafo, permite estimar a concentração de GEEs e até mesmo de atividades vulcânicas ocorridas há milhares de anos. Essas análises são fundamentais para os estudos de glaciologia e paleoclimatologia.

Cruzando-se esses dados e outros, é possível reconstituir o clima passado em largas escalas temporais e entender como esses fatores determinam a oscilação das temperaturas globais. É possível também determinar que o atual período de aquecimento global é atípico e não pode ser explicado apenas pela variabilidade das causas naturais que regulam o clima. Algum outro fator está interferindo. Esse fator é o fator humano.

Causas humanas das mudanças climáticas

Desde a Revolução Industrial (cerca de 1750 em diante e, mais acentuadamente, a partir de 1850), a expansão da economia teve os combustíveis fósseis como o principal insumo energético, inicialmente com o carvão mineral, seguido pelo uso de petróleo, gás natural e, mais recentemente, o gás de xisto, também chamado de *shale gas*, obtido por fraturamento hidráulico. A combustão desses recursos emitiu para a atmosfera uma elevada quantidade de GEEs, especialmente o dióxido de carbono (CO_2).

O metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O) são outros GEEs importantes. O metano tem as seguintes fontes principais de emissão: a fermentação entérica presente no sistema digestivo de animais ruminantes, como bovinos, caprinos e ovinos; a decomposição anaeróbica de matéria orgânica, como nas áreas de cultivo alagado de arroz e nos aterros sanitários contendo resíduos orgânicos; e o vazamento de gás natural durante a extração, o transporte e o armazenamento pelo setor de energia. O óxido nitroso, por sua vez, está associado ao uso excessivo de fertilizantes na agricultura. Apesar de as emissões de óxido nitroso serem relativamente baixas em termos quantitativos, o seu elevado potencial de aquecimento global (GWP)[5] o torna relevante.

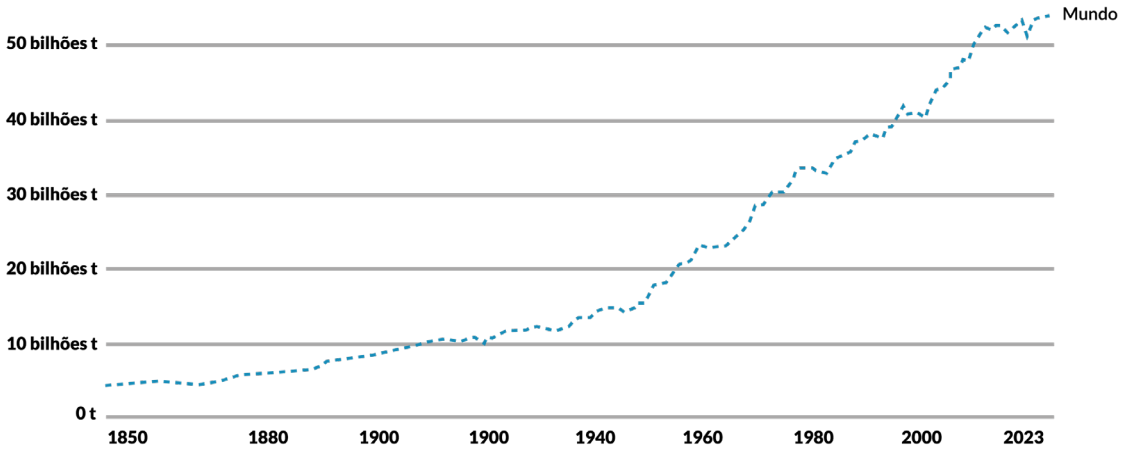
Outros gases merecem destaque. Os gases da família dos HFC (hidrofluorcarbonetos) têm um alto potencial de aquecimento. Usados como substitutos aos CFCs (clorofluorcarbonetos) e HCFCs (hidroclorofluorcarbonetos) no combate à degradação da camada de ozônio, esses gases ainda são usados em equipamentos de refrigeração, como aparelhos de ar-condicionado e câmaras frigoríficas. Alguns HFCs chegam a ser milhares de vezes mais potentes no poder de aquecimento quando comparados ao CO_2.

O efeito estufa está relacionado à forma como esses gases interagem com a radiação eletromagnética na faixa do infravermelho, por meio de um processo físico chamado espalhamento. Essa interação pode variar, a depender do gás e da frequência envolvida. Para calcular as emissões de todos os GEEs em uma mesma base de comparação, costuma-se converter as emissões dos demais GEEs em gás carbônico equivalente (CO_2eq), empregando o GWP de cada gás analisado.

As emissões anuais desses gases vêm crescendo consistentemente nos últimos 170 anos, com uma inflexão importante a partir do fim da Segunda Guerra Mundial, quando a sociedade de consumo em massa ganhou tração em escala global, conforme mostra a Figura 1. Ao analisar o impacto dessas emissões, em combinação com os fatores naturais de variabilidade, fica clara a sua alta correlação com os aumentos de temperatura observados globalmente.

5 O potencial de aquecimento global, conhecido pela sigla GWP (global warming potential) expressa o quanto um gás é mais potente que o gás carbônico (cujo GWP é 1) na sua contribuição para o aquecimento global em um dado período. Para um período de 100 anos, por exemplo, estima-se que o GWP do metano seja de aproximadamente 28 a 34 (sem unidade), enquanto o do óxido nitroso seja de aproximadamente 273 (sem unidade).

Figura 1 – Evolução das emissões globais de gases de efeito estufa, 1850-2023, em bilhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (GtCO2e) por ano.



Fonte: Adaptado de Our World in Data (2024); base de dados Jones et al. (2024).

A Figura 1 mostra a evolução das emissões anuais de gases de efeito estufa globais, incluindo CO_2, CH_4 e N_2O de todas as fontes, inclusive da agricultura e da mudança de uso do solo.

Consequências das mudanças climáticas

O sistema climático é um sistema complexo, não linear. Portanto, alterações muito pequenas nas condições iniciais podem produzir resultados de grande porte e difíceis de prever no médio e longo prazo. Assim, todo exercício de projetar cenários futuros e identificar relações entre as partes do sistema climático envolve algum grau de incerteza.

O argumento da incerteza é frequentemente usado pelos negacionistas das mudanças climáticas para argumentar contra a realidade do problema. Entretanto não se pode confundir incertezas com dúvida. Não há dúvida sobre a relação entre as emissões de GEEs oriundas da atividade humana e as mudanças climáticas. Já está bem compreendido que a energia excedente retida na atmosfera pelos GEEs se manifesta em aquecimento global. Sabe-se que a cadeia causal desse aquecimento consiste em uma série de consequências físicas chamadas, no conjunto, de mudanças climáticas (Figura 2). Além de extremos de temperatura, secas e alterações nos padrões de precipitação, outros exemplos dos efeitos da mudança do clima são a retração das geleiras, o aumento do nível do mar e o risco de incêndios florestais.

Figura 2 – Mudanças climáticas observadas atribuídas à influência humana, segundo o grau de certeza científica

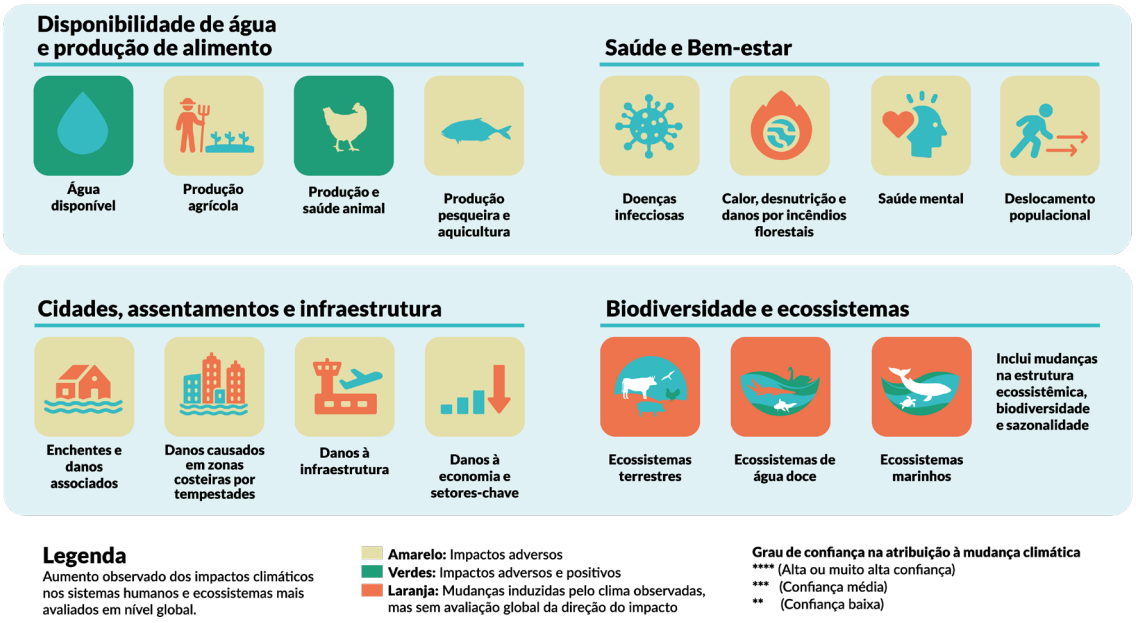


Fonte: Adaptado do IPCC (2023)

Parte do CO_2 antropogênico vai para os mares e oceanos. Uma vez diluído, o CO_2 reage com a água (H_2O), forma ácido carbônico (H_2CO_3) e reduz o pH (potencial hidrogeniônico) da água. Esse fenômeno é conhecido como acidificação oceânica e tem sérias consequências para a biodiversidade marinha, especialmente para corais, crustáceos, moluscos e equinodermos. Quanto mais CO_2 houver na atmosfera, mais ácido carbônico é formado. A gradual redução do pH oceânico tem um efeito corrosivo sobre as estruturas calcárias, podendo levar esses organismos à morte, com efeitos indiretos em toda a cadeia trófica.

As mudanças climáticas, por sua vez, têm consequências adversas para os sistemas humanos e naturais (perdas e danos). As dimensões afetadas incluem a saúde e o bem-estar humanos; a produção de bens essenciais à existência, como água e alimentos; as cidades, infraestruturas e assentamentos; os ecossistemas, entre outras (Figura 3).

Figura 3 – Impactos nos sistemas humanos e naturais atribuídos às mudanças climáticas, segundo o grau de certeza científica



Fonte: Adaptado de IPCC (2023)

Considerações finais

O sistema climático da Terra é dinâmico, tendo oscilado ao longo das eras geológicas. Essa dinâmica resulta da interação complexa de mecanismos internos e externos que regulam o balanço de energia solar retida na atmosfera e nos oceanos, ora resultando em aquecimento global, ora em resfriamento global. As emissões antrópicas globais de GEEs, a partir da Revolução Industrial, têm interferido no balanço natural, intensificando o efeito estufa a patamares que têm resultado no aquecimento acelerado da atmosfera. Isso tem levado a biodiversidade, os ecossistemas e os sistemas humanos ao limite de suas capacidades de adaptação, ameaçando a existência de espécies e de populações humanas ao redor do mundo. É urgente, portanto, encontrar meios para reduzir e capturar essas emissões.

REFERÊNCIAS

» IPCC. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: synthesis report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. LEE; J. ROMERO (ed.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2023, 36 p.

» IPCC. Climate Change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R. K. PACHAURI; L.A. MEYER (ed.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014, 151 p.

» 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, R. K. PACHAURI; REISINGER, A. (ed.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2007 104 p.

» IPCC. Annex I: Glossary [MATTHEWS, J. B. R. (ed.)]. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V. P. et al (ed.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, p. 543.

» JONES, M. W. et al. National contributions to climate change due to historical emissions of carbon dioxide, methane and nitrous oxide. Dataset, ZENODO, version 2024.2. Disponível em: https://zenodo.org/records/14054503. Acesso em: 7 dez. 2024.

» OUR WORLD IN DATA. Greenhouse Gas Emissions, 2024. Disponível em: https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions. Acesso em: 7 dez. 2024.

LITERATURA COMPLEMENTAR E SUGESTÕES DE LEITURA

» BURSZTYN, M.; RODRIGUES FILHO, S. (Org.). O Clima em Transe: vulnerabilidade e adaptação da agricultura familiar. 1. ed. Rio de Janeiro: Garamond/IABS, v. 1., 2016, 352 p.

» LINDOSO, D.; EIRÓ, F.; BURSZTYN, M.; RODRIGUES FILHO, S.; NASUTI, S. Harvesting Water for Living with Drought: insights from the Brazilian human coexistence with semi-aridity approach towards achieving the sustainable development goals. Sustainability, v. 10, p. 622, 2018.

» LINDOSO, D. P. Adaptação à mudança climática: ciência, política e desenvolvimento sustentável. Climacom Cultura Científica: pesquisa, jornalismo e arte, v. 2, p. 1, 2015. Disponível em: https://climacom.mudancasclimaticas.net.br/adaptacao-a-mudanca-climatica-ciencia-politica-e-desenvolvimento-sustentavel/

» STRAPASSON, A. et al. Modelling carbon mitigation pathways by 2050: insights from the global calculator. Energy Strategy Reviews, v. 29, 100494. 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100494

» TALANOA. NDC brasileira com metas corrigidas para 2025 e 2030. Nota Técnica 4. Série “NDC brasileira”. Rio de Janeiro, Brasil. 2023. Disponível em: https://institutotalanoa.org/documentos

» UNESCO. Jovens & Mudança: guia sobre mudanças climáticas e estilos de vida, 2018, 64 p. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000266237

» Sites e Plataformas

» Plataforma Adapta Brasil, do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). Disponível em: https://adaptabrasil.mcti.gov.br

» Website do Imperial College de Londres, com modelos sistêmicos online (acesso livre), para mitigação de emissões (Global, Brasil e outros países). Disponível em: https://www.imperial.ac.uk/2050-calculator


FINATEC
Centro de Desenvolvimento
Sustentável UnB
UnB