

## Crises, Policrise e a importância do reforço da Resiliência do Sistema Terrestre.

### CATEGORIA

Artigo

### CITAÇÃO

Gonçalves, J. A. (2025)

Crises, Policrise e a importância do reforço da Resiliência do Sistema Terrestre,

*Rev. Ciência Elem.*, V13(01):002.

[doi.org/10.24927/rce2025.002](https://doi.org/10.24927/rce2025.002)

### EDITOR

João Nuno Tavares

Universidade do Porto

### EDITOR CONVIDADO

Alexandre Lopes Magalhães

Universidade do Porto

### RECEBIDO EM

12 de março de 2025

### ACEITE EM

12 de março de 2025

### PUBLICADO EM

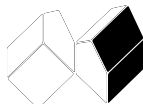
15 de março de 2025

### COPYRIGHT

© Casa das Ciências 2025.

Este artigo é de acesso livre, distribuído sob licença Creative Commons com a designação [CC-BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/), que permite a utilização e a partilha para fins não comerciais, desde que citado o autor e a fonte original do artigo.

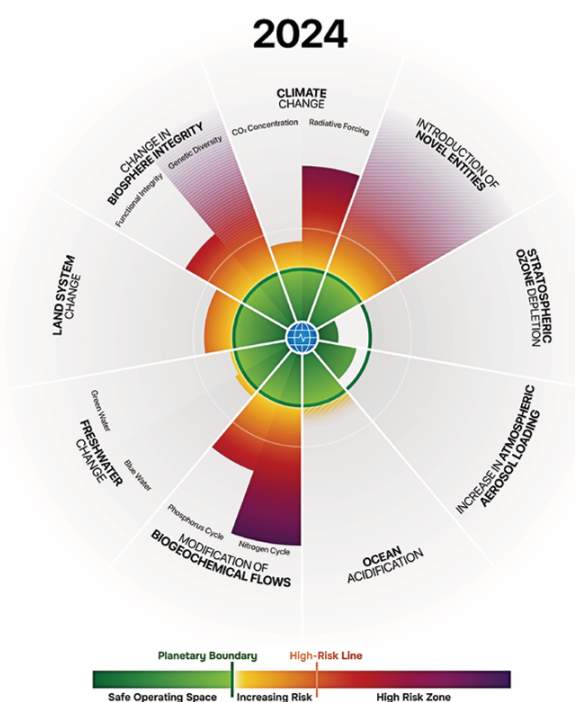
[rce.casadasciencias.org](https://rce.casadasciencias.org)



### Orfeu Bertolami, Ricardo Elísio

DFA/FC/U.Porto

Com muitos dos subsistemas do Sistema Terrestre a entrar em crise e correndo o risco de colapsar, torna-se necessário compreender especificamente de que maneira as alterações climáticas causadas pela atividade humana os afetam. Em particular, os mecanismos que regem estes subsistemas e a resposta face a pressões externas tendem a ser semelhantes entre todos. Além disso, alterações num subsistema afetam outros subsistemas e o próprio sistema global, potencialmente, na sua totalidade através de um conjunto complexo de interações. O Sistema Terrestre evidencia assim uma mudança de regime coletiva face à crise climática. Utilizando um formalismo baseado em indicadores do impacto da atividade humana, as Fronteiras Planetárias, cujos valores de base referem-se ao período Holocénico, caracterizado pela estabilidade climática, é possível descrever a trajetória da crise climática e a sua putativa evolução. Contudo, os aspetos mais nefastos desta evolução podem ser contornados através de ações de mitigação e adaptação, que reforçam a resiliência do Sistema Terrestre. Pretende-se, assim, motivar um modelo matemático que descreva estes fenómenos complexos, interpretando-os num contexto físico.



## **Crise Climática.**

A crise climática hoje faz-se sentir em todo o planeta. O desequilíbrio energético na atmosfera, agravado pela presença de gases de efeito de estufa, tem aumentado a temperatura média da superfície terrestre, causando alterações significativas às taxas de evaporação e precipitação<sup>1</sup>. A fragmentação das florestas, com a redução da sua área e extensão contígua, tem causado alterações disruptivas à biodiversidade e as populações de seres vivos, algumas a caminho de extinção, outras em crescimento descontrolado<sup>2</sup>. Estes sistemas florestais atuam como sumidouros essenciais de CO<sub>2</sub> atmosférico. Com a sua fragmentação e o decréscimo da biodiversidade, estes estabilizadores climáticos enfraquecem, deixando o planeta mais suscetível a flutuações climáticas<sup>2,3</sup>. Muitos subsistemas terrestres são dotados de pontos críticos, para além dos quais é desencadeada uma transição abrupta para um novo estado de regime climático<sup>4</sup>. O recuo e fusão da camada de gelo da Gronelândia é um exemplo de um subsistema com grande risco de atingir o ponto crítico e passar para um novo estado<sup>4,5</sup>. Alcançado este ponto, um mecanismo de retroação positiva é acionado, criando um expectável aumento de temperatura local que desencadeará o desaparecimento da sua extensa camada de gelo<sup>4,5</sup>. A generalização de processos desta natureza fará com que a Terra passe a ser um planeta criogenicamente unipolar, causando alterações irreversíveis nos mecanismos de regulação de temperatura, devido à diminuição do albedo terrestre, entre outros fatores<sup>5</sup>. Fatores que caracterizam a perda de resiliência ou robustez de um sistema face a pressões externas<sup>6</sup>, manifestam-se, por exemplo, na forma de secas intensas ou de incêndios florestais, que implicam uma perda assinalável de resiliência vegetal e dos mecanismos de retroação a partir dos anos 2000<sup>6,7</sup>. Assim, estes sistemas estarão mais suscetíveis à fragmentação e à perda da sua qualidade de absorção de gases de efeito de estufa, o que pode agravar, ou até desencadear, os fenómenos acima descritos: o planeta suscetível a acentuadas flutuações climáticas; aumento da temperatura média global, etc.<sup>2,3,4</sup> Todos estes subsistemas demonstram uma dinâmica complexa e importantes mecanismos de retroação<sup>7</sup>.

De facto, considerando o Sistema Terrestre (ST) como o conjunto da Atmosfera, Biosfera, Criosfera, Hidrosfera, Litosfera superior e todas as relações estabelecidas entre estes subsistemas<sup>7</sup>, é assinalável que, desde os anos 50 do século XX, a atividade humana é a força dominante deste sistema<sup>8</sup> e tem deixado vestígios observáveis nas camadas estratigráficas tais como a presença de radionuclídeos ou depósitos crescentes de resíduos da atividade humana<sup>8,9,10</sup>.

Na verdade, este impacto tem sido tão significativo que a emergência e proliferação de fenómenos extremos se tem agravado e complexificado<sup>11,12</sup>. Verifica-se que estes interagem entre si, agravando-se e exibindo um comportamento coletivo. Este comportamento é consequência do aumento do número e do grau de conexões que se têm estabelecido no ST em função da atividade humana. Qualquer destes fenómenos, no contexto de um sistema complexo, pode propagar uma crise local para a totalidade do sistema, tornando-a num fenómeno em cadeia, através da conectividade intra-sistémica e inter-sistémica entre os subsistemas<sup>12</sup>. Estas distinguem-se pela escala da sua ação. Por exemplo, na FIGURA 1, a conectividade inter-sistémica refere-se às interações entre os subsistemas, que constituem as componentes diretamente relacionadas com a atividade humana no ST, tais como a Economia, Ambiente, etc. Por sua vez, a conectividade intra-sistémica estabelece-se dentro de cada um destes subsistemas, por exemplo, dentro do sistema “Energia”, caracterizando a sua estrutura e assegurando que pode ser considerado como uma entidade autónoma.

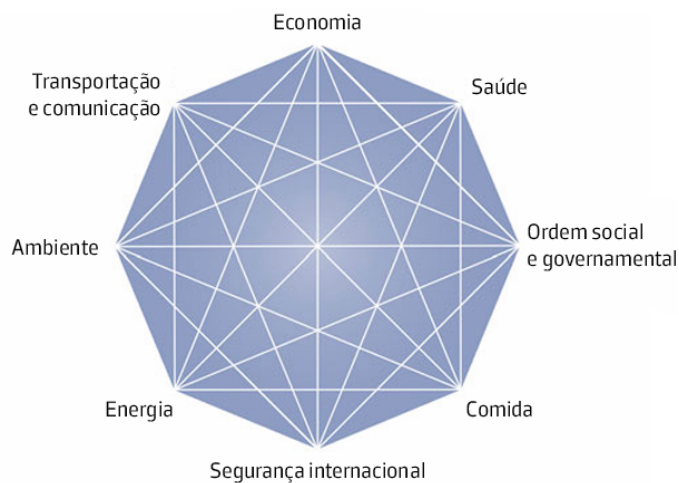


FIGURA 1. Representação da hiper-conectividade dos sistemas que constituem o ST, tornando-o num sistema complexo, segundo a referência<sup>12</sup>.

O estado do ST é caracterizado por um conjunto de parâmetros que refletem o impacto da atividade humana no ST. Estes parâmetros são designados por Fronteiras Planetárias (FP). Foram enumerados os 9 parâmetros essenciais para caracterizar o estado do ST: integridade da Biosfera; alterações climáticas; novos materiais; Ozono estratosférico; carga de aerossóis atmosféricos; acidificação dos oceanos; alterações dos fluxos biogeoquímicos de azoto e fósforo; reservas de água doce; ocupação humana das superfícies continentais<sup>13,14</sup>. Na FIGURA 2, é indicada a evolução das FP desde a região central associada ao período de estabilidade climática, o Holocénico, que se iniciou há 11700 anos.

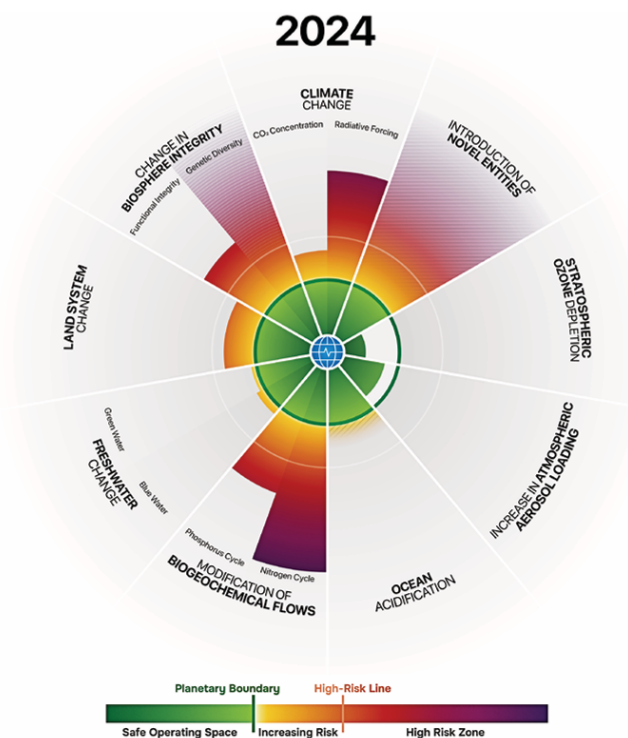


FIGURA 2. Diagrama das fronteiras planetárias com as suas quantificações relativas em 2024. A circunferência central indicada a verde corresponde aos valores estimados das FP no Holocénico, antes de atividade antropogénica se tornar significativa. A zona preenchida que se irradia da região central corresponde aos valores das FP atualmente<sup>15</sup>. As quantificações das FP Novos materiais e Integridade da Biosfera estão para além da escala.

As FP indicam também o crescimento simultâneo do impacto da atividade humana e do risco das crises<sup>13,14</sup>. A emergência climática está associada, entre outros fatores, com o desequilíbrio radiativo terrestre ou ruptura dos ciclos globais de azoto, fósforo e outras substâncias<sup>13,15</sup>. A complexidade do ST sugere que as FP interagem entre si e dentro de si através das suas componentes<sup>16</sup>. Assim, compreende-se que a perda de biodiversidade afete a captura de CO<sub>2</sub> atmosférico<sup>3</sup> numa interação inter-sistémica entre a "Integridade da Biosfera" e a "Alteração Climática". Outro exemplo relevante refere-se ao já mencionado desaparecimento da calote de gelo da Gronelândia que afeta a captura de CO<sub>2</sub> atmosférico, o que caracteriza uma interação intrassistémica dentro da FP "Alterações Climáticas"<sup>4,5</sup>.

A FIGURA 2 caracteriza o estado atual do ST. Observa-se que 7 das 9 FP já ultrapassaram os valores típicos do Holocénico. O crescimento das FP tem acelerado descontroladamente, que é o comportamento típico de uma crise<sup>12,15</sup>. Considerando as inúmeras interações que estas crises têm demonstrado e o quão conectados estão os subsistemas afetados<sup>1,2,3,4,5,6</sup>, temos um novo epifenómeno que descreve este comportamento coletivo, a policrise<sup>12</sup>.

## **Policrise.**

Uma característica do aumento da atividade humana é o desencadear de várias crises simultâneas, quer a nível local, quer a nível global. As crises têm origem num evento ou série de eventos repentinos que causam danos a um elevado número de indivíduos<sup>12</sup>. De uma perspetiva mais física, a crise é uma trajetória do ST, onde ocorre a ruptura dos mecanismos de estabilização dos subsistemas (retroação negativa), causando uma transição de regime (retroação positiva)<sup>11</sup>. Quando o sistema se encontra em crise, o seu comportamento torna-se imprevisível e disruptivo, podendo até admitir um comportamento caótico. Tal ocorre se a atividade humana for muito intensa e comportar-se segundo uma equação logística discreta<sup>17,18</sup>. Nestas condições as trajetórias do ST apresentam bifurcações e deixam de ser previsíveis<sup>17</sup>.

De facto, as trajetórias do ST estão a tornar-se mais rápidas e difíceis de contrariar. Um sistema de armadilhas antropocénicas têm mantido o ST na direção de novos pontos de equilíbrio<sup>19</sup>, com condições amplamente distintas das do Holocénico, anterior à grande aceleração da atividade humana<sup>15,20</sup>. Estas armadilhas caracterizam-se por: ser consequência de um processo decorrente da atividade humana; ter, ou vir a ter, impactos indesejáveis no ST, em particular no bem-estar das populações; aprisionarem o ST numa trajetória que levará a um novo ponto estável indesejável. Foram identificadas pelo menos 14 armadilhas antropocénicas: padronização e especialização excessiva dos sistemas de produção; crescer como um fim em si mesmo; sobre-exploração de recursos; decréscimo da colaboração; proliferação de pandemias; inércia infraestrutural; poluição química; tecnologias que representam riscos existenciais; tecnologias dotadas de inteligência artificial sem controlo; desinformação; favorecimento do curto prazo em detrimento de estratégias sustentáveis; ultraconsumismo; desconexão da Biosfera; redução de capital social<sup>19</sup>. Invariavelmente, estas armadilhas iniciaram-se através de alguma inovação social que desencadeou uma trajetória, da qual se seguiu uma subsequente globalização graças à conectividade do ST, cimentando a dependência nesta inovação, acabando por não resolver qualquer problema humano a longo prazo. Após a globalização, observa-se uma fase de "dissimulação", na qual, dada a escala global das interações, deixa de haver a noção da direção da trajetória. De outro modo, o desfazamento espacial e temporal entre ação e consequência torna impercetível a conexão causa-efeito. A última fase é de ativação, onde o mecanismo está plenamente estabelecido, agravando o poder disruptivo da crise e a incapacidade do sistema se opor à evolução da trajetória que se desenvol-

ver. Estima-se que, com exceção das “tecnologias autônomas” e “redução de capital social”, as armadilhas possam estar numa fase avançada de evolução<sup>19</sup>.

Não obstante, estas armadilhas podem ser agrupadas em três grandes grupos relativamente à natureza da interação: globais, tecnológicas e estruturais. Destes, dois estão dotados de um ciclo de reação positiva que se amplifica sistematicamente. Associado às armadilhas globais, o ciclo de seleção a muitos níveis atua principalmente através do processo de seleção cultural e cooperação mundial. Emerge daqui uma ordem social mais rígida, por sua vez menos apta a lidar com crises e com um grau maior de conflito. A organização social resultante leva a um crescimento mais acentuado, associado a uma excessiva extração de recursos. No caso das armadilhas tecnológicas, o ciclo vicioso exprime-se através de uma necessidade de resolver problemas sociais ou ecológicos através duma inovação tecnológica, que, por sua vez, leva a um novo problema ainda mais complexo. A inteligência artificial, novos compostos sintéticos nocivos e a ameaça nuclear são exemplos deste tipo de ciclo. As armadilhas estruturais referem-se à dissimulação das interações e a sua natureza. Caracterizam-se pelo desfasamento espaço-temporal e envolvem a hiper-conectividade do ST<sup>19</sup>.

## **Resiliência.**

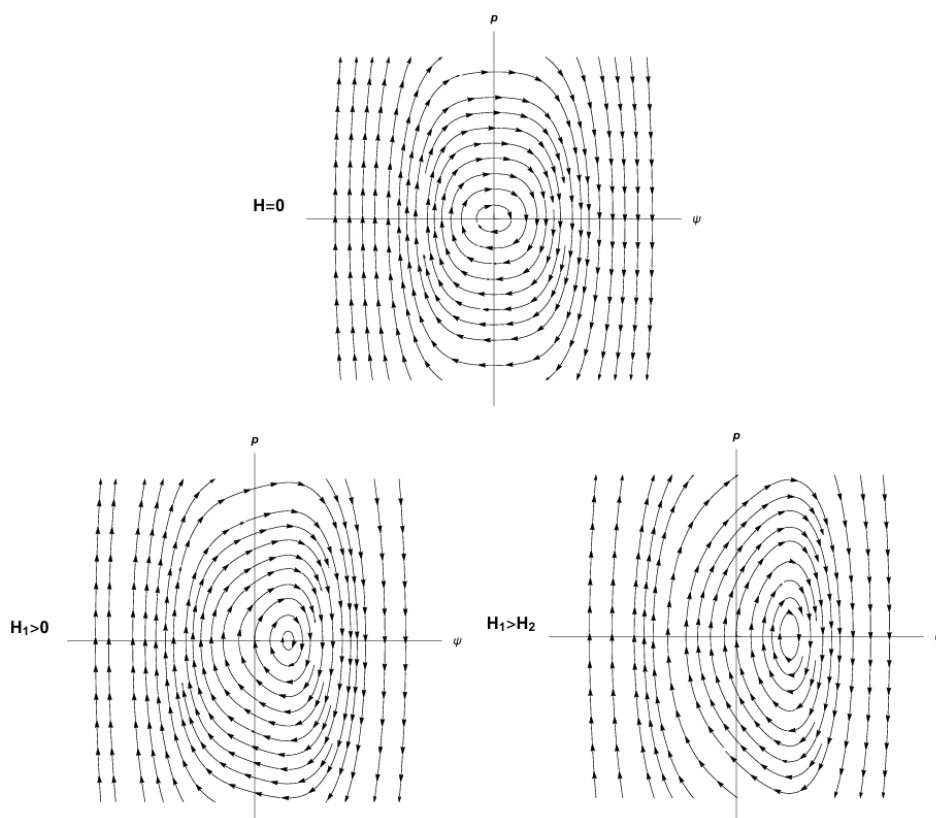
Resiliência é a capacidade de um sistema complexo amortecer as perturbações a que está sujeito ao longo da sua evolução<sup>21</sup>. Deparamo-nos já com este fenómeno ao analisar a capacidade dos sistemas vegetais resistirem às perturbações de origem externa<sup>6</sup>. Teoricamente, o conceito pode ser incorporado no formalismo de interação das FP para melhor descrever os pontos críticos dos sistemas ambientais<sup>4, 5</sup> e os seus mecanismos de retroação<sup>21</sup>. De uma perspectiva física, a resiliência está associada à capacidade do ST dissipar as perturbações de origem externa. Esta propriedade pode ser útil para construir novas trajetórias do ST através da dissipação dos efeitos da atividade humana e evitar cenários de “Terra-quente”<sup>21</sup>. Outra característica da resiliência no ST é permitir a existência de estados meta-estáveis, pontos de equilíbrio instáveis, devido às propriedades dissipativas do sistema, necessárias para evitar que o ST siga a trajetória atual na direção de uma “Terra-quente”. Por exemplo, a FIGURA 3 descreve esta evolução em termos de órbitas no espaço de fase do ST resultantes do incremento da atividade humana, dando origem a estados de equilíbrio de crescente temperatura.

As propriedades de resiliência podem ser exemplificadas através de um modelo termodinâmico do ST que permite identificar através da equação de movimento do ST, a equação do Antropocénico<sup>22</sup>, as trajetórias no espaço de fase do ST<sup>16</sup>.

Um passo relevante para fomentar a resiliência do ST é a mitigação dos efeitos da atividade humana a nível global. No campo da transição para energias renováveis, a redução do consumo de combustíveis fósseis decresce a emissão de gases de efeito de estufa e outros poluentes. Paralelamente, o custo das políticas de mitigação tende a decrescer com o aumento da resiliência e os retornos monetários na forma de saúde, por exemplo, poderem suportar estas políticas<sup>23, 24, 25</sup>. Contudo, há certos efeitos adversos que devem ser considerados. Certas tecnologias verdes emitem menos gases de efeito de estufa, mas podem ter uma pegada ecológica não negligenciável devido, por exemplo, aos subprodutos indesejáveis do seu fabrico, tal como o SO<sub>2</sub><sup>23</sup>.

Numa abordagem genérica e numa dimensão mais local ou individual, deve-se procurar estimular a adaptação e a versatilidade. Uma perspetiva de estruturas modulares é vantajosa na adaptação face às crises, considerando, por exemplo, infraestruturas autônomas<sup>19</sup>. Além disso, este processo de adaptação muitas vezes vai de encontro às políticas de desenvolvi-

mento sustentável necessárias para aumentar a resiliência do ST<sup>19,26</sup>. Dentro do conjunto de estratégias possíveis de adaptação há que considerar propostas puramente financeiras<sup>27</sup> ou de geoengenharia<sup>28,29</sup>, que permitem contrariar os efeitos da crise climática.



**FIGURA 3.** Trajetórias do ST no espaço de fase  $(\psi, p)$ , onde se define a variável  $\psi$  como o desvio relativo de temperatura terrestre atual em relação ao valor médio no Holocénico,  $\psi = (T - \langle T_H \rangle) / \langle T_H \rangle$ , e  $p$  o seu momento conjugado,  $p \propto \dot{\psi}$ , em função do impacto da atividade humana nas FP, coletivamente designado por  $H$ . Observa-se que o aumento da atividade humana, conduz o ST para um novo ponto de equilíbrio, uma Terra-quente<sup>16</sup>.

Na verdade, mesmo que os custos e resultados das ações de mitigação e adaptação tenham escalas diferentes, muitas vezes beneficiam-se mutuamente<sup>26</sup>. Basta pensar que a transição para energias renováveis, um processo claramente positivo de mitigação, engloba inúmeros processos locais de adaptação, tais como a construção de geradores hídricos e eólicos a nível regional, aumentando a resiliência global do ST.

Posto isto, um dos objetivos do nosso trabalho é construir um modelo matemático que permita avaliar o impacto das ações humanas diretamente nas FP e na evolução das crises<sup>30</sup>. O grau de conectividade e o grande número de interações no contexto do ST são característicos de um sistema físico complexo, que, se dotado de propriedades dissipativas, pode também descrever a resiliência do ST face à atividade humana. Através de um modelo análogo ao da interação de spins em sistemas de matéria condensada, pensamos ser possível descrever o comportamento das crises do ST.

Claramente, a atividade humana tem sido a força motriz da crise climática, eclipsando as restantes forças telúricas (geológicas e astronómicas) que regem o ST. Os subsistemas que o constituem estão a atingir pontos críticos associados a mudanças de regime. As observações demonstram que estes subsistemas em transição de regime, que se afetam mutuamente, dão origem a uma policrise. A caracterização das FP permite quantificar a evolução da crise do ST,

podendo ser um instrumento útil para evitar ou prever uma, ou um conjunto, de armadilhas antropocénicas. Pode permitir também a conceção de estratégias específicas de adaptação e mitigação para as crises que invariavelmente teremos de enfrentar no futuro.

## Notas

<sup>a</sup> Assume-se o Teorema da Flutuação-Dissipação, onde se estima a resposta do sistema a forças externas através da resposta às suas flutuações naturais em torno de um ponto de equilíbrio.

## REFERÊNCIAS

- <sup>1</sup> STEPHENS, G. L. et al., [An update on earth's energy balance in light of the latest global observations](#), *Nature Geoscience*, vol. 5, no. 10, pp. 691-696. 2012.
- <sup>2</sup> HADDAD, N. M. et al., [Habitat fragmentation and its lasting impact on earth's ecosystems](#), *Science Advances*, vol. 1, no. 2, p. e1500052. 2015.
- <sup>3</sup> POORTER, L. et al., [Diversity enhances carbon storage in tropical forests](#), *Global Ecology and Biogeography*, vol. 24, 10. 2015.
- <sup>4</sup> LENTON, T. M., [Tipping elements in the earth's climate system](#), *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105, no. 6, pp. 1786-1793. 2008.
- <sup>5</sup> MCKAY, D. A. et al., [Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points](#), *Science*, vol. 377, no. 6611, p. eabn7950. 2022.
- <sup>6</sup> SMITH T. et al., [Empirical evidence for recent global shifts in vegetation resilience](#), *Nature Climate Change*, vol. 12, no. 5, pp. 477-484. 2022.
- <sup>7</sup> FRANCISCO, F. & BERTOLAMI, O., [Alterações climáticas e o sistema terrestre](#), *Revista de Ciência Elementar*, vol. 8, no. 4. 2020.
- <sup>8</sup> CRUTZEN, P. J., *The "Anthropocene"*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 13-18. 2006.
- <sup>9</sup> CRUTZEN, P. J., [Geology of mankind](#), *Nature*, vol. 415, no. 6867, pp. 23-23. 2002.
- <sup>10</sup> WATERS, C. N., *The anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the holocene*, *Science*, vol. 351, no. 6269. 2016.
- <sup>11</sup> MORIN, E. & KERN, A., *Homeland Earth: A Manifesto for the New Millennium*, *Advances in systems theory, complexity, and the human sciences*, pp. 72-75. 1999.
- <sup>12</sup> LAWRENCE, M. et al., [Global polycrisis: the causal mechanisms of crisis entanglement](#), *Global Sustainability*, vol. 7, p. e6. 2024.
- <sup>13</sup> ROCKSTRÖM, J. et al., [Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity](#), *Ecology and Society*, vol. 14, no. 2, p. 32. 2009.
- <sup>14</sup> STEFFEN, W. et al., [Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet](#), *Science*, vol. 347, no. 6223, p. 1259855. 2015.
- <sup>15</sup> CAESAR, L. et al., [Planetary health check report 2024](#). 2024.
- <sup>16</sup> BERTOLAMI, O. & FRANCISCO, F., [A phase space description of the earth system in the anthropocene](#), *EPL (Europhysics Letters)*, vol. 127, p. 59001. 2019.
- <sup>17</sup> BERNARDINI, A. E. et al., [Chaotic behaviour of the earth system in the anthropocene](#), *Evolving Earth*, vol. 3, p. 100060. 2025.
- <sup>18</sup> BERTOLAMI, O., [From the stochastic weather to a putative chaotic earth system](#), *arXiv e-prints*, p. arXiv:2209.09540. 2022.
- <sup>19</sup> SØGAARD JØRGENSEN, P. et al., [Evolution of the polycrisis: Anthropocene traps that challenge global sustainability](#), *Phil. Trans. R. Soc.*. 2024.
- <sup>20</sup> STEFFEN, W. et al., [Trajectories of the earth system in the anthropocene](#), *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 115, no. 33, pp. 8252-8259. 2018.
- <sup>21</sup> BERTOLAMI, O. & NYSTRÖM, M., [Setting up the physical principles of resilience in a model of the earth system](#), *em preparação*. 2025.
- <sup>22</sup> BERTOLAMI, O. & FRANCISCO, F., [A physical framework for the earth system, anthropocene equation and the great acceleration](#), *Global and Planetary Change*, vol. 169, pp. 66-69. 2018.
- <sup>23</sup> BLANCO, G. et al., [Drivers, trends and mitigation](#), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, pp. 351-412. 2014.
- <sup>24</sup> BERTOLAMI, O., [Greening the anthropocene](#), *Anthropocenica. Revista de Estudos do Antropoceno e Ecocrítica*, vol. 3, Out. 2022.
- <sup>25</sup> BERTOLAMI, O. & GONÇALVES DIEGO, C., [Safety in an uncertain world within the resilience integrated model of climate and economic \(RIMCE\)](#), *SSRN*. 2023.
- <sup>26</sup> DENTON, F. et al., [Climate-resilient pathways: adaptation, mitigation, and sustainable development](#), in *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*, pp. 1101-1131, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. 2014.
- <sup>27</sup> BERTOLAMI, O., [Natural capital as a stock option](#), *arXiv:2404.14041*. 2024.
- <sup>28</sup> BERTOLAMI, O., [Could the Well of an Orbital Lift Be Used to Deposit Greenhouse Gases into Space?](#), *John Wiley Sons*, ch. 23, pp. 367-375. 2025.
- <sup>29</sup> BERTOLAMI, O. & MATOS, C. J., [Cooling the earth with CO<sub>2</sub> filled containers in space](#), *arXiv:2401.07829*. 2024.
- <sup>30</sup> BERTOLAMI, O. & ELÍSIO, R., *em preparação*. 2025.