



Artigo de Revisão

e-ISSN 2177-4560

DOI: 10.19180/2177-4560.v19n12025p183-209

Submetido em: 04 jun. 2025

Aceito em: 13 out. 2025

.....

A estrutura dos Limites Planetários e a realização dos estudos de impacto ambiental: contribuições para o enfrentamento da crise ecológica planetária

The Planetary Boundaries framework and the environmental impact studies: contributions to addressing the planetary ecological crisis

El marco de Límites Planetarios y los estudios de impacto ambiental: contribuciones para abordar la crisis ecológica planetaria

Páulea Zaquini  <https://orcid.org/0009-0000-9166-3827>

Fundação Oswaldo Cruz

Mestrado em Saúde Pública pelo Fundação Oswaldo Cruz. Tecnologista em Saúde Pública do Fundação Oswaldo Cruz.

E-mail: paulea.zaquini@fiocruz.br

Resumo: Apesar das muitas evidências relacionadas à intensa deterioração ambiental do planeta, continuamos a emitir, cotidianamente, altas concentrações de dióxido de carbono; a lançar na atmosfera, na hidrosfera e na litosfera altas cargas de diversos outros poluentes; e, por meio dessas ações e de muitas outras, a interromper os ciclos de regeneração dos ecossistemas. Nesse contexto, e considerando a importância dos estudos de impacto ambiental como instrumentos imprescindíveis à mitigação da deterioração ambiental planetária, busca-se demonstrar aqui a importância da incorporação dos conhecimentos advindos das pesquisas sobre os Limites Planetários (*Planetary Boundaries*) quando da realização dos estudos de impacto ambiental. Para subsidiar a discussão, o artigo apresenta uma síntese dos conhecimentos que fundamentam e que estão presentes na estrutura dos Limites Planetários, apresentação que é seguida pela identificação dos possíveis pontos de encontro ou atravessamento entre a referida estrutura e a legislação nacional que discorre sobre os estudos de impacto ambiental. Como conclusão é defendida a incorporação dos estudos relacionados à estrutura dos Limites Planetários quando da elaboração dos estudos de impacto ambiental.

Palavras-chave: Limites Planetários. Serviços Ecossistêmicos. Estudos de Impacto Ambiental. Crise ecológica. Terra Estufa.

Abstract: Despite the abundant evidence related to the intense environmental deterioration of the planet, we continue, daily, to emit high concentrations of carbon dioxide; to release high loads of many other pollutants into the atmosphere, hydrosphere and lithosphere; and, through these actions and many others, to interrupt the regeneration cycles of ecosystems. In this context and considering the importance of environmental impact studies as essential instruments for mitigating planetary environmental deterioration, this research seeks to demonstrate the importance of incorporating knowledge from studies on Planetary Boundaries when conducting environmental impact studies. To support the discussion, the article presents a summary of the knowledge that underlies and is present in the structure of Planetary Boundaries, a presentation that is followed by the identification of possible points of convergence or intersection between said structure and national legislation that discusses environmental impact studies. As a conclusion, the incorporation of studies related to the Planetary Boundaries structure when preparing environmental impact studies is advocated.

Keywords: Planetary Boundaries. Ecosystem Services. Environmental Impact Studies. Ecological Crisis. Hothouse Earth.

Resumen: A pesar de las numerosas evidencias relativas al intenso deterioro ambiental del planeta, seguimos emitiendo diariamente altas concentraciones de dióxido de carbono; liberando grandes cantidades de muchos otros contaminantes a la atmósfera, la hidrosfera y la litosfera; y, a través de estas acciones y muchas otras, interrumpiendo los ciclos de regeneración de los ecosistemas. En este contexto, y considerando la importancia de los estudios de impacto ambiental como instrumentos esenciales para mitigar el deterioro ambiental planetario, esta investigación busca demostrar la importancia de incorporar el conocimiento de los estudios sobre Límites Planetarios en la elaboración de estudios de impacto ambiental. Para sustentar la discusión, el artículo presenta un resumen del conocimiento subyacente y presente en la estructura de Límites Planetarios, seguido de la identificación de posibles puntos de convergencia o intersección entre dicha estructura y la legislación nacional que aborda los estudios de impacto ambiental. En conclusión, se aboga por la incorporación de estudios relacionados con la estructura de Límites Planetarios en la elaboración de estudios de impacto ambiental.

Palabras clave: Límites planetarios. Servicios ecosistémicos. Estudios de Impacto Ambiental. Crisis ecológica. Tierra de efecto invernadero.

1 Introdução

Bastante diferente das eras, períodos e épocas geológicas anteriores, quando os processos de transição entre esses tempos geológicos no planeta Terra foram disparados por fatores exógenos às relações metabólicas estabelecidas entre a humanidade e o seu habitat natural, é bastante provável que ingressemos, ou que já estejamos vivendo, em um novo tempo geológico, agora intensamente determinado pelas ações humanas que impactam o sistema terrestre¹ (Crutzen, 2002; Crutzen; Stoermer, 2000; Richardson *et al.*, 2023; Steffen; Crutzen; McNeill, 2007). Tempo esse que vem sendo denominado de Antropoceno^{2/3} (Crutzen, 2002; Crutzen; Stoermer, 2000) dada as suas características fundantes quando as ações humanas sobre o planeta passaram a ser a grande força geofísica global (Steffen; Crutzen; McNeill, 2007).

Sobre o potencial dessa força geofísica global, Rockstrom *et al.* (2009a; 2009b) e Steffen *et al.* (2007; 2015; 2018) chamam a atenção para o fato de que a manutenção de ações antropogênicas que empurram cotidianamente os ecossistemas em direção aos limites de sua resiliência – considerando as características físicas, químicas e biológicas do sistema terrestre dos últimos 11.000 anos – poderia impedir, por exemplo, a estabilização do clima no planeta em temperaturas mais próximas daquelas observadas no

¹ Steffen *et al.* (2007) referem-se ao sistema terrestre como o conjunto de ciclos físicos, químicos e biológicos em escala global e fluxos de energia que fornecem o sistema de suporte à vida na superfície do planeta (Steffen; Crutzen; McNeill, 2007). Para Rockstrom *et al.* (2024), o sistema terrestre é um sistema complexo e autorregulável caracterizado por múltiplas interações e feedbacks entre grandes sistemas biofísicos que interagem com a vida na Terra e determinam a resiliência de todo o sistema (Rockström *et al.*, 2024).

² Segundo Steffen *et al.* (2018) o Antropoceno é uma nova época geológica proposta com base na observação de que os impactos humanos nos processos planetários essenciais se tornaram tão profundos que expulsaram a Terra da época do Holoceno. Apesar do termo Antropoceno ter sido utilizado no meio científico na década de 1980 por Eugene Stoermer, foi só a partir dos anos 2000 que o termo passou a ser utilizado por outros autores (Crutzen; Stoermer; Steffen, 2013, p. 487). No entanto, é preciso destacar que ainda no século XIX o termo “era Antropozóica” foi utilizado por Antonio Stoppani (Stoppani *apud* Marsh, 1878).

³ *Anthropo*, que no grego significa “homem”, e *cene*, que vem de *kainos* e em grego significa “novo”. Nesse caso, um novo tempo geológico que tem, como determinação, as atividades humanas.

Holoceno⁴. Ou mesmo causar o aquecimento contínuo do sistema terrestre na direção de uma "Terra Estufa". Tal fenômeno aconteceria mesmo depois que as emissões humanas de gases de efeito estufa fossem reduzidas (Steffen *et al.*, 2018).

Essas afirmações estão baseadas em observações não só de acréscimos de temperatura no ar próximo à superfície do planeta, mas também a partir da observação de outras alterações biogeoquímicas dentro do planeta (Rockström *et al.*, 2009a, 2009b; Steffen *et al.*, 2015b, 2018), algumas delas nem sempre tão evidentes, mesmo para a comunidade científica. Sobre essas alterações, muitas vezes provenientes de efeitos em cascata, Steffen *et al.* (2018) indicam que “a soma total dos impactos humanos no sistema precisa ser levada em consideração para analisar as trajetórias futuras do Sistema Terrestre” (Steffen *et al.*, 2018, tradução nossa, n.p.).

Entre as alterações advindas de efeitos em cascata e que nem sempre se apresentam de forma tão aparente, podemos citar as observações realizadas recentemente a respeito de quedas nas taxas populacionais em comunidade de abelhas, que têm como um dos possíveis motivos a redução de proteínas no pólen das plantas, uma das consequências dos aumentos de CO₂ na atmosfera (Ziska *et al.*, 2016). Ainda em relação à queda de percentuais proteicos nas plantas, estudos que investigam a deficiência de nutrientes na população humana também têm analisado os efeitos do aumento de CO₂ na atmosfera sobre a produção vegetal, e têm igualmente apontado a queda dos percentuais de proteínas em vegetais. Esses estudos têm indicado que, embora ocorra um aumento na síntese de açúcares e amidos em culturas cultivadas sob condições de alto teor de carbono, há uma redução nas concentrações de proteínas e outros nutrientes (Dong *et al.*, 2018; Schmitt, 2024), o que pode comprometer a saúde humana diretamente (Schmitt, 2024).

Notemos aqui que, nos dois casos – o das quedas nas taxas populacionais em comunidades de abelhas e o de um possível aumento do déficit nutricional na população humana derivado de quedas nos percentuais de proteínas e outros nutrientes na produção vegetal –, não estamos tratando de efeitos diretos do aquecimento global como, por exemplo, o derretimento do gelo polar (Calvin *et al.*, 2023). Não se trata nem mesmo de efeitos indiretos bastante visíveis, como é o caso do aumento do nível do mar, ou do aumento da aridez do solo (Calvin *et al.*, 2023; European Commission, 2025). O que se pretende destacar aqui é que muitos processos decorrentes da degradação do sistema terrestre podem ser ainda bastante desconhecidos, e que eles podem ser bem mais nocivos do que imaginamos.

⁴ Holoceno: período geológico que compreende os aproximadamente últimos 11.000 anos do planeta Terra e no qual a agricultura, as comunidades sedentárias e, eventualmente, as sociedades humanas social e tecnologicamente complexas se desenvolveram (Crutzen; Stoermer; Steffen, 2013).

No caso das abelhas, num ciclo vicioso, a queda nas taxas populacionais prejudica a polinização, prejudicando, em sequência, a Produção Primária Líquida (PPL) mundial. Produção essa que é a base da alimentação de toda a cadeia trófica, além de ser um importante sumidouro de CO₂ (European Commission, 2025). Destaca-se aqui que a PLL pode ser afetada também por outras modificações dentro do sistema terrestre, entre elas as alterações nos regimes de chuva e de outras precipitações atmosféricas (CLD, 2022). Nesse caso tal processo decorre tanto do efeito direto da ocorrência mais intensa de inundações, secas severas, e incêndios sobre a produção vegetal (CLD, 2022), quanto pelos efeitos indiretos relacionadas aos ciclos bioquímicos dos seres vivos que participam do processo da referida produção vegetal e que também sofrem quando da ocorrência de incêndios, secas ou inundações.

Lembrando que, conforme apontado no Atlas Mundial da Desertificação, muitos serviços ecossistêmicos estão positivamente correlacionados com a produção primária líquida incluindo, para além da produção de alimentos, a regulação do clima, a purificação da água, a manutenção de nutrientes no solo, o sequestro do carbono disponível na atmosfera, a preservação da biodiversidade, - incluindo a produção e proteção de patrimônio genético -, e a função estética da paisagem (European Commission, 2025).

Retomando agora um pouco da história, destaca-se que não são recentes, no meio científico, análises que indicam a importância da avaliação do todo, e não somente das partes, quando o assunto é a relação metabólica instituída entre os seres humanos e o seu habitat natural. Essas análises estão presentes, por exemplo, no livro *The Earth as Modified by Human Action*, de Marsh (1878), baseado no livro *Man and Nature*, publicado pelo mesmo autor em 1864; nas obras de Marx, todas do século XIX (Foster, 2005), e nas obras de Georgescu-Roegen desde a década de 1960 (Georgescu-Roegen, 1975).

Tais questões também estavam presentes quando da instituição do Clube de Roma, em 1968; na realização da 1^a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente, na Suécia, no ano de 1972 (United Nations, 2025); e na publicação intitulada *Os Limites do Crescimento*, de Meadows *et al.*, cuja primeira edição data de 1972 (Meadows *et al.*, 1978). Como desdobramento da realização da 1^a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente, destaca-se aqui a criação, no âmbito das Nações Unidas, do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnuma) (United Nations, 2025).

Retomando as preocupações de Marsh (1878), o autor, ao se referir à decadência ecossistêmica de diferentes regiões da Europa, da Ásia Ocidental, da Líbia e da antiga Pérsia, e de outras partes do Oriente traz que “rios famosos na história e na música encolheram até se tornarem humildes riachos” e que “riachos deixaram de existir como correntes perenes, porque a pouca água que encontra seu caminho para seus antigos canais é evaporada pelas secas do verão ou absorvida pela terra ressecada antes de chegar às terras baixas” (Marsh, 1878, tradução nossa, n. p.).

Dos trechos de Marsh reproduzidos acima e das reflexões colocadas por Foster e Clark (2004) em “Ecological Imperialism: the curse of capitalism”, por Georgescu-Roegen (1975) em “Energy and Economic Myths”, e por Meadows *et al.* (1978) em *Os limites do Crescimento*, aprofundamos aqui duas questões. A primeira é que, mesmo antes da Revolução Industrial, as ações antropogênicas já causavam importantes processos de degradação ambiental, ainda que localizadas. Daí inclusive uma certa dificuldade dos cientistas em estabelecerem a data mais exata de quando realmente as ações antropogênicas começaram a se apresentar como uma força geofísica global. A segunda é que, mesmo diante de avisos bastante acentuados (Foster; Clark, 2004a; Georgescu-Roegen, 1975; Marsh, 1878; Meadows *et al.*, 1978), a humanidade, de maneira geral, não optou por estabelecer uma interação metabólica harmônica com a Terra na contemporaneidade. Pelo contrário, a humanidade, de maneira geral, manteve-se na direção de uma degradação cada vez maior do planeta, rompendo as barreiras da localidade e devastando de maneira cada vez mais global (Foster; Clark, 2004b).

No contexto do reconhecimento da produção científica e de seus protagonistas quanto à identificação de graves e intensas falhas metabólicas em relação à apropriação do ambiente natural pelos seres humanos, destaca-se aqui dois conceitos contemporâneos que têm muita proximidade com as reflexões/preocupações de Marsh (1878) e Antonio Stoppani (*apud* Marsh, 1878). O primeiro, que diz respeito à necessidade de uma interação metabólica entre a humanidade e o sistema terrestre de forma a garantir condições favoráveis de vida às gerações futuras, foi apresentado por Marsh (1878). Sobre isso, o autor escreve:

[e] é apenas recentemente que, mesmo nas partes mais populosas da Europa, a atenção pública foi meio despertada para a necessidade de restaurar as harmonias perturbadas da natureza, cujas influências bem equilibradas são tão propícias a todos os seus descendentes orgânicos, e de pagar à nossa grande mãe a dívida que a prodigalidade e a parcimônia das gerações anteriores impuseram aos seus sucessores - cumprindo assim o mandamento da religião e da sabedoria prática, de usar este mundo sem abusar dele. (Marsh, 1878, tradução nossa, n. p.).

O segundo, que aborda a capacidade das ações antropogênicas alterarem o tempo geológico, tratado por Stoppani (Stoppani *apud* Marsh, 1878), e que apresenta uma reflexão muito próxima daquelas trazidas por Paul Crutzen e Eugene Stoermer mais de um século depois (Crutzen; Stoermer, 2000). Conforme relatado por Marsh (1878), Stoppani indica que a existência da vida humana no planeta instaura um novo tempo geológico e o designa como a Era Antropozóica:

Em um capítulo anterior, falei da influência da ação humana na superfície do globo como imensamente superior em grau à exercida por animais irracionais, se não essencialmente diferente em espécie. O eminent geólogo italiano Stoppani vai além do que eu ousei fazer e trata a ação do homem como um novo elemento físico totalmente sui generis. Segundo ele, a existência do homem constitui um período geológico que ele designa como ERA ANTROPOZOICA. "A criação do homem", diz ele, "foi a introdução de um novo elemento na natureza, de uma força totalmente

desconhecida em períodos anteriores". "É uma nova força telúrica que, em poder e universalidade, pode ser comparada às maiores forças da Terra". (Stoppani *apud* Marsh, 1878, tradução nossa, n.p.).

Retornando à segunda metade do século XX e aos estudos que tinham como objetivo expor as condições sociometabólicas insustentáveis existentes naquele momento, merecem destaque ainda algumas passagens do relatório *Os Limites do Crescimento*. A primeira delas é a que diz respeito ao Clube de Roma, uma instituição não governamental que tinha como objetivo em sua constituição discutir os dilemas da época e o futuro da humanidade (Meadows *et al.*, 1978). Segundo Meadows *et al.* (1978), os integrantes do Clube de Roma tinham a “profunda convicção” de que os grandes problemas que desafiavam a humanidade eram tão complexos e interrelacionados “que as instituições e os planos de ação tradicionais” já não seriam “capazes de superá-los, nem mesmo de enfrentá-los em seu conjunto” (Meadows *et al.*, 1978, p. 10).

Meadows *et al.* (1978) destacam que o projeto Predicament of Mankind (em português, Dilemas da Humanidade), uma iniciativa do Clube de Roma, tinha como objetivo principal examinar o conjunto de problemas que afligiam os povos de todas as nações, considerando toda a pobreza em meio à abundância, a deterioração do meio ambiente, a perda de confiança nas instituições, a expansão urbana descontrolada, a insegurança no emprego, entre outros transtornos econômicos e monetários (Meadows *et al.*, 1978, p. 11). De um trecho do livro *Os Limites do Crescimento*, destaca-se:

O dilema da humanidade é que o homem pode perceber a problemática e, no entanto, apesar de seu considerável conhecimento e habilidades, ele não comprehende as origens, a significação e as correlações de seus vários componentes e, assim, é incapaz de planejar soluções eficazes. Fracasso que ocorre, em grande parte, porque continuamos a examinar elementos isolados na problemática, sem compreender que o todo é maior do que suas partes; que a mudança em um dos elementos significa mudança nos demais (Meadows *et al.*, 1978, p. 11).

Mais do que lançar luz sobre reflexões/preocupações históricas que envolviam a relação humanidade-sistema terrestre, os trechos trazidos como destaque neste artigo têm como objetivo indicar que, pelo menos nos últimos 150 anos, os caminhos de degradação descontrolada do planeta Terra percorridos pela humanidade não foram percorridos sob uma escuridão científica. Pelo contrário, a ciência, pelo menos desde o século XIX, vem indicando e demonstrando os diversos efeitos deletérios da ação antropogênica sobre o planeta.

Assim, passados mais de um século e meio de importantes relatos científicos que indicavam a alta degradação dos ecossistemas devido ao modo de ocupação humana, e mais de 50 anos desde a publicação da primeira edição do relatório *Os Limites do Crescimento*, o conjunto robusto de mudanças sociais interconectadas necessárias que pudesse estender por mais tempo a existência humana num tempo geológico com as características do Holoceno não foi realizado. É possível identificar que, apesar da

importância das mudanças pontuais ocorridas no sistema produtivo, como aquelas relacionadas à redução na emissão de gases que comprometem a presença de ozônio na atmosfera terrestre (Protocolo de Montreal, 1987), as alterações no sistema produtivo ainda são muito insuficientes diante da diversidade de ações antropogênicas causadoras do desequilíbrio no sistema terrestre.

Nesse contexto, vale lembrar que, mesmo diante do contínuo aquecimento global – causado, na atualidade, majoritariamente pelas emissões antropogênicas de CO₂ na atmosfera –, no ano de 2022 mais de 80% da energia consumida no mundo ainda teve como base da sua cadeia de produção elementos extraídos de reservas relacionadas aos estoques de carbono (IEA, 2025). Isso ocorreu apesar da já consolidada presença de tecnologias eficazes, que poderiam ter contribuído de forma mais significativa para a mudança desse cenário.

Tomemos aqui como exemplo a energia fotovoltaica que, segundo Gayen, Chatterjee e Roy (2024), entre os maiores obstáculos que impedem o avanço da instalação desta tecnologia está a incapacidade de governos e entidades corporativas financiarem essa transição (Gayen; Chatterjee; Roy, 2024).

E é neste contexto delineado tanto pela interrupção ou pela queda “na produtividade” de serviços ecossistêmicos importantes para a preservação da vida humana no planeta, quanto pela necessidade de a humanidade construir, urgentemente, uma nova relação metabólica com o sistema terrestre, que este estudo foi estruturado. A intenção é demonstrar que os conhecimentos sistematizados para a elaboração e atualização da estrutura dos Limites Planetários, conceito que será apresentado adiante, são de grande valia no contexto da elaboração dos estudos de impacto ambiental.

A metodologia da pesquisa foi organizada considerando dois pontos centrais: 1) a necessidade de uma apresentação detalhada da estrutura dos Limites Planetários; e 2) a identificação dos possíveis pontos de encontro ou atravessamento entre a estrutura dos Limites Planetários e a legislação nacional sobre os estudos de impacto ambiental.

A primeira fase da pesquisa, reservada à apresentação da estrutura dos Limites Planetários, foi estruturada considerando a necessidade da realização de uma revisão teórica do objeto. Para isso foram utilizadas inicialmente as plataformas de busca Connected Papers e Google Acadêmico. Em ambas, o termo definido para pesquisa foi *Planetary Boundaries*.

Nesse contexto, a primeira busca realizada na plataforma Connected Papers gerou um gráfico com conexões entre 41 artigos publicados entre os anos de 2002 e de 2022, tendo como núcleo o artigo de Rockström et al. (2009b), intitulado “*Planetary Boundaries: exploring the safe operating space for humanity*”.

E foi a partir da leitura do texto de Rockström *et al.* (2009b) que foram definidos os passos seguintes da pesquisa bibliográfica. Sendo o artigo de Rockström *et al.* (2009b) um texto seminal, e que trazia em seu desenvolvimento a identificação de nove Limites Planetários (LP), para a seleção inicial dos artigos foi considerado como critério de inclusão na base de dados do estudo a necessidade da apresentação e de alguma discussão sobre todos os nove Limites Planetários, excluindo da primeira seleção os artigos que tratavam apenas de Limites Planetários específicos. Assim, dos 41 documentos listados inicialmente na plataforma Connected Papers, para além do texto seminal de Rockström et al (2009b), outros cinco textos foram selecionados.

Dando continuidade, na busca de artigos realizada por meio da plataforma Google Acadêmico, também foi considerado como critério de inclusão a necessidade de que os artigos selecionados apresentassem a discussão dos nove processos apresentados na estrutura dos LP. Assim, com o *start* dado a partir do termo *Planetary Boundaries*, e diante da não definição de período específico, foram relacionados na plataforma Google Acadêmico mais de 1.700.000 referências. Destas, considerando a ordem de relevância definida pela própria plataforma, foram lidos os títulos e os resumos das 50 primeiras referências listadas. Nessa ocasião, considerando o critério de elegibilidade que contemplava a necessidade de apresentação e a discussão dos novos processos nos textos a serem selecionados, dez artigos foram destacados para leitura. Como quatro deles já tinham sido incorporados à pesquisa quando da seleção realizada a partir da busca feita na plataforma Connected Papers, doze textos foram lidos na primeira fase da pesquisa.

E foi a partir das referências relacionadas nesses doze primeiros artigos selecionados que muitos outros artigos foram sendo incorporados à base de dados desta pesquisa, com destaque a um segundo artigo seminal de Rockström *et al.* também publicado no ano de 2009 (Rockström *et al.*, 2009a).

Quanto à definição do referencial legal nacional que trata da necessidade da realização de estudos de impacto ambiental no país, por escolha metodológica, este estudo teve como foco as considerações trazidas nas Resolução Conama nº 01 de 1986 e Resolução Conama nº 237 de 1997. A primeira que “dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental” (Brasil, 1986) e a segunda que “dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental” (Brasil, 1997).

Assim, considerando o caminho metodológico percorrido, nas duas próximas seções são apresentadas, em primeiro lugar, a estrutura dos Limites Planetários proposta inicialmente por Rockström *et al.* (2009a; 2009b), com as atualizações de Steffen *et al.* (2015a) e Richardson *et al.* (2023) e, dando sequência, são apresentadas as análises que subsidiaram o objetivo deste estudo, que está fundamentado na

defesa da pertinência da utilização dos conhecimentos sistematizados na estrutura dos Limites Planetários quando da elaboração dos estudos de impacto ambiental.

2 Planetary Boundaries (os Limites Planetários): revisão teórica

Diante de muitas preocupações em relação ao contínuo aquecimento do planeta e do esgotamento/comprometimento de importantes serviços ecossistêmicos, e partindo do desejo de que adotássemos mais rapidamente, enquanto sociedade, ações que garantissem que a continuidade da trajetória da humanidade no planeta pudesse ser mantida em condições ecossistêmicas mais hospitalares, Rockström *et al.* publicaram, no ano de 2009, os artigos “A safe operating space for humanity” (Rockström *et al.*, 2009a) e “Planetary Boundaries: exploring the safe operating space for humanity” (Rockström *et al.*, 2009b). Nesses dois artigos, os autores apresentaram nove processos em curso na Terra que, na contemporaneidade, foram disparados e/ou são fortemente alimentados pelas ações antropogênicas, e que também estão diretamente relacionados à autorregulação e à resiliência do Sistema Planetário.

São eles: mudanças climáticas; mudanças no uso do solo; perda de biodiversidade (processo proposto em 2009 e depois substituído em 2023 por um processo mais amplo relacionado à integridade funcional e genética da biosfera); fluxos biogeoquímicos: interferências nos ciclos do fósforo e do nitrogênio; uso global da água doce (processo proposto em 2009 e depois substituído em 2015 pelo processo intitulado ‘mudanças no fluxo da água doce’); carregamento de aerossóis na atmosfera; acidificação dos oceanos; poluição química (processo proposto em 2009 e depois substituído em 2015 por um processo mais amplo relacionado ao carregamento/emissões de novas entidades na Terra); e destruição do ozônio atmosférico.

Além da definição dos nove processos, Rockström *et al.* (2009a, 2009b) selecionaram ao menos uma variável de controle para cada processo, e indicaram valores-limite para a maior parte dessas variáveis. Tanto a escolha das variáveis quanto os valores-limite foram definidos considerando a necessidade de interrupção da deterioração planetária na intensidade que estamos vivenciando na atualidade e considerando as condições ecossistêmicas necessárias à permanência da vida humana em padrões operacionais próximos aos vivenciados no Holoceno (Rockström *et al.*, 2009a, 2009b).

Rockström *et al.* (2009a; 2009b) indicam ainda que respeitar esses limites reduziria muito o risco de que atividades antropogênicas pudessem inadvertidamente levar o sistema terrestre a um estado muito menos hospitalero, e que “transgredir um ou mais limites planetários pode ser deletério ou mesmo catastrófico devido ao risco de cruzar limiares que desencadearão mudanças ambientais abruptas e não

lineares em sistemas de escala continental para planetária” (Rockström *et al.*, 2009a, Abstract, tradução nossa).

Sobre a abordagem da estrutura dos limites planetários, Rockström *et al.* discorrem:

[a] abordagem dos limites planetários se concentra nos processos biofísicos do Sistema Terrestre que determinam a capacidade de autorregulação do planeta. Ele incorpora o papel dos limiares relacionados aos processos do Sistema Terrestre em larga escala, cujo cruzamento pode desencadear mudanças não lineares no funcionamento do Sistema Terrestre, desafiando assim a resiliência socioecológica em escalas regionais e globais. Juntos, o conjunto de limites representa o “espaço” biofísico dinâmico do Sistema Terrestre dentro do qual a humanidade evoluiu e prosperou. Os limites respeitam as “regras do jogo” da Terra ou, por assim dizer, definem o “campo de jogo planetário” para o empreendimento humano. Os limiares nos principais processos do Sistema Terrestre existem independentemente das preferências, valores ou compromissos das pessoas com base na viabilidade política e socioeconômica, como expectativas de avanços tecnológicos e flutuações no crescimento econômico (Rockström *et al.*, 2009a, n.p., tradução nossa).

Ainda sobre a trajetória de ocupação do sistema terrestre pela humanidade, os processos contínuos e crescentes de deterioração do planeta, e as condições de operacionalidade da humanidade dentro de um Sistema Terrestre dentro dos padrões do Holocene, Steffen *et al.* (2015a) descrevem que “o empreendimento humano cresceu tão dramaticamente desde meados do século 20 que a época relativamente estável do Holocene, que até a atualidade tem um registro de duração de cerca de 11.700 anos, está chegando ao seu fim” (Steffen *et al.* 2015a, n.p., tradução nossa). Os autores indicam que o Holocene está agora sendo desestabilizado. E declaram:

Uma trajetória contínua para longe do Holocene poderia levar, com uma probabilidade desconfortavelmente alta, a um estado muito diferente do sistema terrestre, que provavelmente será muito menos hospitalar para o desenvolvimento das sociedades humanas (Steffen *et al.*, 2015a, n.p., tradução nossa).

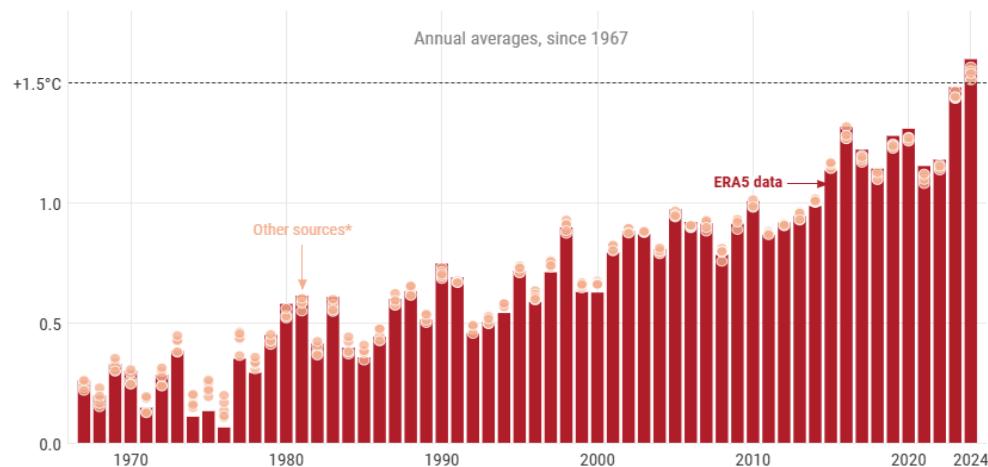
Tomemos como exemplo das preocupações de Steffen *et al.* (2015a) os acréscimos de temperatura que vêm sendo registrados na superfície do planeta nos últimos 50 anos, conforme demonstrado na Figura 1 publicada pela C3S/ECMWF (C3S, 2025).

Figura 1. Acréscimos anuais da temperatura na superfície do planeta no período 1967-2024, tendo como base a média das temperaturas no período de referência 1850-1990



Global surface temperature: increase above pre-industrial

Reference period: pre-industrial (1850–1900) • Credit: C3S/ECMWF



*Other sources comprise JRA-3Q, GISTEMPv4, NOAGlobalTempv6, Berkeley Earth, HadCRUT5.

Fonte: C3S (2025)

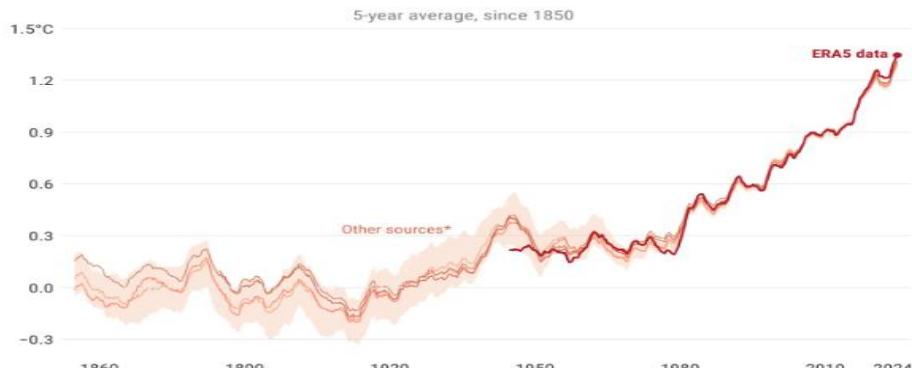
Além de demonstrarem claramente a tendência de aumento da temperatura na superfície do planeta no período de 1967 a 2024, os dados plotados na Figura 1 evidenciam que desde o final da década de 1970, a tendência de aquecimento global tem aumentado em média cerca de 0,2 °C por década (C3S, 2025). Acréscimos esses que divergem das tendências de variação de temperaturas na superfície do planeta no período de 1850 a 1980, segundo registros disponibilizados a partir de 1850, conforme mostrado na Figura 2 (C3S, 2025).

Figura 2. Variação da temperatura na superfície do planeta no período 1850-2024 tendo como base a média das temperaturas no período de referência 1850-1990 (média de 5 anos)



Global surface temperature: increase above pre-industrial

Reference period: pre-industrial (1850–1900) • Credit: C3S/ECMWF



*Other sources comprise JRA-3Q, GISTEMPv4, NOAGlobalTempv6, Berkeley Earth and the HadCRUT5 ensemble mean. Shading shows the range of the HadCRUT5 ensemble.



PROGRAMME OF
THE EUROPEAN UNION



Copernicus
Climate Change Service

CECMWF

Fonte: C3S (2025)

É necessário destacar ainda que, conforme demonstrado na Figura 2, a tendência de aumento da temperatura na superfície do planeta no período de 1850 a 2024 só pode ser observada após o ano de 1920 e, mesmo assim, com uma variação média sempre inferior a 0,3º C considerando o período iniciado no ano de 1920 e com término no final da década de 1970. Isso é muito diferente do que ocorre no período de 1980 a 2024, quando os registros de temperatura realizados na superfície do planeta vêm demonstrando acréscimos cada vez maiores. Considerando apenas os últimos 44 anos, o aumento da temperatura foi de aproximadamente 1º C.

Sobre a intensificação dos aumentos de temperatura no planeta nos últimos 44 anos e os estudos publicados por Rockström *et al.* (2009a, 2009b), é importante destacar que, segundo esses autores, os modelos climáticos com projeções lineares disponíveis até então estimavam que a duplicação da concentração de CO₂ atmosférico resultaria em um aumento médio da temperatura global de aproximadamente 3 ºC — com uma faixa de incerteza provável entre 2 ºC e 4,5 ºC. No entanto, caso tivessem sido considerados os efeitos em cascata nos sistemas terrestres, essa duplicação poderia provocar um aumento de até 6 ºC, com uma faixa de incerteza estimada entre 4 ºC e 8 ºC (Rockström *et al.*, 2009a).

Também com grande proximidade temporal às análises publicadas pela C3S (2025) que abordam a intensificação dos acréscimos de temperatura na segunda metade do século XX, Watson *et al.* (2020) observam que, desde a década de 1950, aproximadamente 60% dos ecossistemas globais foram significativamente degradados. Ainda sobre processos de degradação ambiental, em especial aqueles advindos das modificações no uso da terra, pesquisas recentes indicam que o estado natural de mais de 70% da superfície continental da Terra foi modificado por ações antropogênicas, contribuindo, entre outras questões, para o aumento das temperaturas na superfície do planeta (CLD, 2022).

É importante destacar ainda que, apesar de nenhum dos nove processos apresentados por Rockström *et al.* (2009a, 2009b) ser uma novidade à época, visto que eles já vinham sendo estudados por diferentes pesquisadores (Carpenter *et al.*, [s.d.]; Crutzen, 2002; Crutzen; Stoermer, 2000; Steffen; Crutzen; McNeill, 2007), os artigos de Rockström *et al.* (2009a, 2009b) trouxeram contribuições muito importantes, considerando a compilação desses nove processos e da projeção de limites seguros de operacionalidade para as variáveis escolhidas em uma única estrutura: a estrutura dos Limites Planetários.

Assim, a partir dos textos, das figuras e das tabelas elaboradas e disponibilizadas por Rockström *et al.* (2009a; 2009b), por Steffen *et al.* (2015a) e por Richardson *et al.* (2023), reproduzimos, no Quadro 1 deste artigo, informações compiladas por esses autores sobre a estrutura do Limites Planetários, que foi inicialmente proposta na Tabela “Proposed planetary boundaries” (Rockström *et al.*, 2009b).

Além da descrição dos nove processos do sistema terrestre fortemente impactados pelas atividades antropogênicas e relevantes para o estado geral do planeta Terra (Richardson *et al.*, 2023), o Quadro 1 apresenta as variáveis escolhidas pelos autores como variáveis de controle desses processos. Essas variáveis foram determinadas considerando a capacidade de cada uma delas capturar o impacto/influência antropogênica mais importante no nível planetário do processo em foco (Richardson *et al.*, 2023).

Também estão reproduzidos no Quadro 1 os valores-limite para a maior parte das variáveis de controle, assim como estão descritos alguns processos que são desencadeados em decorrência de alterações persistentes nos nove processos principais. Além disso, são apresentadas informações relativas ao estado do conhecimento das pesquisas vinculadas a esses processos.

Convém reiterar que as informações agrupadas no Quadro 1, salvo algumas pouquíssimas explicações relacionadas às unidades de medida, são todas reproduzidas dos textos de Rockström *et al.* (2009a; 2009b), de Steffen *et al.* (2015a) e de Richardson *et al.* (2023).

Quadro 1 - Limites Planetários propostos por Rockström *et al.* (2009) com atualizações realizadas por Steffen *et al.* (2015) e Richardson *et al.* (2023)

Processos em curso	Variável ou variáveis de controle no planeta Terra ⁵	Processos desencadeados decorrência das alterações permanentes nos macroprocessos selecionados	Valor-limite da variável ou das variáveis de controle que corresponde ao valor planetário ideal calculado para a variável ⁶	Estado do conhecimento das pesquisas (considerações trazidas pelos autores)
Acidificação dos oceanos	Estado médio de saturação da superfície oceânica global em relação à aragonita (Ω_{ARAG}). Variável essa que auxilia na mensuração da concentração média de íons de carbonato na superfície dos oceanos.	Conversão de recifes de coral em sistemas dominados por algas. Perda regional de biota marinha formadora de aragonita e calcita rica em magnésio. Em escala mais lenta, afeta os sumidouros marinhos de carbono.	Manter 80% ou mais de saturação da aragonita na superfície média do oceano, considerando os valores pré-industriais, incluindo as variabilidades naturais diárias e sazonais. Valor estimado para o período pré-industrial de 3,44 Ω_{ARAG} .	(1) A acidificação antropogênica dos oceanos atualmente está dentro da margem do espaço operacional seguro. Sendo estimado em 2,8 Ω_{ARAG} , o que corresponde a aproximadamente 81% do valor pré-industrial . No entanto este valor está bem próximo do limite. Em 2015, Steffen <i>et al.</i> registraram que a Ω_{ARAG} na época era de aproximadamente 84% do valor pré-industrial. Valor superior ao registrado por Richardson <i>et al.</i> (2023).
Carregamento de aerossóis na atmosfera	(1) A quantificação do limite planetário de carga de aerossóis é dificultada pelo fato de eles terem múltiplas fontes naturais e antropogênicas; pelas diferenças na composição química, sazonalidade e tempo de vida atmosférico; e, consequentemente, pela enorme heterogeneidade espacial e temporal na distribuição e impactos climáticos e ecológicos dos aerossóis. No entanto,	(1) Os aerossóis têm múltiplos efeitos físicos, biogeoquímicos e biológicos no sistema terrestre, motivando sua inclusão como um limite planetário. Estando entre eles a perturbação nos sistemas de monções; os efeitos sobre a saúde humana; além de contribuírem com outras mudanças climáticas e no ciclo e na qualidade da água doce. (2) É sabido que a carga antropogênica de aerossóis vem aumentando e	(1) Com base na evidência dos impactos de grandes AOD na precipitação regional sobre o sul da Ásia, considerando em especial que valores altos de AOD em regiões de monção provavelmente levam a chuvas significativamente mais baixas, afetando a integridade da biosfera, Steffen <i>et al.</i> (2015) estabeleceram um limite planetário provisório de AOD = 0,25 (considerando a época uma zona	(1) Ampla evidência científica das perturbações. (2) Comportamento do limite global desconhecido. (3) A AOD média anual no sul da Ásia atualmente é de cerca de 0,3 a 0,35. O valor atual para a região do Leste da China é 0,4. Assim, a carga de aerossóis nessas regiões excede o limite definido por Steffen <i>et al.</i> (2015). (4) Segundo Richardson <i>et al.</i> (2023) A diferença inter-

⁵ Processos analisados e apresentados por Rockström *et al.* (2009a, 2009b), com atualizações de Steffen *et al.* (2015a) e de Richardson *et al.* (2023). “A estrutura dos Limites Planetários está baseada em processos críticos que regulam o funcionamento do sistema terrestre” e “que cada um dos quais está claramente sendo modificado por ações humanas” (Steffen *et al.*, 2015a, tradução nossa, n.p.).

⁶ Rockström *et al.* indicam que, “em geral, os limites planetários são valores para variáveis de controle que estão a uma distância ‘segura’ dos limiares para processos com evidência de comportamento de limiar, ou em níveis perigosos para processos sem evidências de limites” (Rockström *et al.*, 2009b, tradução nossa). Os autores ainda indicam que “determinar um valor seguro envolve julgamentos normativos de como as sociedades escolhem lidar com o risco e a incerteza” Rockström *et al.*, 2009b, tradução nossa). No estudo, eles adotaram “uma abordagem conservadora e avessa ao risco para quantificar os valores correspondentes aos limites planetários e levaram em consideração as grandes incertezas que cercam a verdadeira posição de muitos limiares” (Rockström *et al.*, 2009b, tradução nossa).

em 2015, Steffen *et al.*, a partir de observações e medições regionais, indicou que a profundidade óptica do aerossol (AOD) é capaz de ser utilizada como uma variável de controle genérica para a carga de aerossóis. (2) Já em 2023, Richardson *et al.* propuseram como medida, a diferença de AOD inter-hemisférica.

Comprometimento da Integridade da Biosfera. Abrange, além da perda de biodiversidade (processo escolhido em 2009), a apropriação humana da produção primária líquida da biosfera (HANPP).

(1) Taxa de extinção. Extinções por milhão de espécies por ano (E/MSY) (Rockström *et al.*, 2009a, 2009b). (2) A apropriação humana da produção primária líquida da biosfera (HANPP) foi uma variável apresentada por Richardson *et al.* em 2023. Esses autores discorrem que “o funcionamento planetário da biosfera, em última análise, repousa em sua diversidade genética, herdada da seleção natural não apenas durante sua história dinâmica de coevolução com a geosfera, mas também em seu papel funcional na regulação do estado do sistema terrestre” (Richardson *et al.*, 2023, tradução nossa, n.p.). Richardson *et al.* (2023) ainda destacam que ““integridade” não implica uma ausência de mudança na biosfera, mas, sim, uma mudança que preserva o caráter dinâmico e adaptativo geral da biosfera” (tradução nossa, n.p.).

evidências observacionais sugerem uma duplicação global da deposição de poeira desde 1750 (Richardson *et al.*, 2023).

de incerteza entre 0,25 e 0,5)⁷. (2) Para a diferença inter-hemisférica de AOD Richardson *et al.* (2023) atribuíram um valor de contorno planetário anual médio de 0,1, com alta incerteza sobre a zona de riscos crescentes, de 0,1 a 0,25.

hemisférica atual é de $\sim 0,076 \pm 0,006$ ($\text{média} \pm \text{DP}$), atingindo $\sim 0,1$ na primavera e no verão boreais, devido ao aumento sazonal das tempestades de poeira que dominam no hemisfério norte. Assim, a **diferença inter-hemisférica atual média global está abaixo do limite estabelecido**.

Variável de atuação lenta que afeta o funcionamento dos ecossistemas em escala continental e de bacias oceânicas. Causa impacto em muitos processos ecossistêmicos, entre eles os de armazenamento do carbono, os de ciclagem da água doce, alguns relacionados aos ciclos do nitrogênio e do fósforo e em muitos outros processos naturais que acontecem no planeta. A perda de biodiversidade também é inaceitável por razões éticas.

(1) Taxa de extinção menor do que 10 E/MSY (valor mantido em 2023).
(2) Quanto ao limite HANPP, foi definido, provisoriamente, o percentual de acréscimo de 10% da HANPP média considerando a NPP (produção primária líquida) em período pré-industrial, deslocando-se para a zona de alto risco ao chegar em 20%.

(1) Segundo os autores, embora a taxa de linha de base de extinções (e da evolução de novas espécies) seja altamente variável e difícil de quantificar com confiança ao longo do tempo geológico, a taxa atual de extinção de espécies é estimada em pelo menos dezenas a centenas de vezes maior do que a taxa média nos últimos 10 milhões de anos e está se acelerando. De forma conservadora, os autores definiram o valor atual para a taxa de extinção em maior do que 100 E/MSY. **Valor que excede o limite planetário instituído**.
(2) Quanto à HANPP, segundo Richardson *et al.* (2023) “**a fronteira definida foi transgredida no final do século 19**, uma época de considerável aceleração no uso da terra em termos globais com fortes impactos nas espécies...” (tradução nossa, n.p.).

Atualmente o percentual de acréscimo da HANPP chega a 30%. Muito superior ao limite estabelecido.

⁷ AOD é uma medida integrada da redução geral da luz solar que atinge a superfície da Terra causada por toda absorção e dispersão na coluna de ar vertical (Richardson *et al.*, 2023).

Destrução do ozônio estratosférico	Concentração estratosférica de O ₃ medida em DU (unidades Dobson).	Efeitos graves e irreversíveis da radiação UV-B sobre a saúde humana e dos ecossistemas.	O limite para o espaço operacional seguro é fixado em 276 unidades Dobson (DU), ou que corresponde a uma redução menor que 5% em relação ao nível pré-industrial, contabilizado em 290 DU. Com o limite superior da zona de risco crescente estabelecido em 261 DU.	(1) Como consequência direta do Protocolo de Montreal, a estimativa global no ano de 2020 foi de 284 DU, ficando, portanto, dentro do limite planetário estabelecido. Nos últimos anos a concentração tem se mantido estável e espera-se que aumente nas próximas décadas.
Emissões de novas entidades. Na publicação seminal de 2009 esse processo foi denominado como Poluição Química .	Introduções antropogênicas verdadeiramente novas no sistema terrestre. Inclui (1) produtos químicos e substâncias sintéticas (por exemplo, microplásticos, desreguladores endócrinos e poluentes orgânicos); (2) materiais radioativos mobilizados antropogenicamente, incluindo resíduos nucleares e armas nucleares; e (3) modificação humana da evolução, organismos geneticamente modificados e outras intervenções humanas diretas em processos evolutivos.	As novas entidades podem atuar como variáveis lentas, podem prejudicar a resiliência dos ecossistemas e podem aumentar o risco dos efeitos em cascata.	Para esta classe de novas entidades o limite planetário definido é de 0% para a liberação no sistema terrestre de sintéticos não testados considerando que “o único espaço operacional verdadeiramente seguro é aquele em que essas entidades estão ausentes, a menos que seus impactos potenciais em relação ao sistema terrestre tenham sido cuidadosamente avaliados” (Richardson <i>et al.</i> , 2023, tradução nossa, n.p.).	(1) Límite intensamente transgredido considerando que há com centenas de milhares de produtos químicos sintéticos produzidos e liberados no meio ambiente.
Interferências em fluxos biogeoquímicos: interferência nos ciclos de P e N –	(1) Desde 2015, o limite global para P é um fluxo sustentado de P ao ano proveniente do deságue da água doce no oceano e, em nível regional, é considerado a aplicação de P em terras agrícolas, por meio de fertilizantes. (2) Já o limite planetário para N é a taxa de aplicação de N intencionalmente fixado ao sistema agrícola (Steffen <i>et al.</i> , 2015a). (3) Desde a concepção da estrutura dos LP, foram consideradas a quantificação dos fluxos do nitrogênio (N) e do fósforo (P) pois, além de serem elementos constituintes de vários seres vivos, em especial na formação da PPL (ou NPP), seus ciclos globais foram marcadamente alterados pela agricultura e pela indústria. No	O controle dos fluxos de fósforo pode evitar um grande evento anóxico no oceano, com impactos nos ecossistemas marinhos. Com relação ao nitrogênio, apesar de ser uma variável com efeito lento, o controle de seu fluxo possibilita impedir modificações relacionadas à resiliência global dos ecossistemas que podem ser provocadas pela acidificação dos ecossistemas marinhos e eutrofização de águas doces. A ultrapassagem de um limiar crítico de influxo de fósforo (P) nos oceanos tem sido apontada como o principal fator por trás dos eventos anóxicos oceânicos (OAE) em escala global. Os quais possivelmente explicam extinções em massa da vida	(1) O limite global para P é um fluxo sustentado de 11 Tg de P ano ⁻¹ da água doce ao oceano. (2) Já o limite em nível regional, para evitar a eutrofização dos sistemas de água doce, é definido em um fluxo de 6,2 Tg de P ano ⁻¹ . (3) O limite planetário para N é de 62 Tg de N ano ⁻¹ . (4) Os limites superiores da zona de risco foram estabelecidos em 100 Tg de P ano ⁻¹ a nível global e em 11,2 Tg ano ⁻¹ em nível regional. (5) Quanto ao N, o valor superior da zona de risco foi estabelecido em 82 TG de N ano ⁻¹ .	(1) Para P, a nível global, os dados considerados são os apresentados por Steffen <i>et al.</i> (2015) que indicam que o valor do fluxo sustentado de P ao ano proveniente do deságue da água doce no oceano é de 22,6 Tg de P ano ⁻¹ . (2) Em nível regional, a taxa de aplicação de P em lavouras foi estimada por Richardson <i>et al.</i> (2023) em 17,5 Tg de P ano ⁻¹ , embora o uso de P esteja aumentando e estimativas muito mais altas estejam sendo relatadas. Assim, os limites globais e regionais para P são excedidos. Quanto à introdução antropogênica de N, de acordo com a Organização para Alimentação e Agricultura, a

		entanto há alta possibilidade de desenvolver variáveis de controle para outros elementos.	marinha no passado (Handoh; Lenton 2003 apud Rockström <i>et al.</i> , 2009b).	introdução total aplicada ao sistema agrícola é de ~ 190 Tg de N ano ⁻¹ . O que indica que esse limite está muito além do estabelecido. Superando inclusive o limite superior da zona de risco (Richardson <i>et al.</i> , 2023).
Mudanças climáticas		(1) Concentração de CO ₂ na atmosfera em ppm (partes por milhão). (2) Variação do forçamento radiativo na superfície da Terra, W/m ² (watts por metro quadrado), medida no topo da atmosfera. De acordo com os autores, a variável de controle de forçamento radiativo é a mais inclusiva e fundamental, embora a carga de CO ₂ seja importante devido à sua longa vida útil na atmosfera e à intensidade das emissões humanas.	(1) Perda de mantos de gelo polar; (2) aumento acelerado do nível do mar; (3) perturbações climáticas regionais; (4) perda de suprimentos de água doce glacial; (5) mudanças abruptas nos sistemas florestais e agrícolas; (6) enfraquecimento dos sumidouros de carbono; entre outros.	(1) Concentração atmosférica de CO ₂ até 350 ppm ⁸ , com a zona de risco crescente variando de 350 a 450 ppm antes de atingir alto risco ⁹ . Isso corresponde aproximadamente a uma faixa de aumento da temperatura média global da superfície de 1° C a 2° C. (2) Mudança no forçamento radiativo de até 1 W/m ² com zona de risco entre +1,0 e +1,5 W/m ² , considerando os valores pré-industriais.
Mudanças no ciclo da água doce (processo utilizado a partir da publicação de Richardson <i>et al.</i> (2023)). Anteriormente, o processo escolhido foi o uso global de água doce.		Em 2009, a variável escolhida foi o consumo de água azul em km ³ por ano. No entanto, Richardson <i>et al.</i> (2023) apresentaram novas variáveis de controle para o processo. Atualmente as variáveis medidas representam a porcentagem da área global anual de terra livre de gelo com perturbações induzidas pela humanidade (1) no fluxo de “água azul”, mensurado pelos desvios de fluxos nos rios, e (2) no fluxo de “água verde”, mensurado pela alteração na disponibilidade de água presente na zona radicular do solo.	Alterações no ciclo de água doce podem afetar os padrões climáticos regionais além de prejudicar muitos outros serviços ecossistêmicos. Entre eles estão os relacionados à produção de biomassa, à absorção de carbono por sistemas terrestres e à redução da biodiversidade	(1) Atualmente aproximadamente 18% de área terrestre global considerando as variações mensuradas para a água azul e aproximadamente 16% da área terrestre global considerando as variações mensuradas para a água verde experimentam desvios de água doce, extrapolando assim os limites estabelecidos.

⁸ Valor ou valores mantidos nos estudos de Steffen *et al.* (2015a) e de Richardson *et al.* (2023).

⁹ A zona de risco crescente (do sistema terrestre perdendo características semelhantes ao Holoceno) agora é usada para avaliar o status de limites transgredidos, em vez da “zona de incerteza”. O estabelecimento das zonas de incerteza foi abandonado a partir da publicação de Steffen *et al.* (2015), pois a demarcação dessa zona é baseada em mais do que o que geralmente é chamado de incerteza científica (Richardson *et al.*, 2023).

Mudanças na cobertura do solo

A porcentagem da cobertura terrestre global convertida em terras cultiváveis foi a variável definida em 2009. No entanto, considerando que, durante o Holoceno, as florestas foram o bioma terrestre com o mais forte acoplamento funcional ao sistema climático, desde 2015 (Steffen *et al.* 2015a), a perda desse bioma passa a ser a variável-controle. Assim, a redução global da área florestal é adotada como a variável de controle que representa todas as mudanças no sistema fundiário. Essa fronteira se concentra na quantificação de informações advindas dos três principais biomas florestais que globalmente desempenham as funções mais importantes na condução de processos biogeofísicos: a floresta tropical, a floresta temperada e a floresta boreal.

Mudanças persistentes no uso da terra podem gerar o desencadeamento da conversão irreversível e generalizada de biomas para estados indesejados. Essas mudanças atuam principalmente como uma variável lenta que afeta o armazenamento de carbono e a resiliência às mudanças na biodiversidade e na heterogeneidade da paisagem.

Com a nova variável, o limite é estabelecido considerando a cobertura florestal remanescente em comparação com a área potencial de floresta no Holoceno. Atualmente, os limites são para a mensuração global igual ou superior a 75%; e por tipo de floresta o valor deve ser igual ou superior a 85% para as florestas tropicais, 50% para as temperadas e 85% para as florestas boreais.

(1) A nível global o valor está na ordem de 60%, **valor inferior ao estabelecido**. (2) Quanto aos percentuais verificados por tipo de floresta esses são: para floresta tropical – 83,9% no continente americano, 54,3% no continente Africano e 37,5% para a Ásia -, para a floresta temperada – 51,2% nas Américas, 34,2% na Europa e 37,9% na Ásia -, para a floresta boreal – 56,6% para as Américas e 70,3% para a Eurásia. **Indicando assim o extravasamento de todos os limites.**

Fonte: Rockström *et al.* (2009a; 2009b), Steffen *et al.* (2015a) e Richardson *et al.* (2023).

Informações gerais disponibilizadas por Richardson *et al.* (2023) sobre os dados reproduzidos no Quadro 1. (1) Todos os limites individuais da estrutura adotam as condições pré-industriais do Holoceno como referência para avaliar a magnitude dos desvios antropogênicos. (2) Os dados disponíveis e o nível atual de conhecimento sobre a análise e modelagem dos componentes da estrutura determinam os métodos utilizados para a derivação e quantificação dos limites individuais, bem como suas medidas preventivas de proteção. (3) O foco está sempre no sistema terrestre e não na escala regional, mesmo quando as evidências usadas para estabelecer limites se originam de estudos regionais. Nesses casos, as evidências regionais são combinadas para avaliar os impactos de transgressões cumulativas de vários sistemas regionais no sistema terrestre. (4) As variáveis de controle devem, idealmente, prestar-se à determinação empírica e ser computáveis para uso em projeções do sistema terrestre (por exemplo, simulação baseada em processo de mudanças futuras na cobertura florestal) sempre que possível. (5) A estrutura dos Limites Planetários está preocupada com a estabilidade e resiliência do sistema terrestre, não quantificando a interferência na saúde humana. (6) Em 2023, os limites foram, pela primeira vez, propostos para todos os componentes individuais da estrutura. (7) Os limites de mudança climática e integridade da biosfera estão em uma zona de riscos crescentes e sistematicamente ligados. (8) Sobre o risco crescente das mudanças climáticas, a precaução coloca o limite planetário no início do risco crescente em 350 ppm, com acréscimos de temperatura próximos a 1° C, ou seja, ligeiramente abaixo da meta de 1,5 °C identificada no Acordo de Paris. A meta de 1,5 °C é aquela que a ciência demonstra cada vez mais estar associada a um risco substancial de desencadear grandes mudanças

irreversíveis e cujos pontos de inflexão cruzados não podem ser excluídos mesmo em aumentos de temperatura mais baixos. (9) Talvez o mais preocupante em termos de manutenção do sistema terrestre em um estado interglacial semelhante ao Holoceno seja que todos os processos de fronteira planetária relacionados à biosfera e que fornecem a resiliência (capacidade de amortecer a perturbação) do sistema terrestre estão dentro ou próximos de um nível de alto risco de transgressão. (10) Em um estudo recente, foi demonstrado que vários pontos de inflexão climáticos regionais, relevantes para a estabilização do sistema global, já foram ou estão próximos de serem transgredidos, enfraquecendo a capacidade de resiliência global. Isso implica resiliência baixa/decrescente precisamente quando a resiliência planetária é necessária mais do que nunca para lidar com o aumento de distúrbios antropogênicos. (11) De acordo com simulações realizadas, as atividades antropogênicas acarretaram mudanças no clima e no sistema terrestre para além de seu espaço operacional seguro por volta de 1988. Se o sistema terrestre tivesse permanecido forçado pelas condições definidas como meta em 1988, considerando a emissão de CO₂ máxima de 350 ppm e a diminuição da cobertura florestal tropical/temperada/boreal restante dentro dos limites de 85%/50%/85%, a temperatura sobre a superfície terrestre global não aumentaria mais do que 0,6° C adicionais nos 800 anos subsequentes. Assim, as condições planetárias essencialmente estáveis teriam sido mantidas dentro do espaço operacional seguro.

Ainda sobre os nove processos do sistema terrestre apresentados por Rockström *et al.* (2009a, 2009b) e as atualizações realizadas posteriormente, como pode ser observado na leitura do Quadro 1, seis dos nove processos já se apresentam em estado crítico. São elas: mudanças climáticas; mudanças no uso do solo; mudanças no fluxo da água doce; mudanças nos fluxos biogeoquímicos do fósforo e do nitrogênio; integridade da biosfera; e emissões de novas entidades. Os processos de acidificação dos oceanos e, regionalmente, o carregamento de aerossóis na atmosfera estão muito próximos de atravessar a fronteira da operacionalidade segura. Apenas a depreciação da camada de ozônio atmosférica está estabilizada e em níveis seguros de operacionalidade planetária.

Para Rockström *et al.* (2009a, 2009b), apesar das eternas incertezas relacionadas à permanência da vida humana no planeta Terra advindas de riscos oriundos de processos exógenos ao sistema terrestre, ou mesmo de riscos endógenos, mas não decorrentes das ações humanas que degradam cotidianamente as funcionalidades do sistema terrestre, conduzir a existência humana no planeta de forma que os limites estabelecidos no Quadro 1 fossem atendidos nos permitiria, enquanto humanidade, permanecer como parte do planeta Terra num espaço operacional seguro.

É importante destacar ainda que Rockström *et al.* (2009a, 2009b) não desconhecem ou negligenciam a capacidade de resiliência dos ecossistemas. Muito pelo contrário. Toda a sistematização elaborada por esses autores quanto à estrutura dos Limites Planetários foi realizada justamente com vistas à preservação da resiliência dos ecossistemas. No entanto, eles acreditam que ultrapassar os limites planetários poderia levar o planeta a condições irreversíveis (Rockström *et al.*, 2009a).

3 A importância dos conhecimentos referentes aos Limites Planetários e a elaboração dos estudos de impacto ambiental

A expansão permanente das atividades humanas no planeta, assim como o aumento de acontecimentos não desejáveis em decorrência das mudanças climáticas e de outros processos biogeoquímicos em curso têm levado a perdas de serviços ecossistêmicos (Li *et al.*, 2022 *apud* Wang *et al.*, 2025), perdas essas que tensionam mais intensamente os limites planetários e empurram a humanidade cada vez mais para condições planetárias não seguras. Nesse contexto, Wang *et al.* (2025) destacam que há uma escassez de avaliações de perdas de serviços ecossistêmicos abrangentes e precisas e que avaliar essas perdas “é uma pré-condição essencial para promover a restauração e compensação ecológica” (Wang *et al.*, 2025, tradução nossa).

Assim, no contexto do desenvolvimento deste estudo, reforça-se a importância da elaboração de estudos de impacto ambiental considerando, sobretudo, a necessidade de combate à deterioração do sistema terrestre tal qual o conhecemos no Holoceno. No entanto, para que esses estudos sejam desenvolvidos, seus elaboradores devem compreender de antemão que qualquer alteração dentro do sistema terrestre causa distúrbios dentro do próprio sistema – alguns até passageiros, considerando a capacidade de resiliência do próprio sistema terrestre, mas outros nem tanto. É preciso que atentem também para o fato de que é muito provável que o produto do processo de produção material que toma forma por meio do trabalho humano seja classificado, em algum momento, como resíduo. Resíduo esse que terá grandes chances de ser classificado mais adiante como um poluente.

Além disso, faz parte de todos os processos produtivos a apropriação inicial de algum recurso da natureza, seja como matéria prima, seja como gerador de energia fundamental ao desenvolvimento do processo, ou seja, por meio da apropriação de algum espaço físico para o desenvolvimento daquele produto. Assim, além de a produção humana alterar cotidianamente os fluxos naturais dos ecossistemas, ela demanda um alto consumo de matéria, causando enormes desorganizações nesses sistemas.

Neste contexto, dada, por um lado, a intensidade da produção material no planeta, e por outro, o crescente esgotamento de serviços ecossistêmicos, bem como o comprometimento de importantes processos que possibilitam a manutenção da resiliência do sistema terrestre, torna-se imprescindível que conhecimentos, como os sistematizados na estrutura dos Limites Planetários, sejam considerados nos estudos de impacto ambiental.

3.1 A legislação brasileira sobre os estudos de impacto ambiental

No Brasil, os estudos de impacto ambiental são solicitados aos proponentes de empreendimentos que, em alguma medida, alterarão o uso e a ocupação de algum espaço urbano ou rural, independentemente se o empreendimento for demandado ou executado por agentes públicos ou privados:

A localização, construção, instalação, ampliação, modificação e operação de empreendimentos e atividades utilizadoras de recursos ambientais consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras, bem como os empreendimentos capazes, sob qualquer forma, de causar degradação ambiental, dependerão de prévio licenciamento do órgão ambiental competente, sem prejuízo de outras licenças legalmente exigíveis (Brasil, 1997, Art. 2º).

Entre os estudos de impacto ambiental solicitados pelos órgãos ambientais brasileiros estão o Relatório de Controle Ambiental (RCA), exigido quando da construção, instalação, ampliação, modificação e operação de empreendimentos ou atividades que não gerem impactos ambientais significativos; o Relatório Ambiental Simplificado (RAS), que é solicitado no licenciamento ambiental de empreendimentos

com baixo impacto ambiental; e o Estudo de Impacto Ambiental (EIA), que é exigido quando os empreendimentos que serão instalados e as atividades que serão desenvolvidas são passíveis de causar impactos ambientais significativos (Brasil, 2025). Sendo solicitadas, em todas as três exigências, informações sobre os possíveis impactos ambientais advindos da instalação e operação dos empreendimentos e as medidas de controle a serem tomadas (Brasil, 2025).

Sobre a definição do que é um impacto ambiental, a Resolução Conama nº 1 de 1986, que dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental, já em seu Art. 1º apresenta esta definição:

qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: I - a saúde, a segurança e o bem-estar da população; II - as atividades sociais e econômicas; III - a biota; IV - as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; V - a qualidade dos recursos ambientais (Brasil, 1986, art. 1º).

Note-se aqui que, mesmo sendo uma lei de 1986, muito antes das publicações seminais relacionadas à estrutura dos Limites Planetários, a Resolução Conama 01/1986 traz princípios comuns àqueles considerados na estrutura dos Limites Planetários. Estando entre eles a proteção da saúde, da segurança e do bem-estar da vida humana; a proteção da biota; e a proteção da qualidade dos recursos ambientais.

Identificando mais alguns dos caracteres de vanguarda da Resolução Conama 1/1986 e da aproximação de sua regulamentação com os conceitos, as bases e as estruturas do Limites Planetários, o artigo 6º da referida resolução discorre sobre a necessidade de os Estudos de Impacto Ambiental (EIA) contemplarem em suas análises o diagnóstico ambiental da área de influência do projeto, garantindo a descrição e a análise dos recursos ambientais e suas interações, de modo a caracterizar a situação ambiental da área antes da implantação do projeto. Para tanto devem ser considerados:

a) o meio físico - o subsolo, as águas, o ar e o clima, destacando os recursos minerais, a topografia, os tipos e aptidões do solo, os corpos d'água, o regime hidrológico, as correntes marinhas, as correntes atmosféricas; b) o meio biológico e os ecossistemas naturais - a fauna e a flora, destacando as espécies indicadoras da qualidade ambiental, de valor científico e econômico, raras e ameaçadas de extinção e as áreas de preservação permanente; c) o meio socioeconômico - o uso e ocupação do solo, os usos da água e a sócio economia, destacando os sítios e monumentos arqueológicos, históricos e culturais da comunidade, as relações de dependência entre a sociedade local, os recursos ambientais e a potencial utilização futura desses recursos (Brasil, 1986, Art. 6º, Inciso I).

Nota-se, mais uma vez, a convergência entre o que é solicitado nos estudos de impacto ambiental, especialmente no EIA, e as questões que vêm sendo agrupadas na estrutura dos Limites Planetários. Isso indica que os estudos relacionados ao Limites Planetários podem ser de enorme valia quando da elaboração

dos estudos de impacto ambiental e suas posteriores fases de avaliação, seja pela sociedade civil ou pelos técnicos responsáveis por essas avaliações dentro da estrutura do Estado.

Sobre a realização de estudos que consideram a deterioração dos ecossistemas advinda de ações humanas, Wang *et al.* (2025) chamam a atenção que, apesar de haver um crescente corpo de evidências destacando a importância das avaliações referentes à perda de serviços ecossistêmicos, incluindo a agudização da deterioração decorrente dos crescentes efeitos em cascata, até agora, a maior parte das pesquisas que aborda perdas ecossistêmicas se concentrou nas perdas imediatamente diretas dos meios de subsistência e segurança humanos (Janzen *et al.*, 2021 *apud* Wang *et al.*, 2025). Isso indica, mais uma vez, a necessidade de apropriação dos conhecimentos sistematizados na estrutura dos Limites Planetários na elaboração dos estudos de impacto ambiental.

Portanto, é preciso total atenção quando da elaboração dos estudos de impacto ambiental para a realização de análises integradas que considerem ao aspectos relacionados às mudanças climáticas; à perda da integridade da biosfera; às mudanças no uso do solo, em especial na redução dos espaços florestais; à produção e emissão de aerossóis; à produção de novas entidades que, a curto, médio ou longo prazo se tornarão poluentes dispersos pelo sistema terrestre; às mudanças nos ciclos do fósforo e do nitrogênio; aos processos que levam à acidificação dos oceanos; e aos processos que modificam o fluxo da água doce, em especial aqueles que comprometem a umidade do solo.

4 Considerações Finais

Partindo da alta probabilidade de que o atual *modus operandi* da humanidade seja o grande definidor do próximo tempo geológico do planeta Terra, tempo geológico este que será marcado por temperaturas ainda mais elevadas que as atuais, solos menos nutritivos e mais áridos em quase todo o planeta, perdas ainda mais intensas de biodiversidade, perdas qualitativas e quantitativas na produção primária líquida mundial, perdas de terras produtivas ou habitáveis, mudanças significativas nos fluxos da água doce e comprometimento da produção oceânica, torna-se necessário, e extremamente urgente, que a humanidade reorganize seu modo de operação considerando, sobretudo, as características e funcionalidades do sistema terrestre. É crucial que essa reorganização seja capaz de manter as condições biogeoquímicas futuras do planeta bem próximas das já experimentadas no Holoceno, garantindo assim que a humanidade continue a se desenvolver num planeta Terra com características mais próximas das dos últimos 11.000 anos, conforme defendido por Rockstrom *et al.* (2009a, 2009b) e outros autores mencionados neste artigo.

Diante dessa necessidade, é defendido aqui, como parte das considerações finais desta pesquisa, a instituição de uma contabilidade ecossistêmica planetária única. É preciso também que as benesses dos serviços ecossistêmicos estejam ao alcance de todos, interrompendo assim os ciclos injustos de distribuição dessas benesses. É necessário que tenhamos a oportunidade de garantir e comemorar os avanços sociais universais, e não apenas a melhoria de condições de vida em algumas poucas partes do planeta.

É imperativo que busquemos soluções que garantam o avanço social coletivo planetário, superando os índices tradicionais de medição de desenvolvimento humano que não quantificam as inseparáveis relações entre as condições sociais ótimas de algumas nações e as condições bastante insalubres de muitas outras. Assim, os avanços sociais reais só deveriam ser contabilizados diante de condições universais e sustentáveis de bem viver.

Nesse contexto, e considerando os objetivos deste estudo, reforçamos a defesa da incorporação dos estudos relacionados à estrutura dos Limites Planetários quando da elaboração dos estudos de impacto ambiental. A justificativa para tal defesa está amparada nas observações expostas neste estudo que indicam que os conhecimentos sistematizados na elaboração da estrutura dos Limites Planetários e de suas posteriores atualizações possibilitam uma compreensão de que o todo não se constitui apenas pela soma simples das partes, mas sobretudo pelas fortes relações existenciais entre essas partes. Além disso, os conhecimentos sintetizados na estrutura dos Limites Planetários trazem muitos subsídios que podem ser considerados quando da defesa do estabelecimento de uma contabilidade universal unitária dos recursos ambientais ou dos serviços ecossistêmicos disponibilizados pelo sistema terrestre.

Referências

BRASIL, Conselho Nacional do Meio Ambiente. **RESOLUÇÃO CONAMA nº 1, de 23 de janeiro de 1986** - Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental, 1986. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=745.

BRASIL, Conselho Nacional do Meio Ambiente. **RESOLUÇÃO CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997**, 1997. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0237-191297.PDF>. Acesso em: 5 jun. 2025.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. O que é licenciamento ambiental?. **Portal Nacional de Licenciamento Ambiental**, 2025. Disponível em: <https://pnla.mma.gov.br/o-que-e-licenciamento-ambiental>. Acesso em: 6 maio. 2025.

C3S, Copernicus Climate Change Service. **Global Climate Highlights 2024**: the 2024 annual climate summary. Copernicus Earth Observation Programme, 2025. Disponível em: <https://climate.copernicus.eu/sites/default/files/custom-uploads/GCH-2024/GCH2024-PDF-1.pdf>. Acesso em: 6 mar. 2025.

CALVIN, Katherine et al. IPCC, 2023: **Climate Change 2023: Synthesis Report**. 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 and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 15 abr. 2025.

CARPENTER, Stephen R. et al. **Relatório-Síntese da Avaliação Ecossistêmica do Milênio**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.446.aspx.pdf>.

CLD, Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación. **Resumen para los responsables de la adopción de decisiones**. Perspectiva global de la tierra. segunda edición ed. Bonn: Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación, 2022. Disponível em: https://www.unccd.int/sites/default/files/2022-05/UNCCD_SDM_ES_Web.pdf.

CRUTZEN, Paul J. Geology of mankind. **Nature**, v. 415, n. 6867, 2002. DOI: 10.1038/415023a. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/415023a>. Acesso em: 2 abr. 2025.

CRUTZEN, Paul J.; STOERMER, EUGENE F. The “anthropocene”. **IGBP Newsletter**, v. 41, p. 17–18, 2000. Disponível em: https://www.jstor.org/stable/j.ctt5vm5bn?turn_away=true.

CRUTZEN, PAUL J.; STOERMER, EUGENE F.; STEFFEN, Will. "The ‘Anthropocene’". In **The Future of Nature**. Yale University Press, 2013. p. 483–490.

DONG, Jinlong; GRUDA, Nazim; LAM, Shu K.; LI, Xun; DUAN, Zengqiang. Effects of Elevated CO₂ on Nutritional Quality of Vegetables: A Review. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 924, 2018. DOI: 10.3389/fpls.2018.00924. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2018.00924/full>. Acesso em: 10 abr. 2025.

EUROPEAN COMMISSION. World Atlas of Desertification, 2025. **Joint Research Centre**. Disponível em: <https://wad.jrc.ec.europa.eu/primaryproduction>. Acesso em: 15 abr. 2025.

FOSTER, John Bellamy. **A ecologia de Marx: materialismo e natureza**. Rio de Janeiro: Civilização Brasiliense, 2005. Disponível em: <https://ia904504.us.archive.org/9/items/526394/John%20Bellamy%20Foster.%20A%20ecologia%20de%20Marx..pdf>.

FOSTER, John Bellamy; CLARK, Brett. Ecological Imperialism: The Curse of Capitalism. **Socialist Register**, v. 40, 2004. Disponível em: <https://socialistregister.com/index.php/srv/article/view/5817>. Acesso em: 26 fev. 2025.

GAYEN, D.; CHATTERJEE, R.; ROY, S. A review on environmental impacts of renewable energy for sustainable development. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 21, n. 5, p. 5285–5310, 2024. DOI: 10.1007/s13762-023-05380-z. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s13762-023-05380-z>. Acesso em: 10 abr. 2025.

GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas. Energy and Economic Myths. **Southern Economic Journal**, v. 41, n. 3, p. 347–381, 1975. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/1056148>.

IEA. World - IEA. 2025. **Energy Mix**. Disponível em: <https://www.iea.org/world/energy-mix>. Acesso em: 31 mar. 2025.

MARSH, George P. **The earth as modified by human action**, 1878. Versão online produzida por Steve Harris, Charles Franks. The Project Gutenberg eBook. Disponível em:
<https://www.gutenberg.org/cache/epub/6019/pg6019-images.html>.

MEADOWS, Donella H.; MEADOWS, Dennis L.; RANDERS, Jørgen; BEHRENS, William W. **Os Limites do Crescimento**: um relatório para o projeto do Clube de Roma sobre o dilema da humanidade. 2a. ed. [s.l.] : Editora Perspectiva, 1978.

RICHARDSON, Katherine et al. Earth beyond six of nine planetary boundaries. **Science Advances**, v. 9, n. 37, 2023. DOI: 10.1126/sciadv.adh2458. Disponível em:
<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adh2458>. Acesso em: 6 mar. 2025.

ROCKSTRÖM, Johan et al. A safe operating space for humanity. **Nature**, v. 461, n. 7263, p. 472–475, 2009a. DOI: 10.1038/461472a. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/461472a>. Acesso em: 16 dez. 2024.

ROCKSTRÖM, Johan et al. Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. **Ecology and Society**, v. 14, n. 2, 2009b. DOI: 10.5751/ES-03180-140232. Disponível em:
<http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>. Acesso em: 16 dez. 2024.

ROCKSTRÖM, Johan et al. The planetary commons: A new paradigm for safeguarding Earth-regulating systems in the Anthropocene. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 121, n. 5, 2024. DOI: 10.1073/pnas.2301531121. Disponível em: <https://pnas.org/doi/10.1073/pnas.2301531121>. Acesso em: 21 mar. 2025.

SCHMITT, Kellie. Less Nutritious Crops: Another Result of Rising CO₂. 2024. **Hopkins Bloomberg Public Health**. Disponível em: <https://magazine.publichealth.jhu.edu/2024/less-nutritious-crops-another-result-rising-co2>. Acesso em: 10 abr. 2025.

SCHYNNS, J. F.; HOEKSTRA, A. Y.; BOOIJ, M. J. Review and classification of indicators of green water availability and scarcity. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 11, p. 4581–4608, 2015. DOI: 10.5194/hess-19-4581-2015. Disponível em: <https://hess.copernicus.org/articles/19/4581/2015/>. Acesso em: 27 fev. 2025.

STEFFEN, Will et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. **Science**, v. 347, n. 6223, 2015a. DOI: 10.1126/science.1259855. Disponível em:
<https://www.science.org/doi/10.1126/science.1259855>. Acesso em: 16 abr. 2025.

STEFFEN, Will et al. Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. **Perspective**, v. 115. n° 33, p. 8252–8259, 2018. DOI: 10.1073/pnas.1810141115. Disponível em:
<https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1810141115>. Acesso em: 28 nov. 2024.

STEFFEN, Will; BROADGATE, Wendy; DEUTSCH, Lisa; GAFFNEY, Owen; LUDWIG, Cornelia. The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. **The Anthropocene Review**, v. 2, n. 1, p. 81–98, 2015. b. DOI: 10.1177/2053019614564785. Disponível em:
<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/2053019614564785>. Acesso em: 19 mar. 2025.

STEFFEN, Will; CRUTZEN, Paul J.; MCNEILL, John R. The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature?. **Ambio**, v. 36, n. 8, p. 614–621, 2007. Disponível em:
<https://www.jstor.org/stable/25547826>. Acesso em: 2 abr. 2025.

UNITED NATIONS. **United Nations Conference on the Human Environment**, Stockholm 1972. 2025. Disponível em: https://www-un.org.translate.goog/en/conferences/environment/stockholm1972?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=tc. Acesso em: 7 maio. 2025.

WANG, Hanjie; ZHANG, Xiulong; ZHANG, Jianhua; YIN, Jianwen; BAO, Weikai. Assessing ecosystem service losses—A review of progress and problems. **Resources, Environment and Sustainability**, v. 19, 2025. DOI: 10.1016/j.resenv.2025.100194. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666916125000064>. Acesso em: 8 abr. 2025.

ZISKA, Lewis H.; PETTIS, Jeffery S.; EDWARDS, Joan; HANCOCK, Jillian E.; TOMECEK, Martha B.; CLARK, Andrew; DUKES, Jeffrey S.; LOLADZE, Irakli; POLLEY, H. Wayne. Rising atmospheric CO₂ is reducing the protein concentration of a floral pollen source essential for North American bees. **The Royal Society Publishing**. Proceedings of The Royal Society B: Biological Sciences, v. 283, n. 1828, 2016. DOI: 10.1098/rspb.2016.0414. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspb.2016.0414>. Acesso em: 31 mar. 2025.