

CAPÍTULO 2

FRONTEIRAS PLANETÁRIAS NO ANTROPOCENO

Luciana Gomes de Araujo

2.1 INTRODUÇÃO

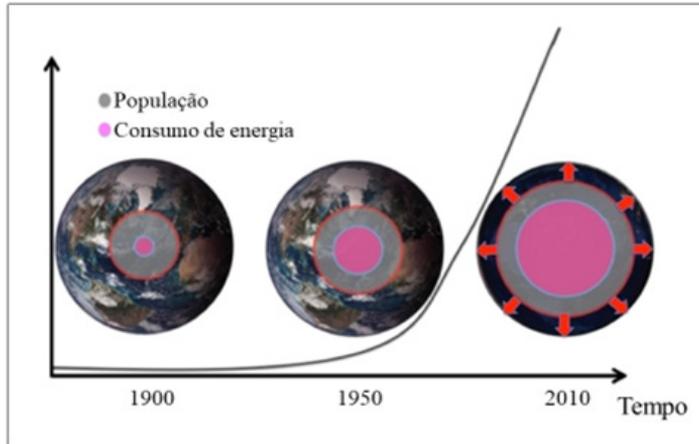
O planeta Terra tem cerca de 4,5 bilhões de anos e uma história marcada por transformações em sua crosta e atmosfera. A vida começou a florescer no planeta, nos últimos 3,5 bilhões de anos (FOLEY, 1993) e nós, seres humanos modernos (*Homo sapiens*) habitamos a Terra há cerca de 200 mil anos (VIDAL et al., 2022). O Holoceno é a época geológica que marca o final da última glaciação vivida pelo planeta há cerca de 10 mil anos, quando as temperaturas médias da superfície terrestre e as calotas polares se estabilizaram. Foi essa estabilidade climática que permitiu o desenvolvimento das civilizações modernas em todo o planeta (FOLEY, 1993; SALGADO-LABOURIAU, 1994; ELLIS et al., 2016). A ciência tem registros de que o homem vem domesticando plantas e animais, em diferentes regiões do planeta, desde cerca de treze mil anos atrás, ou seja, no final do Pleistoceno. Mas é no Holoceno que o ser humano encontra as condições climáticas adequadas para desenvolver a agricultura. É a partir daí que se têm os primeiros registros de emissões de dióxido de carbono (CO_2) e de metano (CH_4) na atmosfera, decorrentes de atividades humanas (ELLIS et al., 2016).

Ao longo do Holoceno o ser humano continuou a transformar o seu modo de vida, dando início à industrialização na Europa, no século XVIII, fundamentalmente a partir da Revolução Industrial correlata ao advento da máquina a vapor e a todo um contexto de mudanças sociais, econômicas e ambientais no seio da sociedade (naquele momento, tão somente a sociedade europeia) (WATERS et al., 2016; VANWALLE-GHEM et al., 2017). Já em meados do século XX, o período pós Segunda Guerra Mundial marca uma mudança ímpar na ordem mundial, com a intensificação do uso de recursos naturais, transformação da agricultura, dependência de combustíveis fósseis e sociedades pautadas no consumo de bens manufaturados. É nesse período que as concentrações de CO_2 e CH_4 na atmosfera começam a aumentar de forma mais acelerada (WATERS et al., 2016; RAWORTH, 2017).

Considera-se como o marco zero das emissões de carbono o início de atividades dependentes da queima de carvão, a partir da Revolução Industrial em 1750. À época, a concentração de CO_2 na atmosfera era de 280 partes por milhão (ppm). Frisa-se que nos últimos 800 mil anos, as concentrações nunca saíram da faixa entre 170 e 300 ppm, ultrapassando a marca de 300 ppm em 1912. Em 2019, de acordo com o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Internacional sobre Mudanças Climáticas (IPCC-AR6), as concentrações atmosféricas de CO_2 atingiram o patamar de 410 ppm, o mais alto valor dos últimos dois milhões de anos (Capítulo 3).

2.2 O CRESCIMENTO DA POPULAÇÃO HUMANA

As mudanças observadas na crosta e na atmosfera da Terra estão estreitamente relacionadas ao aumento da população e ao consumo de energia pelas sociedades humanas. Essas mudanças podem ser observadas em três diferentes datas – 1900, 1950 e 2010 (Figura 2.1). Inicialmente, o aumento é tênue e linear entre 1900 e 1950, resultante do desenvolvimento industrial, predominantemente na Europa. A partir de 1950, após a Segunda Guerra Mundial, o aumento da população humana e do consumo de energia ganha um contorno exponencial (GRIGGS et al., 2014).



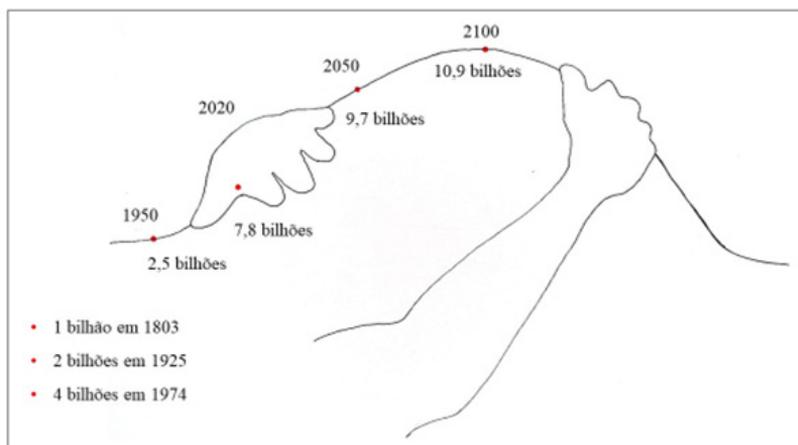
Fonte: Autoria original da Figura 2.1: David Griggs, Mark Stafford Smith, Johan Rockström, Marcus C. Öhman, Owen Gaffney, Gisbert Glaser, Norichika Kanie, Ian Noble, Will Steffen e Priya Shyamsundar, em: Griggs, D. et al., 2014. An integrated framework for sustainable development goals. *Ecology and Society*, 19(4): 49. <http://dx.doi.org/10.5751/ES-07082-190449>. Publicado sob a licença de Resilience Alliance e Creative Commons Attribution 4.0 International License. A autora do capítulo traduziu os subtítulos, originalmente publicados em inglês, para o português.

Figura 2.1 – Relação entre o crescimento da população humana (curva exponencial e circunferência cinza) e consumo de energia (curva exponencial e circunferência rosa) na Terra, entre 1900 e 2010. Na figura, o consumo de energia é usado para representar consumo e crescimento econômico.

Em 1700, éramos 600 milhões de habitantes no planeta, passamos a ser 1 bilhão em 1803, 2 bilhões em 1925, 2,5 bilhões em 1950, 4 bilhões em 1974 e quase 8 bilhões em 2020. De acordo com as Nações Unidas, seremos cerca de 9,7 bilhões em 2050¹(Figura 2.2). O crescimento exponencial da população humana está ligado à expansão massiva do uso de combustíveis fósseis que impulsionou, entre outros setores, a mecanização da agricultura e a produção de alimentos. A população mundial continua crescendo, mas a uma taxa decrescente a partir da década de 1970, quando aumentávamos a uma taxa de 1,95% ao ano (relativo ao período de 1970-1975) (UN, 2019). Essa taxa caiu para 1,09% ao ano no período entre 2015 e 2020 (UN, 2019) e está projetada em 0,1% em 2100.²

1 <https://ourworldindata.org/future-population-growth> (Consulta realizada em 29/4/2022).

2 <https://ourworldindata.org/future-population-growth> (Consulta realizada em 29/4/2022).



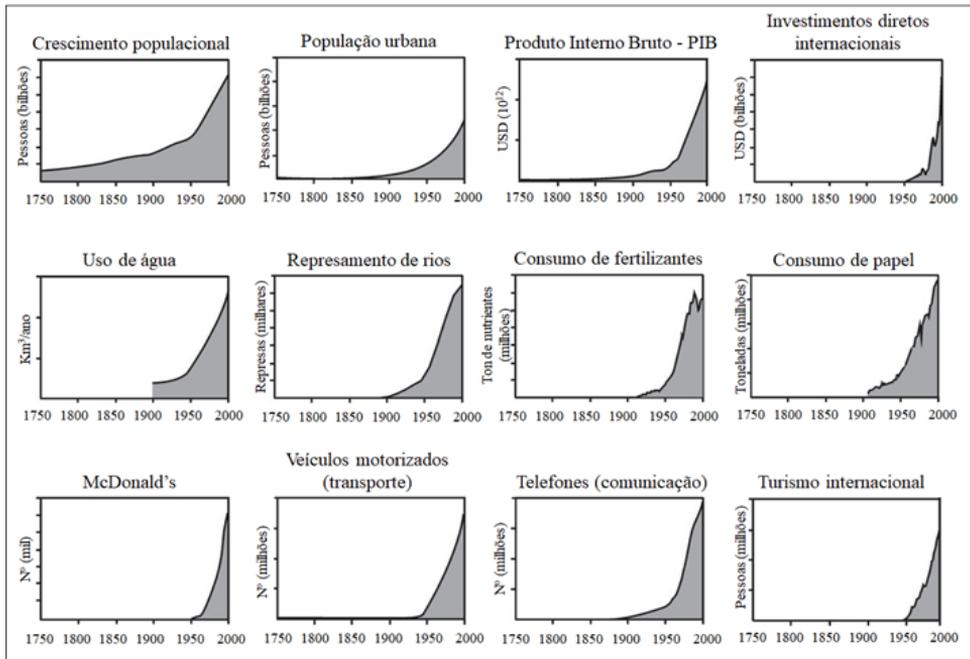
Fonte: elaborado por Helena Gomes de Camargo Neves, a partir de Hannah Ritchie, em <https://www.anthropocenemagazine.org/2020/07/the-human-population-curve-is-on-the-move>; UN, 2019; e <https://ourworldindata.org/future-population-growth>.

Figura 2.2 – Crescimento da população mundial.

Em algumas partes do planeta, as populações estão envelhecendo e em outras, a participação da população jovem na população total ainda é predominante. Essa constatação provoca reflexões sobre como os velhos serão cuidados no futuro e quais oportunidades e condições de vida as populações jovens terão ao longo deste século XXI. Para saber como é o planeta em que habitamos e refletir sobre qual planeta desejamos deixar de herança aos jovens da atualidade, veremos a seguir, algumas das marcas produzidas nele, resultantes de nossos modos de vida.

2.3 AS CURVAS EXPONENCIAIS DA ATIVIDADE HUMANA E DA RESPOSTA DO SISTEMA PLANETÁRIO

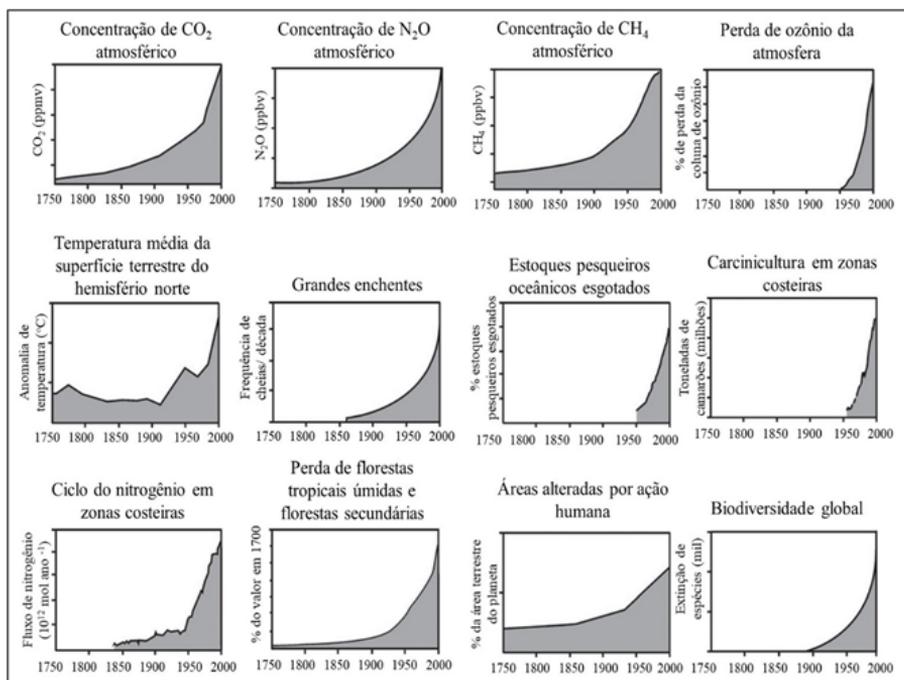
Resultados de trabalhos científicos publicados em 2011 (STEFFEN et al., 2011) mostram que, entre 1950 e 2000, a população mundial, a população urbana, o Produto Interno Bruto (PIB) dos países, os investimentos internacionais, o uso de água, a construção de grandes represas, o consumo de fertilizantes e de papel, o número de lanchonetes McDonald's, veículos motorizados e telefones, e o turismo internacional, medidos por diferentes unidades, cresceram exponencialmente (Figura 2.3). Esses dados ilustram o desenvolvimento das atividades econômicas no planeta combinado ao crescimento populacional.



Fonte: Adaptado de Steffen et al. (2011).

Figura 2.3 – Crescimento exponencial da população e de atividades econômicas entre 1950 e 2000.

O mesmo estudo de Will Steffen e colaboradores (2011) mostra as mudanças na estrutura e no funcionamento de alguns dos sistemas biofísicos da Terra em escala global, as quais são resultantes do aumento das atividades humanas a partir da Revolução Industrial (Figura 2.4). Dentre os sistemas analisados, quatro indicam ações humanas diretas, como a pesca oceânica, conversão de mangues em fazendas de carcinicultura (i.e., criação de camarões), desmatamento de florestas, conversão do uso da terra. Outros dois sistemas – o aumento do fluxo de nitrogênio nas zonas costeiras e a perda de diversidade biológica – são resultantes de diversas ações humanas, como a agricultura e a urbanização. As mudanças nas concentrações de gases de efeito estufa estão diretamente ligadas a fontes antrópicas, assim como as fontes de emissão de substâncias químicas que degradam a camada de ozônio estratosférico. O aumento das temperaturas no hemisfério norte e de grandes inundações tem relações com as mudanças ambientais globais causadas pelo aumento dos níveis de gases de efeito estufa (Figura 2.4). Essas mudanças nos ecossistemas terrestres e marinhos de todo o planeta mostram as respostas ecológicas à forma como habitamos a Terra. Assim como nas curvas que representam o crescimento da atividade econômica no mundo (Figura 2.3), aqui o sistema planetário também responde com mudanças exponenciais a partir de 1950. Nesses 50 anos, o ser humano conseguiu tirar o planeta de uma trajetória de cerca de 10 mil anos de estabilidade, desde o início do Holoceno. Esse cenário nos conduz à ideia de Antropoceno, apresentada a seguir.



Fonte: Adaptado de Steffen et al. (2011).

Figura 2.4 – Mudanças em ecossistemas terrestres e marinhos, em escala global, como resultado do aumento da atividade humana entre os anos de 1750 e 2000.

2.4 O ANTROPOCENO

O termo Antropoceno foi cunhado pelo biólogo Eugene Stoermer (1934-2012), na década de 1980, quando vários pesquisadores começaram a usar este conceito para definir uma época em que os efeitos da humanidade estariam impactando nosso planeta em todos os continentes e oceanos. Somente em 2000, o uso do termo foi popularizado pelo químico Paul Crutzen (1933-2021), que ganhou o prêmio Nobel de Química em 1995 com outros dois cientistas, por trabalhos feitos sobre a formação e decomposição do ozônio na atmosfera. No início da década de 1990, Crutzen publicou uma série de artigos discutindo o que seria essa nova época geológica, na qual a influência humana se mostra tão presente. Para ele, o começo do Antropoceno deve ser estabelecido na última parte do século XVIII e deve, assim, coincidir com o início da Revolução Industrial (CRUTZEN, 2002). Isso porque é a partir dessa época que a ciência passa a ter dados da atmosfera, coletados do gelo polar, mostrando registros crescentes da concentração global de CO₂ e CH₄ (ELLIS et al., 2013, 2016). Atualmente, o conceito de Antropoceno é amplamente usado na literatura científica e fora dela.

Pode-se definir Antropoceno como a época geológica na qual o ser humano constitui o vetor dominante de mudanças na Terra. Dentre os elementos que sustentam a proposta de uma nova época geológica, está a presença de fragmentos de materiais de concreto, alumínio e plástico além de traços de agrotóxicos e outros compostos químicos misturados à lama e areia, em todo o planeta (WATERS et al., 2016). Essa mistura é recente e está cada vez mais abundante em camadas de sedimentos, solos e gelo. O aumento das atividades de mineração, de emissão de CO₂ na atmosfera, das temperaturas na superfície terrestre e nos oceanos e da taxa de extinção de espécies de plantas e animais sustenta a ideia de uma “época do humano”. Apesar disso, ainda não há consenso entre cientistas das diversas áreas das ciências exatas, humanas e biológicas sobre a data de início do Antropoceno. São quatro as datas propostas: o surgimento da agricultura há cerca de dez mil anos; a Revolução Industrial que pode ser contada a partir de 1712, 1750, ou 1760; a explosão da primeira bomba atômica em 1945 ou o período pós-guerra a partir de 1950. Além da ausência de consenso científico, para que o Antropoceno tenha status formal de época geológica, é necessário que ele seja reconhecido e instituído por autoridades da Geologia, o que ainda não ocorreu (WATERS et al., 2016).

2.5 AS FRONTEIRAS PLANETÁRIAS

As pressões exercidas pelo ser humano sobre o planeta produzem uma crise ecológica planetária sem precedentes, o que nos obriga a questionar os modelos de desenvolvimento e de governança ambiental, adotados pelas sociedades modernas. É nesse contexto de crise que a ideia de fronteira planetária foi concebida, em 2009, e revisada, em 2015, por um grupo de 29 pesquisadores da área da Ciência da Sustentabilidade³, liderado por Johan Rockström e Will Steffen (SRC, 2017).

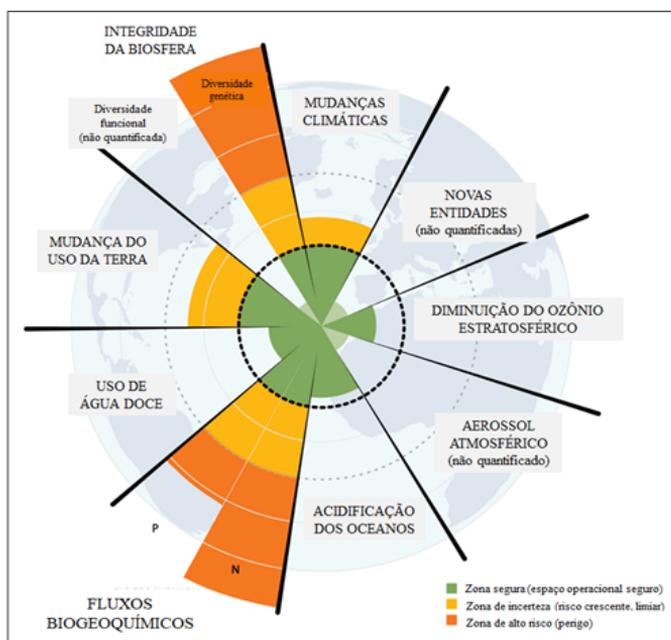
As fronteiras planetárias representam subsistemas de funcionamento da Terra que mantiveram o planeta em estado de estabilidade ao longo de todo o Holoceno, mas atualmente encontram-se pressionados pela ação do ser humano. Esses subsistemas são capazes de regular o funcionamento do planeta, portanto podem nos indicar zonas seguras de operação e manutenção da vida. No entanto, à medida que o impacto humano sobre esses subsistemas aumenta, arriscamos romper as fronteiras planetárias, provocando instabilidades que podem ser devastadoras para a vida humana. Por isso, a abordagem de fronteiras planetárias vem produzindo enorme interesse tanto de cientistas como de formuladores de políticas públicas.

O conceito de fronteira planetária funciona como um guia que mostra os “limites operacionais seguros para a humanidade em relação a questões críticas decorrentes

3 **Influenciada pela Ciência Ambiental e pela ideia de desenvolvimento sustentável, a Ciência da Sustentabilidade trata das interações entre sistemas ecológicos e sociais, buscando entender os complexos mecanismos que levam esses sistemas à degradação, com consequências ecológicas e para o bem-estar humano. A Ciência da Sustentabilidade integra ciência, sociedade e política e desenvolve caminhos para a reconstrução de relações sustentáveis entre a sociedade humana e o meio ambiente (KATES, 2011; HEINRICH et al., 2016).**

da ocupação humana na Terra” (ARTAXO, 2014, p. 17). O grupo de cientistas liderado por Johan Rockström e Will Steffen definiu nove fronteiras planetárias, determinadas por medidas quantitativas a partir do conhecimento científico acumulado sobre o funcionamento do planeta (ROCKSTRÖM et al., 2009ab; STEFFEN et al., 2015) (Figura 2.5). São elas:

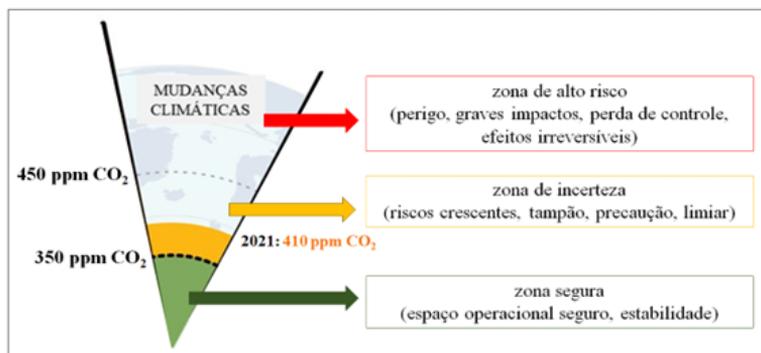
- mudanças climáticas,
- integridade da biosfera (formada pela diversidade genética e diversidade funcional),
- fluxos biogeoquímicos do nitrogênio e fósforo,
- mudanças no uso da terra,
- uso de água doce,
- acidificação dos oceanos,
- concentração de aerossóis atmosféricos,
- novas entidades e,
- diminuição do ozônio estratosférico.



Fonte: Crédito: J. Lokrantz/Azote, baseada em Steffen et al., 2015, adaptação de legendas em português pela autora.

Figura 2.5 – As nove fronteiras planetárias.

As medidas quantitativas de cada uma das fronteiras planetárias (Tabela 2.1) definem a separação de três zonas: a zona segura da fronteira (verde, Figura 2.5), a zona de incerteza ou riscos crescentes (amarela, Figura 2.5) e a zona de alto risco ou perigo (laranja, Figura 2.5), localizada para além da zona de incerteza. Por exemplo, a fronteira planetária das mudanças climáticas é medida pela quantidade de CO₂ na atmosfera em partes por milhão (ppm). A zona segura dessa fronteira é definida em 350 ppm de CO₂. A zona amarela localiza-se entre os valores de 350 e 450 ppm CO₂ e acima deste valor, está a zona laranja de alto risco (Figura 2.6).



Fonte: Adaptada de: J. Lokrantz/Azote, baseada em Steffen et al., 2015.

Figura 2.6 – Valores e atributos da fronteira planetária das mudanças climáticas.

Tabela 2.1 – As variáveis usadas para quantificar a fronteira planetária, o limite do espaço operacional seguro (zona verde), o limiar (zona amarela ou de risco crescente), o valor atual e a zona de operação de cada uma das nove fronteiras planetárias. ^a baseado no valor de referência do período pré-industrial; ^b a variável que mede o funcionamento dos ecossistemas ainda não possui um valor global.

Fronteira planetária	Variáveis medidas	Limite da zona segura (zona verde) ^a	Limiar (zona amarela)	Valor atual	Zona
Mudanças climáticas globais	concentração de CO ₂ (ppm)	350 ppm CO ₂	350-450 ppm CO ₂	410 ppm CO ₂ (AR6 IPCC 2021)	Risco crescente
Integridade da biosfera	diversidade genética; ^b taxa global de extinção de organismos dada pelo número de extinções/milhão de espécies ano	< 10 extinções/milhão de espécies ano	10-100 extinções/milhão de espécies ano	100-1.000 extinções/milhão de espécies ano	Alto risco

Fluxos biogeoquímicos do nitrogênio e do fósforo	fósforo global: fluxo do sistema de água doce aos oceanos (milhões de toneladas por ano)	11 milhões de ton/ano	11-100 milhões de ton/ano	~22 milhões de ton/ano	Alto risco
	fósforo regional: fertilizante no solo (milhões de toneladas por ano)	6,2 milhões ton/ano	6,2 – 11,2 milhões ton/ano	~14 milhões ton/ano	
	nitrogênio reativo global: fertilizantes no solo (milhões de toneladas por ano)	62 milhões ton/ano	62 – 82 milhões ton/ano	~150 milhões ton/ano	
Mudanças do uso da terra	área florestada em relação à cobertura florestal original (%)	Global: 75%; Tropical: 85%; Temperada: 50%; Boreal: 85%	Global: 75-54%; Tropical: 85-60%; Temperada: 50-30%; Boreal: 85-60%	Global: 62%	Risco crescente
Uso de água doce	consumo de água azul (km ³ /ano)	Máximo de 4.000 km ³ /ano	4.000-6.000 km ³ /ano	~2.600 km ³ /ano	Segura
	porcentagem de retirada de água azul de um rio, em relação à vazão média mensal desse rio	vazão média mensal baixa: 25%; vazão média mensal intermediária: 30%; vazão média mensal alta: 55%	vazão média mensal baixa: (25-55%); vazão média mensal intermediária: (30-60%); vazão média mensal alta: (55-85%)	-	
Acidificação dos oceanos	saturação média de aragonita (carbonato de cálcio) na superfície oceânica global (Ω_{arag})	$\geq 80\% \Omega_{arag}$	80%-70% Ω_{arag}	~84% Ω_{arag}	Segura
Concentração de aerossóis atmosféricos	Profundidade óptica do aerossol (AOD)	0,25 AOD	0,25-0,50 AOD	-	-
Novas entidades	Novas entidades				

Perda da camada de ozônio	concentração de ozônio estratosférico (DU)	< 5% de 275 DU	5-10% de 275 DU	~200 DU (somente na Antártica, na primavera)	Segura
---------------------------	--	----------------	-----------------	--	--------

O cálculo dos limites das zonas seguras (também chamadas de espaços operacionais seguros) das nove fronteiras planetárias é feito com base em valores de referência do período pré-industrial no Holoceno. Dentro das zonas seguras, garantem-se a estabilidade e a resiliência⁴ do planeta, em condições ecológicas e climáticas compatíveis às do Holoceno. Cabe às sociedades humanas desenvolver suas atividades econômicas, políticas, sociais e culturais de forma a não pressionar os limites dessa zona, que é capaz de suportar níveis de perturbações antropogênicas com baixo risco de desestabilização do planeta (STEFFEN et al., 2015).

A zona amarela é uma zona de incertezas, definida por um intervalo de valores mensuráveis que guarda em si as limitações do conhecimento científico disponível na atualidade. A incerteza nessa zona também se refere à complexidade inerente ao funcionamento dos subsistemas planetários. A zona amarela é considerada como um limiar, uma zona imprecisa, onde os riscos de desestabilização são crescentes (STEFFEN et al., 2015). A transição de um subsistema planetário do espaço operacional seguro (zona verde) para uma zona de riscos crescentes não se dá de forma imediata e exata, por isso os cientistas determinaram intervalos de valores para a zona amarela, que funciona como uma zona tampão ou zona de precaução. Transpor a zona verde para a zona amarela não significa que mudanças indesejáveis ocorrerão instantaneamente, mas é certo que quanto mais distante da zona segura, maior o risco de desestabilização de processos biofísicos, de perda de resiliência e de mudança de regime da fronteira planetária em questão.

A zona de alto risco (zona laranja) é onde localizam-se os pontos de inflexão⁵ que podem produzir graves impactos e efeitos irreversíveis no subsistema planetário, podendo inclusive afetar outras fronteiras planetárias. Quanto mais afastada a humanidade estiver de uma zona verde, maior o risco de um determinado subsistema perder resiliência ou sofrer mudanças irreversíveis em sua estrutura e função.

A seguir abordaremos cada um dos subsistemas planetários que representam as nove fronteiras planetárias.

4 Resiliência é a capacidade de um sistema em lidar com mudanças e continuar a se desenvolver. Em sistemas sociais, a resiliência é a capacidade de sociedades humanas de resistir, se reorganizar e se recuperar de estresses, como mudanças ambientais ou convulsões sociais, econômicas ou políticas (<https://www.stockholmresilience.org/research/resilience-dictionary.html>).

5 Um ponto de inflexão representa o início de uma realidade irreversível. Ao ultrapassar esse ponto, perde-se o controle de uma situação ou do funcionamento de um dado sistema. Pode representar “um caminho sem volta”.

As Mudanças Climáticas

Essa foi a primeira fronteira planetária definida por Rockström e colaboradores (2009a) e considerada por eles, como a mais importante. Calculada com base na concentração de CO₂ na atmosfera (em ppm), nos encontramos na zona de risco crescente da fronteira (zona amarela, Figura 2.5), com 410 ppm de CO₂ atmosférico (IPCC, no prelo) (Tabela 2.1). Dados do Relatório Anual do *Global Carbon Project* (FRIEDLINGSTEIN et al., 2019) mostram que houve crescimento de 0,6% da emissão de CO₂ na atmosfera em 2019, em todo planeta, em relação ao ano anterior, devido, principalmente, à queima de combustíveis fósseis (84,3%) seguida de mudanças do uso da terra por desmatamento (14,5%). Cerca de metade do CO₂ emitido é absorvida pela atmosfera e o restante pelos oceanos, vegetação e solos (PIVETTA, 2020). A absorção de grandes quantidades de CO₂ pela atmosfera e oceanos contribui, respectivamente, para o efeito estufa e a acidificação das águas oceânicas superficiais.

Os efeitos sentidos na atualidade decorrentes do limiar dessa fronteira planetária são:

- Aumento da intensidade, frequência e duração de ondas de calor em todo o planeta;
- Crescimento do número de eventos de chuvas torrenciais em diversas partes do globo;
- Aumento de secas em algumas regiões do planeta, em consequência de mudanças nos padrões da circulação atmosférica e;
- Aumento da taxa de perda das mantas de gelo da Groenlândia e Antártica.

Caminho sem volta para o degelo das calotas polares?⁶

Estamos perdendo a cobertura de gelo dos polos norte e sul. A desestabilização da cobertura de gelo da Groenlândia e Antártica é considerada pela Ciência como o ponto de inflexão mais grave do sistema planetário. Dentre outras razões, porque as superfícies de gelo exercem uma função essencial de resfriamento do planeta, ao refletirem a luz solar. A Groenlândia possui regiões onde a calota de gelo chega a 3 km de espessura, no entanto, o gelo está derretendo e essa região está perdendo cerca de 10 mil m³ de gelo por segundo. Ao derreter, os mantos de gelo diminuem e nas porções mais finas, a superfície exposta ao sol adquire uma coloração mais escura. A mudança na cor dessa superfície cria uma nova condição de absorção de calor, onde antes a luz do sol era refletida. O que era um sistema de refrigeração está se transformando em um sistema de retenção de calor. Ao se aquecer, a superfície polar faz com que o ar em contato com ela também se aqueça, produzindo um mecanismo de retroalimentação positiva entre a superfície terrestre e a atmosfera, que acelera o derretimento da calota polar. Embora a ciência ainda saiba pouco sobre esses mecanismos de retroalimentação, sabe-se que ao se instalarem, induzem processos rápidos que podem levar o sistema da Terra a um estado muito mais quente, elevando ainda mais o nível dos oceanos. A probabilidade de termos chegado a um ponto irreversível de perda de gelo polar no verão é bastante alta.

6 Baseado em SASGEN et al., 2020; 6º Relatório de Avaliação do IPCC-2021 e o documentário *Rompendo Barreiras: Nosso Planeta* (com David Attenborough e Johan Rockström, disponível na plataforma Netflix em <https://www.netflix.com/br/title/81336476>).

A integridade da biosfera

A fronteira planetária da integridade da biosfera é definida pela biodiversidade, que representa uma poderosa “engrenagem que mantém nossas sociedades”⁷ por meio da produção de inúmeros serviços ecossistêmicos. Ela dá uma medida da capacidade da biosfera em persistir e se adaptar a mudanças graduais e bruscas no longo prazo. As mudanças nessa fronteira se dão no nível dos biomas terrestres, mares e oceanos e dos grandes ecossistemas de água doce.

A integridade da biosfera é medida pela diversidade genética e funcional. A primeira informa sobre a diversidade de vida que coevoluiu com os componentes abióticos dos ecossistemas. A segunda expressa o funcionamento dos ecossistemas pelo número, abundância e distribuição de organismos vivos no planeta. Os cientistas ainda não definiram valores viáveis para calcular a fronteira segura global da diversidade funcional (STEFFEN et al., 2015). Para a diversidade genética, a medida usada é a taxa global de extinção de organismos (Tabela 2.1). O limite da zona segura está abaixo de 10 extinções/milhão de espécies ano. O limiar da zona amarela está entre 10 a 100 extinções/milhão de espécies ano e o valor atual calculado por Steffen et al. (2015) está entre 100 a 1.000 extinções/milhão de espécies ano, ou seja, nós estamos na zona de alto risco (zona laranja), sujeitando os ecossistemas do planeta a mudanças bruscas (Tabela 2.1, Figura 2.5).

As principais causas de perda de diversidade genética são a agricultura, os processos de urbanização, o aumento de incêndios de grandes proporções, a introdução de espécies exóticas e a exploração de recursos naturais, como no caso da mineração. O Relatório Final da Avaliação Global da Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos (IPBES, 2019) aponta que os ecossistemas estão em declínio sem precedentes na história humana, com taxas aceleradas de extinção de espécies e com graves impactos para as sociedades ao redor de todo o planeta. As taxas de extinção de vertebrados, peixes, répteis, anfíbios, aves e mamíferos vêm aumentando acentuadamente desde o começo do século XX. De fato, cerca de 1 milhão de espécies animais e vegetais estão ameaçadas de extinção, sendo mais de 40% das espécies de anfíbios e mais de um terço de todos os mamíferos marinhos. Caso as tendências atuais de perda de espécies se mantenham, o planeta vivenciará a sexta extinção em massa de espécies de sua história, com a previsão de que 65% das espécies animais e vegetais desaparecerão nos próximos séculos.

7 Baseado no documentário *Rompendo Barreiras: Nosso Planeta* (com David Attenborough e Johan Rockström, disponível na plataforma Netflix em <https://www.netflix.com/br/title/81336476>).

O trabalho invisível dos polinizadores

Entre as espécies de vertebrados polinizadores, um sexto delas está na lista vermelha de riscos de extinção. A maioria dos animais polinizadores está representada por espécies silvestres. São cerca de 20 mil espécies de abelhas, além de borboletas, mariposas, vespas e morcegos. Cerca de 90% das plantas silvestres dependem da transferência de pólen feita por animais, para se reproduzirem. E quanto às espécies cultivadas, três quartos das principais espécies cultivadas para alimentação no mundo dependem de algum nível de polinização por animais (IPBES, 2016). No Brasil, das 141 culturas agrícolas brasileiras, 85 dependem de polinização por animais (BPBES, 2022).

Os ciclos do fósforo e do nitrogênio

Essa fronteira retrata a interferência humana sobre os ciclos biogeoquímicos do fósforo e nitrogênio, principalmente pelo uso intensivo de fertilizantes na agricultura e por atividades industriais. Atualmente, as atividades humanas convertem mais nitrogênio atmosférico em reativo do que todos os processos do ciclo natural desse elemento. O excedente do nitrogênio reativo que não é absorvido pelas plantas se acumula nos corpos hídricos, zonas costeiras e outros ecossistemas. O mesmo ocorre com o fósforo que não é absorvido pelas plantas (ARTAXO, 2014).

Os valores do limiar entre a zona segura e de alto risco dos ciclos do fósforo e nitrogênio são calculados com base no fluxo de fósforo global do sistema de água doce aos oceanos (milhões de toneladas por ano) e na quantidade de fósforo e nitrogênio presente no solo, oriunda de fertilizantes (milhões de toneladas por ano) (Tabela 2.1). Os valores atuais dessa fronteira estão localizados na zona de alto risco (Figura 2.5) (STEFFEN et al., 2015), o que se explica pelo excesso de utilização de fertilizantes na agricultura de larga escala. Embora a produção de fertilizantes contribua para a produtividade agrícola em todo o planeta, o excesso de compostos de nitrogênio e de fósforo no ambiente provoca danos localizados que se acumulam, como no caso da eutrofização de lagos e mares, e lentamente afetam os ciclos globais desses dois nutrientes (ARTAXO, 2014; ROCKSTRÖM et al., 2009a).

Mudanças do uso da terra

Essa fronteira representa todos os biomas terrestres, mas os cálculos realizados para estimar o valor do limite da zona segura e do limiar (zona amarela) estão baseados apenas nos biomas florestais. São eles que exercem maior influência de regulação do clima, por meio de processos biofísicos (e.g., evapotranspiração) em escala regional e global. As interações que ocorrem entre a superfície terrestre e a atmosfera nos três principais biomas florestais – tropical, temperado e boreal⁸ – possuem um papel importante de regulação da temperatura e umidade, em comparação a outros biomas (SNYDER et al., 2004). O cálculo dos limites dessa fronteira está baseado em duas medidas de cobertura florestal (Tabela 2.1). Uma delas é global e calculada pela razão

8 As florestas tropicais estão relacionadas a climas quentes e úmidos e são as florestas que possuem a maior diversidade biológica no planeta; as florestas temperadas são quase homogêneas e decíduas (as espécies arbóreas perdem as folhas em parte das estações do ano) e estão localizadas em latitudes médias (35°-45°), onde predominam os climas temperados e; as florestas boreais (ou taigas) localizam-se na região subártica e são formadas por coníferas.

entre o remanescente de cobertura florestal em todo planeta e a área de florestas potencialmente existente no Holoceno, sem interferência da ação humana. A outra medida baseia-se na mesma razão, mas é calculada separadamente para as áreas florestadas e cobertura florestal original de florestas tropicais, temperadas e boreais (STEFFEN et al., 2015).

Globalmente esse subsistema planetário encontra-se em seu limiar (zona amarela), onde os riscos de mudanças abruptas são crescentes (Figura 2.5, Tabela 2.1). Dentre os biomas florestais, as florestas tropicais são as que possuem os mecanismos de retroalimentação climática mais fortes, que operam alterações na evapotranspiração (a transpiração das árvores) quando a floresta é convertida em outro sistema. A diminuição da cobertura florestal associada à redução da evapotranspiração favorece a redução de chuvas, o que, por sua vez, favorece o desencadeamento de mais secas e mortalidade de árvores (STEFFEN et al., 2015; LENTON et al., 2019). Já as mudanças na distribuição espacial das florestas boreais afetam o albedo da superfície terrestre e, em consequência, a troca de energia com a atmosfera, acarretando mudanças do clima em escala regional. As florestas temperadas, por sua vez, exercem influências mais brandas sobre o sistema climático, por isso há diferenças nos valores das zonas seguras e dos limiares desta fronteira para cada um dos três grupos de florestas (Tabela 2.1) (STEFFEN et al., 2015).

Amazônia: sumidouro ou fonte de CO₂?

As florestas da Amazônia são componentes chave para o funcionamento climático da Terra, tanto no nível regional, como globalmente. Em estudo realizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e reportado na revista FAPESP em 2020 (PIVETTA, 2020), dados sobre a Amazônia mostram que ela está passando de sumidouro de CO₂ para fonte emissora de CO₂ à atmosfera. Isso significa que a quantidade de CO₂ emitida pela floresta é hoje mais alta do que a quantidade que ela absorve. Assim, entre 2010 e 2017, a Amazônia liberou em média, anualmente, algumas centenas de milhões de toneladas a mais de carbono do que retirou do ar e estocou em sua vegetação e solo. Na década de 2010, a capacidade da Amazônia em retirar carbono da atmosfera era 1/3 menor do que nos anos de 1990. E em anos de fortes secas, a capacidade da floresta de retirar o carbono da atmosfera diminui, favorecendo o aumento significativo da emissão de CO₂. As secas na Amazônia, que vêm se tornando mais severas e frequentes, também provocam aumento da mortalidade de árvores. Com menos vegetação por causa do desmatamento e com plantas menos saudáveis por causa de secas e efeitos de degradação florestal, as árvores fazem menos fotossíntese, o que significa menos absorção de CO₂. As queimadas, as secas, o aumento da temperatura e da mortalidade de árvores, e a queda da taxa de fotossíntese são processos interligados que se retroalimentam. Por isso, a Amazônia é um exemplo de um sistema que está próximo de um limiar, o que poderá levá-la a um processo de savanização (PIVETTA, 2020).

Uso de água doce

O espaço operacional seguro dessa fronteira planetária é definido por uma medida global e outra na escala de bacia hidrográfica (Tabela 2.1). A medida global é dada pela quantidade máxima de consumo de água azul (rios, lagos e águas subterrâneas) em km³/ano, e a medida de bacia hidrográfica é calculada pela porcentagem de retirada de água de um rio, em relação ao fluxo médio mensal desse rio. Atualmente, o limite

dessa fronteira é dado apenas pela medida global, que situa o uso de água doce ainda dentro da zona segura, com o consumo estimado em 2.600 km³/por ano (STEFFEN et al., 2015) (Tabela 2.1, Figura 2.5).

O Brasil abriga duas das maiores áreas úmidas do planeta – o Pantanal e a Bacia Amazônica e contém cerca de 12% da totalidade de recursos hídricos superficiais da Terra. Apesar disso, o acesso à água potável no Brasil é muito desigual (Capítulo 6) e há inúmeros desafios a respeito do uso adequado da água doce. Na região norte, apesar da abundância hídrica, a qualidade da água ofertada nas cidades é baixa; na região nordeste, a população enfrenta baixos índices de chuvas que ameaçam a produção das lavouras; no Centro-Oeste o uso de agrotóxicos e fertilizantes ameaçam a qualidade das águas e a vida dos rios; no Sudeste e Sul a alta demanda de água doce pelas populações urbanas desafia governos. Como em outras partes do planeta, as mudanças do clima e do uso da terra e mais a poluição são as principais ameaças à conservação da água doce no país (PIRES et al., 2019).

Acidificação dos oceanos

Cerca de 1/3 de todo o CO₂ emitido pelo ser humano na atmosfera é absorvido pelos oceanos por dissolução e absorção de carbono pela biota marinha. O dióxido de carbono combinado à água do mar, que é originalmente alcalina, forma compostos ácidos. O aumento contínuo da emissão de CO₂ na atmosfera reflete-se na quantidade de CO₂ absorvido pelos oceanos e de compostos ácidos dissolvidos na água do mar, que diminuem o pH da água, resultando no fenômeno da acidificação dos oceanos. Nos últimos 200 anos, a acidez dos oceanos, medida pela concentração de íons de hidrogênio, aumentou cerca de 30% (ARTAXO, 2014).

A fauna marinha que secreta carbonato de cálcio na forma de aragonita e calcita para a formação de conchas e esqueletos é particularmente sensível ao aumento da acidez das águas oceânicas porque os carbonatos de cálcio se dissolvem em meio ácido. São moluscos, corais, algas e plânctons que têm o desenvolvimento de suas conchas e esqueletos cada vez mais prejudicado pelo aumento de CO₂ nas águas oceânicas (GUINOTTE; FABRY, 2008; ARTAXO, 2014).

A fronteira planetária da acidificação dos oceanos é calculada em 80% de saturação média de aragonita nas águas superficiais, em relação a valores estimados para o período que antecede a Revolução Industrial (Tabela 2.1). Embora essa fronteira ainda opere em zona segura (Figura 2.5), as alterações da atualidade afetam a cadeia trófica de toda a comunidade marinha. O efeito do aumento de CO₂ nos oceanos é regionalizado e geograficamente heterogêneo, no entanto, interage com as demais fronteiras planetárias que controlam o CO₂, como as mudanças do uso da terra e do clima (STEFFEN et al., 2015).

Aerossol Atmosférico

Os aerossóis são partículas de poluição dispersas na atmosfera, que causam graves efeitos nos organismos vivos e afetam a saúde humana produzindo um enorme número de óbitos anualmente. O comportamento dos aerossóis depende da sua composição química, localização geográfica e altura na atmosfera. Os aerossóis originam-se de

gases poluentes que se condensam em gotículas ou partículas juntamente com poeira e fumaça. A carga de aerossóis na atmosfera pode conter carbono, além de sulfatos, nitratos e outros compostos gerados pela queima de diferentes tipos de combustíveis. A dispersão de aerossóis na atmosfera altera o comportamento da radiação solar que incide sobre a superfície terrestre. Eles interagem com vapor d'água e afetam a formação de nuvens, o ciclo da água e os padrões regionais e globais de circulação atmosférica. Essa fronteira é medida pela profundidade ótica do aerossol (AOD, acrônimo em inglês), mas não existem dados científicos para calcular uma fronteira global (ROCKSTRÖM et al., 2009a; STEFFEN et al., 2015) (Tabela 2.1, Figura 2.5).

Novas entidades

As novas entidades são definidas como novas substâncias e formas de vida modificadas, com potencial de gerar efeitos geofísicos e biológicos indesejados. Elas reúnem substâncias tóxicas e persistentes, como poluentes orgânicos sintéticos, compostos de metal pesado e material radioativo. Clorofluorcarbonos, plásticos, microplásticos e nanoplásticos são exemplos de novas entidades. Atualmente, há mais de 100 mil substâncias produzidas e comercializadas que podem ser classificadas como novas entidades. A preocupação com elas se dá devido à sua persistência, mobilidade e grau de impacto sobre os sistemas bióticos da Terra. As novas entidades podem ter efeitos irreversíveis sobre organismos vivos e o ambiente, afetando inclusive a atmosfera. Há, por exemplo, diversos estudos científicos que demonstram que compostos orgânicos persistentes causam reduções drásticas na abundância de populações de aves e prejuízos de desenvolvimento e reprodução em mamíferos marinhos (STEFFEN et al., 2015; PERSSON et al., 2022).

Essa é uma nova fronteira planetária em termos geológicos que pode ter um amplo impacto sobre os sistemas da Terra. As novas entidades estão entre as fronteiras não quantificadas (Tabela 2.1, Figura 2.5), mas um estudo publicado em 2022 defende o argumento de que já passamos a zona segura dessa fronteira (PERSSON et al., 2022). Com atenção especial à poluição por plásticos, os autores desse estudo apontam que já há evidências suficientes sobre as taxas crescentes de produção e descarte de grandes volumes de novas entidades (Capítulo 5), que geram inúmeros riscos potenciais que excedem a capacidade das sociedades em conduzir avaliações e monitoramentos confiáveis sobre o ciclo dessas substâncias (PERSSON et al., 2022).

Perda do ozônio estratosférico

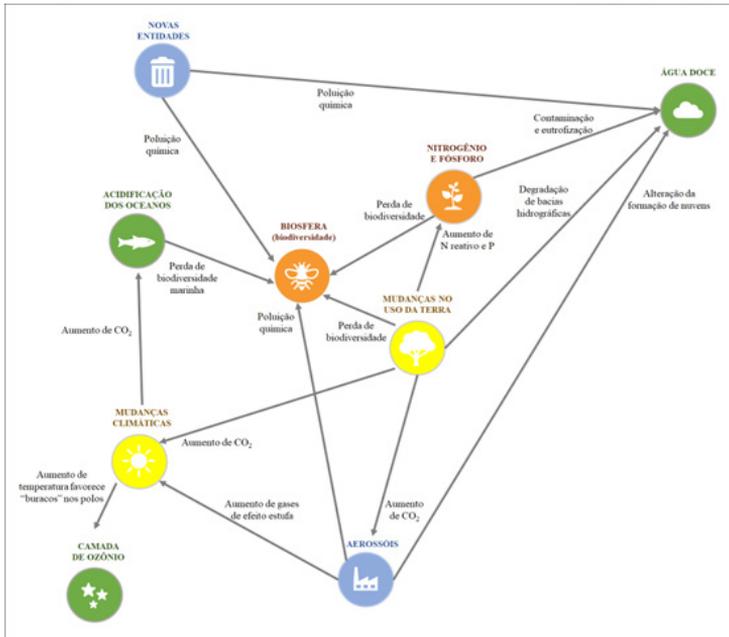
Na estratosfera, o ozônio ocorre naturalmente e filtra a radiação dos raios ultravioleta que incidem sobre a superfície do planeta. Substâncias poluentes, como os clorofluorcarbonetos, quando se combinam com os cristais de gelo na estratosfera, desencadeiam reações químicas que destroem as moléculas de ozônio.

Essa fronteira planetária opera em um espaço seguro (zona verde), com exceção da estratosfera sobre a Antártica durante a primavera (Tabela 2.1, Figura 2.5). O ozônio estratosférico está estável há cerca de 15 anos e calcula-se que nas próximas décadas a depleção (ou, para usar de linguagem coloquial, “o buraco”) da camada de ozônio acima do polo sul seja minimizada ou mesmo eliminada (STEFFEN et al., 2015).

A gestão do problema da depleção da camada de ozônio é um exemplo bem-sucedido de como reverter uma condição de risco e indesejada com base em ações coletivas no nível global. Em 1987 o Protocolo de Montreal, assinado pela maioria dos países do mundo, instituiu o banimento gradual da produção e utilização de substâncias degradadoras do ozônio estratosférico através da substituição por outras substâncias menos nocivas (ROCKSTRÖM et al., 2009a). Vigorando desde 1989, o Protocolo de Montreal foi revisado diversas vezes e é considerado o acordo ambiental internacional mais bem-sucedido da história.

Das nove fronteiras planetárias, quatro já cruzaram seus espaços operacionais seguros: a integridade da biosfera (medida pela diversidade genética), os ciclos biogeoquímicos do fósforo e do nitrogênio (ligado ao uso de fertilizantes agrícolas), as mudanças climáticas e as mudanças do uso da terra (Figura 2.5, Tabela 2.1). Esses subsistemas estão perdendo resiliência, o que afeta não somente suas próprias estruturas e funções, mas também a dos subsistemas com os quais estão interconectados. As fronteiras das mudanças climáticas e mudanças do uso da terra estão em seus limiares, ou seja, em zonas de risco crescente, onde alterações significativas podem levá-las a novos regimes de funcionamento. As fronteiras do uso de água doce, acidificação dos oceanos e diminuição do ozônio estratosférico ainda operam em espaço seguro, no nível global, mas sofrem influências dos demais subsistemas. Por exemplo, o uso da água doce oriunda de rios, lagos, reservatórios e de aquíferos é diretamente afetado por mudanças do uso da terra. No caso da acidificação dos oceanos, a estabilização da emissão de CO₂ atmosférico em 350 ppm (fronteira das mudanças climáticas) asseguraria a manutenção da fronteira da acidificação dos oceanos dentro de sua zona segura (zona verde) (STEFFEN et al., 2015).

As fronteiras planetárias operam ao longo de diferentes escalas, de oceanos e biomas terrestres a bacias hidrográficas e mangues e produzem efeitos locais, regionais e globais (ARTAXO, 2014; STEFFEN et al., 2015; LENTON et al., 2019). As nove fronteiras planetárias são interdependentes (Figura 2.7) e interagem de forma não linear, podendo sofrer transformações abruptas, mudar sua estrutura e trajetória e afetar a estrutura e o funcionamento de outras fronteiras. Tais interações se retroalimentam e geram propriedades emergentes, que não são previstas pelo comportamento das partes de um subsistema planetário, mas pelo resultado do funcionamento integrado de todos eles (WALKER et al., 2004; ROCKSTRÖM et al., 2009a; LENTON et al., 2019).



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 2.7 – Conexões entre as fronteiras planetárias. As setas indicam os efeitos de uma fronteira planetária sobre a outra.

As mudanças do uso da terra interagem com as mudanças climáticas através do aumento da emissão de CO₂, com a integridade da biosfera, provocando perda de biodiversidade e com o uso da água doce, por meio da degradação de bacias hidrográficas. Por exemplo, desmatamentos e incêndios de florestas tropicais impactam a absorção de carbono pela vegetação e solo, como visto anteriormente, mas também provocam perda de biodiversidade e degradação da vegetação que margeia e protege os corpos de água doce. Os oceanos são particularmente sensíveis às interações entre as fronteiras planetárias. A biota marinha está colapsando com o aumento da absorção de CO₂ atmosférico, o aquecimento gradual de suas águas e a eutrofização causada por resíduos de fertilizantes. O branqueamento dos recifes de corais na Grande Barreira de Corais da Austrália, que já matou metade desta comunidade, é um exemplo dramático da atual fragilidade dos oceanos (LENTON et al., 2019).

2.6 CRISE PLANETÁRIA E A PEDAGOGIA DA PANDEMIA DE COVID-19

As fronteiras planetárias constituem a base de um paradigma para a construção de uma nova relação do ser humano com o planeta, capaz de integrar o desenvolvimento das sociedades humanas e a manutenção dos sistemas planetários em um estado de estabilidade (STEFFEN et al., 2015). A ideia das fronteiras planetárias é informar as

sociedades contemporâneas sobre a existência de zonas seguras de operação da vida na Terra, reconhecendo que hoje já não possuímos as condições estáveis do Holoceno. Portanto, a ideia do Antropoceno está totalmente incorporada às fronteiras planetárias. Essa abordagem sobre a crise ecológica do planeta vem atraindo o interesse da comunidade científica e produzindo debates sobre sua aplicação na governança e formulação de políticas socioambientais. Os governos nacionais, por exemplo, podem usar o arcabouço das fronteiras planetárias para avaliar suas responsabilidades pelos impactos ambientais em seus países, em combinação com outras abordagens de governança. A ideia de fronteiras planetárias pode ser comunicada a diferentes setores da sociedade para orientar a reflexão, debate e ação sobre os problemas socioambientais enfrentados na atualidade. Essa abordagem pode ser combinada à ideia de um espaço operacional seguro e justo para a humanidade, proposto pela Economia *Donut*, idealizada pela economista inglesa Kate Raworth (Capítulo 9).

A Terra é capaz de passar por mudanças bruscas decorrentes de processos naturais, como tsunamis, terremotos e erupções de vulcões. Esses fenômenos são parte de sua história geológica, evolutiva e ecológica e os organismos vivos que habitam nosso planeta coevoluem nessa trajetória. No entanto, os seres humanos estão interferindo nos sistemas ecológicos da Terra com tal magnitude e rapidez que as mudanças decorrentes das atividades humanas, em especial aquelas realizadas a partir do final da Segunda Grande Guerra Mundial, são incomparáveis a qualquer outro momento da história humana e do planeta. Cortamos e queimamos florestas, matamos animais e rios, poluímos o ar e destruimos ecossistemas inteiros. Com isso liberamos incontáveis e desconhecidos vírus e seus hospedeiros naturais. Nossa existência como espécie neste planeta é sem precedentes, nunca houve um organismo de grande porte tão abundante como os humanos. Hoje somos mais de 7,8 bilhões de indivíduos e nossa abundância combinada aos distúrbios ecológicos que provocamos no planeta favorecem o aumento das trocas virais, primeiro de animal para ser humano (caracterizando, assim, as zoonoses) e depois entre nós (QUAMMEN, 2020) (Capítulo 1).

Assumindo a existência da crise ecológica planetária e recordando que os subsistemas planetários estão interligados, quais relações podemos identificar entre essa crise e a Pandemia de covid-19? Como vimos no Capítulo 1, as perturbações sobre os ecossistemas naturais e comunidades ecológicas favorecem a emergência de doenças infecciosas. Esse fenômeno está diretamente ligado ao comportamento das fronteiras da integridade da biosfera, mudanças climáticas e mudanças do uso da terra. E o vírus SARS-CoV-2, causador da covid-19, nos mostra que as condições de saúde dos humanos e do planeta estão completamente conectadas e inter-relacionadas.

Surtos de doenças virais novas são como as bolinhas de aço de uma máquina de pinball: você pode dar um tapa nelas com as palhetas, sacudir a máquina e bater nas bolinhas para ouvir o tilintar do fliperama, mas onde elas acabam caindo depende de onze variáveis, bem como de qualquer coisa que você faça. Isso ocorre principalmente com os coronavírus: eles sofrem frequentes muta-

ções à medida que se replicam, e podem evoluir tão rápido quanto um espírito maligno saído de um pesadelo (QUAMMEN, 2020: 12).

No início da Pandemia de covid-19, acreditamos que o planeta experimentava uma possível “pausa regenerativa”, devido às tantas quarentenas impostas visando romper a transmissão viral. E, de fato, as ações antrópicas, ao menos durante os meses de março, abril, maio e junho de 2020, quase que pararam e, assim, não sem motivo, verificou-se uma breve queda na emissão de CO₂ e nos níveis de poluição, provavelmente em todos os ecossistemas do planeta. Mas, a presença e persistência do vírus foram maiores do que nossa capacidade de mudança de modo de vida. Se de um lado, os deslocamentos para o trabalho e em viagens nacionais e internacionais diminuíram, não observamos nenhuma mudança estrutural de comportamento e de políticas públicas, por exemplo, para transformar o transporte coletivo, visando torná-lo efetivamente sustentável ou, mais precisamente, menos intenso em carbono. Também observamos o aumento do consumo de máscaras, luvas, sacolas plásticas e embalagens de plástico e isopor sem que essa mudança viesse acompanhada de alguma mudança na produção e descarte desses materiais. Pelo contrário, todos vimos imagens de máscaras em rios, mares e presas em animais. Enquanto esse vírus choca a humanidade, ouvimos dos governantes o discurso sobre a recuperação econômica, mas não a do planeta, como se a “mensagem ecológica do vírus” não tivesse sido ouvida pela humanidade.

Enquanto a Pandemia de covid-19 é uma crise de progressão rápida, a crise planetária é lenta. A respeito da resolução dessas crises, sabemos que esta pandemia será revertida, mas a crise planetária nos apresenta inúmeras incertezas sobre sua reversibilidade. A resposta à Pandemia de covid-19 foi dramática e de emergência (ao menos em seu início, em 2020). Já a respeito da crise planetária, observam-se movimentos lentos, decisões arrastadas e pouco ou nenhum avanço. O confinamento que o planeta experimentou nesta pandemia poderá ser considerado brando comparado às exigências de confinamento mais permanentes ou sazonais em algumas regiões do planeta, em decorrência de mudanças climáticas severas (SOUZA, 2020).

A Pandemia de covid-19 nos alertou que o planeta não está bem e com isso nos deu a oportunidade de refletir sobre o rumo que a humanidade está tomando. A ideia das fronteiras planetárias traz esperança para a humanidade transformar as condições instáveis e insustentáveis de vida na Terra. Essa ideia é como um facho de luz a guiar os caminhos da humanidade. A janela de oportunidade para esses caminhos ainda está aberta aos seres humanos. Aproveitemos.

Concluo com fragmentos de texto publicado pela jornalista Eliane Brum em março de 2020, no *El Pais*, que se chama “O vírus somos nós (ou uma parte de nós)”:

No princípio era o vírus. Coronavírus. (...) Tornou-se onipresente no planeta, ainda que tão invisível quanto certos deuses para olhos humanos. (...) Vamos precisar derrotá-lo em nossos corpos, neutralizá-lo para reiniciar isso que

chamamos de o outro mundo que virá. (...) O modo de viver precisa mudar. Nossa sociedade precisa se tornar outra. O impasse imposto pela pandemia não é novo. É o mesmo impasse colocado há anos, décadas, pela emergência climática. (...) Todas as informações científicas apontam que é preciso parar de devorar o planeta, que há que se mudar radicalmente os padrões de consumo, que a ideia de crescimento infinito é uma impossibilidade lógica num mundo finito. (...) O efeito da pandemia é o efeito concentrado, agudo, do que a crise climática está produzindo de forma muito mais lenta. É como se o vírus desse uma palhinha do que viveremos logo mais. (...) O vírus não permite fingimentos. Ele possivelmente saltou de um morcego, espécie cujo habitat também destruímos, para se hospedar no organismo dos humanos. Nada mais fez do que tocar sua vida de vírus. (...) E aí vem o vírus, que não está interessado em nos passar nenhuma mensagem, só está mesmo cuidando da própria vida, e mostra: vocês, humanos, não estão sozinhos nesse planeta nem têm o controle que acreditam ter. (...) Aqueles que serão os mais atingidos pelo superaquecimento global - negros e indígenas, mulheres e pobres - foram os que menos contribuíram para provocar a emergência climática. E aqueles que produziram a crise climática ao consumir o planeta em grandes porções e proporções - os brancos ricos de países ricos, os brancos ricos de países pobres, os homens, que nos últimos milênios centralizaram as decisões, nos trazendo até aqui - são os que serão menos afetados por ela. (...) Na pandemia de coronavírus há o mesmo apartheid. (...) Se a pandemia passar e ainda estivermos vivos, será no momento de recompor as humanidades que poderemos criar uma sociedade nova. (...) uma sociedade preparada para compreender que qualquer futuro depende de parar de esgotar o que chamamos de recursos naturais — e que os indígenas chamam de mãe, pai, irmão. O futuro está em disputa. No amanhã, demorando ou não a chegar, saberemos se a parte minoritária, mas dominante, da humanidade seguirá sendo o vírus hediondo e suicida, capaz de exterminar a própria espécie ao destruir o planeta-corpo que a hospeda. Ou se barraremos essa força de destruição ao nos inventarmos de outro jeito, como uma sociedade consciente de que divide o mundo com outras sociedades. (...) A pandemia de coronavírus revelou que somos capazes de fazer mudanças radicais em tempo recorde. (...) E por isso precisamos nos unir em torno de um comum global que proteja a única casa que todos temos. O vírus, também um habitante deste planeta, nos lembrou de algo que tínhamos esquecido: os outros existem. (...) (BRUM, 2020).

Leituras sugeridas

BRUM, Eliane. **O vírus somos nós (ou uma parte de nós)**. 2020. Disponível em: <https://brasil.elpais.com/opiniaio/2020-03-25/o-virus-somos-nos-ou-uma-parte-de-nos.html>. Acesso em: 24 fev. 2022.

SOUSA SANTOS, Boaventura. **A cruel pedagogia do vírus**. Boitempo Editorial, 2020. 32 p. Disponível em: https://www.abennacional.org.br/site/wp-content/uploads/2020/04/Livro_Boaventura.pdf. Acesso em: 24 fev. 2022.

KRENAK, Ailton. **Ideias para adiar o fim do mundo**. 1a ed.: Companhia das Letras, 2019. 64 p.

Documentário sugerido

David Attenborough e Johan Rockström. Rompendo Barreiras: Nosso Planeta. Netflix (<https://www.netflix.com/browse>).

Questões sugeridas para debate

1. Como você imagina que os governos nacionais, organizações internacionais, empresas, cidades ou grupos de pessoas poderiam usar a abordagem das fronteiras planetárias?
2. Qual é a importância da conservação da Amazônia para a estabilidade do Sistema Terra?
3. Descreva e analise, criticamente, os efeitos das mudanças do uso da terra no município em que você vive.
4. Quais são os compromissos firmados na atualidade, entre as nações, para o planeta não ultrapassar o aumento de temperatura, em 1,5 °C?

REFERÊNCIAS

ARTAXO, Paulo. Uma nova era geológica em nosso planeta: o Antropoceno? **Revista USP**, n. 103, p. 13-24, 2014.

BPBES. **1º Diagnóstico Brasileiro de Biodiversidade & Serviços Ecossistêmicos**. São Carlos: Editora Cubo, 2019. 178 p. Disponível em: https://www.bpbes.net.br/wp-content/uploads/2019/09/BPBES_Completo_VF-1.pdf. Acesso em: 24 fev. 2022.

DE SOUSA SANTOS, Boaventura. **A cruel pedagogia do vírus**. Boitempo Editorial, 2020. 32 p. Disponível em: https://www.abennacional.org.br/site/wp-content/uploads/2020/04/Livro_Boaventura.pdf. Acesso em: 24 fev. 2022.

CRUTZEN, Paul J. Geology of mankind. **Nature**, v. 415, p. 23, 2002.

- ELLIS, Erle *et al.* Used planet: A global history. **PNAS**, v 110, n. 20, p. 7978-7985, 2013.
- ELLIS, Erle *et al.* Involve social scientists in defining the Anthropocene. **Nature**, v. 540, n. 7632, p. 192-193, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/540192a>.
- FOLEY, Robert. **Apenas mais uma espécie única**. 1a ed.: EDUSP, 1993. 363 p.
- FRIEDLINGSTEIN, Pierre *et al.* Global carbon budget 2019. **Earth System Science Data**, v. 11, n. 4, p. 1783-1838, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>.
- GRIGGS, David *et al.* An integrated framework for sustainable development goals. **Ecology and society**, v. 19, n. 4, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5751/ES-07082-190449>.
- GUINOTTE, John, M.; FABRY, Victoria J. Ocean acidification and its potential effects on marine ecosystems. **Annals of New York Academy of Sciences**, v. 1134, p. 320-342, 2008. doi:10.1196/annals.1439.013.
- HEINRICH, Harald *et al.* (eds.). **Sustainability Science. An Introduction**. Springer, 2016. 365 p.
- IPBES. **The assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on pollinators, pollination and food production**. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, 2016. Bonn, Alemanha. 552 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3402856>.
- IPBES. **Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services**, 2019. Bonn, Alemanha. 1148 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>. Disponível em: <https://zenodo.org/record/5657041#.YhjeJujMLrc>. Acesso em: 24 fev. 2022.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC 2021. **Summary for Policymakers**. In: **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, 40 p. In Press.
- KATES, Robert W. What Kind of a Science Is Sustainability Science? **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 49, p. 19449-50, 2011. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116097108>.
- KRENAK, Ailton. **Ideias para adiar o fim do mundo**. 1a ed.: Companhia das Letras, 2019. 64 p.

- LENTON, Timothy M. *et al.* Climate tipping points - too risky to bet against. **Nature**, v. 575, p. 592-595, 2019.
- PERSSON, Linn *et al.* Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities. **Environmental science & technology**, v. 56, n. 3, p. 1510-1521, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04158>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.1c04158>. Acesso em: 24 fev. 2022.
- PIRES, Aliny P. F. *et al.* Sumário para Tomadores de Decisão (STD) do Relatório Temático Água: biodiversidade, serviços ecossistêmicos e bem estar humano no Brasil, 2019. Editora Cubo, São Carlos. 20 p.
- PIVETTA, Marcos. Amazônia, agora, é fonte de CO₂. **Revista Pesquisa FAPESP**, 2020. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/amazonia-agora-e-fonte-de-co2/>. Acesso em: 24 fev. 2022.
- QUAMMEN, David. **Contágio: Infecções de origem animal e a evolução das pandemias**. 1a ed.: Companhia das Letras, 2020.
- RAMANKUTTY, Navin; FOLEY, Jonathan A. Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700 to 1992. **Global biogeochemical cycles**, [S. l.], v. 13, n. 4, p. 997-1027, 1999. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1029/1999GB900046>. Acesso em: 24 fev. 2022.
- RAWORTH, Kate. **Economia Donut: Uma alternativa ao crescimento a qualquer custo**. 1a ed.: Zahar, 2019. 368 p.
- RITCHIE, Hannah. The human population curve is on the move. **Anthropocene Magazine**, 2020. Disponível em: <https://www.anthropocenemagazine.org/2020/07/the-human-population-curve-is-on-the-move/>. Acesso em: 24 fev. 2022.
- ROCKSTRÖM, Johan *et al.* Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. **Ecology and Society**, v. 14, n. 2, 2009a. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/26268316>. Acesso em: 24 fev. 2022.
- ROCKSTRÖM, Johan *et al.* A safe operating space for humanity. **Nature**, 461, p. 472-475, 2009b.
- SALGADO-LABOURIAU, Maria Léa. **História Ecológica da Terra**. 2a ed.: Blucher, 1994. 318 p.
- SASGEN, Ingo *et al.* Return to rapid ice loss in Greenland and record loss in 2019 detected by the GRACE-FO satellites. **Communications Earth & Environment**, v. 1, n. 8, p. 1-8, 2020. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-0010-1>.
- SNYDER, P. K.; Delire, C.; Foley, J. A. Evaluating the influence of different vegetation biomes on the global climate. **Climate Dynamics**, v. 23, p. 279-30, 2004) DOI: 10.1007/s00382-004-0430-0.
- SANTOS, Boaventura S. **A cruel pedagogia do vírus**. Boitempo Editorial, 2020. 32

- p. Disponível em: https://www.abennacional.org.br/site/wp-content/uploads/2020/04/Livro_Boaventura.pdf. Acesso em: 24 fev. 2022.
- STEFFEN, Will *et al.* Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. **Science**, v. 347, n. 6223, p. 1259855, 2015. DOI: 10.1126/science.1259855.
- STEFFEN, Will; GRINEVALD, Jacques; CRUTZEN, Paul; MCNEILL, John. The Anthropocene: conceptual and historical perspectives. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 369, n. 1938, p. 842-867, 2011. DOI: 10.1098/rsta.2010.0327.
- STOCKHOLM RESILIENCE CENTRE - SRC. **The nine planetary boundaries 2015**. Disponível em: <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries/the-nine-planetary-boundaries.html>. Acesso em: 24 fev. 2022.
- STOCKHOLM RESILIENCE CENTRE -SRC. **Stockholm Resilience Centre Decennial Report 2007-2017**. Strokirk-Landströms AB, 2017. 140 p.
- UNITED NATIONS, DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS, POPULATION DIVISION -UN. **World Population Prospects 2019**, Online Edition. Rev. 1, 2019.
- VANWALLEGHEM, T. *et al.* Impact of historical land use and soil management change on soil erosion and agricultural sustainability during the Anthropocene. **Anthropocene**, v. 17, p. 13-29, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ance.2017.01.002>.
- VIDAL, Céline M. **et al.** Age of the oldest known Homo sapiens from eastern Africa. **Nature**, v. 601, p. 579-583, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04275-8>.
- VIEIRA, Paulo Freire; BERKES, Fikret; SEIXAS, Cristiana Simão. **Gestão integrada e participativa de recursos naturais: conceitos, métodos e experiências**. Florianópolis: APED, 2005. 415 p.
- WALKER, Brian *et al.* Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. **Ecology and Society**, v. 9, n. 2: 5, 2004. [Online] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5>.
- WATERS, Colin N. *et al.* The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. **Science**, [S. l.], v. 351, n. 6269, p. aad2622, 2016. DOI: 10.1126/science.aad2622.
- ZOLNERKEVIC, Igor. A era humana. **Revista Pesquisa FAPESP**, [S. l.], n. edição 243, 2016. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/a-era-humana/>. Acesso em: 24 fev. 2022.