



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
NÚCLEO DE ALTOS ESTUDOS AMAZÔNICOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO  
SUSTENTÁVEL DO TRÓPICO ÚMIDO  
DOUTORADO EM CIÊNCIAS: DESENVOLVIMENTO SOCIOAMBIENTAL



MÔNICA MORAES RIBEIRO

**OS LIMITES NATURAIS DO CRESCIMENTO ECONÔMICO À LUZ DA  
ECONOMIA ECOLÓGICA: CAMINHOS PARA UMA SOLUÇÃO NEGUENTRÓPICA**

BELÉM-PA  
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
NÚCLEO DE ALTOS ESTUDOS AMAZÔNICOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO  
SUSTENTÁVEL DO TRÓPICO ÚMIDO  
DOUTORADO EM CIÊNCIAS: DESENVOLVIMENTO SOCIOAMBIENTAL



MÔNICA MORAES RIBEIRO

**OS LIMITES NATURAIS DO CRESCIMENTO ECONÔMICO À LUZ DA  
ECONOMIA ECOLÓGICA: CAMINHOS PARA UMA SOLUÇÃO NEGUENTRÓPICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido - PPGDSTU, da Universidade Federal do Pará, como critério parcial para obtenção do título Doutora em Ciências: Desenvolvimento Socioambiental.

Orientador: Danilo Araújo Fernandes

BELÉM-PA  
2025

AUTORIZO, NOS TERMOS DA LEI Nº 9.610/1998, A REPRODUÇÃO E A DIVULGAÇÃO DESTE TRABALHO, INTEGRAL OU PARCIALMENTE, POR QUAISQUER MEIOS FÍSICOS OU DIGITAIS, PARA FINS ACADÊMICOS, CIENTÍFICOS OU DE PESQUISA, DESDE QUE A AUTORIA SEJA DEVIDAMENTE REFERENCIADA.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)  
autor(a)

---

R484l Ribeiro, Mônica Moraes Ribeiro.  
Os Limites Naturais do Crescimento Econômico à Luz da  
Economia Ecológica: : Caminhos para uma solução  
neguentrópica / Mônica Moraes Ribeiro Ribeiro. — 2025.  
217 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Danilo Araújo Fernandes  
Fernandes

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará,  
Núcleo de Altos Estudos Amazônicos, Programa de Pós-  
Graduação em Desenvolvimento Sustentável do Trópico  
Úmido, Belém, 2025.

1. Neguentropia. 2. bioeconomia. 3. Entropia. 4.  
Sustentabilidade . 5. Economia Ecológica. I. Título.

CDD 330.1209811

---

MÔNICA MORAES RIBEIRO

**OS LIMITES NATURAIS DO CRESCIMENTO ECONÔMICO À LUZ DA  
ECONOMIA ECOLÓGICA: CAMINHOS PARA UMA SOLUÇÃO NEGUENTRÓPICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido - PPGDSTU, da Universidade Federal do Pará, como critério parcial para obtenção do título Doutora em Ciências: Desenvolvimento Socioambiental.

Defendida e aprovada em 05 / 08 / 2025.

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Danilo Araújo Fernandes  
Orientador — PPGDSTU – NAEA/UFPA

Prof. Dr. Francisco de Assis Costa  
Examinador Interno — PPGDSTU – NAEA/UFPA

Prof. Dr. Ricardo Theófilo Folhes  
Examinador Interno — PPGDSTU – NAEA/UFPA

Prof. Dr. Altem Nascimento Pontes  
Examinador Externo — PPGCA – CCNT/UEPA

Prof.<sup>a</sup> Dra. Larissa Steiner Chermont  
Examinadora Externa — MPGAP – INPA/UFPA

Ao meu marido Cléber e aos meus filhos Isabelle e Davi,  
com os quais, agora, quero aproveitar mais a vida.

Agradeço ao meu orientador Danilo Fernandes pelos valiosos ensinamentos.

Natureza é um processo sinfônico, é como uma orquestra que tem número fantástico de instrumentos e partituras. Nosso atual problema, e o da orquestra, é que nós humanos, que estamos entre os últimos chegados, deixamos de marcar o compasso. Em vez de sermos um instrumento novo, enriquecedor, estamos nos comportando como um músico que enlouqueceu, que se levantou de seu assento, passou a tocar seu instrumento caoticamente a toda força, sem olhar partitura, dançando no palco, derrubando colegas, instrumentos e móveis, assassinando outros músicos. Para o louco, orquestra e palco são apenas fundo. Para cada um dos músicos representam algo de profunda significação, um espaço onde estão dinamicamente inseridos, um conjunto cujas leis não podem transgredir. Mas a obediência a essas leis não é coisa chata, trabalho duro, mal necessário, bem ao contrário, a execução propicia a eles imenso prazer. Tenho insistido e continuo insistindo nesse tipo de imagem, claro que super simplificada, porque ilustra a inversão de perspectiva de que estamos necessitando, de troca de paradigma, sem o que não chegaremos a um futuro sustentável.

**José Lutzenberger**

## RESUMO

Este estudo objetiva compreender, no contexto do sistema econômico, as formas pelas quais o crescimento econômico impacta o meio ambiente, tanto em termos de extração de recursos materiais e energéticos, quanto da deposição de matéria degradada e de energia dissipada. Isso porque a prática econômica dominante, com sua escala de produção, gera uma série de problemas ambientais que ameaçam a sustentabilidade da vida na Terra. Esses problemas incluem a deterioração dos ecossistemas, a perda da biodiversidade e mudanças no clima. Neste sentido, cabe a indagação: de que forma o crescimento econômico, com seus impactos ambientais decorrentes, vêm sendo tratado pelas teorias econômicas ao longo do tempo; e quais abordagens teóricas poderiam ser identificadas, no estado atual da literatura, no sentido da defesa de uma abordagem teórica inovadora – com possibilidades de soluções nequentrópicas – capaz de dirimir o impasse da relação entre crescimento vs conservação ambiental? Para estas demandas, foi realizada extensa pesquisa bibliográfica no campo interdisciplinar, nas áreas da Economia Aplicada, Economia do Meio Ambiente, Física, Ecologia e Ecologia Política; com enfoque para a obra basilar de Nicholas Georgescu-Roegen (1971), na apreensão de sua crítica ao paradigma econômico dominante, bem como nos autores que representam a visão por ele criticada. No final do século XX, muitos debates divergentes emergiram na esfera acadêmica e no âmbito de formulações de políticas multilaterais globais. Isso resultou na elaboração de dois distintos campos de estudo que investigam a interação entre o processo econômico e os processos ecológicos, que são a Economia Ambiental e a Economia Ecológica. Essas duas correntes constituem pólos antagônicos de um mesmo processo, em que de um lado, na Economia Ambiental, se afirma o potencial de crescimento econômico sustentável de longo prazo, desde que se avance nos processos de internalização dos custos ambientais e substituição dos fatores escassos por fatores e recursos disponíveis; de outro, na Economia Ecológica, firmada nos limites biofísicos do crescimento e na necessidade de uma nova forma de pensar a economia, fundamentada em princípios bioeconômicos, ao propor sua reestruturação com foco na sustentabilidade dos fluxos de matéria e energia. Diante desse impasse e avançando sobre o cenário da emergência climática, dos esforços globais em buscar a conciliação para a questão do crescimento econômico e da conservação dos ecossistemas, propõe-se o debate sobre um modelo conceitual e inovador, que possa conciliar opções de crescimento com gabaritos qualitativos capazes de enquadrar as estratégias de crescimento dentro dos limites biofísicos dos ecossistemas, buscando compatibilizar a conflituosa relação entre crescimento vs conservação ambiental.

**Palavras-chave:** Amazônia, Sustentabilidade, Entropia, Neguentropia, Bioeconomia.

## ABSTRACT

This study aims to understand how economic growth impacts the environment within the framework of the economic system, both through the extraction of material and energy resources and the deposition of degraded matter and dissipated energy. The prevailing economic paradigm, with its scale of production, generates a range of environmental problems that threaten the sustainability of life on Earth, including ecosystem degradation, biodiversity loss, and climate change. In this context, the research explores how economic theories have historically addressed the environmental consequences of growth and seeks to identify theoretical approaches that, in the current state of the literature, support an innovative framework—one that offers negentropic solutions to reconcile the tension between growth and environmental conservation.

To address these questions, an extensive interdisciplinary literature review was conducted across Applied Economics, Environmental Economics, Physics, Ecology, and Political Ecology, with particular emphasis on Nicholas Georgescu-Roegen's seminal work (1971) and the authors representing the paradigm he critiqued. By the end of the 20th century, divergent academic debates and global policy initiatives led to the emergence of two distinct fields examining the interaction between economic and ecological processes: Environmental Economics and Ecological Economics. These schools represent opposing poles—while Environmental Economics advocates for long-term sustainable growth through internalization of environmental costs and substitution of scarce resources, Ecological Economics emphasizes the biophysical limits to growth and calls for a fundamental rethinking of economics based on bioeconomic principles.

In light of this impasse and the urgency of the climate crisis, this thesis proposes a conceptual and innovative model that integrates qualitative growth strategies within the biophysical boundaries of ecosystems. The goal is to reconcile the conflicting relationship between economic expansion and environmental preservation through a negentropic lens.

**Keywords:** Amazon, Sustainability, Entropy, Negentropy, Bioeconomy.

## LISTA DE SIGLAS

CEE – Comunidade Econômica Europeia

CMMAD – Comissão Mundial sobre Meio Ambiente

CNUMAD – Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento

DIT – Divisão Internacional do Trabalho

GEE – Gases de Efeito Estufa

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

MIT – Massachusetts Institute of Technology

NAFTA – North American Free Trade Agreement

ODS – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organizações das Nações Unidas

OPEP – Organização dos Países Exportadores de Petróleo

OTAN – Organização do Tratado do Atlântico Norte

PIB – Produto Interno Bruto

PNB – Produto Nacional Bruto

PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

PMQG – Paradigma Mecânico Químico Genético

UNEP – Un Environment Programme

UNFCCC – Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima

WRI – World Resources Institute

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de Fluxo Circular.....	34
Figura 2. Os 10 maiores emissores de dióxido de carbono.....	71
Figura 3. Correlação entre escala da produção e degradação ambiental.....	75
Figura 4. Curva de Kuznets Ambiental .....	77
Figura 5. O Meio Ambiente como apêndice do sistema econômico.....	100
Figura 6. Sistema Econômico e Meio Ambiente.....	112
Figura 7. Diagrama de Daly.....	116
Figura 8. Modelo Biofísico do Sistema Econômico.....	138
Figura 9. Ecorregiões Terrestres do Mundo.....	164
Figura 10. Diversidade vertical da floresta tropical úmida .....	167
Figura 11. Ciclo de Nutrientes nas Florestas Tropicais Úmidas.....	168

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Classificação das principais correntes de pensamento da Economia do Meio Ambiente .....	99
Quadro 2. Análise comparativa: modelo Fundo-fluxo e a função de produção..	143
Quadro 3. Princípios bioeconômicos de Georgescu-Roegen.....	150
Quadro 4. Tipos de bioeconomia de acordo com Vivien et al. (2019) .....	176
Quadro 5. Modelo Conceitual Neguentrópico – Proposta Sistemática.....	191

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Diferenças de enfoque entre a Economia Ecológica e Economia Ambiental Neoclássica.....	124
Tabela 2. Principais características dos sistemas dissipativos.....	161

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
<b>2. A ECONOMIA E A CRISE AMBIENTAL.....</b>	<b>30</b>
2.1 O PARADIGMA DOMINANTE .....	33
2.2 UM BREVE RETROSPECTO DO PENSAMENTO ECONÔMICO SOBRE O CRESCIMENTO .....	39
2.2.1 A Escola Marginalista e os conceitos de Linearidade e Reversibilidade .....	46
2.2.2 Solow e o Modelo Neoclássico de Crescimento Econômico no Longo Prazo..	50
2.2.3 Stiglitz e sua análise sobre a Economia dos Recursos Naturais.....	55
2.3 EVENTOS QUE LEVARAM À INSERÇÃO DA DIMENSÃO AMBIENTAL À ANÁLISE ECONÔMICA.....	56
2.3.1 A Contrarresposta de Solow e Stiglitz sobre o Relatório do Clube de Roma....	64
2.4 CRESCIMENTO, ESCALA E DEGRADAÇÃO AMBIENTAL .....	65
2.5 CURVA AMBIENTAL DE KUZNETS: ORIGEM, DEFINIÇÃO E CRÍTICAS .....	76
2.6 POLÍTICA DAS DESIGUALDADES COMBINADAS: DIVISÃO INTERNACIONAL DO TRABALHO E A TROCA ECOLOGICAMENTE DESIGUAL .....	82
<b>3. A ECONOMIA DO MEIO AMBIENTE COMO RESPOSTA À CRISE AMBIENTAL .....</b>	<b>89</b>
3.1 O CONCEITO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL COMO MOLDURA PARA A ECONOMIA DO MEIO AMBIENTE .....	90
3.2 ECONOMIA DO MEIO AMBIENTE: ECONOMIA AMBIENTAL NEOCLÁSSICA E ECONOMIA ECOLÓGICA.....	96
3.2.1 A perspectiva ambiental integrada à Ciência Econômica.....	96
3.2.2 As hipóteses ambientais da Economia do Meio Ambiente .....	97
3.3 ENFOQUES TEÓRICOS E METODOLÓGICOS NAS VISÕES DA ECONOMIA AMBIENTAL NEOCLÁSSICA E DA ECONOMIA ECOLÓGICA.....	100
3.3.1 Economia Ambiental Neoclássica .....	100

3.3.1.1 Valoração Econômica da Natureza .....	104
3.3.2 A Economia Ecológica.....	108
3.3.2.1 Herman Daly e a Economia Estacionária .....	113
3.3.2.2 Joan Martinez-Alier e os Movimentos de justiça ambiental como inovações sociais .....	119
3.4 ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE AS DUAS ABORDAGENS DA ECONOMIA DO MEIO AMBIENTE .....	121
<b>4. O PENSAMENTO BIOECONÔMICO DE NICHOLAS GEORGESCU-ROEGEN .....</b>	<b>125</b>
4.1 A FORMAÇÃO DE GEORGESCU-ROEGEN.....	126
4.2 O PAPEL DA TERMODINÂMICA NA ECONOMIA .....	129
4.2.1 As duas primeiras Leis da Termodinâmica .....	130
4.3 TERMODINÂMICA <i>VERSUS</i> MECÂNICA.....	134
4.4 FLUXO ECONÔMICO .....	137
4.4.1 Modelo Fundo-Fluxo.....	141
4.4.2 Principais críticas à Economia Neoclássica .....	143
4.4.2.1 O Contraponto à Teoria de Solow e Stiglitz. ....	144
4.5 A BIOECONOMIA DE GEORGESCU-ROEGEN .....	146
<b>5. ENTROPIA, EVOLUÇÃO E NEGUENTROPIA: A ESTABILIDADE DO ECOSISTEMA GLOBAL .....</b>	<b>1544</b>
5.1 A APARENTE CONTRADIÇÃO .....	155
5.1.1 Evolução e Aumento da Complexidade.....	157
5.2 AS ESTRUTURAS DISSIPATIVAS DE PRIGOGINE.....	159
5.3 COMPLEXIDADE E ORDEM: A NEGUENTROPIA COMO MOTOR DOS ECOSISTEMAS .....	162
5.3.1 Neguentropia em Florestas Tropicais Úmidas.....	163
5.3.1.1 A Amazônia como Prioridade Global de Conservação.....	165

<b>6. ABORDAGENS RECENTES.....</b>	<b>170</b>
6.1 A BIOECONOMIA CONTEMPORÂNEA.....	171
6.1.1 Os tipos de Bioeconomia.....	172
6.2 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS .....	178
6.2.1 Dilemas da transição .....	178
6.3 A ECONOMIA DA SOBREVIVÊNCIA E VERTENTES RECENTES .....	182
6.4 MODELO ECONÔMICO NEGUENTRÓPICO: INTEGRAÇÃO ENTRE CRESCIMENTO E CONSERVAÇÃO.....	187
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>196</b>
REFERÊNCIAS.....	205

## 1. INTRODUÇÃO

O que temos de sublinhar em primeiro lugar é que esse processo [o econômico] é um processo parcial e que, a exemplo de todo processo parcial, está circunscrito por uma fronteira através da qual matéria e energia são intercambiadas com o resto de todo o universo material [...]. A resposta à questão sobre o que faz esse processo material é simples: ele não produz nem consome matéria-energia; limita-se a absorver matéria-energia para devolvê-la continuamente. É o que nos ensina a física pura. (Georgescu-Roegen, 2012, p. 57).

No debate global, muito se tem discutido sobre a urgente necessidade de conservar a integridade dos ecossistemas naturais para mitigar duas crises planetárias: as mudanças climáticas e a perda de biodiversidade. As evidências desses dois fenômenos globais são inequívocas, assim como também a influência humana nesse processo. Henrique Leff (2021) aponta que “a crise ecológica atual, pela primeira vez não é uma mudança natural; é transformação da natureza induzida pela concepção metafísica, filosófica, ética, científica e tecnológica do mundo”. É resultado de uma visão de mundo que apartou o ser humano da natureza e que explora intensamente os recursos naturais, para viabilizar o crescimento contínuo da produção e do consumo, sem ter em conta os limites biofísicos do ambiente e o devir que se manifesta de diferentes formas e ritmos.

Para as ciências econômicas, tais problemas ambientais representam grandes dilemas, visto que seu instrumental analítico-econômico tradicional foi fundamentado na produção de riquezas, no papel do crescimento econômico contínuo, na expansão das economias ao longo do tempo e na acumulação de capitais. Em vista disso, a teoria econômica, até recentemente, tem situado em um plano muito secundário as relações entre o crescimento do sistema econômico e seus impactos nos sistemas ecológicos e, por conseguinte, precisa ser capacitada para proporcionar respostas substanciais, capazes de indicar e contribuir para uma relação mais harmoniosa entre economia e natureza.

É indubitável que os desafios ambientais contemporâneos resultaram em alterações globais nos sistemas socioambientais complexos, impactando as condições de sustentabilidade do planeta. Para esse enfrentamento, torna-se premente questionar a lógica produtivista dos mercados; considerar os limites dos ecossistemas, os direitos e deveres dos cidadãos, as formas de participação e o controle social na tomada de decisões sobre o ambiente natural. A esse respeito, Francisco de Assis Costa (2012) aponta que:

A problemática ambiental gerou mudanças globais em sistemas socioambientais complexos que afetam as condições de sustentabilidade do planeta, propondo a necessidade de internalizar as bases ecológicas e os princípios jurídicos e sociais para a gestão democrática dos recursos naturais. Estes processos estão intimamente vinculados ao conhecimento das relações sociedade-natureza: não só estão associados a novos valores, mas a princípios epistemológicos e estratégias conceituais que orientam a construção de uma racionalidade produtiva sobre bases de sustentabilidade ecológica e de equidade social.

Como princípio basilar, é importante admitir o fato de que a atividade econômica, a qualidade de vida e a coesão das diversas sociedades humanas são inexoravelmente dependentes dos bens e serviços fornecidos pela natureza. Por essa razão, é primordial que a ciência econômica considere em seu arcabouço teórico as interconexões existentes entre o sistema econômico e o ambiente em que está inserido. Isso inclui a compreensão de como os processos produtivos afetam os sistemas naturais, e vice-versa, e como esses impactos ocorrem de forma desigual nos diferentes países. Desta forma, a crise climática e a degradação ambiental geram impactos que afetam o planeta como um todo, porém de maneira desigual (Martinez-Alier, 1998).

Isso ocorre por várias razões, dentre as quais vale ressaltar as desigualdades econômicas, onde os países mais ricos possuem mais recursos, tecnologias, infraestrutura ou políticas eficazes para mitigar os efeitos das mudanças climáticas, enquanto os países mais pobres carecem de todos estes fatores mencionados. Além disso, os países que contribuem mais para as mudanças climáticas, geralmente através da emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), podem enfrentar pressões políticas e econômicas adicionais. Esses aspectos, por conseguinte, cooperam para a disparidade no impacto da crise ambiental entre países ricos e pobres.

Blaikie e Brookfield (1987) apontam que, para compreender a miséria do mundo atual, as desigualdades distributivas e a crescente degradação ambiental, há que distinguir entre a pressão da população sobre os recursos naturais e a pressão da produção sobre os recursos naturais. Sobre este aspecto, Stephen Bunker (1985) em sua análise sobre ecologia política da Amazônia brasileira, agregou um elo sociológico à corrente que integra: exploração exterior, pobreza local e degradação ambiental. E argumenta que a ausência de uma estrutura de poder local, em consequência da própria exploração externa, agrava a degradação ecológica (Bunker apud Alier, 1998). Ainda sobre a Amazônia, no que se refere à sustentabilidade ambiental, Fernandes et al. (2022) preconizam ser premente a elaboração de um modelo sistêmico que traga o fortalecimento de práticas produtivas sustentáveis e inclusivas que há séculos estão em funcionamento nesta região, bem como em diferentes partes do mundo, mas que continuam invisíveis segundo os “óculos” das teorias e modelos econômicos hegemônicos.

Por conseguinte, é importante lembrar que a crise ambiental é um problema global que requer uma solução global. Todos os países precisam agir para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e adaptar-se a um mundo em mudança. Para essas demandas, persistem as discussões acerca de premissas do processo de desenvolvimento econômico em bases sustentáveis, mas é perceptível que suas opções, escolhas e caminhos dependem de diversos fatores, como a visão de mundo, os valores dos diferentes contextos, os estilos de desenvolvimento estabelecidos, os objetivos e os interesses dos atores envolvidos.

Apesar de diferentes premências, há um ponto consensual em identificar que os sistemas ecológicos vêm sendo constantemente impactados pelas atividades antrópicas, havendo a necessidade de incorporar essa pauta, cada vez mais, nas agendas governamentais, para que haja formulações e implementações de políticas públicas efetivas. Cabe ainda frisar que, tais impactos ocorridos nos sistemas ecológicos podem ter consequências humanas catastróficas de longo alcance, afetando ao mesmo tempo a saúde dos ecossistemas e a sustentabilidade dos recursos naturais a um ponto de não retorno.

Ocorre que, a despeito do retórico ponto consensual predominante nas grandes discussões globais sobre sustentabilidade, persiste no mercado e no debate sobre políticas públicas a práxis da busca pelos ganhos de escala, prevalecendo a ininterrupta busca pelo aumento dos indicadores de produção econômica e do consumo, para garantir a acumulação e expansão do capital a todo custo. Esta prática é corroborada pela forma com que as sociedades organizam os seus dados econômicos e editam suas políticas, com visão limitada, sem considerar ou prever corretamente privações futuras. Não valorizam adequadamente os impactos futuros das ações no presente, uma vez que, os “mercados são míopes, descontam o futuro, não enxergam as escassezes futuras incertas de fontes ou sumidouros” (Martinez-Alier, 2015).

Nesta direção, propaga-se a ideia de que a crise ambiental pode ser resolvida através de programas adequados de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) de novas tecnologias – onde há a crença de que sempre existirá uma solução técnica para tudo – incumbindo à capacidade humana de produzir novas soluções em termos de novos produtos, insumos e fontes energéticas a cada etapa, em resposta a cada demanda e limite que surge, sem se aprofundar nas discussões sobre os limites biofísicos do

Planeta. Nesta lógica, muitas soluções propostas acabam trilhando pelo mesmo caminho paradigmático que há séculos interpenetrou o processo civilizatório em torno da chamada “civilização industrial” (Furtado, 1974), como soluções aprisionadas pelo pensamento hegemônico herdado, que constitui parte do problema a ser analisado nesta pesquisa, posto que “é estudando as teorias convencionais que nos capacitamos para superá-las” (Furtado, 1957).

Assim sendo, o grande desafio relacionado às questões da sustentabilidade é buscar soluções que visem dirimir tensões e conflitos existentes entre as lógicas do desenvolvimento econômico, da justiça social e da conservação da natureza. Essas reivindicações impostas pela atualidade, tornam imprescindíveis os estudos interdisciplinares e transdisciplinares que reconheçam a interdependência da economia e dos ecossistemas naturais ao longo do espaço e do tempo (Nawaz; Lahiani; Roubaud, 2019).

Para isso, os questionamentos e sobretudo, os estudos científicos que abordem a relação sociedade-natureza precisam persistir, a fim de luzir caminhos inovadores para o estabelecimento de novas lógicas de produção e consumo onde haja atividades produtivas sustentáveis, agroecológicas e a validação de tecnologias que apontem para a vida (Morrar; Arman; Mousa, 2017). Em vista disso, os principais valores nas novas lógicas de produção devem ser compatíveis com o desenvolvimento qualitativo, com a manutenção da floresta em pé e rios fluindo, com forte componente comunitário que valorize o conhecimento e os modos de vida das populações tradicionais (Costa et al., 2022).

Neste cenário, é pertinente asseverar que as inquições apontadas demandam uma profunda reflexão acerca das interações entre o sistema econômico e os ecossistemas naturais. Tais concepções são identificadas pelo economista e matemático romeno Nicholas Georgescu-Roegen, em seu trabalho *The Entropy Law and the Economic Process*, publicado em 1971, que será focado com destaque nesta pesquisa, como suporte teórico, visto que este autor estabeleceu o início das pesquisas no campo atualmente conhecido como Economia Ecológica. Nesse contexto, nas últimas décadas do século XX, muitos debates e opiniões divergentes emergiram não somente na esfera acadêmica e científica, como também no âmbito de formulações de políticas multilaterais globais. Isso resultou na elaboração de dois novos e distintos campos de estudo que investigam a interação entre o processo

econômico e os processos ecológicos, que são a Economia Ambiental e a Economia Ecológica.

A corrente da Economia Ambiental é um complemento e continuidade dos estudos convencionais sobre economia, por isso é referida como Economia Ambiental Neoclássica, que desenvolve informações teóricas e modelos práticos a partir da possibilidade de escassez. Esta corrente, propõe minimizar os impactos ambientais do crescimento econômico, maximizando o valor dos recursos através da análise detalhada e mensuração dos efeitos da exploração ambiental e seus custos de oportunidade. Nesta perspectiva, a ênfase desta abordagem está situada na formulação de mecanismos econômicos que possibilitem a internalização das externalidades ambientais, bem como da valoração econômica dos recursos e serviços ecossistêmicos. Ressalta-se que, esta escola de pensamento não conjectura restrições rígidas ou limites externos ao processo de crescimento econômico. Estando mesmo, em grande medida, condicionada à possibilidade de substituição dos fatores produtivos através de avanços tecnológicos.

Inicialmente, admite-se que a Economia Ambiental Neoclássica não capta a complexidade e a dinâmica dos sistemas ecológicos e suas interações com a atividade produtiva. Em vista disso, a hipótese sustentada para esta análise é a de que a não-linearidade e a irreversibilidade decorrentes de impactos da atividade econômica sobre o ambiente não tem lugar nos modelos da Economia Ambiental Neoclássica. Esse pressuposto erigido oferece um ângulo intrigante para este estudo — bem como para a construção de pesquisas posteriores — visto que pode ser respaldado pelo fato de que a maioria dos modelos da economia ambiental assume que os sistemas ecológicos são previsíveis, estáveis e substituíveis por capital humano ou tecnológico. Tais modelos também tendem a ignorar as incertezas, as assimetrias de informação e os conflitos de interesses que envolvem as questões ambientais.

Em contrapartida, a corrente da Economia Ecológica — inspirada pelas premissas de Georgescu-Roegen — apresenta suas bases argumentativas no pensamento complexo e nas teorias físicas, consolidando reflexões coerentes, com ênfase na conexão intrínseca entre sistema econômico e sistema ecológico, onde o sistema econômico é uma parte integrante do sistema biogeofísico global. Isto significa dizer que ele (o sistema econômico) opera dentro de limites e restrições

impostas pela natureza. Ao reconhecer esses limites, a Economia Ecológica busca integrar analiticamente os componentes do sistema econômico com os componentes do sistema ecológico, adotando uma abordagem transdisciplinar e holística para compreender como as atividades econômicas, que buscam o crescimento ininterrupto, geram impactos em todo seu contexto.

Neste sentido, as duas correntes podem ser vistas como polos antagônicos de um mesmo processo, em que: de um lado, se afirma o potencial de crescimento sustentável de longo prazo do sistema econômico, desde que se avance nos processos de internalização dos custos ambientais e substituição dos fatores escassos por fatores e recursos disponíveis; de outro, afirma-se os limites naturais ou biofísicos do crescimento econômico e a necessidade de enquadramento do sistema econômico no sentido da valorização de seus aspectos qualitativos. Diante do impasse, pergunta-se: seria possível considerar a existência atual de um modelo conceitual inovador, capaz de conciliar possibilidades de crescimento com critérios qualitativos que enquadrem as estratégias econômicas dentro dos limites éticos e biofísicos impostos pelos ecossistemas?

Ante o exposto, fica evidente que o objeto deste estudo é a relação entre o crescimento econômico e seus impactos ambientais, bem como os limites impostos pelo sistema ecológico. Nesse intuito, inicialmente recorre-se à compreensão das principais teorias neoclássicas sobre o crescimento econômico, dos impactos ambientais decorrentes da grande escala de produção e, portanto, do entendimento das ressonâncias no meio ambiente, resultantes do crescimento econômico ininterrupto no modo de produção vigente. Num segundo momento, analisa-se as concepções da Economia Ecológica bem como de suas variantes mais recentes, como abordagens que buscam equilibrar o desenvolvimento econômico com a proteção ambiental, considerando os limites biológicos, químicos e físicos da natureza, tendo em mente a necessidade de uma perspectiva teórica inovadora que conceba a atividade econômica em padrões qualitativamente diferentes dos atuais.

Como próprio das pesquisas interdisciplinares, esta tese debruça-se na interação e integração de ciências diversas, como nos conhecimentos da economia, da ecologia e da física para situar o ambiente natural enquanto sistema maior e originário, que afeta e é afetado pela economia, sendo esta última considerada, não

como um sistema isolado, mas como um sistema aberto, dependente dos recursos e serviços fornecidos pela natureza, que é finita e regida pelas leis da termodinâmica.

Seguindo por essa linha de raciocínio, este estudo considera, como problema de pesquisa, a seguinte indagação: de que forma o crescimento econômico, com seus impactos ambientais decorrentes, vêm sendo tratado pelas teorias econômicas ao longo do tempo; e quais abordagens teóricas poderiam ser identificadas, no estado atual da literatura, no sentido da defesa de uma via teórica inovadora — com possibilidades de soluções nequentrópicas — capaz de dirimir o impasse da relação entre crescimento vs conservação ambiental?

Neste sentido, o presente estudo tem como objetivo geral compreender, no contexto do sistema econômico, as formas pelas quais o crescimento contínuo da produção impacta negativamente o ambiente natural, tanto em termos de extração de recursos materiais e energéticos, quanto da deposição no ambiente de matéria degradada e de energia dissipada, para então propor uma via teórica inovadora — com possibilidades de soluções nequentrópicas — capaz de indicar caminhos que compatibilize opções de crescimento qualitativo com a conservação ambiental.

Isso porque a prática dominante, com sua escala de produção, gera uma série de problemas ambientais que ameaçam a sustentabilidade da vida na Terra. Esses problemas incluem a deterioração dos ecossistemas naturais, a perda da biodiversidade, a poluição da água, do ar e do solo e mudanças no clima. Por isso, este estudo avança sobre o cenário da emergência climática e dos esforços globais em buscar a conciliação para a questão que envolve a atividade econômica, o crescimento e a conservação dos ecossistemas. Assim sendo, com os objetivos específicos apresentados a seguir, espera-se poder contribuir para a ampliação dos debates e estudos referentes a essa complexa temática, aos seus desafios e limites associados:

- 1) Identificar os principais eventos que levaram à inserção da dimensão ambiental à análise econômica;
- 2) Apresentar os aspectos teóricos e metodológicos das duas principais correntes da teoria econômica que tratam das questões ambientais, sendo estas a Economia Ambiental Neoclássica e a Economia Ecológica;

- 3) Analisar as principais premissas observadas no campo da Economia Ecológica para as demandas ambientais, onde vários autores dessa corrente de pensamento serão apresentados, com maior ênfase, para o pensamento econômico-ecológico de Nicholas Georgescu-Roegen;
- 4) Propor, no estado atual da literatura, um modelo conceitual distinto e inovador, capaz de dirimir o impasse da relação entre crescimento econômico vs conservação ambiental.

Para o desenvolvimento deste estudo, foi realizada pesquisa bibliográfica no campo interdisciplinar e, como a própria metodologia sugere, as pesquisas interdisciplinares exigem uma abordagem flexível e crítica, visto que buscam superar as fronteiras entre as disciplinas tradicionais, permitindo uma maior troca de conhecimentos, métodos e perspectivas. A interdisciplinaridade propicia uma compreensão mais completa e sistêmica acerca do objeto de estudo possibilitando soluções mais eficazes. Desta forma, o levantamento da literatura ocorreu em vários artigos científicos e livros na área da Economia Aplicada, Economia do Meio Ambiente, Física, Ecologia e Ecologia Política, com enfoque para o trabalho basilar de Nicholas Georgescu-Roegen (1971), na apreensão de sua crítica ao paradigma econômico dominante e na formação do pensamento da Economia Ecológica.

Dado o exposto, esta pesquisa mostra-se relevante, haja vista que o crescimento econômico, nas diversas economias do mundo, é visto como objetivo supremo, que sucede através da intensiva produção “de coisas” e do incentivo ao consumismo, onde a *Growthmania*<sup>1</sup> ou mania de crescimento é tomada pelo anseio em elevar o nível de bem-estar da população, com maior nível de empregos, maiores rendas e maiores disponibilidades de bens e serviços. Em contrapartida, são numerosos e indubitáveis os impactos negativos causados pela atividade produtiva

---

<sup>1</sup> O termo “Growthmania” refere-se a uma mentalidade excessivamente focada no crescimento econômico contínuo, ignorando os limites ecológicos e sociais. Ou seja, refere-se à ideia de que o crescimento econômico é o objetivo primordial da sociedade, mesmo que isso implique em ultrapassar os limites biofísicos do planeta ou que engendre maiores desigualdades sociais. Ver: DALY, Herman E. Steady-state economics versus growthmania: a critique of the orthodox conceptions of growth, wants, scarcity, and efficiency. Policy Science, p. 149-167, 1974.

nos ecossistemas naturais, principalmente em países periféricos, cuja economia é predominantemente primário-exportadora. Esses danos ambientais afetam não somente a qualidade de vida das pessoas, como também a própria sustentabilidade da produção, que é dependente dos recursos e dos serviços ecossistêmicos para operar.

Por essa perspectiva e entendendo o quão recente é a análise socioeconômica através de uma lente ecológica, este trabalho traz para o foco as discussões sobre a questão da “perfeita substitutibilidade” dos fatores de produção da visão neoclássica, os limites ecológicos do crescimento econômico, os riscos da degradação ambiental para a sobrevivência da humanidade, a capacidade de resiliência da natureza e sobretudo, a premente necessidade de uma mudança de paradigma na relação entre a economia e o ambiente a que está inserida.

Como já referido, para a eficaz compreensão das relações entre o sistema econômico e os sistemas ecológicos torna-se vital adotar uma abordagem transdisciplinar, que integre diversos saberes envolvendo as ciências sociais e as ciências naturais. Neste sentido, a Economia Ecológica se apresenta como uma corrente de pensamento que preconiza a análise sistêmica das relações entre a economia e a natureza, com princípios epistemológicos e estratégias conceituais que levam em conta os aspectos econômicos, ecológicos, biofísicos, sociais, culturais e éticos envolvidos e que, portanto, pode orientar a construção de uma racionalidade produtiva fundamentada na sustentabilidade ecológica e na equidade social.

Quanto a sua estrutura, este estudo é composto por 7 capítulos, onde, no primeiro capítulo, em que o tema é contextualizado e introduzido, são também apresentados os componentes do plano desta pesquisa, como o objeto de estudo, o problema, a hipótese, os objetivos (geral e específicos), a metodologia empregada e a justificativa. A apresentação deste capítulo, nestes moldes, possui especial relevância, na medida em que ao oferecer uma estrutura clara e lógica para a análise desta tese, permite também que outros pesquisadores compreendam e avaliem o presente estudo, prosseguindo com novas pesquisas, contribuindo para a construção e difusão do conhecimento científico.

O segundo capítulo busca analisar as discussões relacionadas à crise ecológica contemporânea, como consequência do paradigma vigente e, portanto, como resultado das repercussões das atividades humanas sobre o meio ambiente.

Neste, é apresentado o diagrama de fluxo circular — amplamente aplicado pela teoria econômica neoclássica — que é visto pela economia ecológica, como uma simplificação errônea da realidade econômica, sendo criticado por ignorar os limites físicos e ambientais do planeta, ao tratar a economia como um sistema fechado e autorregulado, onde os recursos naturais são vistos como inesgotáveis e os resíduos como irrelevantes em termos de impacto.

Para haver a compreensão mais ampla da crise ecológica e do impacto das práticas econômicas, com seu crescimento incessante, tornou-se essencial analisar o contexto evolutivo da ciência econômica entre os séculos XVIII e XX. Isso inclui o foco na transformação dessa problemática ao longo do desenvolvimento da ciência econômica e de suas implicações históricas, buscando evidenciar o percurso realizado pela teoria econômica para reconhecer o papel da natureza nos processos produtivos. Neste seguimento, é analisado os eventos que levaram à inserção da dimensão ambiental na análise econômica para aprofundar o entendimento de como as práticas econômicas começaram a ter que considerar os limites impostos pelo meio ambiente. Outro ponto relevante abordado neste capítulo diz respeito à contrarresposta de Robert Solow e Joseph Stiglitz ao Relatório do Clube de Roma, especialmente ao estudo "*The Limits to Growth*" de 1972, visto que estes autores defendiam que o avanço tecnológico e o mercado seriam capazes de encontrar soluções para os desafios ambientais e econômicos, rejeitando a ideia de que o crescimento econômico deveria ser desacelerado.

O terceiro capítulo trata da Economia do Meio Ambiente como resposta à crise ambiental, que é lançada como campo da ciência econômica que trata das questões ambientais, buscando formas de solucionar ou mitigar os problemas causados pelo processo econômico sobre os sistemas naturais. Nessa perspectiva, são apresentadas as hipóteses ambientais (tênue e aprofundada) de suas principais vertentes teóricas, destacando-se os enfoques teóricos e metodológicos nas visões da Economia Ambiental Neoclássica e da Economia Ecológica. Desta forma, este capítulo busca realçar as diferenças significativas existentes entre essas duas correntes de pensamento no que concerne as suas hipóteses, uma vez que, cada hipótese está em conformidade com suposições e premissas sobre como o meio ambiente funciona e como ele afeta e é afetado pela atividade econômica,

correspondendo as duas diferentes maneiras de abordar a relação entre economia e natureza.

O quarto capítulo apresenta o pensamento bioeconômico de Nicholas Georgescu-Roegen, onde anuncia sua visão inovadora, que integra a Lei da entropia à análise econômica, argumentando que os recursos naturais são finitos e que o processo econômico inexoravelmente leva à degradação irreversível desses recursos, desafiando a visão hegemônica de crescimento econômico ilimitado. Em vista disso, são apresentadas as principais críticas que Georgescu lança à Teoria Neoclássica, em especial, o contraponto às teorias de Robert Solow e Joseph Stiglitz, colocando sua reflexão e parecer à substitutibilidade dos fatores produtivos na função de produção do crescimento neoclássico.

O quinto capítulo, explora como os ecossistemas, apesar da tendência universal ao aumento da desordem, conseguem manter a complexidade e até mesmo evoluir para estados mais organizados. Argumenta que, a aparente contradição entre a Teoria da Evolução de Darwin (que conduz a observação de que os sistemas biológicos e os ecossistemas evoluem para formas mais complexas e organizadas ao longo do tempo), e a Lei da Termodinâmica (que postula o aumento inevitável da entropia em sistemas fechados), é resolvida pelo conceito de Neguentropia.

Em vista disso, é apresentada a teoria das estruturas dissipativas, desenvolvida pelo físico Ilya Prigogine, que explica como sistemas abertos, que interagem com o ambiente por meio da troca de energia e matéria podem, de forma espontânea, formar e manter ordem e complexidade, dissipando entropia para o exterior. Cumpre salientar que os ecossistemas são exemplos emblemáticos dessas estruturas dissipativas e, neste raciocínio, é discutido como a neguentropia impulsiona a organização e a complexidade nos ecossistemas. A entrada constante de energia, notadamente a solar, permite que os ecossistemas realizem trabalho, construam e mantenham estruturas complexas. Assim sendo, ilustra o conceito de neguentropia em um ecossistema altamente complexo e produtivo como a floresta tropical úmida, onde a rica biodiversidade, as complexas interações tróficas e os ciclos biogeoquímicos altamente eficientes exemplificam como a energia solar é capturada e utilizada para criar e manter uma elevada ordem e complexidade, minimizando a entropia interna.

O sexto e último capítulo, antes das considerações finais, oferece uma análise sobre novas abordagens que buscam responder as demandas da crise ambiental

contemporânea, fundamentando-se nos postulados da Economia Ecológica. Neste, são tratados os tipos de Bioeconomia considerados na atualidade, também é abordada a urgência da transição para fontes de energia renovável como resposta aos desafios das mudanças climáticas, onde é discutida as implicações econômicas, sociais e ambientais dessa transição.

Apresenta também uma variante recente da Economia Ecológica, chamada por Charles C. Mueller de “economia da sobrevivência”, que, influenciada pelas ideias de Robert Ayres sobre a termodinâmica e o metabolismo econômico, bem como pelo trabalho do Instituto Beijer em economia ecológica, enfatiza os limites biofísicos do planeta e a necessidade de um desenvolvimento que respeite esses limites para a sobrevivência a longo prazo da humanidade. Explora também as evoluções e aplicações recentes dessa perspectiva, propondo, de forma, sistemática, um modelo conceitual nequentrópico que Integra fundamentos da ecologia, princípios da termodinâmica aplicados a sistemas abertos e perspectivas da economia da complexidade, constituindo uma base analítica e normativa voltada à promoção de práticas econômicas regenerativas, resilientes e comprometidas com a justiça ambiental e social.

Desta forma, este capítulo oferece uma análise das novas abordagens que buscam responder à crise ambiental atual, fundamentando-se na Economia Ecológica e em suas variantes, para propor caminhos que conciliem o desenvolvimento socioeconômico com a sustentabilidade ecológica, superando a visão de que crescimento e conservação são intrinsecamente incompatíveis.

Assim, ao analisar os fundamentos da Economia Ecológica e as propostas das suas vertentes atuais, este estudo reforça a urgência de uma mudança paradigmática que integre os limites ecológicos ao planejamento econômico. Superar a dicotomia entre crescimento e preservação implica reconhecer que o desenvolvimento genuíno, ancorado no conceito de equilíbrio dinâmico, está ligado a um processo evolutivo: a construção de modelos bioeconômicos sustentáveis, capazes de garantir bem-estar social sem comprometer os recursos naturais das gerações vindouras.

A large tree stands in a field of cracked, dry earth. The tree's left side is dead and skeletal, while its right side is lush and green. The background is a bright, hazy sky.

## **2. A ECONOMIA E A CRISE AMBIENTAL**

A capacidade de assimilação de resíduos do meio ambiente também é um recurso finito. Os materiais que são extraídos cedo ou tarde se tornam emissões, ou de resíduos de processo, ou de resíduos de consumo. Mas o meio ambiente não tolerará indefinidamente tais emissões. (Ayres, 1999, p.886).

A discussão sobre a crise ecológica atual se faz relevante porque envolve o entendimento das repercussões das atividades humanas sobre o ambiente natural e as consequências para a vida no planeta. Deste modo, é irrefutável afirmar que a crise ambiental se tornou uma das questões mais urgentes e complexas da contemporaneidade, e por isso, é fundamental a compreensão das causas e dos impactos desta crise para a formulação de estratégias de enfrentamento eficientes e duradouras. A conflitante relação sociedade/natureza e as questões ambientais dela decorrentes exigem uma reflexão interdisciplinar, crítica e responsável sobre o papel do ser humano na preservação do ambiente em que vive e que é dependente.

Henrique Leff (2007) aponta que a problemática ambiental, na qual convergem processos naturais e sociais de diferentes ordens, não pode ser compreendida em toda a sua complexidade nem resolvida de forma eficiente sem a confluência e integração de diversos campos do conhecimento. As trocas recíprocas com enriquecimento mútuo estabelecidas pelas pesquisas interdisciplinares são, notadamente, uma forma de promover a integração do conhecimento científico e a sua aplicação prática para resolver os desafios socioambientais contemporâneos e orientar as decisões que impactam o bem-estar coletivo. Neste sentido, a prática generalizada na busca incessante pelo crescimento econômico nos diversos países tornou urgente a necessidade de estudos multidisciplinares e integrados, para analisar como a elevada escala de produção impacta negativamente o ambiente natural, não somente considerando a extração de recursos materiais e energéticos, mas também o seu descarte no ambiente.

Neste sentido, é indubitável afirmar que a população humana e a produção material no planeta vêm se expandindo ao longo do tempo, causando pressões sobre a natureza. A urbanização, a industrialização, a agropecuária e a mineração são exemplos de atividades econômicas que geram diferentes tipos de efeitos duradouros e até mesmo irreversíveis, nas características físicas e biológicas dos elementos da natureza. A queima de combustíveis fósseis tais como carvão mineral, petróleo, gás natural e xisto betuminoso tem impactos significativos sobre o meio ambiente. Com efeito, a expansão demográfica, o aumento da produção material e o consumismo trouxeram riscos e alterações no sistema ambiental, devastando ecossistemas, poluindo o solo, o ar e as águas; promovendo destruição de habitats naturais,

ocasionando impactos negativos na biodiversidade e mudanças climáticas. Estes são alguns dos problemas resultantes desse processo.

A esse respeito, Henrique Leff (2021) defende que a qualidade de vida do ser humano não depende somente de ter suas necessidades básicas atendidas, mas também de viver em harmonia com seu entorno, com sua comunidade e, de forma mais ampla, com o ambiente natural, respeitando seus limites e potencialidades. Nas suas próprias palavras:

A qualidade de vida está necessariamente conectada com a qualidade do ambiente, e a satisfação das necessidades básicas, com a incorporação de um conjunto de normas ambientais para alcançar um desenvolvimento equilibrado e sustentado (a conservação do potencial produtivo dos ecossistemas, a prevenção frente a desastres naturais, a valorização e preservação da base de recursos naturais, sustentabilidade ecológica do habitat), mas também de formas inéditas de identidade, de cooperação, de solidariedade, de participação e de realização, bem como de satisfação de necessidades e aspirações através de novos processos de trabalho.

Essas novas formas de pensar, e de se conduzir devem orientar as atividades econômicas, sociais e culturais das pessoas, buscando reduzir os impactos negativos que a produção e o consumo exercem sobre o meio ambiente, e promover o bem-estar coletivo (Leff 2009). O autor ainda afirma que, na sociedade, as pessoas devem buscar novas formas de se relacionar consigo mesmas, com os outros e com a natureza, valorizando a diversidade, a democracia, a ética e a criatividade. Desta forma, propõe que os indivíduos satisfaçam suas necessidades e aspirações através de novos processos de trabalho, que sejam mais humanos, participativos e ambientalmente responsáveis. Ou seja, Leff aponta que a qualidade de vida está necessariamente conectada com a qualidade do meio ambiente, e que isso implica em uma mudança de paradigma na forma como as pessoas pensam e agem no mundo.

Deste modo, a crise ambiental atual é reflexo do padrão de produção e consumo que predomina no mundo e a redefinição deste padrão constitui o principal desafio que a crise ambiental impõe à humanidade. Também é imperioso que, para reduzir as emissões de GEE e limitar o aumento da temperatura global a 2°C, ou se

possível a 1,5°C, como previsto no Acordo de Paris<sup>2</sup>, haja uma transição efetiva para fontes de energias limpas, agricultura de baixo carbono e conservação florestal, para que seja possível a preservação da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos que sustentam a vida na terra.

Cavalcanti (2012), alude que, embora o crescimento econômico tenha melhorado as condições de vida de bilhões de pessoas no mundo, seus frutos têm sido crescentemente distribuídos de forma desproporcional e injusta. O mecanismo "throughput growth" (extrair→transformar→consumir→ descartar) é apontado como o principal fomentador do crescimento econômico, estimulado pelo consumo, e esse processo foi massificado com a globalização, que estendeu o crescimento a todas as economias dos diversos continentes. Não obstante, o ritmo de desgaste dos ecossistemas naturais que sustentam a escala produtiva, juntamente com o agravamento dos riscos ambientais, limitam a possibilidade de extensão dos benefícios do "desenvolvimento" à crescente população mundial.

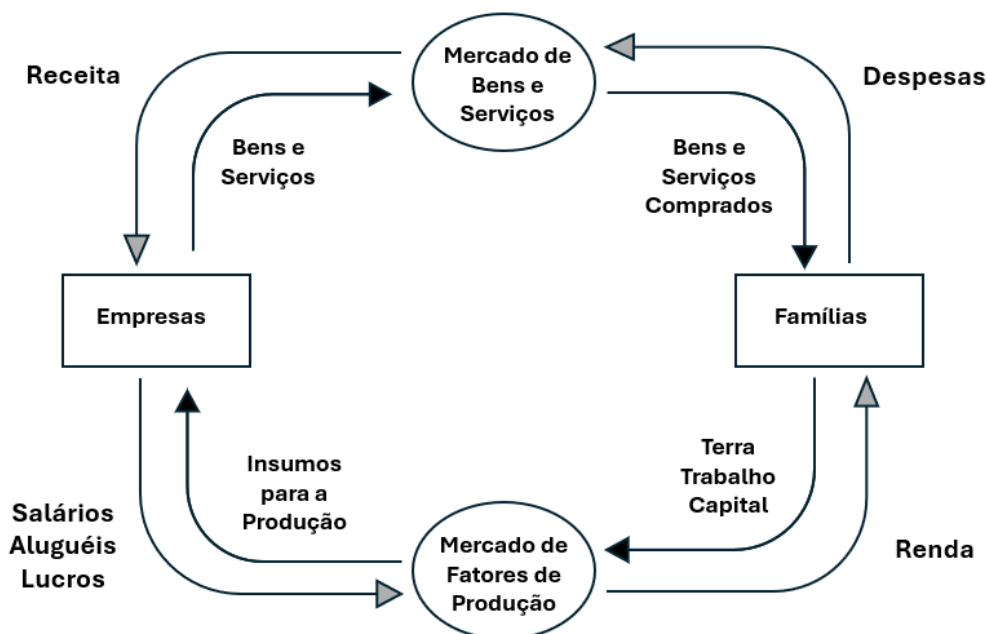
## 2.1 O Paradigma Dominante

Até a atualidade, é no livro-texto que o estudante universitário forma uma visão do que é a economia, de quais são seus problemas típicos e de como representá-la visualmente (Cechin; Veiga, 2010, p. 440). Desse modo, o diagrama de fluxo circular da Figura 1 constitui a representação da visão pré-analítica que se tem a respeito do funcionamento do sistema econômico.

---

<sup>2</sup> O Acordo de Paris é um tratado internacional que visa reduzir as emissões de gases de efeito estufa e limitar o aumento da temperatura global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, até o final do século 21, reconhecendo que isso reduziria substancialmente os impactos das mudanças climáticas. Esse é um objetivo ambicioso e desafiador, pois a temperatura média global já aumentou cerca de 1,2°C desde o período pré-industrial e há uma probabilidade de 20% de que o aumento da temperatura exceda temporariamente os 1,5°C já a partir de 2024. Ver: United Nations. <https://www.un.org/>.

**Figura 1.** Diagrama de fluxo circular



**Fonte:** Gregory N.Mankiw. Introdução à Economia: princípios de Micro e Macroeconomia, São Paulo: Elsevier, 2001, p.23.

Neste diagrama, usualmente encontrado nos livros de introdução à economia, é postulada a simplificação de uma visão do sistema econômico como sendo um sistema circular e fechado. Circular no sentido de mostrar como o dinheiro e os bens circulam na economia e fechado pois postula que no sistema econômico não entra nada de novo nem sai nada, propondo alcançar, com a previsibilidade e o uso do princípio “*ceteris paribus*”<sup>3</sup> o equilíbrio estável, propagando uma visão irrealista e restrita do processo econômico.

Desta forma, a ciência econômica tradicional perpetua um modelo visual e simplificado do sistema econômico que demonstra como o dinheiro circula pelos

---

<sup>3</sup> A expressão “*Ceteris paribus*” vem do latim e significa “todo o resto constante”. Na ciência econômica tradicional, ela é utilizada para explicar modelos e teorias, considerando como inalterados todos outros fatores que possam influenciar.

mercados, alheio aos custos sociais e ambientais da produção e do consumo, que não são contabilizados pelo mercado, nem refletidos nos preços dos bens e serviços.

Nesta lógica, o diagrama do fluxo circular representa a visão de sistema econômico que é transmitida para gerações de estudantes desde o *Tableau économique* de Quesnay até o presente, com alguns arranjos. Vale salientar que, exemplos compartilhados no decorrer do tempo refletem a concepção de paradigma atribuída por Thomas S. Kuhn (2012), onde aponta que os paradigmas moldam a maneira como a ciência é conduzida e como os cientistas abordam os problemas.

Retomando à análise do diagrama do fluxo circular (Figura 1), sua representação é a clara evidência do reducionismo e do mecanicismo predominantes na economia convencional, visto que o fluxo circular funciona apenas teoricamente, dentro de uma visão hermética, onde nada entra e nada sai, como uma máquina de moto-perpétuo, que não computa aquilo que entra e nem aquilo que sai, ou seja, não conta com os recursos naturais que alimentam o sistema produtivo nem os resíduos gerados por ele. Portanto, o diagrama do fluxo circular demonstra uma visão errônea do processo econômico. Sobre isso, Andrei Cechin (2010, p.19) argumenta que:

É falsa a ideia de considerar a economia como um sistema isolado no qual nada entra e nada sai, uma vez que nessa concepção nada existe no exterior dele mesmo. A visão que comumente se tem da economia é a de que ela é uma totalidade. O diagrama é estritamente uma representação da circulação do dinheiro na economia e dos bens em sentido reverso, sempre dentro dele mesmo, sem absorver materiais e sem ejetar resíduos. Se a economia não gera resíduos e não requer novas entradas de matéria e energia, então se trata de uma máquina de moto-perpétuo, ou seja, uma máquina capaz de produzir trabalho ininterruptamente, consumindo a mesma energia e valendo-se dos mesmos materiais. Tal máquina seria um reciclador perfeito. Todavia, isso contradiz uma das principais leis da física: a segunda lei da termodinâmica, a lei da entropia.

Martinez- Alier (1998) endossa que a economia industrial não é e não pode ser circular, mas sim entrópica, pois busca continuamente novas matérias-primas nas fronteiras de extração, da Amazônia ao Ártico. O autor aponta ainda para a tática econômica do mercado, cujo critério é de que, se o princípio econômico da lei da escassez professa que não há quantidades suficientes de recursos para atender a todos, então, o *modus operandi* do mercado é agir como uma economia de rapina, cuja conduta é de que “se não há para todos, que haja para nós” (1998, pag.18). Desta forma, o sistema produtivo explora os recursos naturais sem considerar seus limites,

seus custos sociais e ambientais. Além disso, a economia do crescimento gera desigualdades, exclusão e conflitos entre os diferentes grupos sociais que disputam o acesso aos bens e serviços produzidos.

Neste circuito, o dinheiro constitui a constante força motriz da economia, e esta se concentra na determinação de preços, produção e distribuição de remuneração dos fatores produtivos, por meio da oferta e demanda no mercado, visando fundamentalmente a acumulação de riqueza. Tal preceito assume que os indivíduos são racionais e que, portanto, buscam maximizar sua utilidade ou lucro. Nas palavras de Martinez-Alier (1998, p.55), “a economia neoclássica analisa os preços – é, pois, uma crematística – tendo uma concepção metafísica da realidade econômica que funciona como um *perpetuum mobile*<sup>4</sup> lubrificado pelo dinheiro”.

Nesse trajeto, os recursos naturais não fazem parte do mercado e, portanto, não fazem parte das tomadas de decisões racionais dos agentes econômicos, podendo ser utilizados, sem embargo, até sua exaustão. No bojo desta economia antrópica, o valor atribuído ao ambiente natural era zero ou infinito, melhor dizendo, eram considerados bens gratuitos e não entravam na contabilidade econômica, apesar de serem intensamente utilizados na produção de bens e serviços. Até a atualidade, principalmente nos países do sul global, a teoria econômica vigente vem situando em um plano muito secundário as relações entre o sistema econômico e o ambiente natural, abordando os impactos ambientais (quando deles se ocupa) como fenômenos externos ao sistema econômico, sendo estes julgados como “falhas de mercado”, que podem ser “corrigidas” se internalizadas no sistema de preços.

Sucintamente, corroborando com a hipótese levantada por essa pesquisa, tem-se algumas razões pelas quais a Economia Neoclássica não consegue apreender adequadamente a relação entre o crescimento do sistema econômico e seus impactos no sistema ecológico. O primeiro argumento diz respeito a não-linearidade e a

---

<sup>4</sup> O termo em latim “perpetuum mobile” que significa um moto-contínuo ou máquina de movimento perpétuo é uma classe de máquinas hipotéticas que reutilizariam indefinidamente a energia gerada por seu próprio movimento. Entretanto, é consenso científico que moto-contínuos são impossíveis de serem construídos devido às leis da termodinâmica. Essas leis estabelecem que a energia não pode ser criada do nada e que sempre há perdas de energia em qualquer processo. Portanto, um moto-contínuo violaria essas leis fundamentais. Ver: RAO, Y. V. C. An introduction to thermodynamics. Universities Press, 2004.

irreversibilidade de impactos ambientais decorrentes das intensas atividades produtivas, isso deve-se ao fato de que, por muitas vezes, as perturbações ambientais não seguem relações lineares, por exemplo, a degradação de um bioma pode ter efeitos cumulativos e até mesmo irreversíveis no decorrer do tempo.

Nesta lógica, os modelos neoclássicos geralmente não cogitam essas características não-lineares, uma vez que, sua hipótese ambiental ténue supõe não só um ambiente passivo, que não reage de forma mais drástica às agressões das atividades produtivas, como também que as consequências de tais agressões podem ser revertidas. Além do mais, o pensamento neoclássico considera mínima a possibilidade de que o esgotamento de um recurso natural não renovável possa vir a restringir a expansão da economia (Mueller, 2012).

Um dos aspectos relevantes a ser mencionado é sobre o que a economia neoclássica chama de “externalidades ambientais<sup>5</sup>”, visto que, esta escola assevera que os custos e benefícios são internalizados pelos agentes econômicos. Não obstante, as externalidades ambientais, como poluição, esgotamento de recursos naturais e perda de biodiversidade, não são apropriadamente consideradas nesse modelo. Da mesma forma, essa escola de pensamento pressupõe mercados perfeitamente competitivos, onde certas condições são atendidas para garantir a “eficiência máxima”. Entretanto, muitos recursos naturais não são negociados de forma justa ou em mercados eficientes. Isso pode acarretar na subavaliação dos custos ambientais. Ademais, outro ponto fundamental a destacar, refere-se ao fato de que, a forma como os modelos neoclássicos tratam os descontos intergeracionais<sup>6</sup>

---

<sup>5</sup> Na economia neoclássica, “externalidades ambientais” referem-se aos efeitos colaterais das atividades econômicas que impactam o meio ambiente e que não são refletidos nos custos de mercado. Esses efeitos podem ser positivos ou negativos, mas geralmente o termo é usado para descrever impactos negativos, como desmatamento, poluição do ar e da água e mudanças climáticas.

<sup>6</sup> Nos modelos neoclássicos, os descontos intergeracionais são tratados através da taxa de desconto, que reflete a preferência temporal dos agentes econômicos. Essa taxa é crucial para determinar como os benefícios e custos futuros são avaliados em relação ao presente. Na preferência temporal, a taxa de desconto representa a preferência dos indivíduos por consumo presente em detrimento do consumo futuro. Uma taxa de desconto alta indica que os indivíduos valorizam muito mais o presente do que o futuro, enquanto uma taxa baixa sugere uma maior valorização do futuro. Assim, a escolha da taxa de desconto pode influenciar significativamente as decisões de política econômica.

(como valorizam os benefícios futuros em relação aos benefícios atuais) pode afetar a avaliação de políticas públicas e políticas ambientais de longo prazo.

Nas últimas décadas, tem-se intensificado críticas a essa teoria econômica, bem como à agricultura moderna e, às práticas econômicas em geral, porque estas propiciam gastos de combustíveis fósseis, contaminação do ambiente e perda de biodiversidade em uma escala muito superior àquela decorrente da agricultura tradicional e da economia pré-industrial. Neste contexto, Martinez-Alier (1998, p.148/149) sintetiza a crítica ecológica em relação ao paradigma dominante, arguindo que:

Hoje tomamos cuidado com os efeitos ambientais da agricultura moderna (contaminação dos alimentos, da água, destruição ou abandono dos recursos genéticos, uso de energias esgotáveis dos combustíveis fósseis). Esses efeitos não são medidos pelo mercado e por isso os economistas lhes dão o nome de externalidades, ou seja, efeitos externos ao mercado. Então devemos pôr em dúvida que a agricultura moderna seja realmente mais produtiva, pois medem-se os aumentos consideráveis de produtividade (por hectare ou ainda mais por hora de trabalho) subtraindo do valor da produção o valor dos insumos e dividindo o resultado pela quantidade de insumo cuja produtividade medimos. Assim, a produtividade da agricultura moderna é, por hectare e, ainda mais, por hora de trabalho, maior que a da agricultura tradicional, porém, está claro, os valores da produção e dos insumos estão medidos incorretamente ao não incluírem as externalidades e ao não considerarem a destruição das próprias condições da produção agrária. Esta é, em resumo, a crítica ecológica.

Nessa perspectiva, acirram-se as discordâncias sobre o funcionamento do sistema econômico, sobre sua infundável busca pelo crescimento e sobre seus efeitos deletérios no sistema ecológico, propiciando novas discussões entre economistas, ambientalistas, nos meios científicos e na sociedade.

É importante mencionar que, ao longo da trajetória da Economia como campo de estudo, inúmeras transformações nas ideias acerca dos processos analisados foram presenciadas até os dias atuais. Todavia, é propriamente na representação do sistema econômico como um fluxo circular isolado que marca o começo da profissão, visto que passou a tratar o sistema econômico como uma ordem ou categoria a ser estudada de forma separada do seu contexto geral. Desta maneira, para que a relevância de tal representação seja devidamente compreendida, é necessário possuir algum entendimento sobre a história do pensamento econômico.

Também faz-se bastante útil, para uma melhor percepção da crise ecológica e do papel da prática econômica com seu crescimento contínuo, compreender o

contexto evolutivo da ciência econômica entre os séculos XVIII e XX, enfatizando a evolução desta questão no decurso do desenvolvimento da própria teoria econômica, bem como de suas repercussões ao longo da história, com o objetivo de demonstrar a trajetória que a teoria econômica percorreu para compreender o papel da natureza nos processos produtivos.

## **2.2 Um breve retrospecto do Pensamento Econômico sobre o Crescimento**

A economia como uma disciplina formal é relativamente recente na história humana. Antes disso, as questões econômicas eram correntemente tratadas por líderes políticos, filósofos e demais pensadores que abordavam tópicos como gestão de recursos, comércio e distribuição de riqueza dentro de suas obras mais abrangentes, que tratavam de temas como política, ética e sociedade. Segundo registros históricos, o termo “economia” vem do grego “oikonomia”, que significa “administração da casa” (Samuelson; Nordhaus, 2012). Xenofonte, filósofo ateniense e discípulo de Sócrates, foi um dos primeiros a usar o termo em sua obra “oikonomikos”, onde dialoga sobre a gestão eficiente de uma casa e propriedades. A obra de Xenofonte reflete a importância da economia doméstica e a gestão de recursos dentro do contexto familiar, que era vista como um microcosmo da sociedade e da economia em maior escala (Backhouse, 2007).

Com o passar do tempo, notadamente, com a Revolução Industrial — em que o aumento da complexidade das economias tornou cada vez mais evidente a necessidade de análises e teorias econômicas especializadas — a pujança econômica verteu à economia como uma área de estudo própria. Entretanto, nos primórdios do estudo dos fenômenos econômicos, já é possível identificar a busca por respostas no tocante as questões que envolvem produção, crescimento, escassez, riqueza e distribuição, ou seja, como produzir de forma eficiente, considerando os recursos limitados disponíveis e como alocar esses recursos escassos.

Contudo, a análise aqui começa no despontar da era moderna, num período em que ressoava um conjunto de ideias surgidas na França do século XVIII, concebidas como reação às políticas econômicas francesas. Tais ideias defendiam que o dinheiro em si não criava riqueza, pois para isso ele precisava circular. François

Quesnay (1694-1774) com o seu *Tableau Économique*<sup>7</sup> modelo criado em 1759, expôs como ocorria a circulação de riqueza. Acreditava que o comércio e a indústria não eram fontes de riqueza por si só, mas apenas redistribuíam os produtos gerados pela agricultura e, portanto, argumentava que os excedentes agrícolas formavam o verdadeiro motor da economia. A obra de Quesnay é a representação visual das ideias econômicas desenvolvidas pelos fisiocratas, sendo estes últimos considerados como o primeiro grupo constituído de economistas, que contribuíram para o desenvolvimento posterior da Ciência Econômica (Azevedo, 2023).

Neste sentido, Bell (1982) e Mueller (2012) relembram que a partir do final do século XVIII, nos primórdios da Revolução Industrial inglesa, as questões sobre o crescimento da produção e seus limites já se faziam presentes nas concepções e enunciações dos pensadores da economia política clássica. Inicialmente com os fisiocratas, como já referido, que enfatizavam a importância da terra e dos recursos naturais na produção econômica. Como estes acreditavam ser a agricultura a única atividade verdadeiramente produtiva e a principal fonte de riqueza, viam a terra cultivada como base para o crescimento e, por conseguinte, para a prosperidade econômica. Sendo assim, os fisiocratas defendiam uma economia agrária, uma vez que o crescimento econômico era visto como dependente da agricultura. Aliás, dentro desta visão, a economia deveria ser governada pela ordem natural, com menos intervenção do Estado e por conseguinte, esta escola defendia a importância da liberdade econômica e do *laissez-faire*.

Não só porque para os autores fisiocratas a natureza era a verdadeira fonte de riqueza, na medida em que a agricultura era a única atividade capaz de produzir excedente, mas também pela visão de que a natureza, antecedente a todas as instituições humanas, era o modelo ao qual se devia amoldar a humanidade e todas as classes sociais. Obviamente, não se quer aqui defender os pressupostos fisiocratas, bem descaracterizados por Adam Smith e a escola clássica, tampouco colocá-los numa posição de vanguarda na moderna economia ecológica, mas a ideia de ordem natural, consolidada por Quesnay, poderia ser ampliada, em última instância, para uma ideia de interdisciplinaridade, embora a história do pensamento econômico coloque

---

<sup>7</sup> O *Tableau économique* (Quadro econômico) é um modelo econômico descrito pelo economista francês François Quesnay em 1759 e trata, segundo o autor, da representação geométrica das regras que regem a ordem natural. Este modelo estabeleceu as bases da teoria econômica dos fisiocratas. Ver: François Quesnay. *Tableau économique*. British Economic Association, 1894.

nessa mesma ordem natural a origem do laissez faire, laissez passer. (Bell, 1982, p.123-125)

Embora os fisiocratas não estivessem explicitamente preocupados com questões ambientais ou com o conceito de economia estacionária, como as entendemos hoje, seus estudos interdisciplinares representam um contraponto inicial à visão equivocada de que os recursos naturais são infinitos e podem ser explorados sem consequências. Desta maneira, os escritos fisiocratas imprimem uma visão um pouco diferente sobre os recursos naturais, com uma importância maior destes para o estudo do valor e de como deveria funcionar a economia e a sociedade.

Entretanto, os ideais fisiocratas foram duramente criticados pela escola clássica, havendo mudanças de enfoque econômico, também em decorrência do início do processo de industrialização conduzido pela primeira revolução industrial, onde os recursos naturais passaram a ocupar um papel secundário comparado a outros fatores de produção, tanto nas atividades industriais quanto na teoria econômica. Desta forma, os recursos naturais deixaram de ser considerados como fonte principal de riqueza, passando a ser vistos apenas como um mero fator de produção, de modo que, a ênfase dos fisiocratas na agricultura foi substituída para o setor manufatureiro. Esta fase foi delineada pelo aumento da produtividade do trabalho, como resultado da especialização, que viabilizou a acumulação de capital mediante a poupança provinda dos lucros que asseverariam o crescimento econômico.

Não obstante, economistas da escola clássica, como David Ricardo e Adam Smith, reconheciam, de certo modo, a influência do ambiente natural no sistema econômico e tinham como uma das preocupações centrais demonstrar se o capitalismo industrial da época (ainda incipiente) tinha condições de se alicerçar, de crescer e de se expandir (Hall, 2018). Por exemplo, David Ricardo e sua Teoria da Renda da Terra, argumentou que a renda da terra é determinada pela diferença de produtividade entre diferentes parcelas de terra. Isto é, a renda da terra surge porque algumas terras são mais férteis ou mais bem localizadas do que outras e, portanto, a renda corresponde a diferença entre o produto da terra mais fértil e o produto da terra

menos fértil. É válido notar, que no conceito da Lei dos Rendimentos Decrescentes<sup>8</sup> — enunciada por Turgot e popularizada por Ricardo — estava subjacente a ideia de finitude dos recursos naturais; contudo a ideia de lucros decrescentes como decorrência da limitação no fornecimento futuro de matérias primas reside, na secular tendência em pensar ser o declínio das possibilidades de inovação tecnológica e não a limitação da natureza ao crescimento econômico capitalista. Em outras palavras, à medida que a tecnologia avança, torna-se cada vez mais laborioso engendrar inovações que resultem em aumentos significativos na produção ou na eficiência. Portanto, nesta concepção, o crescimento da produção capitalista não seria limitado pela natureza, mas sim pela capacidade da sociedade em inovar continuamente.

A reflexão sobre a Lei dos Rendimentos Decrescentes é importante para entender os limites do crescimento econômico e as escolhas sustentáveis dos produtores. Ela também tem implicações para a questão ambiental, pois mostra que o uso intensivo dos recursos naturais pode levar à sua escassez e à sua degradação. Contudo, as contribuições mais representativas da época da economia clássica, emanadas dos esforços de explicar o crescimento econômico, foram estabelecidas com Adam Smith, sendo este considerado como fundador dessa corrente do pensamento econômico, que propôs determinar a natureza e as causas das riquezas das nações<sup>9</sup>.

---

<sup>8</sup> A Lei dos Rendimentos Decrescentes é uma teoria econômica que afirma que, em um processo de produção, quando se aumenta a quantidade de um fator variável, mantendo os demais fatores fixos, chega-se a um ponto em que o produto marginal (a produção adicional obtida por cada unidade do fator variável) começa a diminuir. Isso significa que há um limite para o aumento da produtividade e que o custo marginal (o custo adicional de produzir uma unidade a mais) tende a aumentar. Um exemplo simples dessa lei é o de um agricultor que cultiva milho em uma área de terra fixa. Se ele aumentar a quantidade de sementes, fertilizantes, água, ferramentas e mão de obra, ele poderá obter uma maior produção de milho. Porém, se ele continuar aumentando esses fatores, sem aumentar a área de terra, ele chegará a um ponto em que a produção de milho por unidade desses fatores começará a cair, pois haverá uma superlotação e uma competição pelos recursos. Além disso, o custo de produzir cada espiga de milho aumentará, pois ele terá que usar mais insumos para obter menos resultado. Ver: BACCARO, Lucio; BLYTH, Mark; PONTUSSON, Jonas (Ed.). *Diminishing returns: The new politics of growth and stagnation*. Oxford University Press, 2022.

<sup>9</sup> “A Riqueza das Nações” é uma obra clássica de economia política escrita por Adam Smith e publicada em 1776. É considerada a obra fundadora da ciência econômica e do liberalismo econômico. Ver: Adam Smith, *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations* (1776).

Destarte, os clássicos empenharam-se nas questões do crescimento, visualizando o sistema econômico inserido no ambiente natural, julgando este último benevolente, neutro e passivo. É importante ementar que, os economistas clássicos adotaram hipóteses em seus estudos em um período histórico, entre o final do século XVIII e início do século XIX, em que a Inglaterra ainda era um país eminentemente agrícola, cuja industrialização encontrava-se em seu estágio embrionário e, dessa maneira, a agricultura na Europa ainda era muito dependente das condições do ambiente natural. No tocante a adoção da hipótese de um meio ambiente neutro e benevolente, esta pode ser elucidada pelo fato de que a escala produtiva da economia inglesa ainda era incipiente, não havendo nenhuma preocupação de que a natureza pudesse reagir aos impactos ambientais do tenro sistema econômico em crescimento.

Assim sendo, os clássicos reconheciam as “dádivas gratuitas da natureza”, mas não manifestavam preocupações em relação a possíveis impactos do despejo no meio ambiente de resíduos e dejetos pelo sistema econômico (Mueller, 2012, p.122). Neste período, a atenção era direcionada fundamentalmente para a relação entre a oferta de terras cultiváveis e a capacidade produtiva da agricultura, sendo os fatores: capital, mão de obra e terra (ou recursos naturais), considerados como elementos essenciais nas teorias econômicas da época. Não obstante, ao longo do século XIX, essa formulação foi transformada com a chamada Revolução Marginalista, dando origem a Teoria Neoclássica, que assumiu grande preeminência nos estudos econômicos, adotando epistemologia congênere aos economistas clássicos, com o agravante de desconsiderar completamente os recursos da natureza, optando por prender-se à epistemologia mecanicista e reducionista.

É importante mencionar aqui, ainda que de forma sucinta, a relevância da filosofia política de Karl Marx<sup>10</sup>, surgida no século XIX, por sua crítica sustentada ao modo de produção capitalista e ao conceito de propriedade privada. No que se refere ao Materialismo Histórico (teoria desenvolvida por Karl Marx e Friedrich Engels), propôs que a história da humanidade é determinada pelas condições materiais e

---

<sup>10</sup> Karl Marx (1818 - 1883) foi um filósofo e economista alemão, cuja influência na política e nas ideias dos séculos seguintes foi e continua sendo profunda. Para análise mais acurada ler: MARX, Karl. O Capital-Livro 1: Crítica da economia política. Livro 1: O processo de produção do capital. Boitempo Editorial, 2015.

econômicas, onde as relações de produção (como se produz e como se distribui a produção) exercem influência em todas as outras esferas da vida (política, cultural e ideológica). Marx, teceu contribuições profundamente significativas ao pensamento econômico sobre o crescimento, especialmente através de sua análise crítica ao capitalismo e de sua Teoria da Acumulação de capital<sup>11</sup>.

Não obstante, alguns autores, como Schmidt (1976) e Benton (1989) argumentam que o marxismo tradicional tem um caráter antropocêntrico, negligenciando a questão ecológica. Também a esse respeito, Joan Martinez-Alier (1998) argumenta que o debate ecológico esteve ausente tanto na história econômica clássica e neoclássica quanto na teoria política marxista, e reitera que recém estamos aprendendo a ver a história socioeconômica deste ponto de vista ecológico. Nas palavras do autor:

Na história econômica não se estudam os temas de ecologia humana, que também estão ausentes na historiografia marxista. Marx e Engels eram contemporâneos dos físicos que, entre 1840 e 1851, estabeleceram as leis da termodinâmica (Joule, Mayer, Clausius, Thompson, que se transformou em Lord Kelvin). Entretanto, é surpreendente a falta de interesse pelo estudo do fluxo de energia manifestado por Marx e Engels e pelos historiadores marxistas posteriores. (Martinez-Alier, 1998, p.242)

Todavia, autores como Foster (1999) e Saito (2021), afirmam que Karl Marx abordou a questão ecológica em seus escritos, embora de maneira indireta e fragmentada. Segundo estes autores, Marx reconheceu a relação entre a natureza e o modo de produção capitalista, destacando como a exploração da natureza está intrinsecamente ligada à exploração do trabalho humano. Ainda que Marx não tenha desenvolvido uma teoria ecológica completa, observou que o capitalismo não somente leva à exploração e à desumanização dos trabalhadores, como também tende a esgotar os recursos naturais e a degradar o meio ambiente, o que ele chamou de “ruptura metabólica” entre a humanidade e a natureza. Em suas palavras, afirmou que:

---

<sup>11</sup> Marx argumentou que o crescimento econômico no capitalismo é impulsionado pela acumulação de capital (sendo este um conceito central em sua análise) e descreve como o capital se expande e se concentra nas mãos dos capitalistas através da exploração do trabalho.

“O homem, por suas próprias ações, media, regula e controla o metabolismo entre ele e a natureza” (Marx, 1983, p.149).

Em textos como os Manuscritos Econômico-Filosóficos (1844), Marx assinala como a relação entre o ser humano e a natureza é degradada sob o capitalismo; e que, a ausência de florestas poderia afetar diretamente o clima, aumentando a temperatura e a secura no ar. Nesses manuscritos, Marx aponta também como o capitalismo favorece à alienação do ser humano em relação a natureza, tratando-a como fonte trivial de exploração e mercadoria, enfatizando como esse rompimento não somente prejudica o equilíbrio ecológico, como também afeta propriamente a sobrevivência humana, prenunciando discussões que atualmente são centrais nos diálogos mundiais.

Embora seja significativa a inquirição da teoria marxista e sua relação (ou não-relação) com a questão ecológica, esta não está no âmbito do presente estudo, não sendo o foco da nossa análise. Por isso, o que precisa ser ressaltado nesse contexto histórico, para este estudo, é que os economistas contrários à economia política de Karl Marx, concentraram esforços e se contentaram em desenvolver a disciplina de economia sobre o caminho próximo da física mecânica, e como consequência dessa adesão, o processo econômico passa a ser regido por modelos mecânicos, como o princípio da conservação, onde nada se cria, nada se perde e tudo se transforma em uma lei de maximização de lucros. Com isso, o processo econômico foi reduzido a uma “cinemática atemporal”, ou seja, reduzido a movimentos pendulares, constituídos de ciclos nos quais um evento ambiental catastrófico, inflação ou uma queda de ações na bolsa não deixam marcas na economia, visto que, a reversibilidade, enquanto princípio da mecânica, garante que a economia poderá voltar ao estado que era antes.

Posto isto, por volta de 1870, com o surgimento do marginalismo e com a criação de sua teoria da utilidade marginal decrescente, o centro de preocupações de grande parte dos economistas foi deslocado para o princípio marginal, sendo estabelecida uma fase de mudança na abordagem da economia. Tais mudanças ocorreram tanto em termos teóricos, com o advento das teorias sobre consumo, quanto em termos metodológicos, com a aplicação de analogias mecânicas trazidas da física para a análise dos fenômenos econômicos (Mueller, 2021). O empenho dessa busca era para que a economia alcançasse um caráter “mais científico” ao tomar os métodos matemáticos empregados na física e quiçá chegar, assim como

resultados dos avanços no campo da mecânica, a leis universais sobre os fenômenos econômicos (Feijó, 1998).

Desta forma, o marginalismo que mudou a orientação dos estudos econômicos ao focar na utilidade marginal e na relação entre oferta e demanda para determinar o valor econômico, representou um instrumento que foi rapidamente difundido, para explicar a influência de determinados recursos escassos entre os usos alternativos, buscando alcançar resultados ótimos (Rebêlo, 2017). Reforçando este raciocínio, Zamagni e Screpanti (1993), aludem que, tanto os fisiocratas quanto os clássicos, que consolidaram a análise do fluxo circular do processo econômico, ainda tinham como preocupação a questão da produção da riqueza. Entretanto, foi a partir da chamada “Revolução Marginalista”, que houve a introdução do conceito de utilidade marginal, onde princípios de utilidade e escassez foram utilizados para prever o comportamento do mercado e a alocação de recursos e, neste sentido, os marginalistas usaram a analogia com a mecânica e reduziram todas as questões econômicas a questões alocativas.

### **2.2.1 A Escola Marginalista e os conceitos de Linearidade e Reversibilidade**

Reconhece-se que, nos livros-texto de história do pensamento econômico a expressão “revolução marginalista” é amplamente utilizada. Não obstante, embora esse *slogan* seja de uso consagrado na teoria neoclássica, o período dos anos setenta do século XIX não representou uma ruptura com a tradição anterior que justificasse o emprego do termo “revolução”. Feijó (1998) aduz que, o que se verificou com a publicação quase simultânea dos principais tratados teóricos de Jevons, Menger e Walras, entre os anos de 1871 e 1874, foi a articulação de uma tradição, caracterizada pelo emprego do cálculo marginalista e da noção de utilidade, que já vinha se desenvolvendo em trabalhos dispersos desde a década de trinta daquele século.

Deveras, a escola marginalista estabeleceu a concepção mecânica do sistema econômico, cujo raciocínio ancorou-se decididamente na física do início do século XIX, com vasta utilização de analogias concernentes com o princípio da conservação de energia da física (Mirowski, 1991). Sob essa perspectiva, as trocas entre indivíduos auto interessados, quando somadas em toda a economia, levariam a um equilíbrio econômico, onde todos estariam otimizando sua satisfação pessoal.

Deste modo, reiterando o que já foi aqui abordado, o marginalismo corresponde a uma escola de pensamento econômico, surgida em meados do século XIX e estabelecida no início do século XX, como resposta às limitações das teorias econômicas clássicas, sendo reputada também como uma tentativa de neutralizar as críticas marxistas ao capitalismo, fornecendo uma visão mais “científica” e menos ideológica da economia, buscando concentrar sua atenção na análise do “bom funcionamento” dos mercados e na formação de preços por eles criados. Esta corrente tem como principal característica a análise marginal dos problemas econômicos, onde sua Lei de Utilidade Marginal Decrescente<sup>12</sup>, expressa que, em uma relação econômica, a utilidade marginal decresce à medida que se consome mais uma unidade de um bem ou serviço.

Bougrine (2022), explica que a utilidade total de um bem cresce quando se consome maiores quantidades dele, mas o incremento da utilidade marginal é cada vez menor, ou seja, o valor ou satisfação obtidos com cada unidade adicional diminui à medida que mais unidades são consumidas. Para melhor elucidação, será citado neste ponto, o chamado “paradoxo do diamante” que foi originalmente enunciado por Adam Smith, que proferiu não haver nada de mais útil que a água, mas ela pode quase nada comprar; dificilmente teria bens com os quais trocá-la. Um diamante, pelo contrário, quase não tem valor quanto ao seu uso, mas se encontrará frequentemente uma grande quantidade de outros bens com o qual trocá-lo (Smith, 1776). Neste arquétipo, a água, apesar de ser essencial à vida, tem menor valor porque é abundante, enquanto o diamante possui maior valor por ser mais escasso e por isso possui uma utilidade marginal alta.

Para responder a esse paradoxo, Menger (1871), Jevons (1871) e Walras (1874), formularam de modo quase simultâneo — ainda que de forma independente — a Teoria da Utilidade Marginal, cuja lei expressa que quanto maior é a oferta de um bem, menor é a utilidade marginal; quanto menor a oferta de um bem, maior é a utilidade marginal (Jevons, 1871). Neste sentido, esta abordagem enfatiza a utilidade

---

<sup>12</sup> A Lei da Utilidade Marginal Decrescente é uma regra econômica neoclássica que afirma que o consumo de um bem fornece menos utilidade adicional à medida que mais unidades desse bem são consumidas, mantendo constante o consumo dos outros bens. Alfred Marshall. *Principles of economics: unabridged eighth edition*. Cosimo, Inc., 2009.

marginal como base para compreender o valor econômico e a tomada de decisões dos indivíduos. Para isso, essa escola lança mão de metáforas e analogias mecânicas para explicar o funcionamento do sistema econômico e professa que as decisões econômicas levam em conta a utilidade individual, não considerando ou nem percebendo os efeitos que a produção e o consumo podem incidir sobre o meio ambiente. A esse respeito Cechin, Veiga (2010) apontam que:

A “revolução marginalista” consolidou o entendimento mecânico do sistema econômico ao basear seu raciocínio em metáforas e analogias com o “princípio da conservação de energia”. A ideia era de que existe no mundo social um ponto em que todas as forças que agem no sistema se cancelam. O auto interesse seria a força, como a gravidade, que leva os indivíduos a maximizarem suas utilidades, mas como os recursos não são infinitos, há uma restrição às ações.

Neste trajeto, a Economia Neoclássica ou marginalista, com suas raízes fincadas na física, buscou modelar o comportamento econômico e os mercados usando uma abordagem que se assemelha à física newtoniana<sup>13</sup>, usando cálculos matemáticos para modelar e prever comportamentos econômicos (Borges, 2020). Citando como exemplo, a economia neoclássica assume que os mercados alcançam um estado de equilíbrio, um conceito que é semelhante à ideia de um objeto em repouso na física de Isac Newton. Deste modo, os precursores da escola neoclássica implementaram no contexto econômico uma adaptação de conceitos e equações da física, inclusive adotando a ideia do sistema econômico como um sistema autocontido e isolado, ignorando influências externas. Com base nesta compreensão científica dos sistemas físicos fechados do século XIX, Mueller (2012), explana que os economistas da escola marginalista fizeram as seguintes considerações sobre os sistemas de mercado:

i) Os sistemas de mercado são fechados e existem num domínio da realidade separado e distinto do ambiente externo;

---

<sup>13</sup> A física newtoniana, também conhecida como mecânica newtoniana (estabelecida por Isaac Newton), é uma formulação da mecânica clássica que estuda a dinâmica de sistemas sob a influência de forças. Ela é baseada em três leis fundamentais, que são: princípio da inércia, princípio da dinâmica e lei da ação e reação. Para um bom entendimento sobre as leis de Newton e seu aspecto interdisciplinar ver: Borges, Valter Divino, 2020.

- ii) Um campo de energia útil opera dentro de sistemas de mercado fechados e as forças associadas a este campo manifestam-se como a dinâmica destes sistemas;
- iii) Estas dinâmicas governam as decisões tomadas pelos atores econômicos e sustentam sistemas de mercado fechados em estados de equilíbrio se não sofrerem interferência de agências externas ou exógenas como o governo.

Nestas condições, verifica-se que os conceitos de linearidade e reversibilidade estão inerentes a este modelo, uma vez que o marginalismo considera a linearidade nas mudanças incrementais e a reversibilidade nas decisões econômicas individuais. No tocante a linearidade, esta é frequentemente evidenciada nas análises baseadas em incrementos ou unidades adicionais de um bem ou serviço. A utilidade marginal, que mede o valor adicional de uma unidade extra, possui uma relação linear, ou seja, o aumento na utilidade é proporcional à quantidade adicional consumida. A reversibilidade, por sua vez, refere-se à capacidade de voltar atrás em uma decisão e, no marginalismo, as escolhas são feitas na margem, considerando os benefícios e custos adicionais. Deste modo, a reversibilidade permite “ajustes” contínuos com base nas necessidades e mudanças nas circunstâncias.

Em conformidade com o exposto, Cechin (2010) alude que tal como os físicos do século XIX dedicaram-se a estudar os movimentos dos planetas, a economia passou a se dedicar na análise e compreensão dos movimentos do preço, da produção e da distribuição da renda, que são determinados pelo processo de oferta e procura dos agentes na economia, dando foco em escolhas ótimas dos indivíduos e empresas. Nesta concepção, são empregadas analogias mecânicas e equilíbrios estáticos, de forma linear e reversível, abandonando o debate primordial sobre as questões econômicas e sua relação com a natureza.

Antes do livro “Elements of a Pure Economics” (1872), de Léon Walras, a Economia não era um campo do conhecimento matemático. Walras estava convencido de que se as equações do cálculo diferencial podiam capturar o movimento dos planetas e átomos do universo, essas mesmas técnicas matemáticas capturariam o movimento das mentes humanas na economia. Como o que se queria era previsibilidade, precisariam de um único ponto de equilíbrio estável. Assim, para cada mercadoria trocada no mercado haveria um único preço, pois a interação entre a oferta e a demanda era enxergada por ele como forças que se cancelavam. (Mirowski, 1988; 1989; Beinhocker, 2005 apud Cechin,).

Assim sendo, Léon Walras (1834-1910), acreditava que a economia e a matemática poderiam coexistir e serem tratadas como matérias complementares, e desta forma, promoveu a junção dessas duas disciplinas, consolidando esta maneira de perceber e tratar a ciência econômica. Walras, em seu postulado do “tâtonnement”<sup>14</sup> e por conseguinte, em sua “teoria do equilíbrio geral”, sugere o encontro do “preço comum” quando os agentes com oferta e demanda estão dispostos a negociar e ambos os lados alcançam a satisfação. Essa teoria não somente pressupõe que a interação entre os mercados tende ao equilíbrio no longo prazo, como também infere que estes mercados funcionam de maneira ideal, controlada, linear, sem considerar a irreversibilidade de impactos ambientais decorrentes do crescimento da escala da produção e do consumo.

### **2.2.2 Solow e o Modelo Neoclássico de Crescimento Econômico no Longo Prazo**

O economista estadunidense Robert Solow (1924-2023), ganhador do prêmio Nobel em 1987, desenvolveu a chamada Teoria do Crescimento Neoclássico e publicou em 1956, no *The Quarterly Journal of Economics* o artigo intitulado *Contribution to the Theory of Economic Growth*. Este modelo estuda o crescimento econômico de um país no longo prazo e ficou também conhecido como modelo Solow-Swan, visto que também em 1956 o australiano Trevor Swan produziu um trabalho similar. Esta teoria, descreve como uma taxa de crescimento econômico estável deriva da combinação de três forças motrizes: a acumulação de capital, o crescimento da força de trabalho e alterações tecnológicas.

---

<sup>14</sup> A teoria do “tâtonnement” (“tatear” em francês) foi uma das principais contribuições de Léon Walras para a economia. Esta teoria sugere que quando agentes com oferta e demanda estão dispostos a negociar, ambos tendem a encontrar um “preço comum” em que a transação seja realizada. Walras descreveu o processo de “tâtonnement” como uma sequência em que um preço é anunciado, provocando o surgimento de propostas por parte dos intervenientes que, pela sua interação, fariam com que se atingisse um preço de equilíbrio. No modelo de equilíbrio geral de Walras, a oferta e demanda seriam interdependentes, pois o consumo de cada um dos bens dependeria dos salários derivados da venda de cada um dos bens. Portanto, a teoria do “tâtonnement” de Walras desempenha um papel crucial na determinação do equilíbrio de preços no mercado. Ver: De Zatarin, *La Théorie des Tâtonnements Chez Walras* (1972).

Em vista disso, a lei dos rendimentos decrescentes é transformada pela economia neoclássica em função de produção, para representar como a produção de um bem ou serviço varia em relação à quantidade de insumos utilizados, melhor dizendo, para ilustrar como diferentes combinações de fatores produtivos afetam a quantidade total de produção. Desta forma, no modelo Solow-Swan – reputado como pedra angular da Economia do Crescimento Neoclássico – é utilizada a função de produção, para descrever o crescimento econômico no longo prazo, considerando as três forças motrizes (capital, trabalho e tecnologia).

Mankiw et al. (2005), explanam que, para análise metódica deste modelo de crescimento, tem-se algumas hipóteses simplificadoras que são inerentes aos postulados desta escola, sendo estas:

- i) Retornos constantes de escala, onde uma variação nos fatores de produção implica em uma variação proporcional do produto;
- ii) Concorrência perfeita, onde o modelo Solow-Swan fundamenta-se na hipótese de retornos constantes de escala em um ambiente onde todos os produtos são homogêneos, não havendo barreiras à entrada ou saída do mercado e onde todos os participantes têm acesso à informação completa;
- iii) Retornos marginais decrescentes e positivos, cujos retornos de capital e de trabalho efetivo são positivos, mas diminuem na medida que o uso de cada fator aumenta, ou seja, cada fator de produção (capital e trabalho) tem retornos decrescentes quando estes são usados isoladamente. Isso implica dizer que ao adicionar mais de um fator, mantendo o outro constante, resultará em um aumento menor na produção;
- iv) Crescimento exógeno onde a força de trabalho cresce a uma taxa natural exógena ao modelo;
- v) Economia como uma unidade agregada, que corresponde ao total da produção e do consumo;

vi) Ausência de efeitos monetários e preços constantes;

vii) Acumulação de Capital, onde o investimento é uma função da poupança, que é uma proporção constante da renda. O capital se acumula à medida que o investimento excede a depreciação;

viii) Progresso Tecnológico Exógeno, onde admite-se que a tecnologia melhora ao longo do tempo, aumentando a produtividade do trabalho e do capital, mas essa melhoria ocorre de forma exógena e, portanto, não é explicada pelo modelo;

ix) Estado Estacionário, em que, eventualmente, a economia atinge um estado estacionário onde o capital per capita e a produção per capita permanecem constantes, pois a taxa de poupança e a taxa de crescimento da população se equilibram;

x) Modelo fechado, com a hipótese de que a economia investe toda a sua poupança e que não há governo ou setor externo.

Os marginalistas admitem a crença de que estas hipóteses simplificadoras permitem que este modelo condense sua análise nas forças principais que impulsionam o crescimento econômico, que são o trabalho, o capital e a tecnologia. Solow (1999), argumenta que, a tecnologia aumenta a produtividade do trabalho e o aumento da capacidade de produção. Desta forma, a mudança tecnológica tem grande e impreterível influência na economia e, por isso, o crescimento econômico não pode continuar a acontecer sem avanços tecnológicos. Logo, o produto é função dos fatores Capital e Trabalho, multiplicados pelo fator Tecnologia (ou conhecimento acumulado). Assim, a função de produção da Teoria do Crescimento Neoclássico é expressa por:

$Y=A \cdot f(K, L)$ , onde:

Y é o Produto Interno Bruto (PIB)<sup>15</sup> de uma economia; A representa o nível determinante de tecnologia; f é a função de produção; K representa a participação do capital e L descreve a quantidade de trabalho em uma economia. O aumento em qualquer um dos insumos é expresso no PIB e, por conseguinte, no equilíbrio da economia. Se os três fatores não forem iguais, há uma diminuição nos retornos do trabalho e do capital na economia. Esses retornos diminuídos implicam que os aumentos em L e K tem retornos decrescentes exponencialmente, ao passo que o nível de A é ilimitado em sua contribuição para o crescimento e na produção resultante que pode produzir.

Em outros termos, os fatores de produção são substituíveis entre si, não sendo possível haver o crescimento contínuo se apenas for aumentado o estoque de K pois, cada investimento adicional gera retornos menores que o precedente, até o ponto onde somente a depreciação do estoque passado é compensada. O índice de crescimento da economia é tido pela soma das taxas de crescimento do L e do estoque de K por trabalhador. Como no longo prazo há o declínio dos retornos para o K incremental, o Y (ou PIB) cresce somente de acordo com a taxa de crescimento da população, não havendo com isso crescimento per capita, culminando para a estagnação. Nesta acepção, o meio para sair da economia estagnada reside no efeito do fator A, visto que, bons resultados são obtidos através da alta produtividade dos fatores que se mantêm constantes no longo prazo e a partir disso o PIB per capita<sup>16</sup> começa a crescer aparelhado com o nível de A (Spencer; Dimand, 2010).

---

<sup>15</sup> O Produto Interno Bruto (PIB) é um indicador econômico que mede a produção total de bens e serviços de um país, estado ou cidade em um determinado período, geralmente um ano. Ele é calculado pela soma dos valores adicionados na produção de bens e serviços pelas diversas atividades econômicas, mais impostos sobre produtos, menos os subsídios. O PIB é uma medida do tamanho da economia de uma região. Ele pode ser usado para comparar o tamanho e o crescimento econômico entre diferentes países ou regiões. Ver: Dictionary of Economics - Oxford Reference

<sup>16</sup> PIB per capita é um indicador econômico neoclássico que “traduz” o PIB de um país dividido pela sua população, ou seja, é uma ferramenta utilizada para comparar a riqueza média entre diferentes países. Entretanto, é importante observar que o PIB per capita não considera a desigualdade de renda dentro de um país. Isso significa que um país pode ter um elevado PIB per capita e mesmo assim ter uma expressiva parcela da população em situação de pobreza.

Solow (1999) defendeu que no curto prazo, um aumento na taxa de poupança levará a um crescimento mais rápido ao favorecer maiores investimentos em capital, visto que mais poupança estimula a mais investimento que, por sua vez, leva ao aumento no estoque de K. Todavia, à medida que o estoque de K aumenta, o retorno marginal do K adicional diminui, devido à Lei dos Rendimentos Decrescentes, e a economia converge para um estado estacionário de crescimento onde o novo investimento somente mantém o estoque de capital per capita constante. Já no longo prazo, o crescimento econômico será dependente apenas de avanços na forma de combinar K e L (a chamada produtividade total dos fatores), ou seja, no longo prazo, a taxa de crescimento de produto per capita é determinada pelo progresso tecnológico, que é exógeno e não depende de fatores internos da economia.

Ante o exposto, nota-se que a função de produção de Solow busca compatibilizar a preocupação com a exaustão dos recursos naturais com o crescimento contínuo do PIB. Neste sentido, a “regra de ouro de Solow” postula que o conceito de sustentabilidade consiste em sustentar o consumo *per capita* de tal modo, num nível mais elevado possível, de forma indeterminada no tempo, através da manutenção do estoque total de capital em uma economia. Por conseguinte, a ideia central da função de produção de Solow é a substitutibilidade dos recursos naturais por outros fatores de produção, de tal sorte que “o mundo pode, com efeito, seguir sem recursos naturais” (Solow, 1974, p.11).

Além disso, Solow fundamentou o seu conceito de sustentabilidade no pressuposto neoclássico da taxa de desconto de utilidade marginal futura, cujo princípio representa a taxa pela qual o valor futuro de uma utilidade (ou benefício) é convertido em valor presente. Isso corresponde a dizer que a incerteza sobre os acontecimentos atuais legitima o economista a mensurar a utilidade futura como inferior à utilidade presente. Em suas próprias palavras “há uma pequena probabilidade fixa de que a civilização terminará em um curto intervalo de tempo [...] a cada geração é permitido se favorecer em detrimento da futura, mas não muito.” (Solow, 1993, p.168).

### 2.2.3 Stiglitz e sua análise sobre a Economia dos Recursos Naturais

Outro economista estadunidense, que possui grande representatividade na economia neoclássica é Joseph E. Stiglitz. Em seu ensaio “*A Neoclassical Analysis of the Economics of Natural Resources*”, publicado em 1980, este autor levanta discussões sobre as implicações econômicas da escassez de recursos naturais, discorrendo, sob a perspectiva neoclássica, sobre crescimento, uso eficiente de recursos naturais e sustentabilidade. No referido ensaio, Stiglitz defende a ideia de que o crescimento econômico pode ser alcançado sem necessariamente esgotar os recursos naturais. Argumenta que o crescimento econômico pode sim ser sustentado e que uma economia somente estaria diante de um grave problema de escassez de recursos naturais se o recurso for essencial, não reciclável e não renovável, se a oferta for limitada em relação às taxas de demandas atuais, se não puder ser substituído e for impossível aumentar a eficiência de sua utilização (Stiglitz, [1979] 2011, p.40).

Este autor argumenta ainda que “a mera existência de um problema de recursos naturais não tem implicações imediatas, não é condição necessária nem suficiente para intervenção governamental no mercado, uma vez que práticas regulatórias geram ineficiências mais graves do que falhas de mercado nas taxas e padrões de extrações de recursos naturais (Stiglitz, [1979] 2011, p. 60). Desta forma, Stiglitz defende que a inovação tecnológica e a substituição de recursos podem propiciar um desenvolvimento sustentável. A exemplo disso, menciona em seus estudos, que investimentos em energias renováveis, tecnologias limpas e eficiência energética podem mitigar a pegada ambiental da produção econômica, sem a necessidade de restringir seu crescimento.

De forma geral, esta é a postura dos economistas neoclássicos, incorporada em seus modelos dinâmicos<sup>17</sup>, que estudam o comportamento de variáveis econômicas no longo prazo levando em conta o ordenamento das preferências, as restrições e as expectativas dos agentes econômicos e que são utilizados para análise de questões como demanda, crescimento, inflação, ciclos, emprego, investimentos,

---

<sup>17</sup> É o caso, por exemplo, dos modelos de crescimento econômico, ciclos econômicos e modelos DSGE (*Dinamic Stochastic General Equilibrium*), amplamente utilizados por economistas neoclássicos.

política fiscal e monetária. Tais modelos agem como ferramentas para entender e prever o comportamento da economia, sempre atuante de forma alheia e totalmente “independente” das questões que envolvem os impactos nos ecossistemas naturais decorrentes de atividades econômicas. Por isso, a Economia Neoclássica – enquanto corrente teórica mais influente e difundida da análise econômica – somente incorporou a questão ambiental em sua base analítica a partir da década de 1960, período em que o sistema econômico e seu crescimento ininterrupto passou a ser apontado como fonte de desordens ambientais, onde a validade de seus pressupostos, métodos e aplicações passaram a ser questionados por outras correntes teóricas.

Deste modo, até a metade da década de 1960, nenhuma escola econômica deu atenção direcionada ou explícita à entrada de recursos naturais e à saída de resíduos oriundos da produção. Até então, tal entendimento não havia sido questionado pelas diferentes escolas de pensamento econômico. Todavia, é indubitável que, do ponto de vista material, o processo econômico transforma bens naturais de alta qualidade em rejeitos que não podem ser mais utilizados. Desta forma, as mudanças reais que ocorrem na economia têm direção no tempo. Tais mudanças são irreversíveis e, do ponto de vista da física, há uma mudança qualitativa promovida pelo sistema econômico. A esse respeito, Cechin (2010, p.21) explana que, o sistema produtivo transforma matéria-prima, recursos naturais, em produtos que a sociedade valoriza. Mas não só. Essa transformação produz, necessariamente, algum tipo de resíduo que não entra de novo no sistema produtivo. Portanto, a transformação econômica (comumente chamada por produção) é irreversível e qualitativa.

### **2.3 Eventos que levaram à inserção da dimensão ambiental à análise econômica**

A crise ambiental começou a ganhar proeminência nas discussões globais a partir do final da década de 1960, intensificando-se ao longo da década de 1970, quando os impactos negativos do crescimento econômico se tornaram notórios para a humanidade. Esse período foi marcado por um aumento na conscientização sobre questões como, desmatamento, poluição e esgotamento de recursos naturais. Desta maneira, a incorporação do impacto ambiental na análise econômica é um fenômeno que se consolidou nas últimas décadas do século XX, como uma forma de buscar

internalizar os custos e benefícios ambientais das atividades humanas; como uma resposta aos desafios impostos pela sociedade de risco global e também pela necessidade de buscar a coadunação entre as atividades econômicas e a conservação ambiental.

Um dos pioneiros dessa ideia foi o economista neoclássico inglês Arthur Cecil Pigou<sup>18</sup>, que em 1920 propôs a aplicação de impostos ou subsídios para corrigir as chamadas externalidades<sup>19</sup> negativas ou positivas geradas pelo mercado. Entretanto, posteriormente, com o surgimento das análises do impacto de restrições ambientais sobre o crescimento econômico (1960-1970), foram também desenvolvidos os primeiros modelos neoclássicos de equilíbrio geral, levando em conta o ambiente natural, sendo este último, categoricamente, considerado como fornecedor de recursos naturais ao sistema econômico e também como assimilador de resíduos provenientes do processo de produção e consumo.

Este avanço em considerar o meio ambiente na análise econômica está fundamentalmente correlacionado a três eventos: i) O aumento da poluição nos países industrializados; ii) Os choques do petróleo da década de 1970 e a conferência de Estocolmo e; iii) A publicação do relatório do Clube de Roma, em 1972. Estes eventos serão destacados e pormenorizados a seguir.

---

<sup>18</sup> Arthur C. Pigou viveu entre 1877 e 1959. Foi aluno e sucessor de Alfred Marshall na cátedra de economia política da Universidade de Cambridge. Desenvolveu o conceito da taxa de Pigou, uma medida do Estado para influenciar o comportamento de agentes econômicos no mercado, com o objetivo de corrigir externalidades negativas. Ele também formulou o efeito de Pigou, que explica o aumento da demanda por bens de consumo em um período de deflação. Além disso, ele contribuiu para a análise dos ciclos econômicos, especialmente sobre os aspectos monetários do ciclo e a teoria da poupança forçada. Ele é considerado um dos fundadores da economia do bem-estar e um dos principais representantes da escola neoclássica. Ver: PIGOU, Arthur Cecil. *Wealth and welfare*. Macmillan and Company, limited, 1912.

<sup>19</sup> O conceito de “externalidades” foi desenvolvido pela primeira vez por Pigou na década de 1920, e se refere aos efeitos que a produção ou o consumo de um bem ou serviço causam sobre outros agentes econômicos, sem que haja uma compensação adequada. As externalidades podem ser positivas ou negativas e podem causar ineficiência no mercado, pois os preços dos bens e serviços não refletem os custos e benefícios sociais reais. Por isso, muitas vezes é necessário a intervenção do governo ou de outras instituições para corrigir as distorções causadas pelas externalidades. Algumas formas de intervenção são: impostos, subsídios, regulamentações, normas, incentivos, direitos de propriedade, etc. Ver: *The Economics of Welfare*, 4th ed. 1932. ISBN 0-7658-0739-4.

**i) O aumento da poluição nos países industrializados:** A intensificação da poluição nas cidades industriais no século XX foi consequência do processo de industrialização e urbanização que ocorreu em várias partes do mundo, especialmente nos países industrializados e em desenvolvimento. É sabido que a Revolução Industrial, iniciada no século XVII na Europa, trouxe mudanças econômicas, sociais e ambientais, com o uso de máquinas, a exploração de recursos naturais, o aumento cada vez maior da produção e do consumo, a formação de classes sociais, o êxodo rural e o crescimento das cidades (Hobsbawm, 2003). Por conseguinte, a expansão industrial que ocorreu na Europa, nos Estados Unidos, no Japão e em parte da União Soviética após a Segunda Guerra Mundial, foi um fenômeno histórico que teve grandes impactos econômicos, sociais e ambientais. Este período, muitas vezes referido como a Era Dourada do Capitalismo<sup>20</sup>, foi marcado por um crescimento econômico sem precedentes e uma expansão massiva da indústria. Isso levou a um vertiginoso crescimento na produção de bens, o que por sua vez levou a um aumento no consumo de recursos naturais e energia (Prata, 2019).

Alguns dos principais aspectos que marcaram esse processo foram a reconstrução das áreas devastadas pela guerra, com o auxílio do plano Marshall<sup>21</sup> para a Europa Ocidental e da ocupação americana para o Japão; O desenvolvimento

---

<sup>20</sup> A era dourada do capitalismo foi um período de prosperidade econômica que ocorreu principalmente em países ocidentais após o final da 2ª Guerra Mundial (1945), e durou até início de 1970. Nesse período, houve o crescimento elevado da produção industrial, do comércio internacional, do consumo de bens/serviços, e do emprego. Esta fase terminou com o colapso do sistema de Bretton Woods (1971), a crise do petróleo (1973), e a recessão econômica (1973-1974). Esses problemas abriram espaço para novas formas de organização econômica e social. Ver Eric Hobsbawm. Era dos extremos: o breve século XX:1914-1991. São Paulo: Companhia das Letras. 1991.

<sup>21</sup> O Plano Marshall foi um programa de ajuda econômica dos Estados Unidos aos países da Europa Ocidental com o objetivo de reconstruí-los após a Segunda Guerra Mundial. O plano foi idealizado pelo general George Marshall, secretário de Estado do governo Truman, em 1947. O plano ofereceu cerca de 17 bilhões de dólares aos países europeus entre 1948 e 1961, além de alimentos, combustível, auxílio tecnológico e mão de obra. Os principais beneficiados foram Inglaterra, França, Alemanha e Itália. O plano também tinha como objetivo evitar o avanço do comunismo liderado pela União Soviética na Europa, garantindo a presença capitalista e a influência norte-americana no continente. O plano foi bem-sucedido em promover a recuperação econômica e a integração dos países europeus ocidentais, mas também aumentou a tensão entre os Estados Unidos e a União Soviética durante a Guerra Fria. A esse respeito ver: Delong, J. Bradford; Eichengreen, Barry. The Marshall Plan: History's most successful structural adjustment program. 1991.

de novas tecnologias, como a telecomunicação, a informática, a energia nuclear, a biotecnologia, a robótica e a exploração espacial; a intensificação da produção e do consumo de bens industriais que provocou o aumento da demanda por mão de obra, matérias primas e energia; a formação de blocos econômicos, como a Comunidade Econômica Europeia (CEE), o Tratado do Atlântico Norte (OTAN), o Pacto de Varsóvia e o Comecon, que retratavam os conflitos e disputas ideológicas entre o capitalismo e o socialismo; a aceleração da urbanização e da industrialização em países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento que lutavam por sua inserção no mercado mundial na busca de superar as desigualdades sociais existentes; e por fim, em decorrência desses aspectos mencionados, houve a intensificação e expansão dos impactos ambientais causados pelo desmatamento, pela poluição, pela exploração dos recursos naturais não renováveis e pelo aquecimento global.

Notadamente, as cidades industriais se caracterizaram por apresentar elevados índices de poluição atmosférica, causada pela emissão de gases e partículas provenientes das fábricas, dos veículos e das queimadas. Essa poluição afetou a saúde da população, atingiu os recursos hídricos e o solo que foram contaminados pelos esgotos industriais e domésticos, pelos resíduos sólidos e pelos agrotóxicos. Essa contaminação prejudicou a qualidade da água potável, a biodiversidade aquática e terrestre, a agricultura e a segurança alimentar. Além disso, a poluição que contribuiu para o aquecimento global e para a chuva ácida, danificou os diferentes ecossistemas naturais.

Cabe frisar que a acentuação da poluição e degradação nas cidades industriais, principalmente nos países em desenvolvimento, também se manifestou pela ocupação desordenada do espaço urbano, com o surgimento de favelas, cortiços e periferias, onde habitam as camadas mais pobres da população e os excluídos do sistema de produção. Essas áreas caracterizam-se pela falta de infraestrutura básica, como saneamento, transporte, energia, saúde e educação. A desigualdade social, a violência, a marginalização e a exclusão tornaram-se problemas sociais frequentes nessas áreas. Portanto, a degradação ambiental e social das cidades industriais no século XX foi resultado do modelo de produção baseado na perseguição de um crescimento econômico contínuo, mediante a exploração ilimitada da natureza e intensiva acumulação de capital. Esse modelo gerou e continua gerando uma série de

crises ecológicas, econômicas e humanitárias que ameaçam a sustentabilidade da vida na terra.

**ii) A crise mundial do petróleo na década de 1970 e a Conferência de Estocolmo:**

A crise do petróleo <sup>22</sup>, abalou a economia e a política dos países ao redor do mundo, especialmente os industrializados. Expôs a dependência dos países centrais em relação aos recursos naturais não renováveis e os impactos negativos da exploração excessiva desses recursos sobre o meio ambiente.

Com a elevação global do preço do petróleo, os países industrializados, que eram altamente dependentes deste recurso para o funcionamento de suas economias, foram intensamente atingidos pela crise. Não obstante, conseguiram mais rapidamente se recuperar da crise devido a diversificação de suas economias e à capacidade de investimento em fontes alternativas de energia. Por outro lado, os países periféricos, especialmente aqueles referidos como “países em desenvolvimento” foram desproporcionalmente afetados, uma vez que esses países eram fortemente dependentes do petróleo para suas economias e não dispunham de recursos financeiros para se adaptar rapidamente à recessão. Consequentemente, a crise do petróleo agravou as desigualdades econômicas existentes entre países ricos e pobres.

Além de tudo, a crise do petróleo, que se instalou em 1973, foi um evento significativo que levou ao aumento dos preços dos produtos primários dos países fornecedores (países periféricos), como o petróleo nos países membros da Organização dos Países Exportadores de Petróleo - OPEP, superando os preços dos produtos industrializados oriundos de países industrializados. O choque de preços teve amplas repercussões econômicas e geopolíticas, causando alterações nas

---

<sup>22</sup> A crise do petróleo de 1970 foi um período de escassez e aumento dos preços do petróleo no mercado mundial, causado principalmente por fatores políticos e econômicos envolvendo os países produtores e consumidores do recurso. A crise teve início quando a Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), formada por países árabes e outros produtores, decidiu reduzir a oferta de petróleo e aumentar os royalties pagos pelas empresas transnacionais que exploravam o recurso em seus territórios. A OPEP também usou o petróleo como arma política contra os países que apoiavam Israel na guerra do Yom Kippur, em 1973, impondo um embargo que restringiu ainda mais a disponibilidade do produto. Ver: Aníbal J. Maffeo. La Guerra de Yom Kippur y la crisis del petróleo de 1973. Revista relaciones internacionales, v. 25, n. 1.

dinâmicas de poder e comércio global. Neste contexto, o colapso do petróleo tornou muito evidente as contradições e desigualdades existentes entre os países ricos e pobres, revelando nestes últimos o cenário de escassez de alimentos, de falta de acesso ao saneamento básico, à educação, à saúde e à tecnologia.

A evidenciação dessas discrepâncias existentes entre os diferentes países foram um dos motivos que levaram à Conferência das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento e Meio Ambiente Humano, que ocorreu em junho de 1972, sediada em Estocolmo, capital da Suécia, e foi coordenada pela Organização das Nações Unidas (ONU) que reuniu 113 países e 400 organizações governamentais e não-governamentais para tratar das questões relacionadas à degradação ambiental, como a poluição proveniente da industrialização, do desmatamento, dos desastres naturais; questões sobre a pressão do crescimento demográfico sobre os recursos naturais, a política de desenvolvimento humano, o uso de pesticidas, as mudanças climáticas e o desenvolvimento sustentável.

Os desdobramentos desta conferência resultaram na elaboração da Declaração de Estocolmo, com 26 princípios para orientar as políticas ambientais dos Estados; no Plano de Ação de Estocolmo, que apresentou 109 recomendações para combater a degradação ambiental; e em cinco resoluções, que trataram de questões específicas como testes nucleares, banco de dados ambientais e fundo para o meio ambiente. Foi criado também o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), que é o órgão responsável por coordenar as ações globais de proteção ao meio ambiente e de promoção do desenvolvimento sustentável. Suas principais funções são o monitoramento do meio ambiente, realização de avaliações dos impactos das atividades humanas, elaboração de normas e diretrizes ambientais e dar apoio aos países em desenvolvimento na implementação de políticas e projetos ambientais (UNEP, 2023).

A conferência também influenciou a elaboração de outras convenções e acordos internacionais sobre questões ambientais, como a Convenção sobre Diversidade Biológica, a UNFCCC e o Protocolo de Kyoto<sup>23</sup> (Sohn,1973). Neste

---

<sup>23</sup> O protocolo de Kyoto corresponde a um acordo internacional que visa reduzir as emissões de gases de efeito estufa, principalmente o dióxido de carbono, que contribuem para o aquecimento global. O protocolo foi assinado em 1997 na cidade de Kyoto, no Japão, por mais de 170 países, mas só entrou em vigor em 2005, após a ratificação da Rússia. O protocolo foi prorrogado até 2020, mas foi substituído

sentido, a Conferência de Estocolmo foi uma tentativa de buscar soluções para essas demandas, reconhecendo a necessidade de promover o desenvolvimento sustentável, que pudesse atender às necessidades das gerações presentes e futuras, sem comprometer o ambiente natural. A conferência também buscou estabelecer uma cooperação internacional para tentar resolver os problemas ambientais, respeitando as diferenças entre os países e as suas responsabilidades comuns, mas diferenciadas. Esta convenção foi um passo importante, um evento insigne que deu início às discussões globais para a conscientização e a mobilização em favor do desenvolvimento e da conservação ambiental.

É importante ressaltar que a crise do petróleo incentivou os países a investirem na sua diversificação energética, isto é, a buscarem outras fontes de energia, como o gás natural, o carvão, a energia nuclear e as energias renováveis a fim de diminuir a dependência do petróleo e evitar novos choques posteriores. Houve também neste período o aumento nas tensões entre os países produtores e consumidores de petróleo, bem como entre países ricos e pobres. Os chamados “países em desenvolvimento”, especialmente os da América Latina e da África, sofreram com a dívida externa, com altos índices inflacionários, com a recessão e instabilidade política. Além disso, eclodiram movimentos sociais e ambientais que questionavam o modelo de desenvolvimento baseado no consumo excessivo de recursos naturais.

**iii) O relatório do Clube de Roma:** Este relatório corresponde a um documento que foi publicado em março de 1972, sob o título *The Limits to Growth* que foi elaborado por uma equipe de cientistas do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), liderada por Dennis e Donella Meadows. O relatório utilizou modelos matemáticos e computacionais para simular a interação entre o crescimento populacional, o consumo de recursos naturais, a produção industrial, a poluição, a produção de alimentos e a qualidade de vida. Para *The Limits to Growth* o prosseguimento do crescimento econômico e demográfico nos padrões analisados até a década de 1970 faria com que, em um período relativamente curto, fossem ultrapassados certos limites físicos,

---

pelo Acordo de Paris, assinado em 2015, que estabeleceu novas metas e compromissos para todos os países. Ver: Noss, Reed F. Beyond Kyoto: forest management in a time of rapid climate change.2001.

impostos pela restrição de recursos naturais e pela capacidade de resiliência do meio ambiente<sup>24</sup>.

Sucintamente o relatório concluiu que, se as tendências da época prosseguissem, os recursos naturais se esgotariam em menos de 100 anos, culminando a um colapso econômico, social e ambiental. Deste modo, o relatório propôs a ideia de um desenvolvimento sustentável e sugeriu que era preciso reduzir o consumo e a poluição, estabilizar o crescimento populacional e buscar um equilíbrio entre o ser humano e a natureza. O relatório do Clube de Roma teve uma grande repercussão no mundo, sendo também alvo de muitas críticas, principalmente de setores que defendiam o crescimento econômico ilimitado e que consideravam o relatório pessimista e alarmista. No entanto, ele também influenciou a criação de vários órgãos e políticas ambientais, como os ministérios do meio ambiente e a Conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente Humano, realizada em Estocolmo em 1972.

O relatório do clube de Roma foi um marco na história do pensamento ambiental, pois abriu as discussões sobre os limites ecológicos do crescimento econômico, os riscos da degradação ambiental para a sobrevivência da humanidade e sobre a necessidade de uma mudança de paradigma na relação entre sociedade e natureza. Assim, o aumento da poluição nos países industrializados; os choques do petróleo da década de 1970 e o relatório do Clube de Roma foram eventos cruciais para que a análise econômica começasse a incorporar considerações ambientais.

---

<sup>24</sup> Resiliência ambiental é a capacidade de um sistema natural de se recuperar ou se adaptar às mudanças climáticas, aos distúrbios ou aos impactos causados pelas atividades humanas. A resiliência ambiental envolve aspectos ecológicos, sociais, econômicos e culturais que influenciam a vulnerabilidade e a capacidade adaptativa dos sistemas. A resiliência ambiental é importante para preservar a biodiversidade, os serviços ecossistêmicos, a segurança alimentar, a saúde e o bem-estar das populações. Alguns exemplos de ações que podem aumentar a resiliência ambiental são: restaurar áreas degradadas, promover o uso sustentável dos recursos naturais, diversificar os sistemas produtivos, implementar práticas de conservação do solo e da água, reduzir as emissões de gases de efeito estufa, fortalecer o desenvolvimento local, a educação ambiental e a participação social. Ver, Brian Walker. *Conserving biological diversity through ecosystem resilience*. *Conservation biology*, v. 9, n. 4, p. 747-752, 1995.

### 2.3.1 A Contrarresposta de Solow e Stiglitz sobre o Relatório do Clube de Roma

Robert Solow e Joseph Stiglitz, ambos laureados com o Prêmio Nobel de Economia, foram críticos proeminentes do relatório “*The Limits to Growth*”, divulgado pelo Clube de Roma em 1972. Suas críticas centraram-se fundamentalmente nos aspectos seguintes:

**i) Subvalorização do Avanço Tecnológico:** Solow e Stiglitz afirmavam que o relatório não reconheceu suficientemente o potencial da tecnologia inovadora para superar as barreiras impostas pela finitude dos recursos naturais e pela poluição. Eles argumentavam que, com o aumento da escassez de recursos, os preços se elevariam, estimulando a descoberta de alternativas, o desenvolvimento de substitutos e a criação de tecnologias mais eficazes no uso de recursos e no combate à poluição. Para eles, a capacidade humana de inovação era vista como uma força poderosa capaz de modificar as previsões pessimistas do relatório.

**ii) Fragilidades Metodológicas e Simplificações Excessivas:** Os críticos destacavam a simplicidade dos modelos de simulação empregados no relatório. Alegavam que tais modelos falhavam em refletir a complexidade das interações econômicas e ambientais, ignorando mecanismos cruciais de adaptação e retroalimentação presentes no mundo real. A agregação ampla de recursos em categorias gerais e a presunção de relações fixas entre variáveis foram identificadas como simplificações que comprometeriam a precisão das conclusões.

**iii) Desconsideração dos Mecanismos de Mercado:** Solow e Stiglitz defendiam que os mercados têm um papel essencial na alocação eficiente de recursos e no enfrentamento da escassez. Por exemplo, o aumento do preço dos recursos escassos incentivaria não só a inovação tecnológica, mas também a conservação e a utilização mais racional desses recursos. Segundo eles, o relatório negligenciou a importância dos mecanismos de mercado como ferramentas de ajuste.

**iv) Perspectiva Estática dos Recursos:** Outra crítica mencionada se referia à visão pouco dinâmica dos recursos naturais presente no relatório. Robert Solow,

especialmente, argumentou que a definição e a disponibilidade de "recursos" são variáveis dinâmicas que dependem do avanço do conhecimento e da tecnologia. Para ele, aquilo que hoje é considerado como um recurso escasso pode tornar-se, no futuro promissor, abundante devido a avanços em descobertas ou métodos tecnológicos de extração e aproveitamento.

Em suma, Solow e Stiglitz, adotando uma perspectiva mais otimista — fundamentada na confiança da reversibilidade, na adaptabilidade da economia de mercado e na força transformadora da inovação tecnológica — classificaram as previsões alarmantes do relatório do Clube de Roma como excessivamente pessimistas e carentes de uma análise econômica consistente. Embora reconhecessem a existência de desafios ambientais, rejeitavam a inevitabilidade de um colapso imposto por limites biofísicos, acreditando firmemente na capacidade humana de desenvolver soluções para enfrentar tais problemas.

#### **2.4 Crescimento, Escala e Degradação Ambiental**

É inegável que a atividade econômica é dependente dos recursos naturais e dos serviços ecossistêmicos. Entretanto, tais atividades produtivas notadamente são geradoras de impactos negativos sobre o ambiente, esses impactos podem comprometer a resiliência dos ecossistemas e sua capacidade de prover os bens e serviços essenciais à vida humana, gerando maiores custos econômicos, sociais e ambientais (Sachs, 1993). A elevada e crescente escala da produção econômica tornou urgente a necessidade de analisar as formas pelas quais o funcionamento e a expansão do sistema econômico impactam negativamente o ambiente natural, “isso tanto em termos de extração de recursos materiais e energéticos fundamentais para o processo de produção e consumo, como da deposição no ambiente de matéria degradada e de energia dissipada” (Mueller, 2012, p.12).

Por conseguinte, torna-se essencial o entendimento da relação entre crescimento econômico, ganhos de escala, utilização dos recursos naturais e degradação ambiental, haja vista que o consumo insustentável dos recursos naturais pode levar a uma deterioração irreversível das reservas desses recursos, comprometendo a vida nos ecossistemas naturais e a própria existência humana (Leff, 2006). Cabe mencionar que a crise ambiental, por estar intrinsecamente ligada às

questões econômicas e sociais, afeta de forma desproporcional as sociedades mais vulneráveis, alavancando ainda mais as desigualdades sociais nelas existentes, comprometendo os direitos humanos fundamentais, como o direito à vida, à saúde e ao sustento. Ou seja, a crise ambiental aumenta as desigualdades sociais porque cria e agrava situações de injustiça ambiental (Martinez-Alier; Jusmet, 2015).

Com sua grande escala de produção, o crescimento econômico incessante tornou-se insustentável na medida em que gera, cada vez mais, aumento da poluição e entropia. Alguns indicadores de degradação ambiental relacionados ao crescimento econômico são o consumo de energia, a qualidade da água, as emissões de GEE, o aumento do ozono troposférico<sup>25</sup> pela queima de combustíveis fósseis, a perda de biodiversidade, dentre outros indicadores ambientais<sup>26</sup>.

Via de regra, nas economias do mundo, o crescimento econômico é tido como objetivo primordial, dado que, através dele, almeja-se elevar o nível de bem-estar da população, proporcionando maior nível de empregos, maiores rendas e maiores disponibilidades de bens e serviços. Ele é medido pelo aumento do PIB, que corresponde à produção econômica total de um país, durante um determinado período de tempo (Dornbush; Fischer, 2013). Ocorre que, são indubitáveis os desequilíbrios causados pela ação humana ao ambiente natural, sobretudo no que se refere à sua atividade produtiva e, por isso, as discussões sobre as correlações existentes entre o

---

<sup>25</sup> O ozono troposférico é o ozono que se encontra na primeira camada da atmosfera terrestre, a troposfera, onde atua como um contaminante. Na troposfera, o ozono é um poluente secundário resultante de reações fotoquímicas quando existem poluentes primários precursores como os óxidos de azoto (NO X) e os compostos orgânicos voláteis (COV) oriundos de processos industriais ou dos transportes, e radiação solar. Este poluente tem um forte poder oxidante que acelera a degradação dos materiais, promove a perda de produtividade da vegetação e o aumento da morbidade e mortalidade da população exposta. Além disso, o ozono troposférico pode ser muito tóxico às plantas, podendo causar danos consideráveis às espécies vegetais nativas e culturas agrícolas. Ver: Cooper, Owen R. et al. Global distribution and trends of tropospheric ozone, v.2, p.29, 2014.

<sup>26</sup> Sobre Indicadores Ambientais, o Índice de Desempenho Ambiental (EPI) de 2022 fornece um resumo baseado em dados do estado da sustentabilidade em todo o mundo. Usando 40 indicadores de desempenho em 11 categorias temáticas, o EPI classifica 180 países em desempenho de mudanças climáticas, saúde ambiental e vitalidade do ecossistema. Esses indicadores fornecem um indicador em escala nacional de quão próximos os países estão das metas estabelecidas em matéria de política ambiental. Ver: Wolf, M. J., Emerson, J. W., Esty, D. C., de Sherbinin, A., Wendling, Z. A., et al. (2022). 2022 Environmental Performance Index. New Haven, CT: Yale Center for Environmental Law & Policy. [epi.yale.edu](http://epi.yale.edu)

crescimento do PIB e a degradação do meio ambiente tornaram-se tão importantes na atualidade, mas com o entendimento de que há uma interação complexa e dinâmica entre essas duas forças (crescimento x degradação), que se mostra em vários aspectos e depende de vários fatores, tais como as características dos países, as políticas públicas adotadas, as preferências sociais, os padrões de produção e consumo e as tecnologias adotadas (Sachs; Ignacy, 1981).

Em princípio, a produção gerada pelo crescimento eleva a renda para os trabalhadores e investidores de uma economia, o que teoricamente promoveria o bem-estar social. Ocorre que, empiricamente, a elevada produção não garante uma distribuição equânime da renda entre os diferentes segmentos da sociedade, gerando discrepâncias. Uma das razões para essa disparidade é que o crescimento econômico não é necessariamente inclusivo, ou seja, não beneficia todos os segmentos da sociedade. Em muitos países do sul global, o crescimento econômico foi concentrado em esferas e regiões específicas e foi baseado em setores intensivos em capital, que geram poucos empregos e baixa renda para os trabalhadores. Além disso, a distribuição de ativos produtivos, como terra, capital e educação, é frequentemente desigual e favorece aos interesses de grupos dominantes.

Sem precisar entrar, com profundidade, no enfoque histórico das sociedades, sobretudo das economias no Sul global, evidencia-se que a busca pelo crescimento econômico sem limites tem provocado inúmeros problemas, pois este crescimento é resultante de uma série de fatores e interações que hoje, deverasmente, predisõem em mudanças nas estruturas produtivas, tecnológicas e sociais. De qualquer modo, é pertinente continuar a reiterar que as preocupações atuais com os impactos ambientais propiciados pelas práticas humanas nas sociedades são resultantes da grande e progressiva escala de produção da economia (Martinez-Alier; Jusmet, 2015).

Mueller (2012), propõe, de forma interessante — ao refletir sobre as interações existentes entre o sistema econômico e o sistema ecológico — uma analogia biológica onde compara a sociedade humana a um organismo vivo, complexo e multifacetado. Nesta analogia, assim como um ser vivo, que retira energia e matéria de alta qualidade de seu meio externo, utilizando-as para sua manutenção, crescimento e evolução, devolvendo-as, seguidamente, a esse meio externo na forma de energia dissipada, dejetos e resíduos, também a sociedade retira energia e matéria de alta qualidade do

seu meio externo (o meio ambiente) para se manter, crescer e evoluir, devolvendo ao ambiente esses recursos utilizados de forma degradada.

Entretanto, ainda que os processos de obtenção de energia e matéria pela sociedade sejam, em parte, semelhantes aos processos de um ser vivo, a sociedade com seu consumo exossomático excede, e muito, a capacidade de resiliência da natureza. Além do que, como explana Martinez - Alier (1998), de forma geral, os seres vivos têm instruções genéticas no que se refere ao consumo endossomático, porém a espécie humana não tem instruções genéticas com respeito ao consumo exossomático. Os conceitos de consumo endossomático e exossomático ajudam a compreender como a humanidade utiliza recursos naturais e energia, tanto para a sua sobrevivência quanto para a acumulação de mercadorias.

Para elucidação desse argumento, tem-se que os seres vivos realizam o consumo endossomático que se refere a matéria e energia que um organismo consome diretamente para suas necessidades fisiológicas básicas, ou seja, é o consumo interno e essencial para a sobrevivência individual. Por outro lado, o consumo exossomático, envolve o uso de energia e materiais que vão muito além do corpo do indivíduo (como por exemplo o consumo de bens e serviços produzidos em larga escala pela economia) que está diretamente influenciado pela renda, cultura e padrões de consumo e que geram impactos ambientais significativos, uma vez que produzem resíduos e rejeitos que são despejados nos sistemas naturais, causando danos, por vezes, irreversíveis.

Deveras, o PIB é concebido pelas diversas sociedades como indicador de sucesso, sendo perseguido como meta a ser alcançada, havendo com isso, sua supervalorização. Com efeito, o PIB cresce, mas destrói a biodiversidade. Usa carvão, petróleo e gás que produzem excesso de dióxido de carbono e, conseqüentemente, as mudanças climáticas e os danos ambientais oriundos da larga escala da produção, sendo que estes não são subtraídos do PIB (Martinez-Alier, 2015). Então, o tamanho da escala da produção tem um impacto significativo no meio ambiente pois, à medida que aumenta a escala produtiva na economia, aumenta também a demanda por recursos naturais e energia, que carrega consigo uma série de conseqüências ambientais desastrosas. Sánchez (2020); IPCC (2023) alertam sobre alguns impactos trazidos pelo crescimento da produção industrial, tais como:

**i) Degradação do solo:** a agricultura em larga escala bem como a exploração intensiva de recursos naturais pode provocar a degradação do solo, erosão e perda de fertilidade. Isso afeta a capacidade de produção futura e pode levar à desertificação em certas regiões.

**ii) Aumento da poluição:** a escala produtiva intensiva, ocorrida nos moldes atuais, requer a utilização de mais materiais e energia, resultando em maiores níveis de poluição do solo, da água e do ar, decorrentes das emissões industriais, derramamento de produtos químicos e descarte impróprio de resíduos. Altos níveis de poluição propicia repercussões danosas à saúde humana, à vida selvagem e aos ecossistemas naturais.

**iii) Esgotamento de recursos naturais:** de forma geral, uma maior escala produtiva irá impetrar em quantidades cada vez maiores de recursos naturais, como água, combustíveis fósseis, minerais, madeira, dentre outros. Com efeito, o uso excessivo e desmensurado desses recursos pode levar ao seu esgotamento e à perda de biodiversidade.

**iv) Emissões de GEE:** as principais fontes de emissões de GEE nas atividades econômicas estão relacionadas à queima de combustíveis fósseis na indústria, na geração de energia e nos transportes. As emissões de GEE contribuem para o aquecimento do planeta e as mudanças no clima, resultando em impactos como o aumento das temperaturas, eventos climáticos extremos e o derretimento das calotas polares.

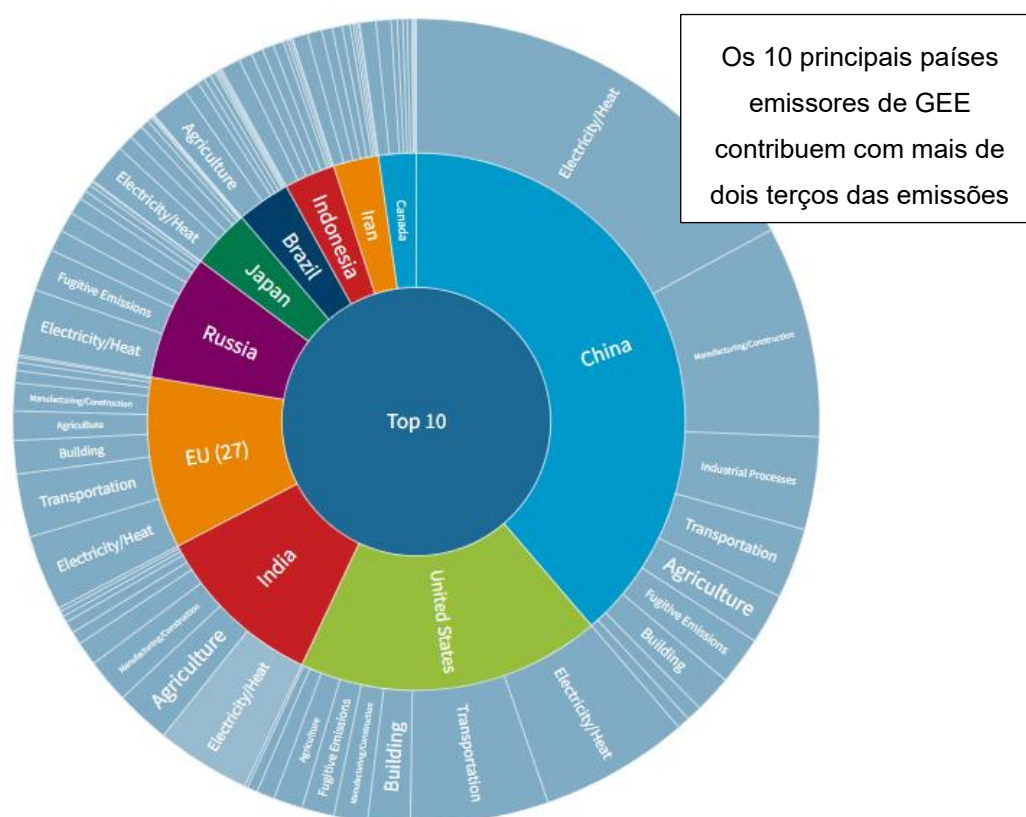
**v) Mudanças climáticas:** como já aludido, a produção em massa emite grandes quantidades de GEE, que estão presentes na atmosfera e favorecem o aumento da temperatura média da terra e às mudanças climáticas. Esses gases absorvem e emitem radiação infravermelha, retendo calor próximo à superfície terrestre. Isso ocorre, principalmente, devido ao uso de combustíveis fósseis na atividade produtiva e ao desmatamento consorciado à expansão industrial e agrícola.

**vi) Consumo demasiado de energia:** a produção em larga escala demanda o consumo excessivo de energia, impactando negativamente no ambiente, sobretudo quando há a dependência de fontes não renováveis, o que contribui para o aumento dos GEE.

**vii) Perda de biodiversidade e fragmentação de habitat:** a excessiva produção industrial promove o desequilíbrio, a degradação ou modificação do ambiente natural que é essencial para a conservação e reprodução das espécies. As atividades antropogênicas, como desmatamento, mineração, agricultura extensiva, construção de grandes estruturas e urbanização acarretam perda de habitat ou fragmentação dos ecossistemas. A perda de habitat resulta na redução ou eliminação das condições necessárias para que as espécies existam e como resultado pode haver o declínio da diversidade biológica e extinção de espécies. A fragmentação do habitat ocorre devido aos desequilíbrios ecológicos e corresponde a divisão do habitat natural em fragmentos menores e isolados, criando ilhas de habitat cercadas por áreas antropizadas como barragens, estradas, áreas urbanas, e sistemas agrícolas homogêneos.

Ainda sobre os impactos relativos aos GEE, Dados do World Resources Institute - WRI (2023) apontam que os três maiores emissores globais — China, Estados Unidos e União Europeia — Contribuem com 42,6% das emissões globais, enquanto os últimos 100 países na lista do acordo de Paris representam apenas 2,9%. A figura 2 mostra que juntos os dez maiores emissores são responsáveis por dois terços das emissões mundiais de GEE. Isso evidencia que as políticas mundiais contra as mudanças climáticas não terão êxito sem que haja ações significativas por parte dos maiores emissores globais.

**Figura 2. Os 10 maiores emissores de dióxido de carbono**



**Fonte:** World Resources Institute - WRI

De modo geral, há uma relação entre crescimento econômico e emissões de GEE, uma vez que, o crescimento econômico tende a aumentar as emissões de CO<sub>2</sub> devido ao maior consumo de energia e de recursos naturais. Isso corrobora com a necessidade de compreensão desses processos para a elaboração de políticas eficazes e efetivas com ações sustentáveis. Neste sentido, o crescimento econômico contínuo representa um enorme desafio ao ambiente natural, uma vez que existem limitações quanto à capacidade do meio ambiente em suportar as pressões exercidas pela ação humana (Radetzki, 1992).

Alguns economistas, como Kate Raworth (2017), argumentam que o crescimento econômico contínuo pode ser conciliado com a proteção ambiental, desde que adote uma perspectiva de sustentabilidade econômica, com a compreensão de que haja a redução do consumo de matérias-primas e produtos, o

aumento da reutilização e reciclagem, o investimento em fontes de energia renováveis e a consideração aos limites ecológicos do planeta. Outros, como Herman Daly (2011), Paul Ariès (2005) e Tim Jackson (2016), defendem que a economia estacionária poderia proporcionar um equilíbrio entre produção e consumo, sem crescimento nem decrescimento, visando a sustentabilidade social e ambiental. Uma vez que, acreditar em um possível *catch-up*, ou seja, em um aumento sem fim do PIB e isso em um nível planetário, somente um planeta Terra não seria suficiente.

É válido reiterar que há limites biológicos, físicos e químicos na natureza para as atividades econômicas e tais limitações não envolvem somente a parte da extração dos recursos naturais, mas também a fase dos despejos de resíduos e emanações no ambiente. Com efeito, um crescimento contínuo da escala da economia mundial promove, de um lado, um aumento excessivo e ininterrupto da extração de recursos naturais, gerando, de outro lado, volumes cada vez maiores de emanações de resíduos e rejeitos para os ecossistemas. Nesta acepção, Mueller (2012) aponta que a escala da economia global é constituída por dois componentes fundamentais que são: o tamanho da população humana e o nível da produção material por habitante ou renda per capita<sup>27</sup>, cujas dinâmicas estão intrinsecamente relacionadas com a questão ambiental. O crescimento da população humana provoca o aumento na demanda por recursos naturais, o que pode resultar em maior pressão sobre o meio ambiente. Da mesma forma, um maior nível de produção material por habitante pode levar a um aumento no consumo de recursos e na geração de resíduos, o que também acarreta em impactos ambientais significativos.

Vale mencionar que, as sociedades economicamente mais pobres, cuja população cresce a taxas elevadas, experimentam também a expansão da demanda por alimentos, e um mínimo por bens e serviços; aumentam também os requerimentos

---

<sup>27</sup> Renda per capita corresponde ao valor da renda média por pessoa em um país ou região. É usada para medir o crescimento e desenvolvimento econômico de um lugar. É calculada pela divisão do produto nacional bruto (PNB) ou do produto interno bruto (PIB) pelo número de habitantes. Vale mencionar que, a renda per capita é um indicador que pode variar conforme o grau de desenvolvimento, o tamanho da população e a distribuição de renda de um país ou região. Normalmente, quanto maior a renda per capita, maior é o nível de prosperidade da população. No entanto, a renda per capita tem algumas limitações, pois não considera as desigualdades sociais, as diferenças regionais e outros fatores que podem influenciar as condições socioeconômicas de um lugar. Ver: BLANCHARD, Olivier; SHEEN, Jeffrey. Macroeconomia; Edição Australásia. Pearson Ensino Superior UA, 2013.

por moradias, acelerando o processo de urbanização desordenada e favelização das paisagens, ampliando-se as emissões de resíduos e rejeitos no meio ambiente. Obviamente, não se trata aqui de atribuir à pobreza como a grande causadora de degradação ambiental, posto que, corroborando com a Figura 2, a riqueza é uma ameaça muito maior para os ecossistemas que a pobreza (Martinez-Alier, 1998).

Com efeito, a partir de meados do século XX, tem-se a considerável expansão material da produção — devido a vários fatores, incluindo o crescimento da população, o desenvolvimento tecnológico e a globalização — exigindo quantidades crescentes de recursos da natureza. Essa expansão tem levado a uma exploração cada vez mais intensa dos ecossistemas naturais.

Nas últimas décadas, tem-se criticado a agricultura moderna e, em geral, a economia atual, porque implicam um gasto de combustíveis fósseis, uma contaminação do ambiente e uma perda de biodiversidade maior que a da agricultura tradicional e da economia pré-industrial. (Martinez-Alier, 1998, p.34).

Como já mencionado, o aumento da população humana e de sua produção material promove a elevação contínua da extração de recursos naturais dos ecossistemas que, por sua vez, produzem volumes cada vez maiores de emanações de resíduos e rejeitos nocivos para o ambiente. Melhor dizendo, quando a população de uma sociedade cresce a uma taxa elevada, independentemente de seu nível de renda, há um aumento na demanda por bens, por serviços e alimentos, assim como também aumenta a necessidade por moradias, que por sua vez resulta em novas configurações de ocupação do espaço geográfico e mais produção de resíduos.

É importante enfatizar que a degradação ambiental de países pobres, que possuem elevado crescimento demográfico, é qualitativamente distinta daquela que ocorre em países ricos. O impacto ambiental sucede de diferentes maneiras e de acordo com o nível de desenvolvimento econômico e social vivido por cada país (Martinez-Alier, 1998). Nos países ricos, por exemplo, o nível de renda fomenta o elevado consumo de bens duráveis (veículos, imóveis, roupas, aparelhos eletrônicos, eletrodomésticos), de produtos descartáveis e conseqüentemente, impulsiona a geração de mais poluição e de lixo, que são os causadores dos maiores impactos negativos ao meio ambiente; já nos países pobres, os impactos ambientais ocorrem principalmente como resultantes da irregularidade das atividades produtivas, do déficit

habitacional, da ausência de saneamento básico, da utilização de carvão vegetal como combustível originário de matas nativas, dentre outros.

Não obstante, tanto em países ricos, onde a população é relativamente estável, mas o nível de renda se expande demandando uma produção material cada vez maior, quanto nos países pobres, onde o nível de degradação é crescente, o crescimento demográfico e o nível de renda são fatores importantes que exercem grande pressão sobre os recursos naturais. Por via de regra, o aumento da renda per capita está relacionado a uma maior produção material, pois significa que haverá mais dinheiro para que a população de uma sociedade possa consumir bens e serviços. Isso implica em uma maior demanda por produtos, que por sua vez requerem mais recursos naturais, energia e trabalho para serem produzidos. Assim, a produção material é o resultado da atividade econômica de um país ou região, que depende do nível de renda e consumo de sua população.

De forma geral, esses dois fatores, expansão da população e crescimento da renda per capita, vem promovendo, em nível global, uma escala progressiva do sistema econômico, resultando em grandes impactos negativos ao sistema terrestre. Mueller (2012) demonstra que essa relação pode ser algebricamente representada através das seguintes equações:

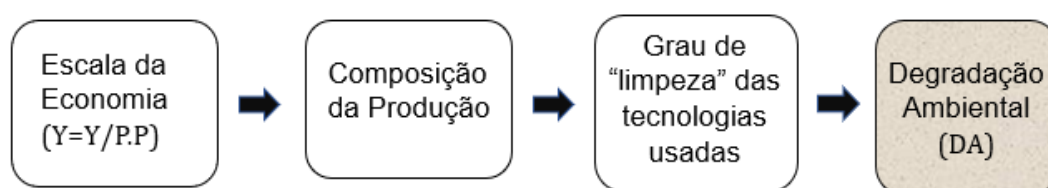
$$Y = \frac{y}{P} \cdot P; e \quad (1)$$

$$DA = \Omega (y) \quad (2)$$

Onde Y é o produto real total ou o PIB real da economia em um determinado período, geralmente 1 ano, e é normalmente tomado como o principal indicador da escala da produção material no período determinado. O P representa a população da economia no período considerado; e a DA é a degradação ambiental resultante desta relação. A equação (1) anuncia que o produto real total em um determinado período é igual a renda *per capita* da economia multiplicada por sua população. A equação (2) sustenta que a degradação ambiental (DA) é uma função ( $\Omega$ ) da escala da produção material da economia. É importante ressaltar que a relação  $\Omega (Y)$  é variável ao longo do tempo e espaço geográfico, isto é, pode ser diferente em cada país, pois depende da composição da produção e da tecnologia empregada na produção. Então, a relação  $\Omega (Y)$  vai depender da composição da produção que a sociedade demanda e

da tecnologia adotada para gerar essa produção. A Figura 3 demonstra esta relação, e sugere que a composição da produção e o grau de “limpeza” das tecnologias empregadas na atividade produtiva estabelecem a natureza da correlação entre a escala da produção e a degradação ambiental.

**Figura 3. Correlação entre escala da produção e Degradação Ambiental**



Fonte: Mueller 2012

A título de exemplo, uma indústria que depende fortemente de combustíveis fósseis para sua produção, pode ter um impacto ambiental significativo em termos de emissões de GEE. De outra forma, uma indústria que adota tecnologias limpas e práticas produtivas sustentáveis pode manter a produção sem causar danos significativos ao meio ambiente. Entretanto, não há uma relação fixa, constante e inalterada entre  $Y$  e  $DA$ , visto que esta relação, por ser variável ao longo do tempo, pode apresentar diferentes perfis entre os diversos países e, até mesmo, dentro de um mesmo país. Desta forma, a configuração da função  $\Omega(Y)$  subordina-se à composição da produção e da tecnologia empregada na produção, de tal forma que há países, cujas estruturas de demanda requerem produtos que envolvem mais recursos naturais e geram mais poluição que outros. Esses países geralmente têm economias fortemente baseadas em recursos naturais, como mineração e produção de energia a partir de combustíveis fósseis, que geram elevados níveis de poluição e produzem mais lixo na etapa do consumo. Por outro lado, existem tecnologias de produção que são mais eficientes na utilização e transformação dos recursos naturais em produtos e que causam menos poluição que outras.

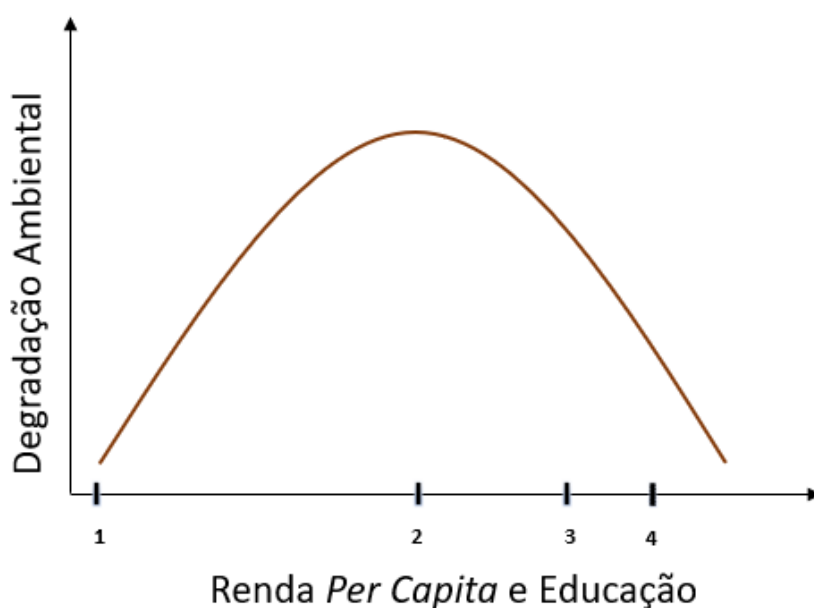
Destarte, para um país em um dado momento, a relação  $\Omega(Y)$  vai depender da composição da produção que a sociedade demanda e da tecnologia adotada para gerar essa produção (Mueller, 2012, p.33). Portanto, a relação entre o crescimento econômico, com sua escala de produção e os impactos ambientais não ocorre de

forma ocasional ou aleatória, e os fatores que forjam essa relação são, em grande parte, estabelecidos pelo estilo de desenvolvimento da economia, sendo este assunto discutido em maior detalhe em seções subsequentes.

## **2.5 Curva ambiental de Kuznets: origem, definição e críticas**

Simon Kuznets (1901-1985), economista e estatístico ucraniano, ganhador do Prêmio Nobel de Economia (1971), teceu uma interpretação que foi reconhecida como “empiricamente fundamentada” do crescimento econômico, cujo postulado ficou conhecido na literatura econômica como “hipótese do U invertido” ou “curva de Kuznets”. Originalmente, a hipótese do U invertido exprime, de forma geométrica, a relação entre crescimento econômico e desigualdade. Em outros termos, a curva de Kuznets é uma representação gráfica desenvolvida para expressar a hipótese de que o aumento da desigualdade de renda é uma tendência natural ocorrida nos primeiros ciclos do processo de desenvolvimento econômico, mas que se reverte com o passar do tempo, visto que as próprias forças de mercado se encarregariam de reduzir as desigualdades a partir do alcance de um certo patamar de renda per capita.

Por conseguinte, a curva de Kuznets ambiental é uma extensão da teoria da curva de Kuznets, porém, aplicada especificamente ao impacto ambiental causado pelo crescimento econômico. A curva de Kuznets ambiental foi proposta por Grossman e Krueger em 1995, que ocorreu no contexto de um estudo sobre os efeitos ambientais do Tratado de Livre Comércio da América do Norte (NAFTA). Desta forma, Grossman e Krueger adaptaram a ideia da curva de Kuznets original, que descreve a relação entre crescimento econômico e a desigualdade de renda, e propuseram que a poluição ambiental seguiria um padrão semelhante, ou seja, aumentando nas fases iniciais do desenvolvimento e diminuindo após atingir um certo nível de renda per capita. Esta relação entre renda per capita e degradação ambiental em formato de U invertido está ilustrada na Figura 4.

**Figura 4. Curva de Kuznets Ambiental**

**Fonte:** Grossman; Krueger, 1995

A princípio, a hipótese desta curva sugere que, em termos macroeconômicos, à medida que a economia cresce, sua escala crescente vai se tornando cada vez mais agressiva ao ambiente, até que encontra um limiar quando irão prevalecer os efeitos escala, composição e tecnológicos. Melhor dizendo, a curva de Kuznets ambiental preconiza que, em estágios iniciais de desenvolvimento econômico, a degradação ambiental tende a aumentar à medida que aumenta a atividade econômica – e isso acontece em função do aumento da produção industrial, da intensificação da urbanização, do uso dos recursos naturais e das emissões de poluentes – mas que, à medida que a economia continua a crescer e a sociedade alcançar maior consciência ambiental, a degradação ambiental atingirá um ponto máximo e começará a diminuir. Desta forma, conforme explica Borghesi (2002), essa relação seria decorrente da conjunção e conciliação de três efeitos distintos do desenvolvimento sobre a qualidade do meio ambiente: o efeito escala, o efeito composição e o efeito mudança tecnológica.

O efeito escala refere-se às maiores pressões sobre o ambiente resultante da elevação da escala da produção e, por conseguinte, do consumo; o efeito composição corresponde a mudanças na estrutura produtiva de um país (via de regra, pelo

aumento da renda per capita) que modifica e converte o seu potencial de impacto ambiental; e por fim, o efeito mudança tecnológica corresponde à adoção de tecnologias mais limpas e eficientes — decorrentes do nível de desenvolvimento alcançado e do aumento das pesquisas em tecnologia — que diminuem a intensidade de emissões por unidade de produto. De forma resumida, a curva de Kuznets ambiental propõe que a degradação ambiental aumenta à medida que os países se industrializam, porém, em um certo ponto de virada, a degradação começa a desacelerar e a cair.

Se verdadeira esta hipótese, estaria rechaçada a desconfiança da incompatibilidade existente entre crescimento econômico e conservação ambiental, pois, com a teoria da curva do U invertido, ao invés de anátema, o crescimento econômico passaria então a ser indicado como fator de mitigação dos problemas ambientais das economias no mundo. Por conseguinte, esse modelo fundamentou o ideário de que o crescimento econômico não constitui um problema para a questão da degradação ambiental, mas sua solução. Esta perspectiva que enfatiza a compatibilidade entre a produção crescente e ininterrupta de riqueza e a sustentabilidade ambiental tornou-se relevante na literatura econômica e ambiental neoclássica.

Entretanto, a curva de Kuznets ambiental tem sido alvo de muitas críticas, tanto teóricas quanto empíricas. Martinez-Alier (2015) expõe que esta hipótese é falha por diversos motivos, dentre eles, porque ela ignora que os fluxos de energia e materiais entre os países geram desigualdades e conflitos de distribuição ecológica e que:

em situações urbanas, à medida que cresce a renda, de início as emissões de dióxido de enxofre aumentam e depois diminuem, enquanto emissões de dióxido de carbono e resíduos domésticos aumentam com a renda. Se algo melhora e algo piora, uma reação do economista convencional pode ser de pôr pesos ou preços nesses efeitos, na busca da comensurabilidade. Entretanto, a incerteza e a complexidade dessas situações (dióxido de enxofre pode neutralizar o efeito estufa na temperatura), e o fato de que os preços das externalidades possam depender do resultado dos conflitos de distribuição ecológicos indica que as contas dos economistas podem somente convencer os crentes da mesma escola. (Martinez-Alier, 2015.p10).

Este autor ressalta ainda que, os países possuem diferentes perfis metabólicos<sup>28</sup>, isto é, possuem padrões distintos de produção e consumo de energia e materiais. Esses diferentes perfis geram conflitos ambientais distributivos entre os países ricos e os países pobres, que têm diferentes linguagens de valoração ambiental. Por conseguinte, o perfil metabólico de um país depende de diversos fatores, como o nível e estilo de desenvolvimento econômico, as questões geográficas/demográficas, as relações comerciais exteriores, as tecnologias empregadas e as diretrizes ambientais. Dito isto, pode-se inferir que um país industrializado tende a um perfil metabólico mais intensivo em materiais e energia que um país agrícola, da mesma forma, um país com elevada densidade populacional possui a tendência a ter um perfil metabólico mais concentrado do que um país com baixa densidade populacional.

Desse modo, Martinez-Alier faz duras críticas a essa e outras hipóteses neoliberais bem como à contabilidade econômica convencional que ignoram os custos ambientais e sociais dos processos metabólicos, onde declara que:

Minha crítica aceita que a pobreza pode ser uma das causas da degradação ambiental, porém a crença de que a pobreza pode ser eliminada pelo crescimento econômico geral, e não pela redistribuição, pode ser ecologicamente contraproducente. (Martinez-Alier, 1998, p.40).

Outros autores como Barbier (1997); Stern (2004) e Dinda (2004) aludem algumas das principais críticas que estão correlacionadas ao fato de que a curva de Kuznets ambiental não leva em consideração os limites ecológicos e que há a necessidade de uma abordagem multidisciplinar que integre a sustentabilidade nas dimensões econômicas, sociais e ambientais; ela ignora os efeitos globais da poluição, como as mudanças climáticas, que não dependem apenas da renda per capita de um país, mas também das emissões totais de GEE; não leva em conta os

---

<sup>28</sup> A concepção de perfis metabólicos está intrinsecamente ligada à sustentabilidade, visto que se referem ao entendimento da economia como um sistema embutido no ecossistema, ou seja, um subsistema aberto, completamente dependente dos recursos naturais e sujeitos às leis da termodinâmica. Isso implica em dizer que a economia não é um sistema isolado e não deve ser tratada como um sistema isolado, pois ela está profundamente interligada aos fluxos de energia e de materiais dos ecossistemas.

custos sociais e ambientais do crescimento econômico, como a exaustão dos ecossistemas, perda da biodiversidade e repercussões na saúde humana e; empiricamente a curva de Kuznets ambiental não é robusta, visto que os resultados nos diversos estudos variam de acordo com as medidas de poluição consideradas, com os métodos estatísticos escolhidos e com os dados utilizados.

Mesmo que a relação do “U” invertido fosse supostamente válida, uma política de estímulo ao crescimento a todo custo levaria a uma amplificação demasiada na degradação ambiental, visto que precisaria de muitos anos ou décadas até que um país pudesse alcançar o ponto máximo da curva de “U” invertido, que corresponde ao ponto de inflexão da renda per capita. Isto traria imensos danos aos ecossistemas naturais, já que, quanto maior a degradação acumulada antes do ponto de inflexão maiores serão as dificuldades para combater os efeitos dessa degradação quando a economia desse país estivesse na fase descendente do “U” invertido. Além de que, efetivamente, não há suporte suficiente para afirmar que, no longo prazo, ocorrerá uma diminuição da degradação ambiental à medida que o crescimento econômico ocorra. Por outro lado, enquanto as economias industrializadas do norte global conseguirem reduzir seus níveis de poluição e degradação, elas continuarão importando bens primários<sup>29</sup>, ou recursos ambientais das economias ditas “emergentes” ou “em desenvolvimento” para sustentá-las.

O relatório sobre Desenvolvimento e Meio Ambiente do Banco Mundial (1992) – embora reconhecendo que, sob determinadas condições, a expansão da escala produtiva para níveis avultados pode causar impactos ambientais desastrosos – foi enfático em acatar que o crescimento econômico é essencial para melhorar o bem-estar humano, respaldando que políticas, instituições e inovações tecnológicas apropriadas podem compatibilizar o crescimento com a conservação do ambiente, corroborando assim com as ideias de Solow e Stiglitz, já abordadas nesse estudo. O relatório não nega que o crescimento econômico implica em quantidades cada vez maiores de materiais e de energia e na liberação progressiva de resíduos para o

---

<sup>29</sup> No processo produtivo, são considerados bens primários os recursos extraídos diretamente da natureza, também chamados de matérias-primas. Eles incluem produtos agrícolas, minerais, recursos vegetais e animais.

ambiente, mas defende que esta relação, entre o aumento da escala econômica e degradação ambiental, somente seria direta se as tecnologias fossem inalteráveis e se não houvesse políticas ambientais compatíveis com o crescimento da produção.

Neste raciocínio, o crescimento econômico não figuraria em aumentos perturbantes de degradação ambiental já que poderia conciliar com a inovação tecnológica, com mudanças nas preferências dos consumidores, com a ecoeficiência<sup>30</sup> e com as regulações ambientais. No entanto, é importante notar que, embora havendo o esforço, por parte da Economia Neoclássica, em desacoplar o crescimento econômico da degradação ambiental, ainda assim existem limites biofísicos aos quais a eficiência e a inovação tecnológica não podem alcançar. A tecnologia pode ajudar a reduzir o impacto ambiental do crescimento econômico, mas há limites planetários críticos que não podem ser superados e que, portanto, precisam ser respeitados.

Sem embargo, o relatório de 1992 do Banco Mundial suscitou pesquisas sobre a hipótese especial, a Curva Ambiental de Kuznets, para dirimir dúvidas existentes na relação entre crescimento econômico e a degradação ambiental. Com este prognóstico, a Economia Neoclássica e suas perspectivas otimistas, atribuiu à Curva Ambiental de Kuznets — que ganhou grande popularidades na década de 1990 — não como possibilidade condicional dependente de vários fatores e para determinados contextos, mas como uma espécie de “lei universal”, sendo utilizada largamente, principalmente nos países do sul global, como justificativa para dissuadir os movimentos de ações ambientais, mantendo a intensiva exploração dos recursos naturais para assegurar os propósitos de acumulação.

---

<sup>30</sup> A ecoeficiência é um conceito que circula nos debates da atualidade. Tal conceito, visa a otimização dos recursos naturais minimizando os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, processo ou serviço, através da eficiência no uso de recursos (utilizando menos recursos naturais para produzir os mesmos ou melhores resultados); minimização de poluentes e resíduos e; inovação tecnológica.

## **2.6 Política das desigualdades combinadas: Divisão Internacional do Trabalho e a troca ecologicamente desigual**

A degradação ambiental, como evoca Leff (1994), acentuou-se nas regiões onde, historicamente, as formações sociais, sobretudo os ecossistemas tropicais, foram explorados pelos países industrializados. Freitas et al. (2012) argumentam que a mundialização do capital, por um lado, reproduziu e fortaleceu o "subdesenvolvimento" dos países chamados "em desenvolvimento", como efeito da Divisão Internacional do Trabalho (DIT), da troca ecologicamente desigual de mercadorias e da degradação ambiental, e, por outro, forneceu bases materiais para a acumulação de capital dos países "desenvolvidos".

Sobre a DIT, ressalta-se que, os estudos dos pensadores Adam Smith (1776), David Ricardo (1817) e Stuart Mill (1848), foram os principais que trataram do conceito de Divisão Internacional do Trabalho. Esses pensadores, desenvolveram a teoria econômica que explica como os países se especializaram na produção e no comércio de bens e serviços, de acordo com as suas vantagens comparativas (Erkinjon O'G'li, 2023). Essa teoria foi formulada no contexto do capitalismo industrial e do liberalismo econômico, no século XVIII e XIX. A DIT refere-se a um conceito que descreve a forma como as atividades produtivas foram distribuídas e organizadas entre os países, de acordo com suas "vantagens comparativas" e "vantagens competitivas" tendo como base a especialização das economias nacionais e a distribuição desigual de recursos entre os territórios, havendo a alocação de várias partes do processo produtivo para diferentes lugares no mundo.

A premissa dessa teoria implica que o comércio internacional é benéfico para todos os países envolvidos, pois permite a ampliação dos mercados e a divisão do trabalho de tal forma que todos saem ganhando, ou seja, parte do princípio de que o fruto do progresso técnico tende a se distribuir de maneira equitativa por toda a coletividade, seja através da queda dos preços, seja através do aumento correspondente da renda. Neste sentido, mediante o intercâmbio internacional, os países de produção primária conseguem sua parte desse fruto, de tal sorte que, não precisam industrializar-se. Ao contrário, sua menor eficiência os faria perderem irremediavelmente os benefícios clássicos do intercâmbio (Prebisch, 2000).

Dessa maneira, a DIT, descreve a forma como diferentes processos produtivos são distribuídos entre diferentes países e áreas econômicas, onde cada país tem uma forma específica de produção e desenvolvimento, criando divisões e hierarquias entre eles (Scott, 2022). Então, a economia mundial organiza-se através de ligações horizontais e verticais de uma DIT na qual os modos de integração e os âmbitos geográficos variam ao longo do tempo (Friedmann, 2021).

Historicamente, a DIT passou por três fases, que estão relacionadas com as mudanças no sistema econômico dominante e com a geopolítica mundial, cuja compreensão se faz importante para analisar como cada país está inserido na economia mundial, quais suas relações diplomáticas e políticas com outros países, quais as suas questões ambientais, sociais e culturais que envolvem a produção e o consumo no mundo globalizado (Santos, 2019; Oxford University Press, 2023).

Santos (2019) informa que, a primeira fase da DIT é baseada no colonialismo, e deu-se durante o período de expansão marítima dos europeus e o desenvolvimento do capitalismo comercial, que ocorreu entre os séculos XV e XVII. Nessa fase, as colônias forneciam matérias-primas e produtos agrícolas para as metrópoles, que em troca vendiam produtos manufaturados para elas. Havia uma relação de dependência e exploração entre as colônias e as metrópoles.

A segunda fase corresponde ao período de industrialização dos países europeus e o surgimento do capitalismo industrial, entre os séculos XVIII e XX. Nessa fase, os países industrializados continuaram a exportar produtos manufaturados para os países não-industrializados, que em troca forneciam matérias-primas e bens primários para eles. Havia uma divisão entre os países centrais, que dominavam a produção industrial, e os países periféricos, que dependiam da exportação de produtos primários (Prebisch, 2000).

A terceira fase começou a partir da segunda metade do século XX e continua até a atualidade, é baseada no capitalismo financeiro e na globalização. Nessa, houve uma reestruturação da DIT, com o surgimento dos chamados países emergentes ou em desenvolvimento, que passaram a se industrializar e a “competir” com os países industrializados. Estes últimos, passaram a investir cada vez mais em pesquisa, tecnologia e serviços, terceirizando a produção — principalmente aquelas de alto impactos ambientais — para os países “em desenvolvimento” ou periféricos, onde

encontraram leis ambientais frágeis, recursos naturais e mão-de-obra de baixo custo e em abundância.

Prebisch (2000), alude que a premissa da DIT é desmentida pelos fatos, pois não leva em conta as diferenças históricas, sociais, políticas e culturais entre os países, nem os efeitos da exploração, da dominação e da dependência que caracterizam as relações internacionais. A DIT, na prática, gera uma relação desigual entre os países centrais e periféricos, em que os primeiros se beneficiam mais do que os segundos, ao impor seus interesses e condições de mercado. Os países centrais se especializam na produção de bens e serviços de alta tecnologia e valor agregado, enquanto os países periféricos se especializam na produção de bens primários e de baixa tecnologia (produtos agrícolas, pecuários, pesqueiros e extrativistas), que possuem preços mais baixos e instáveis. Essa situação gera uma transferência de riqueza e de capacidade produtiva dos países periféricos para os países centrais, sem uma compensação adequada. Atualmente, há uma maior complexidade e diversidade na DIT, mas também uma persistência deste padrão histórico de desigualdades entre os países.

No tocante ao conceito de troca desigual, este é atribuído aos autores Arghiri Emmanuel, Samir Amin e André Gunder Frank, que nas décadas de 1960 e 1970 desenvolveram a teoria da dependência, que critica a DIT, apontando a exploração e a dominação dos países centrais sobre os países periféricos no século XX (Love e Prebisch, 1980; Prebisch, 2000). Essa teoria foi estruturada no contexto do capitalismo financeiro e do neocolonialismo. Tais ideias ainda são muito influentes nas discussões sobre crescimento, dependência econômica e desenvolvimento, pois ajudam a moldar a compreensão das desigualdades globais. Ruy Mauro Marini, Theotônio dos Santos, Vânia Bambirra, Fernando Henrique Cardoso e Enzo Faletto foram uns dos principais autores da teoria da dependência — inspirados nas obras de Lênin, Marx, Rosa Luxemburgo e Trótski — cujas análises foram desenvolvidas a partir da realidade econômica e social da América Latina no século XX (Kohan et al., 2022). Estes, divergiram entre si sobre as trajetórias e possibilidades de superação do subdesenvolvimento, sendo que uns defendiam a ruptura com o sistema capitalista enquanto outros defendiam o desenvolvimento dependente e associado.

Diante do exposto, a troca desigual é um conceito concernente à relação comercial entre países ou regiões que possuem o que se convencionou a chamar de

“diferentes níveis de desenvolvimento econômico e tecnológico”. Nessa relação, os países mais ricos conseguem impor seus interesses e condições de mercado, subjugando e se beneficiando dos países mais pobres. Elmar Atvater (2017) argumenta que a produção intensiva em mão-de-obra migra para países e regiões onde a mão-de-obra é barata, e os processos produtivos prejudiciais ao meio ambiente migram para locais onde as leis e as regulamentações ambientais são pouco exigentes e, portanto, menos dispendiosas.

Um dos aspectos fundamentais da troca desigual é a exportação de recursos esgotáveis, isto é, dos recursos naturais cuja renovação ocorre lentamente ou que simplesmente não se renovam, como o gás natural, o carvão, o petróleo, os minérios, dentre outros. Ao se exportar recursos esgotáveis, produz-se a troca desigual, visto que os preços de mercado infravaloram as necessidades futuras. Isso significa que os países exportadores desses recursos estão vendendo a um preço baixo algo que tem um valor muito alto para as gerações futuras, que poderão enfrentar a escassez ou a extinção desses recursos. Nas palavras de Martinez-Alier (1998, p. 245):

Ao se exportar recursos esgotáveis, produz-se uma troca desigual, pois os preços de mercado infravaloram as necessidades futuras [...] e na economia de mercado, normalmente chama-se de produção ao que é extração. Extrair significa tirar sem repor. Assim, o petróleo não é produzido, mas extraído e destruído.

Além de que, os países exportadores também padecem com os impactos ambientais e sociais da exploração desses recursos, como o desmatamento, a poluição, a perda de biodiversidade, os conflitos sociais e dependência econômica. Todavia, os países importadores desses recursos se beneficiam de um preço baixo e de uma valiosa fonte de matéria-prima e energia para a manutenção de seu desenvolvimento industrial e tecnológico. Entende-se que é recente a análise da história socioeconômica através de uma lente ecológica, mas é fundamental e premente considerar como as atividades econômicas afetam o meio ambiente. Sobre este aspecto, Martinez-Alier (1998, p.247) salienta que:

Há muitos exemplos que dão uma nova força à teoria do subdesenvolvimento como consequência da dependência que se expressa em intercâmbios desiguais, não apenas pela deterioração da relação de troca em termos de preço, mas também pelos diferentes “tempos de produção” intercambiados quando se vendem os “produtos” extraídos, de reposição longa ou impossível, em troca de produtos de fabricação rápida. No caso dos minerais,

é evidente que a exportação é mais rápida que a reposição: frequentemente o resultado é deixar unicamente um buraco físico, muito contaminado, juntamente com um buraco social na região.

O entendimento dos diferentes tempos de produção intercambiados e a imposição de “relações de valor” sobre novos territórios remetem novamente as ideias de Altvater (1995), que tratou das consequências do mercado global em regiões periféricas. Este autor teve a Amazônia como campo de pesquisa, realizando uma acurada investigação sobre as consequências do contato entre as economias capitalistas e as economias ainda não incorporadas pelo capitalismo, analisando as estruturas que a dinâmica do mercado global imprime na região amazônica. Altvater, também introduziu o conceito de “entropia social”, que retrata a acelerada apropriação dos recursos naturais na Amazônia, que promove danos ambientais, ampliando as contradições e degradação da sociedade local.

No que concerne a troca ecologicamente desigual, esta refere-se aos aspectos materiais do comércio internacional, onde há transferências assimétricas negligenciadas de recursos biofísicos, da periferia para áreas centrais do sistema econômico global, ou seja, os países do “centro” do sistema econômico global obtêm receitas significativamente maiores pelos recursos que eles exportam do que os países periféricos (Dorninger et al., 2021). Enfim, a *práxis* da economia convencional — cujo foco é exclusivo nos fluxos monetários — acarreta em desprezo pelas transferências desiguais de recursos biofísicos (terra, trabalho, materiais e energia) que estão incorporados em *commodities* e serviços comercializados entre países ou regiões com diferentes níveis de domínio econômico.

Deste modo, a exportação de recursos esgotáveis é, por excelência, uma forma de troca ecologicamente desigual, pois implica em uma transferência de riqueza e de capacidade de suporte ecológico dos países mais pobres para os países mais ricos, sem uma compensação adequada, se é que pode ser possível haver uma contrapartida compatível ou justa para esse tipo de transação, que negligencia, dentre tantos aspectos, os aspectos materiais dos fluxos de comércio internacional. Em última instância, a troca ecologicamente desigual também compromete a sustentabilidade do planeta, na medida em que acelera a produção e o consumo, que promovem a degradação dos recursos naturais, aumentando os impactos ambientais

nos ecossistemas, a emissão de GEE e as mudanças climáticas (Martinez-Alier et al., 2016; Givens et al., 2019).


Sumariamente, através das relações coloniais, da DIT e da cooperação internacional, foram difundidos e consolidados no mundo as práticas, ideologias e os modelos tecnológicos que atendem satisfatoriamente aos interesses dos países ricos (Austin, 2023). Do outro lado, os países pobres, sofrem de forma desproporcional com os impactos socioeconômicos e ambientais gerados por este modelo de desenvolvimento, com as políticas de desigualdades combinadas, cuja acumulação ocorre para os países ricos, de forma arbitrária, em detrimento das sociedades mais vulneráveis, da diversidade e da sustentabilidade ambiental (Austin, 2023; Dorninger, 2021).

Henri Acselrad (2009), em sua obra “O que é Justiça Ambiental”, menciona o episódio ocorrido às vésperas da Eco 92, que ficou conhecido como “memorando Summers”, onde o economista Lawrence Summers — que até aquele momento ocupava o cargo de economista-chefe do Banco Mundial — escreveu um memorando de circulação restrita que acabou circulando fora do Banco Mundial até chegar na redação do jornal “*The Economist*”. No documento, Summers questiona se o Banco Mundial não deveria incentivar mais a migração de indústrias poluentes para países periféricos, uma vez que, nos países pobres a expectativa de vida mais baixa de seus habitantes os tornaria menos suscetíveis aos impactos negativos da produção industrial e que, além disso, a morte de trabalhadores destas localidades teria custos significativamente mais baixos do que em nações ricas (New York Times, 1992).

Analisando os principais pontos do memorando, percebe-se que, em congruência com a “*práxis*” da economia dominante, Summers defendeu que seria mais “eficiente” transferir indústrias poluentes para países com salários mais baixos e de menor expectativa de vida. Sua lógica era que os custos da poluição seriam menores nesses países, já que a perda de bem-estar humano seria “menos valiosa”. Argumentou que os custos da poluição não seguem uma relação linear, ou seja, os impactos iniciais do aumento da poluição teriam um custo relativamente baixo. Além disso, apontou que a demanda por um ambiente limpo é maior em países ricos e que certas regiões “não desenvolvidas”, por serem subpovoadas, estariam “subpoluídas” e, segundo essa lógica, a qualidade do ar nesses locais seria “ineficientemente alta” em comparação com as grandes metrópoles do mundo.

O memorando Summers foi alvo de duras críticas por parte de ambientalistas e defensores dos direitos humanos, que o acusaram de reforçar ideias racistas e colonialistas ao sugerir que a vida de pessoas em países em desenvolvimento teria menor valor. Isso reacendeu discussões sobre justiça ambiental, evidenciando como os impactos negativos do crescimento econômico costumam recair sobre comunidades pobres e marginalizadas.

Ante o exposto, é indubitável afirmar que a economia está inserida em ecossistemas reais e limitados, bem como em relações de poder socialmente construídas, onde, historicamente, os países mais pobres sofrem de forma arbitrária e desproporcional com os impactos provenientes do crescimento da produção, da troca desigual, da degradação ambiental, das mudanças climáticas — apesar de contribuírem menos para as emissões globais de GEE — e de toda sorte de coisas que o paradigma da economia do crescimento neoclássico impõe nas economias mais vulnerabilizadas. Desta forma, a busca por novos modelos de produção deve considerar a justiça ambiental e climática, sendo de grande relevância para o alcance de um futuro sustentável e equitativo, onde a proteção do ambiente natural e das sociedades mais vulnerabilizadas seja uma prioridade global.

An aerial photograph of a tropical coastline. A wide, light-colored river or lagoon flows from the top left towards the bottom right. The river is bordered by dense, lush green tropical forest. The sky is a pale, hazy blue, suggesting a bright, sunny day. The overall scene is serene and natural.

### **3. A ECONOMIA DO MEIO AMBIENTE COMO RESPOSTA À CRISE AMBIENTAL**

Fazer as leis da economia se conformarem às leis biofísicas, não importando quão trivialmente verdadeiras sejam as últimas, não é tarefa trivial. (Herman Daly, 2007, p.3).

### 3.1 O conceito de Desenvolvimento Sustentável como moldura para a Economia do Meio Ambiente

A análise da disciplina Economia do Meio Ambiente, com suas principais escolas de pensamento, está fundamentada em uma moldura baseada no conceito de Desenvolvimento Sustentável. Em vista disso, são examinados, neste estudo, os principais elementos relacionados a este tema.

A ideia de sustentabilidade tem duas raízes. A primeira vem da biologia, através da ecologia, e se refere à habilidade dos ecossistemas de se recuperar e se reproduzir (resiliência) diante de agressões que podem ser humanas, como o uso excessivo de recursos naturais, desmatamento, incêndios, dentre outros; ou naturais, como terremotos, tsunamis, fogo, dentre outros (Sachs, 2000). A segunda origem está na economia, onde a sustentabilidade é usada como adjetivo para o desenvolvimento. Isso ocorre devido ao reconhecimento crescente ao longo do século XX de que o padrão de produção e consumo em crescimento no mundo, especialmente no último quartel desse século, não é sustentável no longo prazo.

Redclift, (2010) argumenta que as questões ambientais, com suas complexidades, emergem no final dos anos de 1960 e começo da década de 1970, como problemáticas contemporâneas que compartilham o sintoma de uma crise civilizatória. Henrique Leff (2011) aponta que esta conjuntura se manifesta através da intensificação da escala da produção, pela difusão do fracionamento do conhecimento e pela intensa degradação ambiental. Este contexto é, notadamente, marcado pelo logocentrismo<sup>31</sup> da ciência moderna e pelo transbordamento da economização de um mundo guiado pela racionalidade tecnológica e pelas leis do livre mercado.

Convém frisar que, até meados do século XX, prevalecia fervorosamente, na análise econômica, a hipótese tênue de dádivas gratuitas da natureza. O bem-estar global não parecia ser ameaçado pelos impactos ambientais oriundos da escala da economia. Apontava-se sim para danos ambientais locais, em vários cantos do

---

<sup>31</sup> Logocentrismo concerne a um termo originário da teoria da desconstrução, cunhado pelo filósofo alemão Ludwig Klages, nos anos de 1920 e refere-se à tendência, no pensamento ocidental, de se colocar a palavra ou a razão (logos) como o centro de qualquer discurso ou texto.

mundo, mas estes não eram percebidos como impactos ambientais provenientes da larga escala produtiva, tampouco que pudessem ameaçar o bem-estar da humanidade. Nitidamente, o sistema de produção não cogitava que o crescimento e expansão da economia mundial viessem a ser limitados pela natureza. Acreditava-se que os recursos ambientais, dada a sua enorme abundância, nunca iriam se exaurir. Primava a ideia mítica da cornucópia, cujo usufruto de sua prodigalidade seria ilimitado e, em vista disso, acreditava-se que o crescimento econômico poderia ocorrer infinitamente e sem restrições dos ecossistemas (Hornborg, 2003).

Além disso, acostumou-se a recorrer ao desenvolvimento tecnológico para tentar reverter os danos locais, provenientes dos despejos no ambiente de dejetos e resíduos industriais. Dessa forma, principalmente nas sociedades industrializadas, as questões sobre sustentabilidade ficavam limitadas a âmbitos locais e em interesses próprios, visto que é perceptível que a relevância dos impactos ambientais causados pela atividade econômica não se dá pelo que ocorre com a natureza em si, mas sim pelas consequências desses impactos que resultam em desconforto e diminuição da qualidade de vida dos indivíduos desses contextos. Ademais, o pensamento da economia dominante considera remota a possibilidade de que o esgotamento de um recurso natural não-renovável possa vir a limitar o crescimento da economia.

Não obstante, em face à percepção crescente de que o padrão de produção e consumo em expansão nas diversas economias do mundo não tem possibilidade de perdurar, hasteou-se a noção de sustentabilidade, sob o lume da finitude dos recursos naturais e de sua gradativa depleção. Neste intento, são afervoradas críticas e pareceres à economia tradicional, na busca de uma nova ética a ser adotada por empresas e governos, que supere a doutrina produtivista, possibilitando a percepção de que a economia não é um fim em si mesma, e sim um meio para promover o bem-viver, a dignidade humana, a justiça social com a preservação ambiental.

Desta forma, após mais de uma década de intensas discussões acerca dos problemas ambientais como resultante das atividades econômicas, a ONU instituiu, em 1983, a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD). O objetivo primordial era a realização de um exame minucioso da problemática em questão e a formulação de estratégias voltadas à implementação do desenvolvimento sustentável, antes do início do século XXI. Buscava-se, destarte, identificar meios de harmonizar o crescimento econômico com a preservação do meio ambiente,

buscando promover, ao mesmo tempo, os ajustes dos atuais padrões distributivos distorcidos.

Nessa perspectiva, o conceito de Desenvolvimento Sustentável, que surgiu a partir do conceito de ecodesenvolvimento proposto na conferência de Estocolmo em 1972, foi difundido e popularizado no final da década de 1980, após a publicação do relatório intitulado *Our Common Future*, também conhecido como Relatório Brundtland, que foi elaborado pela comissão liderada pela primeira-ministra da Noruega, Gro Harlem Brundtland. O relatório alerta para os riscos da degradação ambiental e da pobreza para a segurança mundial, e propunha uma agenda global para a sustentabilidade, baseada na interação entre as dimensões econômica, social e ambiental do desenvolvimento. Segundo a CMMAD, desenvolvimento sustentável é aquele capaz de suprir as necessidades dos seres humanos da atualidade, sem comprometer a capacidade do planeta para atender as futuras gerações. Portanto, é o desenvolvimento que não esgota os recursos, tornando-os, se possível, perenemente disponíveis (Brundtland, 1987).

Com efeito, o conceito de Desenvolvimento Sustentável foi consolidado na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (CNUMAD), realizada no Rio de Janeiro em 1992, também conhecida como Rio-92. Nessa conferência, foram adotados documentos importantes para a promoção da sustentabilidade, como a Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, a Agenda 21, a Convenção sobre Diversidade Biológica e a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), onde esta última promove anualmente, com seus países signatários, as Conferências das Partes<sup>32</sup> (COPs), com o objetivo de discutir e implementar medidas para reduzir as emissões de GEE e mitigar os efeitos de mudanças climáticas. A CNUMAD também lançou as bases para o estabelecimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que são 17 metas globais para alcançar o desenvolvimento sustentável até 2030 (CMMAD, 1987).

---

<sup>32</sup> A COP30 será realizada na cidade de Belém, no Pará, Brasil, entre os dias 10 e 21 de novembro de 2025. Será a primeira vez que uma Conferência das Partes ocorrerá na Amazônia, destacando a importância da região para as questões ambientais contemporâneas.

A partir do relatório Brundtland — que reconheceu que há um limite para o uso dos recursos naturais e sobrelevou a importância de preservá-los — as demandas sobre crescimento econômico, desenvolvimento e sustentabilidade passaram a ser, progressivamente, pautas das grandes discussões sociais e políticas, tanto em nível nacional quanto internacional. Por exemplo, o relatório inspirou a criação da Comissão Nacional sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento do Brasil, que elaborou um documento chamado Nossa Própria Agenda, que propunha diretrizes para o desenvolvimento sustentável no país. Além disso, o relatório contribuiu para a formação de uma consciência global sobre os desafios e as oportunidades do desenvolvimento sustentável, que se reflete na participação da sociedade civil, dos movimentos sociais, das organizações não-governamentais, dos setores produtivos e dos meios de comunicação nas questões ambientais (Japiassú; Guerra, 2017).

Em vista disso, a tomada de consciência da crise ambiental nas últimas décadas tem despertado a atenção de um número cada vez maior de Governos e entidades, com o entendimento de que a relação humana com a natureza se tornou cada vez mais destruidora e, desse modo, os impactos ambientais causados pelo crescimento econômico com suas atividades antrópicas são inquietações que circundam a questão ambiental. E esta, por seu turno, diz respeito à valores, ideias e projetos que norteiam as ações humanas em relação à conservação dos ecossistemas, suscitando mudanças epistemológicas e novas lógicas de produção que estejam assentadas na sustentabilidade ecológica e na equidade social. A esse respeito, Nascimento (2010) argumenta que:

Nos embates ocorridos nas reuniões de Estocolmo (1972) e Rio (1992), nasce a noção de que o desenvolvimento tem, além de um cerceamento ambiental, uma dimensão social. Nessa, está contida a ideia de que a pobreza é provocadora de agressões ambientais e, por isso, a sustentabilidade deve contemplar a equidade social e a qualidade de vida dessa geração e das próximas. A solidariedade com as próximas gerações introduz, de forma transversal, a dimensão ética.

Por conseguinte, a crise ambiental questiona os paradigmas normatizados, demandando novas metodologias capazes de orientar um processo de reconstrução do conhecimento que permita realizar uma análise multifacetada e integrada da realidade. Então, diante de uma crise de conceitos e de projetos, impera a necessidade da construção de um novo paradigma, alicerçado numa consciência

coletiva de mudança de pensamentos e de ações que possam efetivamente transformar o panorama atual, visto que “a crise ambiental é a crise do nosso tempo. O risco ecológico questiona o conhecimento do mundo” (Leff, 2002).

Nesta lógica, a crise ambiental — que surge como acumulação de externalidades do crescimento econômico — escancarou também a crise do saber, que advém da fragmentação e matematização dos diversos saberes (Escobar, 2010). Assim sendo, o caminho mais exitoso seria lançar mão de outras formas de pensar e de produzir, para frear as pressões ecossistêmicas sobre as quais o ser humano tem controle, e para assegurar que a natureza continue a ser resiliente, impedindo que pontos de ruptura<sup>33</sup> perigosos sejam alcançados.

Mueller (2022) aponta que a hipótese das dádivas gratuitas da natureza e da livre disposição de resíduos e rejeitos é uma suposição comum tanto na Economia Neoclássica quanto na Teoria Marxista, nos seus ramos convencionais. Na Economia Neoclássica, essa hipótese é refletida na forma como os recursos naturais e a capacidade do meio ambiente de absorver resíduos são frequentemente tratados como infinitos. Isso significa dizer que a natureza não é considerada como fator limitante na produção econômica e no crescimento. Na Teoria Marxista, essa hipótese é refletida na ênfase na produção e no trabalho humano como fontes de valor, enquanto os recursos naturais e a capacidade do meio ambiente de absorver resíduos são negligenciados.

A esse respeito, Leff (1994) infere que as sociedades “modernas”, tanto capitalistas quanto socialistas são produtivistas e antiecológicas, visto que, dentro de suas racionalidades econômicas a natureza não é considerada e, portanto, são sociedades insustentáveis. Para este autor, a busca por uma racionalidade ambiental deve ter como objetivo detectar aqueles elementos que possam constituir a base de novas possibilidades de estratégia produtiva, onde a natureza esteja integrada à

---

<sup>33</sup> O Relatório divulgado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) em 2019, define um ponto de ruptura como: Um nível de mudança nas propriedades do sistema climático terrestre além do qual ele pode se reorganizar e não retornar ao estado inicial, mesmo se os causadores da mudança forem diminuídos. Para o sistema climático, o termo se refere a um limite crítico no qual o clima global ou regional muda de um estado estável para outro. Os pontos de ruptura também são usados quando se referir ao impacto: o termo pode implicar que um ponto de ruptura está prestes a ser alcançado em um sistema natural ou humano.

lógica da produção. Por conseguinte, a sustentabilidade ambiental estaria visceralmente vinculada à satisfação das necessidades básicas das populações e essas estariam associadas aos padrões de uso dos recursos naturais, com seus processos de produção e de consumo sustentáveis.

A brilhante discussão filosófica em torno da crise ecológica associada ao industrialismo capitalista, que se desenvolveu no final do século XX, expunha como parte do problema uma crise de paradigmas do conhecimento. Insistia, em consequência, na necessidade teórico-metodológica do holismo e da complexidade para a observação crítica do mundo ameaçado pelo poder destrutivo da razão redutora e mecânica potenciada pelo cartesianismo. (Costa, 2012).

Diante da emergência climática que a humanidade está submetida, deve haver a tomada de consciência e a percepção de que, para frear o colapso ambiental, a ciência econômica precisa considerar novos valores além do monetário e investigar outros aspectos, estudos e métodos para responder aos desafios ambientais sistêmicos (Howarth; Norgaard, 2017). Para isso, impõe-se a necessidade de reorientação da ciência, onde, notadamente, a fragmentação da visão mecanicista mostrou-se inapta para a compreensão dos problemas colocados pela complexidade do mundo atual, ou seja, a análise por meio das séries causais isoláveis e o tratamento por partes mostraram-se insuficientes para atender aos problemas trazidos pela tecnologia moderna (Von Bertalanffy, 1976).

Assim, a análise da Economia do Meio Ambiente, subsidiada pelo conceito de desenvolvimento sustentável, procura direcionar seus esforços na busca de modelos de desenvolvimento que possam ser ecologicamente viáveis, economicamente eficientes e socialmente justos, incentivando de um lado, o estudo de instrumentos econômicos capazes de internalizar externalidades ambientais vislumbrando promover a sustentabilidade e, de outro integrar princípios ecológicos, econômicos e sociais para garantir o bem-estar das gerações presentes e futuras, dentro dos limites biofísicos do planeta.

## **3.2 Economia do Meio Ambiente: Economia Ambiental Neoclássica e Economia Ecológica**

Conforme já explicado, o processo evolutivo que levou a inclusão da componente ambiental na teoria econômica foi consequência de três eventos fundamentais: a intensificação da poluição nas economias industrializadas; a crise do petróleo da década de 1970 e o relatório do Clube de Roma em 1972. Esses acontecimentos estimularam os debates referentes as relações entre o sistema econômico e o ambiente natural e no campo das ciências econômicas foi impulsionada a criação da disciplina Economia do Meio Ambiente, cujas correntes teóricas mais relevantes são: a Economia Ambiental e a Economia Ecológica.

É apropriado reafirmar que, dependendo do horizonte temporal a considerar, bem como da perspectiva de análise — que se refere à abordagem de uma dada vertente de pensamento econômico — consegue-se realizar uma análise que considere desde o tratamento exclusivo dos fenômenos que ocorrem dentro da caixa do sistema econômico, até uma abordagem mais ampla, que abarque as relações entre natureza e economia de forma multidisciplinar e holográfica. Esta reflexão é de grande relevância para o discernimento das diferentes formas de abordar os problemas ambientais sob a ótica econômica, visto que as diferentes perspectivas pertinentes a cada escola econômica têm seus próprios conceitos, pressupostos, métodos e objetivos.

### **3.2.1 A perspectiva ambiental integrada à Ciência Econômica**

Primordialmente, faz-se necessário compreender o princípio fundamental de que as atividades econômicas e a qualidade de vida nas sociedades humanas são inexoravelmente dependentes dos bens e serviços fornecidos pelos ecossistemas naturais. Ou seja, a existência humana e suas atividades produtivas dependem dos benefícios que mantém a vida e que são fornecidos pelos elementos que compõem a natureza. Por isso, é crucial que a teoria econômica incorpore em seu arcabouço teórico as interconexões existentes entre sistema econômico e ecossistemas, buscando compreender e visibilizar o funcionamento tácito subjacente aos processos

naturais de suporte à vida, bem como as implicações que as atividades humanas têm sobre os sistemas naturais.

Neste trajeto, a Economia do Meio Ambiente surge como um campo da economia que estuda as questões ambientais e busca formas de solucionar ou mitigar os problemas causados pelas atividades humanas sobre os recursos naturais. Como já ressaltado, a Economia do Meio Ambiente começou a se firmar como campo de estudo a partir da década de 1960, especialmente na Europa e Estados Unidos, como resposta ao crescente impacto ambiental da industrialização e ao surgimento de movimentos ecológicos; sendo consolidada no final da década de 1970, como resposta a falha do *mainstream* econômico, que não deu a devida importância à conservação do capital natural, enquanto recurso finito.

Com este intuito, as duas principais correntes de pensamento da Economia do Meio Ambiente, a Economia Ambiental e a Economia Ecológica, buscam analisar, as relações entre o sistema econômico e o meio ambiente, situando, cada uma a sua maneira, as formas pelas quais o crescimento econômico impacta os ecossistemas naturais.

### **3.2.2 As hipóteses ambientais da Economia do Meio Ambiente**

É perceptível, quando analisadas, que as correntes de pensamento na Economia do Meio Ambiente apresentam diferenças significativas no que concerne as suas hipóteses. Cada hipótese corresponde as premissas ou suposições sobre como o ambiente funciona e como ele afeta e é afetado pela atividade econômica, com suas diferentes perspectivas, cuja análise leva em conta os aspectos teóricos, práticos, metodológicos e éticos. As duas hipóteses ambientais são: a hipótese tênue e a hipótese aprofundada. Estas, correspondem as duas maneiras de abordar a relação entre a economia e a natureza.

A hipótese ambiental tênue está fundamentada na ideia de que os recursos naturais não representam um problema para o crescimento econômico no longo prazo, pois podem ser substituídos por capital tecnológico e humano. A hipótese ambiental aprofundada é baseada na ideia de que os recursos naturais são essenciais para o bem-estar humano e que, portanto, o crescimento econômico deve ser limitado

para que seja preservado o equilíbrio ecológico, garantindo o bem-estar para as gerações atuais e futuras.

A esse respeito Mueller (2012, p.139) explica que a hipótese ambiental tênue, corresponde a de um ambiente natural benigno, passivo, que pode incomodar se agredido, mas que é basicamente estável. A hipótese ambiental aprofundada, corresponde a de um ambiente natural dotado de certa fragilidade, passível de sofrer alterações potencialmente desestabilizadoras em decorrência de pressões antrópicas cumulativas. Neste aspecto, a aceitação da hipótese ambiental tênue admite que a análise se volte para fenômenos que têm lugar dentro da caixa do sistema econômico por meio da determinação de relações superficiais entre o sistema econômico e seu meio externo. Nesta, os impactos ambientais são de interesse, não pelo que possa estar ocorrendo com os ecossistemas propriamente dito, já que este é passivo e dotado de reversibilidade, mas pelo reflexo de alterações ambientais decorrentes do funcionamento da economia sobre o bem-estar dos indivíduos em sociedade.

Por outro lado, a aceitação da hipótese ambiental aprofundada — que considera o ambiente natural susceptível de sofrer alterações potencialmente desestabilizadoras decorrentes de pressões antrópicas cumulativas — corrobora com a compreensão de que a economia deve se adaptar às características e aos limites da natureza, e não o contrário. Esta hipótese também aponta que o crescimento econômico deve ser orientado para o bem-estar humano com respeito aos limites biofísicos e não para a acumulação de riquezas a todo custo.

Tendo em vista o entendimento das hipóteses ambientais tênue e aprofundada, Mueller (2012) faz um cruzamento dos elementos que compõem a natureza dessas duas hipóteses, levando a uma classificação das principais correntes de pensamento da Economia do Meio Ambiente. O quadro 1 aponta a ênfase que cada vertente de pensamento da Economia do Meio Ambiente atribui às três dimensões básicas do Desenvolvimento Sustentável. Na horizontal estão apresentadas as hipóteses ambientais de suas análises. A partir do cruzamento desses componentes sobressaem as seguintes vertentes de pensamento:

**Quadro 1.** Classificação das principais correntes de pensamento da economia do meio ambiente

<b>Hipótese ambiental</b>  <b>Foco predominante de análise</b>	<b>Meio ambiente neutro, passivo e secundário na economia, que pode ser substituído por outros recursos ou tecnologia</b>	<b>Meio ambiente essencial, finito e insubstituível na economia. Tende a reagir em face de fortes intervenções antrópicas</b>
Análise centrada em economia de mercado de países ou regiões desenvolvidos	Economia Ambiental Neoclássica	
Análise centrada na capacidade das gerações futuras de atender às suas necessidades (perspectiva de muito longo prazo)		Economia Ecológica e variantes da “Economia da sobrevivência”
Análise centrada em aspectos da questão ambiental em países ou regiões pobres	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variante cepalina ambiental</li> <li>• Fundamentalismo socioambiental</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O ambientalismo dos pobres de Martinez-Alier</li> <li>• Variante de marxismo “verde”</li> </ul>

**Fonte:** Mueller (2012, p.141), adaptado pela autora.

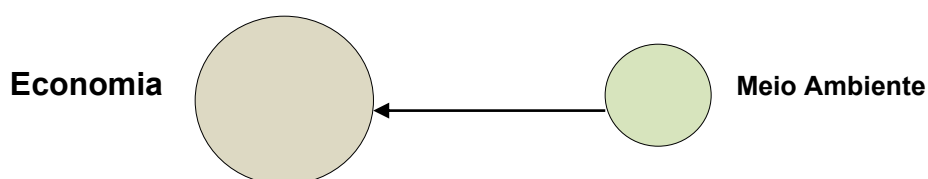
A escolha entre as hipóteses ambientais ténue e aprofundada reflete as diferentes visões e valores sobre a relação entre economia e os ecossistemas, e influenciam as duas abordagens tratadas por este estudo, que são as da Economia Ambiental Neoclássica e da Economia Ecológica. Em vista disso, a próxima parte deste estudo irá oferecer importantes considerações sobre os enfoques teóricos e metodológicos destas duas vertentes da Economia do Meio Ambiente, por serem as duas principais correntes que versam sobre a relação natureza e economia, evidenciando também as principais diferenças existentes entre elas.

### 3.3 Enfoques Teóricos e Metodológicos nas Visões da Economia Ambiental Neoclássica e da Economia Ecológica

#### 3.3.1 Economia Ambiental Neoclássica

Esta corrente de pensamento, tem fundamentação na economia neoclássica, e por conseguinte, é tida como a principal reação ou resposta desta escola à problemática ambiental. A Economia Ambiental Neoclássica representa uma explicação aos questionamentos da sociedade sobre o papel dos ecossistemas na dinâmica econômica e no bem-estar social, dado que sua pauta central sempre foi assegurar o máximo benefício dos recursos naturais, e para isso, o uso da tecnologia como vetor de crescimento econômico está imanente em seu postulado. Com efeito, a Economia Ambiental é uma tentativa de incorporação da problemática ambiental por parte do *mainstream* econômico, fazendo um ajuste na teoria neoclássica, na forma de inclusão do componente ambiental como apêndice do sistema econômico dominante, conforme ilustra a Figura 5.

**Figura 5 - O meio ambiente como apêndice do sistema econômico**



Fonte: Cavalcanti (2010).

Vale enfatizar que, a componente ambiental somente passa a fazer parte dos estudos neoclássicos, como parâmetro importante de análise, na medida em que esta componente, a ambiental, impõe limites ao crescimento econômico. Então, nesta corrente, a teoria econômica ortodoxa busca responder e tratar os problemas resultantes da produção e de seus impactos nos indivíduos. A Economia Ambiental começa a focalizar suas análises no grau de comprometimento da biodiversidade, em

condições de uso dos recursos naturais e em critérios de sustentabilidade, buscando encontrar, como é sua *práxis*, preços apropriados para a alocação ótima dos recursos disponíveis, realizando a análise de custo mínimo e máximo benefício.

Nesta perspectiva, esta corrente parte da hipótese tênue, onde o meio ambiente é considerado um recurso escasso que deve ser alocado de forma ótima pelo mercado através da internalização das externalidades. Atribui preço ao meio ambiente, de maneira a refletir o seu valor na economia para estimular os agentes econômicos a reduzirem os impactos causados nos ecossistemas. A hipótese ambiental tênue também implica que o meio ambiente não afeta o funcionamento do sistema econômico e que os danos ambientais que sofre podem ser compensados ou mesmo revertidos através de ajustes de preços ou de tecnologias inovadoras.

À vista disso, a Economia Ambiental Neoclássica responde à crise ambiental por meio de mecanismos de mercado, instrumentos econômicos e valoração dos recursos naturais. A ideia central desta escola é integrar as preocupações ambientais ao sistema econômico tradicional, buscando considerar os custos e benefícios associados ao uso dos recursos naturais. Aqui estão algumas das principais formas de resposta:

**i) Tentativa de internalização de Externalidades:** A Economia Ambiental Neoclássica propõe que os custos ambientais, como poluição, sejam incorporados no preço dos bens e serviços. Isso pode ser feito por meio de impostos, taxas ou sistemas de "*cap and trade*", como o sistema de mercado de carbono<sup>34</sup>.

**ii) Valoração Monetária do Meio Ambiente:** atribuindo valor econômico a bens ambientais, como florestas e serviços ecossistêmicos, na tentativa de demonstrar sua importância para as decisões de mercado.

---

<sup>34</sup> O mercado de carbono é um sistema projetado para tentar reduzir as emissões de GEE por meio de mecanismos econômicos. Ele propõe funcionar atribuindo um valor monetário ao carbono emitido por empresas ou países, incentivando a redução de emissões. Na perspectiva da Economia Ecológica, o mercado de carbono é considerado uma solução limitada e insuficiente para abordar a crise climática de maneira holística. Visto que, este sistema reduz a complexidade ambiental a valores monetários, operando com mecanismos limitados pela lógica do mercado, perpetuando desigualdades entre os países do Norte e do Sul Global.

**iii) Uso de incentivos Econômicos:** Como políticas baseadas em créditos fiscais, subsídios ou outros incentivos financeiros que visem encorajar práticas “mais sustentáveis” por indivíduos e empresas.

Observa-se que esta vertente prioriza o crescimento econômico que favoreça o bem-estar social, e preocupa-se concomitantemente com a conservação da quantidade de recursos naturais suficientes para manter e perpetuar a economia de mercado. Parte do pressuposto de que a pressão de concorrência, crescimento econômico e prosperidade levariam automaticamente ao uso racional dos recursos naturais, ao progresso tecnológico e às novas necessidades de consumo compatíveis com as exigências do ambiente (Godard, 1997; Frey, 2001). Tais ideias são convergentes com a hipótese do U invertido ou Curva ambiental de Kuznets (assunto tratado na seção 2.5, deste estudo).

Como já mencionado a Economia Ambiental Neoclássica, enquanto concepção da economia dominante, detém caráter reducionista, trata o meio ambiente como essencialmente neutro e passivo, debruça suas atenções aos efeitos dos impactos ambientais causados pela atividade econômica no que diz respeito ao bem-estar dos indivíduos em sociedade. Sobreleva a problemática das quantidades de matéria e energia propondo a utilização ótima, produtivista e racional dos recursos finitos, buscando formas para postergar seu esgotamento para a manutenção dos interesses industriais. Esta vertente não nega que os impactos, quando agudizados, podem causar danos significativos ao ambiente, entretanto defende que tais danos podem ser prontamente restaurados através de medidas de estímulo de mercado no sentido de supressão dos fatores que os causaram.

Nesta lógica, o importante é sustentar o nível de consumo per capita indefinidamente e, para isso, deve haver o aumento na participação relativa do capital na produção quando houver aumento de preço do recurso natural em relação ao preço do capital. Ou seja, deve haver a substituição de recursos naturais por capital e também deve haver continuamente o estímulo às mudanças tecnológicas que poupem recursos naturais. Esta concepção está intimamente integrada no denominado Paradigma Mecânico-Químico-Genético (PMQG), que postula a necessidade de simplificação da natureza nos sistemas agrícolas, cuja lógica extensiva e

homogeneizadora configura o seu procedimento base para garantir ganhos de produtividade, aumento da produção e rendimentos de escala.

Um paradigma tecnológico refere-se a padrões de solução de problemas tecnológicos que perseguem uma noção de progresso ou, “uma promessa de sucesso” em uma ou mais trajetórias. Tais trajetórias orientam a busca de desenvolvimento tecnológico a partir de critérios de seleção influenciados por fatores econômicos, sociais, políticos, culturais e ecológicos. Como estruturas cognitivas que são, os paradigmas tecnológicos representam “camisas-de-força” que conformam um padrão de formulação de perguntas e de problemas tecnológicos seguidos de um padrão de procedimentos para solucioná-los, que findam por influenciar caminhos de políticas. (Dosi, 2006, apud Folhes; Fernandes, 2022).

Folhes e Fernandes (2022) esclarecem que, o PMQG se refere a um modelo de desenvolvimento tecnológico utilizado na agricultura (imaneente aos postulados da economia neoclássica), que se baseia na aplicação de princípios e técnicas da mecânica, da química e da genética para aumentar a produtividade e a rentabilidade dos sistemas agrícolas. Informam que esse paradigma surgiu na Europa e nos Estados Unidos no século XIX, como resultado do avanço científico e industrial dessas regiões e foi difundido em várias outras regiões do mundo, inclusive na Amazônia, como uma forma de garantir o crescimento econômico na promessa de também combater a pobreza. Os autores apontam ainda que, o PMQG tem como características principais a simplificação da natureza, a homogeneização das espécies, a padronização dos processos, a intensificação do uso de insumos externos, a especialização produtiva, a dependência tecnológica e a concentração de poder.

Este paradigma, como padrão tecnológico mundialmente dominante, sustenta-se pela eficácia sancionada no “controle da natureza” para a adequação e atendimento das necessidades industrialistas. Sobre isso, Rachel Carson, em seu livro *Silent Spring* (1962) manifesta que “o controle da natureza é uma frase concebida em arrogância, nascida da idade neandertal da biologia e filosofia, quando supunha que a natureza existe para a convivência do homem”. Sem embargo, o PMQG, enquanto padrão tecnológico, prevalece nos mercados, corroborado com os interesses do capital, onde as soluções se sucedem, compondo trajetórias tecnológicas que se afirmam de um lado, pela busca da maximização do lucro baseada no uso extensivo da terra e dos recursos naturais, onde há prevalência das soluções mecânicas; e de outro, por maximizarem ganhos baseados no uso intensivo

da terra e dos recursos naturais, onde prevalecem as soluções químicas e bioquímicas. Ressalta-se que ambas as formas priorizam a maximização da produção/lucro, em detrimento dos ecossistemas naturais e do bem-estar das comunidades tradicionais e de seus modos de vida.

Esse paradigma tem sido criticado por seus impactos negativos sobre o meio ambiente, a biodiversidade, a saúde humana, a cultura e a soberania dos povos. Logo, o PMQG hodierno, enquanto base tecnológica da agricultura, está assentado na utilização de máquinas, pesticidas, fertilizantes e melhoramentos genéticos; sendo que procurou ajustar-se às demandas ambientais contemporâneas, revestindo-se de métodos eficientes na busca da máxima “produção agropecuária sustentável”, considerando ser capaz de atender às demandas presentes e futuras. Desta forma, na Economia Ambiental Neoclássica, o PMQG é visto como uma forma de manter a *práxis* do aumento da eficiência e da produtividade dos sistemas agrícolas, reduzindo os custos de produção, todavia, precisando agora ter em conta os impactos ambientais.

### **3.3.1.1 Valoração Econômica da Natureza**

No tocante às externalidades negativas da produção — tais como poluição, erosão e perda de biodiversidade — é válido ressaltar que, a Economia Ambiental Neoclássica, busca internalizá-las através de instrumentos econômicos, como impostos, subsídios, mercados de direitos de poluição e de serviços ecossistêmicos. Nesse sentido, há o foco na valoração de bens naturais, que tenta estimar o valor econômico dos recursos e serviços (capital natural) fornecidos pela natureza. Quer dizer, a valoração econômica ambiental busca atribuir um valor monetário aos bens e serviços ambientais, considerando os benefícios que eles proporcionam à sociedade e os custos de sua degradação ou perda (Howarth e Norgaard, 2017).

Martinez-Alier (1998) aponta que muitas sociedades e governos exaltam o mercado como mecanismo racional de alocação de recursos, asseverando que os problemas ecológicos decorrem da ausência de racionalidade mercantil, por conta da falta de “direitos de propriedade” sobre os recursos e serviços ambientais, como na

situação da mal intitulada “tragédia dos comuns<sup>35</sup>”. O autor argumenta que na perspectiva ecológica, a vigência de “direitos de propriedade” sobre os recursos e serviços ambientais causam dúvidas em relação aos benefícios do mercado, uma vez que este impõe a obstinação ferrenha na busca do lucro, o que não compatibiliza com a sustentabilidade ambiental. Sobre esse aspecto, o autor aponta que:

O ponto de vista ecológico, nos leva a duvidar dos benefícios do mercado. O mercado impõe uma busca de lucros, o que ajuda para o uso mais eficiente dos recursos, tal como se viu após o aumento dos preços do petróleo, em 1973 e em 1979. Porém, o mercado não garante que a economia se encaixe na ecologia, já que o mercado infravalora (ou valora arbitrariamente) as necessidades humanas futuras e não considera os prejuízos externos às transações mercantis, tal como a destruição irreversível de outras espécies. (Martinez-Alier, 1998, p.30).

Ademais, a Economia Ambiental Neoclássica conta com diversos instrumentos de valoração ambiental, como os métodos diretos de valoração e há também os de mercados substitutos que são utilizados para atribuir um valor econômico aos recursos ambientais. Leff (2009) aponta que “a valoração ambiental é uma forma de colonização da natureza pela lógica do mercado. Ela impõe uma visão utilitarista e antropocêntrica da natureza, que nega sua autonomia, diversidade e sacralidade”. Todavia, a Economia Ambiental, cuja lógica do mercado triunfa, alega que toda “externalidade” é suscetível à valoração econômica. Sobre esse aspecto, Martinez-Alier (1998) aponta que:

a economia ambiental parte da pretenciosa suposição de que toda “externalidade”, toda contribuição de um recurso ou serviço ambiental não incluído no mercado, pode, entretanto, receber uma valoração monetária convincente.

---

<sup>35</sup> A “tragédia dos comuns” ou “tragédia dos bens comuns” é um conceito econômico e social que descreve uma situação em que indivíduos, agindo de forma independente e racional de acordo com seus próprios interesses, atuam contra os interesses de uma comunidade, esgotando os bens de uso comum. Originalmente, este conceito foi baseado em um ensaio escrito pelo economista e matemático William Forster Lloyd sobre a posse comunal da terra em aldeias medievais, mas foi disseminado pelo ecologista Garrett Hardin em 1968. A ideia central é que o livre acesso resultaria na superexploração de recursos finitos, provocando o seu esgotamento. No entanto, estudos posteriores, como os da economista Elinor Ostrom, vencedora do Prêmio Nobel 2009, descobriram que a tragédia dos comuns não é tão prevalente ou tão difícil de resolver como Hardin sustentou. Muitas vezes, os moradores criaram soluções para o problema dos comuns; no entanto, quando os comuns eram tomados de assalto por indivíduos não-locais, essas soluções deixavam de ter aplicação efetiva. Ver: HARDIN, Garrett. The Tragedy of the Commons. Science, Vol 162. Issue 3839. 1968.pp.1243-1248

Cabe mencionar que as técnicas de valoração utilizadas pressupõem um mundo idealizado, de mercados funcionando em regime de concorrência perfeita, também pressupõe que os recursos naturais são substituíveis por bens e serviços produzidos pelo ser humano, desprezando os limites ecológicos e a complexidade dos ecossistemas naturais. Desta forma, a natureza é reduzida a um mero papel de objeto de troca, não considerando seus valores intrínsecos, estéticos, espirituais e culturais. Ocorre também que, na prática, essas técnicas exigem quantidades muito elevadas e complexas de dados que são difíceis de obter e seus resultados, muitas vezes, não contemplam a realidade.

Martinez-Alier (1998) ainda argumenta que “a valoração ambiental é uma armadilha. Ela cria a falsa impressão de que é possível resolver os problemas ambientais sem mudar o sistema econômico e social que os causa.” Para este autor, não é possível traduzir os impactos ambientais através da valoração econômica-crematística atualizada das externalidades. Ele acredita ser mais efetivo a utilização de instrumentos para conseguir que a economia se encaixe na ecologia, ou seja, dentro dos limites dos ecossistemas que estão em constante evolução.

Retomando às abordagens teóricas na Economia Ambiental, Tietenberg e Lewis (2018), informam que estas foram desenvolvidas em duas vertentes principais: a economia da poluição e a economia dos recursos naturais. A economia da poluição foi elaborada no início do século XX por Arthur Cecil Pigou (1877-1959) e está baseada na teoria do bem-estar e dos bens públicos. Esta teoria busca internalizar as externalidades negativas provocadas pela poluição, por meio de soluções como a regulação ambiental, tributação sobre emissões, subsídios, licenças ou mercados de direitos de poluição<sup>36</sup>. Isto quer dizer que esta vertente da economia ambiental trata

---

<sup>36</sup> mercados de direitos de poluição são sistemas que permitem que os agentes econômicos que emitem poluentes comprem ou vendam o direito de poluir. Esses sistemas objetivam reduzir as emissões de poluentes de forma “eficiente” e incentivar o uso de tecnologias mais limpas. Um exemplo de mercado de direitos de poluição é o mercado de créditos de carbono, que precifica as emissões de CO<sub>2</sub>, um dos principais GEE. Nesse mercado, os países ou empresas que têm metas de redução de emissões podem comprar ou vender créditos de carbono, que representam o direito de emitir uma tonelada de CO<sub>2</sub>. Assim, quem emite mais do que sua meta pode comprar créditos de quem emite menos, e quem emite menos pode lucrar com a venda dos créditos excedentes. O mercado de créditos de carbono foi criado pelo Protocolo de Kyoto. Ver HE, Rong et al. Corporate carbon accounting: A literature review of carbon accounting research from the Kyoto Protocol to the Paris Agreement. *Accounting & Finance*, v. 62, n. 1, 2022.

dos problemas causados pelas emissões de poluentes que afetam a qualidade da água, do ar, do solo e da biodiversidade. Essas externalidades negativas geram custos para a sociedade que, na maioria das vezes, não são reparados nem pagos pelos agentes econômicos que os provocam. Desta forma, a economia da poluição empenha-se em soluções para internalizar tais custos, fazendo com que os agentes poluidores paguem pelo dano que causam ao ambiente e aos demais.

A economia dos recursos naturais preocupa-se com a escassez e trata dos problemas relacionados à exploração dos recursos naturais como água, energia, minerais, florestas, solo, pesca, dentre outros. Versa, portanto, sobre a gestão ótima dos recursos naturais renováveis ou esgotáveis, tendo em conta o custo de oportunidade, a taxa de desconto e a escassez relativa. Ela lança mão de conceitos como a regra de Hotelling, a regra de Hartwick e o capital natural.

A regra de Hotelling e a regra de Hartwick são duas abordagens que tratam da gestão dos recursos naturais não renováveis, como o gás natural, o petróleo, os metais e os minerais. Na regra de Hotelling, concebida por Harold Hotelling (1931), o preço de um recurso não renovável deve crescer na mesma proporção à taxa de juros de mercado, visando a garantir uma taxa uniforme de retorno no decorrer do tempo e também “assegurando” a conservação do recurso natural. De acordo com essa regra o proprietário de um recurso não renovável deve auferir uma renda compensatória pela redução de valor de sua reserva (renda de Hotelling), que precisa ser igual ao custo de oportunidade de deixar o recurso no subsolo, quer dizer, o que o proprietário do recurso poderia auferir se fosse investir em outro ativo financeiro. A regra de Hartwick, concebida por John Hartwick (1977), é considerada como extensão da regra de Hotelling e preocupa-se com a questão da distribuição intergeracional da renda constituída pelos recursos não renováveis. Nota-se que, tanto a vertente da economia da poluição quanto a da economia dos recursos naturais valorizam a natureza, não pelas suas qualidades intrínsecas, mas fundamentalmente, pelo seu potencial de valor em termos monetários e, portanto, em seu valor de mercado.

Sumariamente, a abordagem da Economia Ambiental Neoclássica busca integrar as questões ambientais à análise econômica, tendo em conta os custos e benefícios sociais da alocação dos recursos naturais. Nessa concepção, a natureza é considerada como um estoque de capital que pode ser utilizado para produzir bem-estar e renda, mas admite que esse estoque pode ser degradado se não for

gerenciado de forma “sustentável”. Ademais, esta corrente considera ínfima a possibilidade de que a exaustão de um recurso natural não renovável possa restringir a expansão da economia. Desta forma, o pensamento neoclássico está apoiado na crença da sustentabilidade fraca e no otimismo tecnológico, tratando as questões do esgotamento de recursos e perda de biodiversidade como eventos comuns e não como algo catastrófico.

Não obstante, para tratar dessas limitações contidas na Economia Ambiental Neoclássica, surgiram abordagens mais substantivas, como a Economia Ecológica, que busca a integração de conceitos como limites do crescimento, entropia econômica, serviços ecossistêmicos, capital natural e justiça ambiental, buscando uma compreensão mais holística entre a economia e a natureza.

### **3.3.2 A Economia Ecológica**

Esta é a outra escola de pensamento da economia do meio ambiente, a Economia Ecológica, que começou a se formar no final dos anos 1960 e início dos anos 1970, incentivada pelos debates sobre os limites do crescimento econômico e sustentabilidade ambiental. Entretanto, o estabelecimento dessa corrente de pensamento — como campo de estudo definido — aconteceu somente em meados do século XX e foi inspirada pelas premissas fundamentais do matemático e economista romeno Nicholas Georgescu-Roegen (1906-1994), cuja obra *The Entropy Law and the Economic Process*, de 1971, representa o marco teórico central da crítica ecológica à economia convencional, a ser explorado com maior profundidade no capítulo 4 deste trabalho. De antemão, pode-se dizer que as frutuosas reflexões de Nicholas Georgescu-Roegen sobre a economia a partir da termodinâmica foram fundamentais para o desenvolvimento da Economia Ecológica como um campo de estudo, visto que introduziu conceitos inovadores, como a aplicação da entropia à economia, destacando a finitude dos recursos naturais e a insustentabilidade do crescimento econômico ilimitado.

Em vista disso, a Economia Ecológica faz a análise dos problemas ambientais buscando ampliar o escopo da questão homem/natureza, demandando o conhecimento holístico e transdisciplinar, com o intuito de investigar a relação do sistema econômico com o meio ambiente sob o olhar integrado. Nesta, há a rejeição

da hipótese tênue do meio ambiente neutro, da reversibilidade e da cresça cornucopiana de recursos infindáveis, que são postulados da Economia Ambiental Neoclássica. Outrossim, a Economia Ecológica enfatiza as ameaças que a expansão da economia mundial impõe sobre a estabilidade dos ecossistemas do planeta, com graves consequências para as gerações atuais e futuras.

Nestes termos, a Economia Ecológica é descrita como o campo do conhecimento interdisciplinar que analisa a economia como parte integrante de um sistema maior, a ecosfera, enfatizando os limites naturais impostos pelos recursos finitos e pelas leis termodinâmicas.

A visão de que a macroeconomia é um subsistema da ecosfera, que é sustentado por um rendimento metabólico de matéria-energia, começando com o esgotamento dos recursos de baixa entropia da ecosfera finita e terminando com sua poluição por resíduos de alta entropia resultantes. A economia recicla materiais em diferentes graus; a energia não pode ser reciclada. A ecosfera contida é materialmente fechada e seus ciclos biogeoquímicos, alimentados pelo sol, recirculam materiais. (Daly, 2023, p.149).

Em linha com esse pensamento, Acselrad (2014) também questiona a maneira como os recursos finitos do planeta são usados e invoca à reflexão sobre as escolhas que governos e sociedade fazem para a utilização desses recursos. No contexto brasileiro, o autor questiona se os recursos naturais devem ser usados para a exportação de produtos a fim de equilibrar as contas externas e cumprir os compromissos com os credores internacionais do país, ou se devem ser usados para apoiar a agricultura familiar e a produção de alimentos.

Argumenta ainda que, não é apenas a futura escassez dos recursos naturais que é preocupante, mas também a maneira como o ser humano escolhe usar esses recursos e os objetivos que orientam as sociedades. Nas palavras do autor:

Se o mundo e seus recursos são finitos, quais são os fins para os quais nós deles nos apropriamos? Para produzir tanques ou arados? Para fabricar armas mortíferas ou para produzir alimentos para os que têm fome? Ou, poderíamos dizer no caso brasileiro, para exportar pasta de celulose e grãos para equilibrar as contas externas e cumprir os compromissos com os credores internacionais do país ou para viabilizar a agricultura familiar de alimentos? Nesta ótica, não está em causa apenas a escassez futura de meios que se anuncia, mas a natureza dos fins que norteiam a própria vida social. (Acselrad,2014, p.7).

É necessário também frisar que a Economia Ecológica rechaça os pressupostos do PMQG, dado que este paradigma coaduna com os propósitos das políticas das desigualdades combinadas que abarcam a DIT e a troca ecologicamente desigual. Além de que o PMQG devido a sua agricultura química — com monoculturas de alto rendimento que reduzem a diversidade genética e causam dependência de insumos externos — prejudica a existência dos povos e comunidades tradicionais (que possuem formas próprias de organização) promovendo impactos socioambientais graves.

Os países centrais sustentam que o crescimento econômico é, principalmente no longo prazo, bom para a ecologia. De tal sorte que, a ilusão do crescimento econômico contínuo, justificada pela Curva Ambiental de Kuznets, é estimulada pelos ricos do mundo para alentar os países periféricos em sua obstruída jornada pelo desenvolvimento sustentável. Rao (1991) alude que existe, pois, um conflito entre a destruição da natureza para se ganhar dinheiro, e a conservação da natureza para se poder sobreviver. Este enfrentamento também pode ser percebido como um conflito entre, de um lado, a tecnologia ocidental e, de outro lado, o conhecimento indígena, dos povos tradicionais, a consciência ecológica e as ciências que buscam compreender as leis universais.

Neste sentido, a Economia Ecológica busca elucidar essas questões, na medida em que estuda as relações existentes entre os sistemas econômicos e os sistemas ecológicos, buscando integrar os aspectos econômicos, biológicos, físicos, sociais e culturais do desenvolvimento sustentável. Por isso, esta corrente de pensamento apresenta um campo de estudo complexo, que dialoga com as diferentes áreas do conhecimento, onde incorpora conceitos diversos, destacando-se os conceitos da termodinâmica e do sistema de fluxos na análise econômica. Desse modo, as formulações da Economia Ecológica estão baseadas na hipótese ambiental aprofundada, onde a economia é tratada como um subsistema de um sistema global, maior e finito com o qual se relaciona.

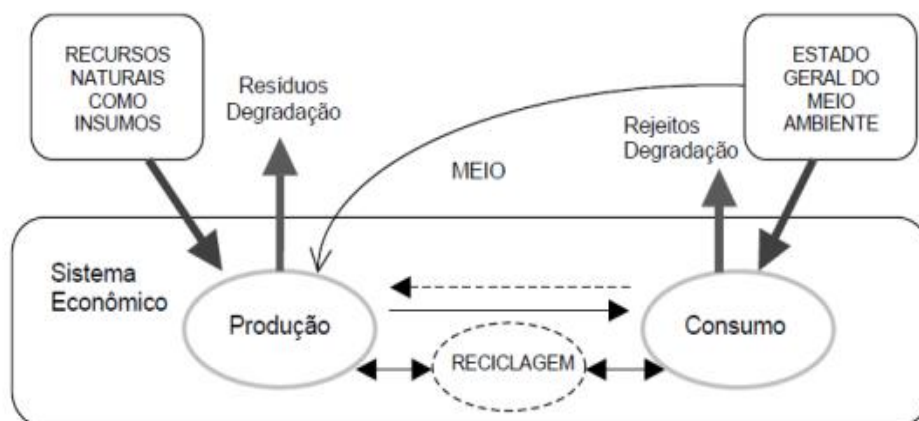
Na economia ecológica, enxerga-se a economia como embutida no ecossistema (ou, de modo mais exato, na percepção social cambiante da história do ecossistema). A economia também está embutida na estrutura dos direitos de propriedade sobre os recursos e serviços ambientais, na distribuição social do poder e da renda, nas estruturas sociais de gênero, classe ou casta social. (Martinez-Alier, 2015, p. 2).

Reforçando o que já foi apontado, a Economia Ecológica reconhece que as ações humanas podem causar alterações potencialmente desestabilizadoras nos ecossistemas naturais, em virtude de pressões antrópicas cumulativas, decorrentes do sistema de produção, com impactos negativos significativos. Além disso, considera a economia também inserida num contexto social, cultural e político, que estabelece a forma como os recursos e serviços ambientais são apropriados, distribuídos e valorizados pelos diferentes grupos sociais. Esta vertente apreende e considera as estruturas de poder, de renda, de gênero ou de classe social, que influenciam as decisões econômicas e as relações entre seres humanos e o meio ambiente. Por conseguinte, a Economia Ecológica contrapõe com a visão da Economia Ambiental Neoclássica, que ignora os conflitos sociais e os limites ecológicos, e preconiza uma abordagem interdisciplinar e crítica da realidade socioeconômica e ambiental.

Desta maneira, a abordagem da Economia Ecológica apreende que, na realidade, o sistema econômico opera inserido no sistema ecológico e interagindo com ele, retirando recursos naturais para a produção de bens e serviços para fins de comercialização e consumo. Coloca em evidência que, tanto a produção de bens e serviços, quanto o consumo destes geram poluentes, rejeitos e resíduos que são devolvidos drasticamente ao ambiente. A extração dos recursos naturais, principalmente aqueles que não são renováveis, alteram e desfiguram o ambiente causando impactos negativos nos ecossistemas.

A Figura 6 esboça de forma resumida a relação entre o sistema econômico e o sistema ecológico. Ela inicia com o meio ambiente fornecendo os recursos naturais primordiais à produção de bens e serviços para consumo (esses recursos incluem terras agrícolas, florestas, água, minerais, energia, dentre outros) e termina recebendo do sistema econômico fluxos de resíduos e rejeitos.

**Figura 6. Sistema Econômico e Meio Ambiente**



**Fonte:** Mueller, 2012, p.138

Do ponto de vista bioeconômico, a produção e o consumo de bens e serviços não fazem “desaparecer” os materiais e a energia empregados nas suas transformações; a produção emana matéria degradada e energia dissipada para o meio ambiente e o consumo produz rejeitos e resíduos que são despejados nos ecossistemas. Isto está fundamentado em princípios da termodinâmica e da ecologia.

Ao longo do tempo, as ciências econômicas têm focalizado o seu principal objeto de análise fora deste contexto e, como abordado neste estudo, a teoria convencional sobre o crescimento econômico, com todo o seu instrumental analítico, considera que o sistema econômico é autocontido. Elas se baseiam na fátua ideia de que o sistema econômico é capaz de gerar e suprir o seu próprio crescimento, sem depender de fatores exógenos, como representado no diagrama de fluxo circular (Figura 1, capítulo 2). É como se somente tivesse relevância as relações que ocorrem dentro da caixa do sistema econômico, que funciona independentemente do meio externo. Sobre esse aspecto, Georgescu - Roegen (1971, p.1) argumentou que:

os fundadores da ciência econômica tinham como única aspiração enquadrá-la nos parâmetros da mecânica. Na física, a mecânica conhece apenas locomoção, e esta, além de reversível, não contempla mudança de qualidade, ao contrário do que acontece na natureza, em que prevalecem fenômenos irreversíveis.

Dado isso, verifica-se que o funcionamento do sistema econômico não foi percebido pela Economia Neoclássica, como passível de ser prejudicado por esgotamento de recursos da natureza, ou por quaisquer outros impactos negativos gerados pelo próprio sistema econômico. Portanto, de forma sucinta, algumas críticas que a Economia Ecológica faz em relação as práticas econômicas vigentes referem-se ao fato de que a economia tradicional trata o processo econômico como um sistema mecânico e autocontido, que pode crescer continuamente, de forma infinita, sem gerar entropia. Não leva em conta os limites ecológicos do planeta, tão pouco os custos sociais e ambientais do crescimento econômico contínuo, adotando métodos que consideram os recursos naturais como infinitos ou substituíveis e assume que a poluição e os resíduos podem ser eliminados ou reciclados sem perda de energia ou qualidade.

### **3.3.2.1 Herman Daly e a Economia Estacionária**

Herman Daly (1938-2022), foi um dos principais economistas ecológicos, cujos trabalhos e ideias foram significativamente influenciados por Georgescu-Roegen, que foi seu professor e orientador de doutorado, na Universidade Vanderbilt. Daly aprendeu com seu mentor a importância de considerar a base material e energética dos processos econômicos, assim como também a Lei da Entropia e seus efeitos sobre a sustentabilidade. Este autor aponta as contribuições de Georgescu-Roegen como linha demarcatória entre o que pode ser considerado Economia Ecológica e as vertentes ambientais da Economia Neoclássica. Professa que a refutação de seu orientador à substituição entre capital produzido e capital natural, por meio da aplicação da Lei de Entropia ao processo econômico, constitui em ruptura paradigmática com a ciência econômica mecânica e engendra a fronteira para o surgimento de uma economia evolucionária.

Daly, por seu turno, também desenvolveu concepções importantes no campo da economia ecológica. Explica que, à medida em que houve a transição de um “mundo vazio”, de pequenas populações humanas com baixos níveis de consumo, para um “mundo cheio”, onde a atividade humana é intensa e os recursos naturais são explorados ao máximo, a economia se expande dentro de um ecossistema global

finito, impactando, no processo, os ecossistemas, cujas funções ecológicas todas as espécies dependem. Desta forma, seu trabalho, questiona com veemência a busca contínua pelo crescimento econômico, afirmando que “em um mundo finito, crescimento contínuo é impossível” (Daly, 1984, p.17).

Este autor articula a possibilidade de uma economia de estado estacionário, cujo conceito propõe limitações permanentes ao fluxo de recursos naturais na economia mundial; em seus próprios termos, declara que:

O estado estacionário é tanto necessário quanto desejável, mas não é nem estático nem eterno – é um sistema em equilíbrio dinâmico com sua biosfera contida, sustentada e entrópica. O caminho do progresso deslocar-se-ia do maior e mais em direção ao melhor e mais durável. (Daly, 2007, p.117).

Nesta lógica, Daly desenvolveu um corpo analítico consistente para a economia ecológica, visto que, sua abordagem — em consonância com as ideias de Georgescu-Roegen — reconhece também os limites físicos e ecológicos do crescimento econômico, porém preconiza um caminho para o desenvolvimento com sustentabilidade ambiental baseado na noção de estado estacionário. Aduz que a atual economia orientada para o crescimento é insustentável e inconciliável com a capacidade finita da Terra, uma vez que:

The Earth as a whole is approximately a steady state. Neither the surface nor the mass of the earth is growing or shrinking; the inflow of radiant energy to the Earth is equal to the outflow; and material imports from space are roughly equal to exports (both negligible). None of this means that the earth is static—a great deal of qualitative change can happen inside a steady state, and certainly has happened on Earth. The most important change in recent times has been the enormous growth of one subsystem of the Earth, namely the economy, relative to the total system, the ecosphere. (Daly,2008, p1).

Deste modo, o autor argumenta que, embora a Terra mantenha um estado estacionário, um equilíbrio em termos de massa e energia, isso não implica que ela esteja estática, visto que, muitas mudanças qualitativas ocorrem dentro desse estado estacionário, especialmente no que dizem respeito ao crescimento da economia humana em relação à ecosfera. Esse crescimento econômico pode ter impactos profundos no meio ambiente, visto que a expansão das atividades humanas pode levar à degradação dos recursos naturais e a perda de biodiversidade.

Neste sentido, a ideia central de Daly é que há a necessidade de repensar o crescimento econômico contínuo e buscar um equilíbrio sustentável que respeite os

limites biofísicos do planeta. Em vez de considerar o crescimento como uma finalidade em si, Daly o vê como um processo que demanda qualificação crítica, distinguindo-se o mero aumento material da economia (crescimento quantitativo) das melhorias estruturais e funcionais que promovem o bem-estar (desenvolvimento qualitativo). Essa distinção fundamenta a necessidade de submeter os processos econômicos ao escrutínio da sustentabilidade ecológica e da equidade social.

Essa perspectiva exige a redefinição dos instrumentos de avaliação econômica, incorporando indicadores que expressem o bem-estar humano, a integridade ambiental e a viabilidade intertemporal do uso dos recursos. Isso implica em estruturar políticas e estratégias socioeconômicas que assegurem não apenas a eficiência alocativa no presente, mas também a equidade intergeracional e a resiliência ecológica como critérios normativos de longo prazo.

Tendo isso em vista, observa-se que a compreensão do conceito de uma economia em estado estacionário proposto por Daly é fundamental para entender a situação econômica e ecológica atual. O autor critica a visão e prática da economia neoclássica que vê o crescimento econômico como algo sempre desejável e benéfico. Aponta como o crescimento pode se tornar deseconômico quando os custos sociais e ambientais suplantam os benefícios. E então, propõe e descreve uma economia em estado estacionário como aquela com estoques constantes de pessoas e de bens, mantidos em níveis desejáveis e suficientes por baixas taxas de produção e de consumo.

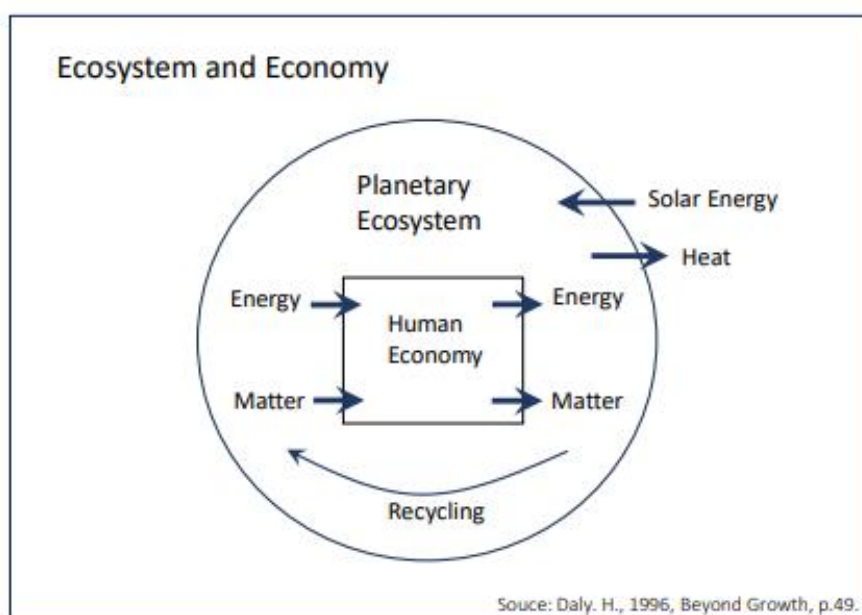
Em seu trabalho *Steady-State Economics: Second Edition With New Essays* (1991), Daly aponta que o crescimento das atividades humanas fez a humanidade ultrapassar a capacidade de carga do planeta e está provocando um “crescimento deseconômico”, que é quando os “males” crescem mais rapidamente do que os “bens”, tornando as sociedades mais pobres, e não mais ricas. Tais ideias têm sido de grande relevância para o desenvolvimento de estudos na ciência da sustentabilidade.

É evidente que, a incorporação por Daly de quantidades biofísicas na economia – que se referem ao uso de recursos naturais e energéticos, bem como aos fluxos de materiais e energia dentro do sistema econômico – baseou-se, substancialmente, no trabalho de Georgescu-Roegen (1971). Daly transpôs as ideias complexas de seu mentor para uma forma mais acessível, explorando as implicações das leis da

termodinâmica para a economia. É pertinente destacar que, conforme será apontado no próximo capítulo deste estudo, Georgescu-Roegen não tratou explicitamente do conceito de uma economia em estado estacionário. No entanto, suas ideias sobre a entropia e a irreversibilidade dos processos econômicos influenciaram fortemente essa noção.

Desta forma, Daly, alinhado com as ideias de seu orientador, observou que a economia convencional, que se concentra no fluxo circular de dinheiro entre famílias e empresas omite completamente o mundo natural, e que a economia não é um sistema isolado, mas um subsistema da biosfera. Todos os recursos utilizados pela economia vêm do meio ambiente, e todos os resíduos produzidos por ela retornam ao meio ambiente. Para a demonstração deste fato, Daly desenhou um diagrama onde há um quadrado representando a economia, contido dentro de um círculo representando a biosfera, com fluxos de matéria e energia conectando-os.

**Figura 7.** Diagrama de Daly



Este diagrama, ainda que de engendramento simples, possui implicações consistentes e profundas, posto que, *"if economic relity is actually so complex that it can only be described by complicated mathematical models that add epicycles and*

*externalities to externalities, then the reality should be simplified.*" (Daly, 1977, p.4). Por conseguinte, Daly critica a complexidade dos modelos econômicos da teoria tradicional que tenta capturar todos os efeitos de uma atividade econômica, mas que acaba ocultando ou mesmo não considerando os efeitos dessas atividades sobre os ecossistemas. O diagrama coloca em foco a análise da atividade econômica não somente em termos de fluxos monetários (como faz a práxis convencional), mas também em termos de fluxos de recursos biofísicos e de suas repercussões sociais.

Ademais, a finitude da biosfera denota que há limites físicos para o crescimento da economia dentro dela. Como já explicado neste estudo, a economia convencional ocupa-se, essencialmente, com o objetivo de alocação eficiente, alegando que os problemas ambientais podem ser resolvidos naturalmente através do sistema de ajuste de preços no mercado. Entretanto, Daly aponta que o foco na alocação eficiente dos preços para solução dos problemas ambientais é falho, uma vez que os problemas ambientais são resultantes da escala produtiva que excede os limites dos ecossistemas e não da má precificação dentro dos mercados. Neste sentido, há limites sobre os recursos que a natureza pode suprir e sobre os poluentes que ela pode absorver. Nas suas palavras: *"organisms cannot survive in a medium consisting of their own final outputs. Neither can economies."*

Na página 22 de seu livro intitulado *Steady-State Economics*, publicado em 1977, Daly usa a analogia entre os organismos vivos e as economias humanas para evidenciar que ambos dependem do fluxo de matéria e energia que entra e sai de seus sistemas. Argumenta que os organismos não podem sobreviver em um meio que consiste nos seus próprios resultados finais, ou seja, nos seus resíduos metabólicos, em função de que esses resíduos podem se acumular e causar intoxicação ou desequilíbrio no sistema. Do mesmo modo, as economias não podem sobreviver em um meio que consiste nos seus próprios resultados finais, ou seja, nos seus resíduos industriais. Isso porque o acúmulo desses resíduos promove poluição e degradação no ambiente. Daly também chama atenção para a consideração do valor intrínseco da natureza e critica a visão convencional que trata a natureza tão somente como recurso a ser explorado no processo de produção de valor econômico.

De forma resumida, segundo Herman Daly, a visão da Economia Ecológica é baseada em três princípios fundamentais: o primeiro, informa ser a economia um subsistema da biosfera, ou seja, a economia é um componente integrante e

dependente do ecossistema maior, a biosfera. O segundo princípio alude que o sistema econômico não pode ser ilimitado, ou seja, a economia não pode crescer de forma infinita dentro de um sistema finito, pois esta enfrenta limites físicos e ecológicos. Desta forma, a economia, que deve ser tratada como parte de um sistema maior, precisa estar em harmonia com os processos ecológicos. O terceiro princípio fundamental, aduz que a economia deve buscar um estado de desenvolvimento onde o crescimento material é equilibrado com a capacidade do ecossistema de fornecer recursos e absorver resíduos. Desta forma, os postulados da economia estacionária de Daly incluem a sustentabilidade do uso de recursos renováveis, a redução do consumo de recursos não renováveis e a limitação dos resíduos a níveis que possam ser assimilados pelo meio ambiente.

Outros pontos significativos a mencionar em suas teorias é a relevância de uma abordagem de “economia de fluxo” em oposição a abordagem de “economia de estoque”. Ao explicar que os recursos naturais devem ser usados de forma sustentável respeitando a capacidade de regeneração dos ecossistemas, assevera a necessidade de a economia buscar a equidade distributiva, em antítese à obstinação cega pelo crescimento do PIB, posto que, a distribuição justa de recursos e benefícios é fundamental para vislumbrar uma sociedade resiliente e sustentável. Para isso, Daly propõe políticas que visem reduzir as desigualdades econômicas, possibilitando o acesso democrático aos recursos necessários para uma vida digna.

O trabalho de Herman Daly trouxe contribuições fundamentais para a ciência da sustentabilidade, visto que enfatiza a importância de integrar os princípios da ecologia e da sustentabilidade na teoria e prática econômica. Propõe que o objetivo da economia deve ser maximizar o bem-estar humano dentro dos limites ecológicos, em vez de maximizar o crescimento econômico a todo custo. Como já referido, Daly reconhece os limites do crescimento econômico em um planeta finito e defende a busca do estímulo ao bem-estar humano dentro desses limites, levando sempre em consideração os impactos ambientais e sociais das atividades econômicas.

Um ponto importante a ressaltar é que, embora Georgescu-Roegen e Herman Daly sejam ambos pioneiros na economia ecológica, estes tiveram algumas divergências teóricas significativas. Georgescu-Roegen teceu várias críticas à Daly, principalmente por duas razões: A primeira diz respeito a aplicação da Lei da Entropia, visto que, Georgescu argumentava que Daly não a aplicava de maneira

suficientemente rigorosa (Kerschner, 2010). Para o mentor intelectual de Daly, a entropia implica que todos os processos econômicos são irreversíveis e que a degradação (de energia e materiais) é inevitável. Ele achava que Daly subestimava a profundidade desse princípio ao propor uma economia em estado estacionário, que, segundo Georgescu-Roegen, Daly ainda não abordava completamente as limitações impostas pela entropia. A segunda crítica desferida a Daly recaí sobre a sua ideia de economia em estado estacionário. Georgescu, afirmava que esta ideia não apresentava viabilidade no longo prazo devido às restrições termodinâmicas, ou seja, acreditava que, mesmo em um estado estacionário, a economia ainda estaria sujeita à degradação entrópica dos recursos naturais, o que inexoravelmente levaria à insustentabilidade (Kerschner, 2010).

Nota-se que essas críticas refletem a visão mais pessimista de Georgescu-Roegen sobre a capacidade da economia se sustentar indefinidamente dentro dos limites planetários, enquanto Herman Daly buscava soluções práticas para mitigar os impactos ambientais e buscar caminhos para promover a sustentabilidade (Moulin, 2020).

### **3.3.2.2 Joan Martinez-Alier e os Movimentos de justiça ambiental como inovações sociais**

Outras expressivas contribuições para a Economia Ecológica e também para o movimento de justiça ambiental são apresentadas por Joan Martinez-Alier (1939), economista e cientista político espanhol, é um dos principais formadores da corrente de Ecologia Política, denominada Ecologismo dos pobres ou Ecologismo Popular. Martinez-Alier, foi um membro fundador e presidente da Sociedade Internacional de Economia Ecológica. Suas ideias tratam, fundamentalmente, de questões relacionadas aos conflitos socioambientais e às desigualdades ecológicas. Manifesta, em suas análises, o reconhecimento da existência de limites ecológicos para o crescimento econômico, e concorda que seja imperativo que a economia opere dentro de limites impostos pela capacidade dos ecossistemas aprovisionar recursos naturais e absorver resíduos.

A economia ecológica vê o planeta terra como um sistema aberto à entrada de energia solar. A economia necessita de entradas de energia e de materiais. A economia produz dois tipos de resíduos: o calor dissipado (pela Segunda Lei da Termodinâmica) e os resíduos materiais, que, mediante reciclagem, podem voltar a ser parcialmente utilizados. O funcionamento da economia tanto exige um fornecimento adequado de energia e materiais (e a manutenção da biodiversidade) quanto exige poder dispor dos resíduos de materiais contaminante. (Martínez-Alier, 1998, p.55).

Martínez-Alier, também acredita na necessidade de repensar o modelo de desenvolvimento vigente, que é baseado na exploração infindável dos recursos da natureza e enfatiza a necessidade de uma valoração adequada dos recursos naturais e dos serviços ecossistêmicos.

O ecologismo político internacional se apoia na crítica ecológica à agricultura moderna, que em resumo argumenta que a maior produtividade deste tipo de agricultura, pobre em biodiversidade e intensiva em energia de combustíveis fósseis, oculta custos ecológicos que não são medidos pelos preços do mercado. (Martínez-Alier, 1998, p.143).

Aponta que, por muitas vezes, a contabilidade econômica tradicional subestima o valor dos recursos naturais, o que acarreta decisões econômicas desfavoráveis às pessoas e ao ambiente natural. O autor advoga a incorporação dos valores ecológicos na análise econômica, levando em conta os custos e benefícios ambientais. Desta forma, questiona a validade do PIB como indicador de desenvolvimento e bem-estar e argumenta que:

Não é possível que a economia vá bem se as pessoas estão mal (desocupadas, acidentadas) e se a ecologia está ruim. A destruição de vidas, paisagens, as angústias dos contaminados ou contamináveis, dos que não encontram trabalho, dos que não tem casa por culpa da especulação urbana, a perda irreversível da diversidade biológica, são magnitudes mais importantes que o PIB ou o PNB. (Martínez-Alier, 1998, p.273).

Em sua análise sobre os conflitos socioambientais, Alier investiga os impactos da exploração das atividades econômicas e dos recursos naturais nas comunidades locais, visando identificar os conflitos resultantes dessas atividades e as desigualdades de poder existentes. Neste sentido, percebe as desigualdades socioambientais e impactos ambientais como decorrentes da exploração desigual dos recursos naturais, por isso, remete à reivindicação por garantias de uma distribuição equitativa dos benefícios e ônus ambientais, dando voz às comunidades afetadas por injustiças ambientais.

A participação cidadã nas decisões que afetam o meio ambiente é, pelo autor, grandemente defendida. Para isso é primordial a inclusão das vozes das comunidades impactadas e dos grupos excluídos nas tomadas de decisões sobre projetos de desenvolvimento local e políticas ambientais, necessitando de uma governança participativa e democrática que considere os interesses de todos envolvidos, em especial, das comunidades locais. Essas são algumas das principais características das ideias de Joan Martinez-Alier, que busca integrar as dimensões econômicas, sociais e ambientais, ressaltando a relevância da participação cidadã e da justiça ambiental, com ênfase na contabilidade ambiental e análise dos conflitos socioambientais no empenho por um modelo econômico mais equitativo e sustentável.

Em seu livro *Land, water, air and freedom: The making of world movements for environmental justice*, publicado em 2023, Martinez-Alier apreende os movimentos globais pela justiça ambiental como inovações sociais fundamentais na era pós-crescimento, destacando-os como forma de resistência contra as desigualdades econômicas e ambientais ao mesmo tempo em que promovem possibilidades mais sustentáveis e inclusivas.

Esses movimentos surgem, segundo este autor, como resposta aos conflitos ecológicos distributivos, onde comunidades locais enfrentam os impactos da exploração de recursos e da degradação ambiental. Na era pós-crescimento, marcada pela necessidade de repensar o modelo econômico tradicional de crescimento irrestrito, os movimentos pela justiça ambiental ganham relevância ao apontar soluções baseadas em equidade, preservação ambiental e respeito aos direitos das comunidades afetadas (Martinez-Alier, 2023).

### **3.4 Algumas considerações sobre as duas abordagens da Economia do Meio Ambiente**

Retomando à análise sobre a Economia do Meio Ambiente, de forma sucinta e de acordo com o já exposto, tem-se que a Economia Ambiental Neoclássica amplia a utilização do instrumental neoclássico aos problemas ambientais. Seus fundamentos teóricos discorrem em duas ramificações principais, que são a economia da poluição e a economia dos recursos naturais. A valoração econômica ambiental é uma aplicação prática importante do instrumental neoclássico para o tratamento das

questões relacionadas à degradação ambiental. Entretanto, essa abordagem tem limitações, pois afirma que os recursos naturais não representam limites ao crescimento econômico de longo prazo e mesmo diante das externalidades decorrentes do processo econômico o que vale é o bem-estar dos indivíduos e não a sanidade do meio ambiente. Para essa escola a hipótese válida (hipótese tênue) é a de que os danos ambientais causados pelo sistema econômico são benignos e, portanto, reversíveis.

Por outro lado, a Economia Ecológica — corrente ainda não influente no pensamento econômico — tem como pressuposto a análise do sistema econômico com base em seus fundamentos ecológicos e biofísicos, propondo a integração de conceitos provindos das ciências sociais, notadamente a economia, e ciências naturais, especificamente a ecologia e a biologia, para uma análise sistêmica que apreenda as relações entre o sistema produtivo e o ambiente natural, buscando superar o reducionismo da análise neoclássica. Considera que, embora o meio ambiente seja dotado de resiliência, se a intensidade dos impactos for ampliada, essa resiliência poderá vir a ser comprometida. Desta forma, enquanto a Economia Ambiental Neoclássica se concentra na valoração e gestão dos recursos naturais dentro do paradigma econômico existente, a Economia Ecológica busca uma compreensão mais holística das interações entre economia e natureza, levando em conta a capacidade biofísica do planeta.

A esse respeito, Balestero (2008) explana que, uma grande diferença existente entre a Economia Ambiental e a Economia Ecológica situa-se em seus métodos de análise, pois enquanto a Economia Ambiental opera com instrumentos que visam a melhor forma de utilizar os recursos de maneira eficiente, ou seja, de acordo com os preceitos da economia de mercado, a Economia Ecológica fundamenta-se em estudos transdisciplinares, ressaltando a questão social e a degradação dos meios ecológicos. Em consonância com esses preceitos, Vizeu, Meneghetti e Seifert (2012), apontam que a Economia Ecológica defende que o desenvolvimento deve ser apreendido como a melhoria qualitativa da vida humana que não depende, necessariamente, do aumento quantitativo da produção e do consumo.

Os pontos convergentes entre as duas vertentes é que estas possuem o mesmo eixo de análise, que corresponde nas formas que o sistema econômico interage com o ambiente, isto é, as duas correntes de pensamento focalizam no modo

como as atividades produtivas afetam os ecossistemas. Não obstante, cada uma destas possui particularidades que buscam explicar essa intrincada relação entre natureza e economia de acordo com seus princípios fundamentais e métodos. Um ponto considerável a constatar é que, no tocante a importância efetiva do capital natural para a sustentabilidade, as duas correntes possuem visões bem diferentes e, a partir daí, há inferências intrínsecas a cada uma das vertentes que engendram postulados e instrumentos próprios.

A Economia Ambiental Neoclássica busca, através da institucionalização ambiental e do emprego da tecnologia, enxertar argumentos persuasivos para subsidiar o desenvolvimento econômico, com PIB crescente, dentro de um modelo mercadológico de sustentabilidade, apresentando ideias que na realidade não condizem com a sustentabilidade e conservação ambiental. Por conseguinte, esta corrente defende que a natureza não apresenta grandes obstáculos ao crescimento econômico, visto que a evolução tecnológica poderá sempre relativizar a questão da Lei da escassez de recursos no processo produtivo. Desta forma, seus preceitos baseiam-se no princípio da sustentabilidade fraca, uma vez que acata o capital tecnológico como substituto do capital natural.

A Economia Ecológica, por sua vez, busca nos diversos saberes da física, da biologia, da teoria sistêmica além da teoria econômica e lança o olhar multifacetado sobre o sistema econômico, asseverando que a sustentabilidade e a conservação dos ecossistemas naturais é a única forma de manutenção da vida no planeta. Para esta corrente, há restrições e exigência de cautelosas avaliações para que exista a possibilidade de ocorrer a substituição do capital natural por outras formas de capital, assim sendo, esta corrente se apoia no conceito de sustentabilidade forte.

Um dos pontos principais da Economia Ecológica, já abordado, é a noção de que a economia é um subsistema aberto do sistema ecológico maior, que é fechado e finito. Isso revela que a economia depende do fluxo de energia e matéria procedente da natureza e que gera resíduos que a natureza precisa absorver. Isso implica em dizer que a economia está sujeita às leis da termodinâmica, especialmente à segunda lei, e isso significa que a energia disponível para realizar trabalho útil diminui ao longo do tempo, e que esse processo é irreversível (Georgescu-Roegen, 1971).

Assim, a Economia Ambiental Neoclássica e a Economia Ecológica concernem em duas correntes de pensamento econômico que tratam da interação do sistema

econômico com o meio ambiente, mas que diferem em suas perspectivas e métodos. Em vista disso, as principais diferenças existentes entre essas duas abordagens estão dispostas na tabela 1.

**Tabela 1.** Diferenças de enfoque entre a Economia Ecológica e Economia Ambiental Neoclássica

Economia Ecológica	Economia Ambiental Neoclássica
1. Escala ótima	1. Alocação ótima e externalidades
2. Prioridade à sustentabilidade	2. Prioridade à eficiência
3. Satisfação de necessidades básicas e distribuição equitativa	3. Bem-estar ideal ou eficiência de Pareto
4. Desenvolvimento sustentável (global e norte/sul)	4. Crescimento sustentável em modelos abstratos
5. Pessimismo com relação ao crescimento e escolhas difíceis	5. Otimismo em termos de crescimento e opções "genha-ganha"
6. Coevolução imprevisível	6. Otimização determinística e intertemporal do bem-estar
7. Foco de longo prazo	7. Foco nos curto e médio prazos
8. Completa, interativa e descritiva	8. Parcial, monodisciplinar e analítica
9. Concreta e específica	9. Abstrata e geral
10. Indicadores físicos e biológicos	10. Indicadores monetários
11. Análise sistêmica	11. Custos externos e valoração econômica
12. Avaliação multidimensional	12. Análise custo-benefício
13. Modelos integrados com relações de causa - efeito	13. Modelo de equilíbrio geral aplicado com custos externos
14. Racionalidade dos indivíduos restrita e incerteza	14. Maximização da utilidade e Lucro
15. Comunidades locais	15. Mercado global e indivíduos isolados
16. Ética ambiental	16. Utilitarismo e funcionalismo

**Fonte:** Van Den Bergh, 2010, traduzido pela autora.

#### 4. O PENSAMENTO BIOECONÔMICO DE NICHOLAS GEORGESCU-ROEGEN

A quantidade de entropia de qualquer sistema isolado termodinamicamente tende a aumentar com o tempo até alcançar um valor máximo. A unidirecionalidade do calor traduz-se na irreversibilidade do tempo. Aplicados à economia, tais axiomas físicos impossibilitam a caracterização desta como um sistema circular, fechado, isolado ou reversível. (Georgescu-Roegen, 1971).

#### 4.1 A formação de Georgescu-Roegen

Nicolas Georgescu-Roegen (1904-1994), matemático e estatístico de formação, estudos estes desenvolvidos na Romênia de 1927 a 1930, desempenhou um papel fundamental para a formação da Economia Ecológica, visto que, suas ideias influenciaram visceralmente essa escola de pensamento, inspirando acadêmicos e ativistas a repensarem o desenvolvimento econômico à luz das restrições da natureza. Georgescu-Roegen, cursou o doutorado em Paris e, posteriormente, estudou filosofia e estatística com Karl Pearson em Londres. Frequentou a Universidade de Harvard, de 1934 a 1936, período de intensa imersão nas teorias econômicas, onde iniciou sua formação em economia com Joseph Schumpeter, tornando-se membro de um grupo de estudos que reunia economistas como Wassily Leontief, Oskar Lange, Fritz Machlup, Nicholas Kaldor, e Paul Sweezy, além do próprio Schumpeter.

Foi professor da Universidade de Vanderbilt, onde teve uma influência significativa na formação de vários economistas, inclusive brasileiros, como Ibrahim Eris, Delfim Neto, Luiz Paulo Rosenberg, Dionísio Carneiro, Eleutério Prado, João Rogério Sanson e Charles Mueller. É pertinente mencionar, antes de prosseguir, que o ingresso de alunos brasileiros na universidade de Vanderbilt foi impulsionado por uma combinação de fatores acadêmicos e institucionais. Durante as décadas de 1960 e 1970, o Brasil estava em um período de expansão e desenvolvimento de suas instituições de ensino superior e programas de pós-graduação. Nesse contexto, a busca por formação avançada no exterior era uma estratégia comum para capacitar professores e pesquisadores brasileiros.

Georgescu-Roegen, como professor em Vanderbilt e com elevada notabilidade mundial naquele período, atraiu muitos estudantes internacionais, incluindo brasileiros, interessados em suas teorias inovadoras. Ademais, programas de bolsas de estudo e acordos de cooperação internacional facilitaram a ida desses estudantes para Vanderbilt. Ao retornarem para o Brasil, esses alunos trouxeram consigo conhecimentos e novas perspectivas que contribuíram significativamente para o desenvolvimento acadêmico e a disseminação das ideias de Georgescu-Roegen no país.

Quanto as suas publicações, Georgescu-Roegen obteve grande repercussão em seu estudo denominado *The Entropy Law and the Economic Process* (Cambridge:

Harvard University Press, 1971) que é considerada a sua obra-prima, onde ele explora a relação entre economia e entropia. Os livros *Energy and Economic Myths* (New York: Pergamon Press, 1976), composto de uma coleção de ensaios que aborda questões institucionais e analíticas na economia; *La Science économique: ses problèmes et ses difficultés* (Paris: Dunod, 1970), que aborda as limitações e os desafios da ciência econômica; *Analytical Economics: Issues and Problems* (Harvard University Press, 1966), que discute problemas econômicos de forma analítica e dezenas de artigos publicados nos mais importantes periódicos, credenciaram-no como um dos mais importantes economistas de sua geração (Veiga, 2012). Não obstante sua genialidade, Georgescu-Roegen não formou uma escola econômica em sua época<sup>37</sup>, sendo atualmente “redescoberto” por pares e profissionais de outras áreas do conhecimento.

Georgescu trabalhou tal como um pensador renascentista — cuja ênfase pela valorização da integração e do entendimento amplo de diferentes áreas do conhecimento é vigorosa — e com sua abordagem holística buscava um entendimento profundo de todas as ciências em pleno século XX, que foi um século marcado pela alta especialização. Suas ideias interconectaram conhecimentos da economia, da física, da química e da biologia. Durante sua estadia na Universidade de Harvard, Georgescu-Roegen teve oportunidade de trabalhar com Joseph Schumpeter, que exerceu significativa influência sobre sua trajetória nas ciências econômicas. Neste sentido, Georgescu, foi profundamente influenciado pelas ideias de Schumpeter, especialmente em sua abordagem dinâmica da economia, que destaca a inovação e os processos de destruição criativa como motores de transformação econômica. Referindo-se a esse período, em sua publicação intitulada *Universitas Schumpeteriana*, de 1992, Georgescu-Roegen declarou que:

---

<sup>37</sup> Alguns fatores combinados podem explicar por que, apesar de sua genialidade, Georgescu-Roegen não formou uma escola econômica durante sua vida. Estes apontam para a complexidade de sua abordagem interdisciplinar, visto que Georgescu incorporou conceitos da física, química e biologia em seus estudos econômicos, o que era incomum e muito difícil de ser aceito pelos economistas tradicionais. Outro ponto fundamental a considerar é o fato de que suas ideias desafiavam o paradigma dominante e embora este autor tenha sido Professor na Universidade de Vanderbilt e influenciado alguns economistas, não conseguiu criar um grupo coeso de seguidores para prosseguir e expandir suas ideias. Sua abordagem era vista como radical, sendo marginalizada dentro da própria academia que lecionava.

This is how, quite intentionally, I met Joseph A. Schumpeter, the man who directly and through his writings was to have an even greater influence on my thinking than Karl Pearson. Every one of his distinctive remarks were seeds that inspired my later works. In this way Schumpeter turned me into an economist – the only one true Schumpeterian, I believe. My only degree in economics is from Universitas Schumpeteriana. (Georgescu-Roegen, 1992, p.130).

A interação com Schumpeter representou um ponto de virada na carreira de Georgescu-Roegen que, influenciado por suas ideias sobre ciclos econômicos e inovação, passou a focar mais os seus estudos em economia. Schumpeter discursava sobre a diferença existente entre crescimento e desenvolvimento econômico, defendendo que o crescimento acontece quando há aumento da produtividade per capita dos tipos de bens correntes, que por consequência implica em um esgotamento crescente dos recursos naturais acessíveis, ao passo que o conceito de desenvolvimento econômico, na linha evolucionária, significa a introdução de inovações no processo econômico. Neste sentido, para Schumpeter o desenvolvimento impulsiona o crescimento e o crescimento acontece associado ao desenvolvimento.

No entanto, de acordo com a lógica de Georgescu, não há a necessária ligação entre desenvolvimento e crescimento, sendo possível conceber o desenvolvimento sem o crescimento. Ou seja, enquanto Schumpeter via o crescimento e a inovação como motores do desenvolvimento econômico, Georgescu argumentava ser possível alcançar o desenvolvimento qualitativo sem aumentar o quantitativo, direcionando o foco na qualidade de vida e na sustentabilidade. Georgescu, mesmo tendo exímio conhecimento em matemática, argumentava que o número não explica tudo, por isso, privilegiou a dimensão qualitativa em seus estudos, o que também divergia com o rigor dos estudos econômicos tradicionais.

## 4.2 O papel da Termodinâmica na economia

Georgescu-Roegen foi pioneiro ao integrar os princípios da termodinâmica à economia contemporânea. Sua análise rigorosa e inovadora do papel da termodinâmica na economia desafiou os paradigmas econômicos tradicionais. Ele defendeu que a economia não poderia ser tratada como um sistema autônomo, fechado e circular, mas sim como um processo aberto e dinâmico que depende da entrada de recursos naturais e da saída de resíduos.

Sua análise está fundamentada na segunda lei da termodinâmica, a Lei da Entropia, e considera a interdependência entre o sistema econômico e o sistema ecológico, bem como o papel das mudanças qualitativas nesse processo. Destacou também que os recursos naturais, ao serem transformados em bens e serviços, inevitavelmente geram resíduos e perda de energia útil, o que limita a capacidade de crescimento econômico contínuo.

The economic process, like any other life process, is irreversible (and irrevocably so); hence, it cannot be explained in mechanical terms alone. It is thermodynamics, through the Entropy Law, that recognizes the qualitative distinction which economists should have made from the outset between the inputs of valuable resources (low entropy) and the final outputs of valueless waste (high entropy). The paradox suggested by this thought, namely, that all the economic process does is to transform valuable matter and energy into waste, is easily and instructively resolved. It compels us to recognize that the real output of the economic process (or of any life process, for that matter) is not the material flow of waste, but the still mysterious immaterial flux of the enjoyment of life. Without recognizing this fact we cannot be in the domain of life phenomena. (Georgescu-Roegen, 1975, p. 353).

Desta forma, Georgescu-Roegen criticou a visão mecanicista da Economia Neoclássica, consubstanciado no fluxo circular da renda, que descreve movimentos supostamente reversíveis do processo econômico, totalmente desvinculados da noção de tempo, negligenciando as mudanças qualitativas que ocorrem em função do processo econômico. Advertiu também que a Economia Neoclássica vê no progresso tecnológico a capacidade de sempre poder remediar esses limites físicos. Sua abordagem bioeconômica propôs uma economia mais alinhada aos processos naturais, uma vez que os recursos naturais são finitos e que sua transformação em bens e serviços gera resíduos que não podem ser reutilizados indefinidamente.

### 4.2.1 As duas primeiras Leis da Termodinâmica

A Termodinâmica constitui um ramo da Física que se dedica ao estudo das relações entre calor, temperatura, trabalho e energia buscando entender a ligação entre as trocas de calor com a geração de trabalho. Foi desenvolvida em 1824 pelo engenheiro francês Nicolas Sadi Carnot. Em sua publicação “Reflexões sobre a potência motriz do fogo” introduziu o conceito de eficiência termodinâmica e o ciclo de Carnot em um panorama histórico marcado pela necessidade de criação de novas máquinas e do aumento da eficiência daquelas já existentes. Sobre a origem da termodinâmica Georgescu argumentou que:

Na verdade, a ciência da termodinâmica originou-se de uma dissertação na qual o engenheiro francês Sadi Carnot estudou, pela primeira vez, a Economia das máquinas a combustão. A termodinâmica teve seu início, portanto, como uma física do valor econômico, e assim permaneceu, apesar das numerosas contribuições posteriores de natureza mais abstrata. (Georgescu-Roegen, 2012, p. 59).

O físico e matemático alemão Rudolf Clausius (1822-1888), também um dos fundadores da ciência da termodinâmica, formulou as suas duas primeiras leis da seguinte maneira:

A energia do universo é constante (1ª Lei);

No universo, a entropia se move continuamente no sentido de um máximo (2ª Lei).<sup>38</sup>

A primeira Lei, também conhecida como Lei da Conservação de Energia, estabelece que a energia total de um sistema isolado permanece constante. Ou seja, matéria e energia não podem ser criadas nem destruídas, mas transformadas e conservadas, podendo tomar diferentes formas como a energia da luz solar, a energia cinética, a energia elétrica, o trabalho, o calor, dentre outros. Com efeito, os processos que ocorrem dentro do sistema dirigem-se para mudanças nas formas que a energia assume: quando um carro está em movimento, por exemplo, a energia química do combustível é convertida em energia cinética (movimento do carro), parte dessa

---

<sup>38</sup> Rudolf Clausius, Ann. Phys., vol.125,1865, p.353. Apud Prigogine e Stengens, 1984, p.119

energia também é convertida em calor por causa do atrito dos pneus com a estrada e devido ao funcionamento do motor. Desta forma, a energia total do sistema (química+cinética+térmica) permanece constante. Ou seja, num sistema isolado, podem ocorrer mudanças nas diferentes formas que a energia toma, entretanto, a quantidade total da energia do sistema continua a mesma.

A respeito disso, Mueller (2012, p.162) aduz que semelhantemente, a massa<sup>39</sup> total de um sistema isolado também é constante, e, por definição, a matéria não pode ingressar ou deixar o sistema, a massa total do sistema não tem como se alterar, pois, a matéria também é conservada. Ressalta-se que esta lei é peça fundamental da Economia Neoclássica e [...] “com apenas essa lei estamos ainda no âmbito da mecânica e não no domínio dos fenômenos reais, que certamente incluem o processo econômico” (Georgescu-Roegen, 1975, p.551).

A segunda Lei da termodinâmica — a lei da entropia — é essencial para se ir além da mecânica, visto que, esta lei trata das mudanças qualitativas da energia e diz respeito aos níveis de desordem, ignorância e mudança irreversível. A entropia como ignorância é encontrada principalmente na teoria da informação, enquanto a entropia como desordem e mudança irreversível é utilizada mais amplamente, inclusive na Economia Ecológica e pode ser medida como transformações e transferências de energia dentro de um sistema fechado (Mayumi, 2004, p.80-101).

Mueller (2012), explana que a lei da entropia estabelece que, em um sistema isolado que não se encontre em estado de equilíbrio termodinâmico, embora seja constante a quantidade total de energia que este sistema contém, a energia está passando a todo momento, de forma irreversível e irrevogável, da condição de *disponível* para realizar trabalho à de *não disponível* para essa finalidade. Ou seja:

Embora a energia total do sistema seja constante, as quantidades de energia *disponível* e *indisponível* não o são; ocorre contínua degradação da energia do primeiro para o segundo desses estados. Para a termodinâmica, a *energia disponível* para a realização de trabalho (também denominada energia livre), é energia de *baixa entropia*; e a *energia não disponível* para esse fim é denominada *alta entropia* (ou também energia presa). (Mueller, 2012, p.162).

---

<sup>39</sup> Massa é uma propriedade fundamental da matéria que indica a quantidade de matéria presente em um corpo ou sistema.

Consoante ao exposto, Prigogine e Stengers (1991, p.87), afirmam que “a energia é um equivalente geral das transformações físico-químicas, isto é, a medida de grandeza de tudo aquilo que se conserva quantitativamente, ainda que seja modificado qualitativamente por meio do processo de conversão”. Desta maneira, a primeira Lei da Termodinâmica, que trata da conservação de energia, é uma lei universalmente aceita e aplicada em diversas áreas das ciências, como na engenharia. Do mesmo modo a 2ª Lei da Termodinâmica, que trata da entropia e da irreversibilidade dos processos naturais, é fundamental para analisar e apreender muitos fenômenos tecnológicos e naturais.

Por esta razão, Georgescu-Roegen, bem como os economistas ecológicos que o sucederam, utilizaram a teoria da termodinâmica para apreender de forma complexa e abrangente as relações entre as atividades humanas e os ecossistemas naturais. Tais ideias, operam numa lógica que concerne o curso econômico como um evento em permanente desequilíbrio, e esses desequilíbrios ocorrem exatamente porque os percursos econômicos estão sujeitos aos efeitos da Lei da Entropia. Esta constitui, indubitavelmente, uma oposição irreduzível entre termodinâmica e mecânica.

Georgescu-Roegen, em seus estudos, enfatiza importantes ensinamentos da lei da entropia, destacando algumas implicações fundamentais. A primeira, que se refere a um ponto crucial desta discussão — posto que não é aceita pela economia convencional — está relacionada ao fato de que os fenômenos da vida real se movem em uma direção definida e abarcam mudanças qualitativas, muitas das quais são irreversíveis. Em vista disso, o estudo desses fenômenos deve rejeitar a epistemologia mecanicista, que pressupõe reversibilidade. A segunda implicação reside na *natureza antropomórfica*<sup>40</sup> da lei da entropia.

O tempo antropomórfico significa que a nossa percepção do Tempo é derivada do fato de que, por alguma razão desconhecida, todos nós caminhamos pelo caminho na mesma direção. (Georgescu-Roegen, 1971, p. 260. Traduzido pela autora).

Para a raça humana a energia de baixa entropia é disponível, visto que pode ser transformada em trabalho útil para atender aos objetivos humanos. Por outro lado,

---

<sup>40</sup> O conceito de natureza antropomórfica vincula-se à ideia de atribuir características humanas à natureza ou a elementos naturais.

a energia de alta entropia não oferece essa possibilidade. A diferenciação entre as duas qualidades da energia é essencial, já que somente a energia disponível ou de baixa entropia pode ser efetivamente utilizada. Outro aspecto antropomórfico associado à lei da entropia reside na importância que o conceito de tempo assume em sua aplicação. Sobre esse aspecto Georgescu alude que:

Quando dizemos que em um sistema isolado a energia não disponível aumenta por si só – ou seja, que a energia disponível tende a zero – estamos necessariamente especificando que o “aumento” e a “diminuição se referem à direção do tempo conforme percebido pelo fluxo da consciência humana. (Georgescu-Roegen, 1986, p.4).

Desse modo, Georgescu discute, sob a perspectiva da física, um ponto fundamental sobre os processos econômicos. Ele ressalta que esses processos são parciais e dependem da troca contínua de matéria e energia com o universo. Além disso, destaca que o sistema econômico, em sua essência, não cria nem destrói matéria ou energia; apenas a transforma e a devolve ao meio, cumprindo os princípios da física. Conforme por ele descrito:

O que temos de sublinhar em primeiro lugar é que esse processo [o econômico] é um processo parcial e que, a exemplo de todo processo parcial, está circunscrito por uma fronteira através da qual matéria e energia são intercambiadas com o resto de todo o universo material [...]. A resposta à questão sobre o que faz esse processo material é simples: ele não produz nem consome matéria-energia; limita-se a absorver matéria-energia para devolvê-la continuamente. É o que nos ensina a física pura. (Georgescu-Roegen, 2012, p. 57).

Para complementar esta análise, convém acrescentar que Georgescu (1975, p.352) argumentou que todas as formas de energia são transformadas em calor, e o calor acaba se dissipando. Para que a energia esteja disponível é necessário que ela esteja distribuída de forma desigual; desta maneira, a energia totalmente dissipada (que está uniformemente distribuída) não é mais disponível e não pode mais gerar trabalho. Este processo de dissipação de energia é governado pela segunda lei da termodinâmica. Georgescu usava o exemplo do oceano como uma metáfora poderosa para explicar essa Lei. Argumentava que assim como a energia térmica dispersa na vastidão do oceano não pode ser recuperada para realizar trabalho útil, a energia de alta entropia não pode ser revertida de volta a um estado de baixa entropia.

### 4.3 Termodinâmica versus Mecânica

Como se pôde compreender na seção anterior, em sistemas isolados, a entropia sempre tenderá a aumentar com o tempo – indicando a direção natural dos processos – onde os processos naturais tendem a evoluir para estados de maior desordem e menor energia utilizável. Isso significa dizer que, do ponto de vista da degradação da matéria, a entropia tende a aumentar na medida em que os recursos naturais se tornam menos acessíveis. Neste sentido, a diferenciação entre termodinâmica e mecânica clássica assenta-se, em parte, na natureza irreversível dos processos termodinâmicos, os quais progridem em um sentido, em direção a estados de maior entropia (Law; Rennie, 2015). Isso requer que sejam levadas em conta a dimensão temporal e a irreversibilidade na análise do papel da entropia nos processos físicos.

Georgescu-Roegen propôs, já na introdução de *Analytical Economics* (1966), uma crítica epistemológica fundamental à teoria econômica neoclássica, sobre como esta trata o processo econômico enquanto fenômeno mecânico, desconsiderando o contexto espacial e temporal histórico. Na Mecânica, o conceito de espaço e tempo não remete a lugar ou tempo cronológico, mas sim a distância indiferente e intervalo de tempo indiferente. Essa concepção supõe que a economia opera de forma universal, indiferente às particularidades do espaço geográfico e do contexto temporal. No seu segundo e mais relevante livro *The Entropy Law and the Economic Process*, publicado em 1971, Georgescu dedicou-se a apresentar a distinção irreduzível entre a Mecânica e a 2ª Lei da termodinâmica, onde explana que existe uma diferença entre o tempo histórico e o tempo dinâmico da Mecânica, um conceito previamente reconhecido por Schumpeter. Mas, Georgescu mostrou aos economistas que a raiz dessa diferenciação não está nas ciências históricas, e sim no âmago da própria Física, entre a Mecânica e a Termodinâmica. E mostrou que, mesmo do ponto de vista físico, a Economia não pode ignorar o tempo histórico, pois a produção econômica é uma transformação entrópica (Cechin, 2010).

Mirowski (1991) relembra que, os pioneiros da teoria econômica moderna, arrebatados pela elegância e capacidade de previsão da mecânica, consideraram que o valor, no sistema econômico, é algo que se mantém constante. Desta forma, o valor seria como a energia, restando o problema da alocação desse valor por meio das

trocas. É nesta lógica que o alicerce analítico da economia convencional é uma metáfora mecânica, mais precisamente do princípio de conservação de energia na física. Neste sentido, como já apresentado, a teoria econômica convencional trata o meio ambiente como um recurso econômico inextinguível, acreditando no crescimento contínuo e na ótima alocação de recursos com base no equilíbrio de mercado. Além do mais, considera os impactos ambientais gerados pelo processo produtivo como “externalidades” e, sob essa perspectiva, tais externalidades podem ser corrigidas por meio de mecanismos de mercado.

Não obstante, Georgescu-Roegen mostrou que esses pressupostos básicos da teoria econômica dominante são incompatíveis com a física, uma vez que a economia corresponde a um subsistema aberto de um sistema bem maior, que é finito e que não aumenta de tamanho. Um sistema complexo, materialmente fechado, mesmo que aberto para a energia do sol. Isso significa que, embora a Terra receba energia do sol, ela não ganha novos materiais, e, portanto, os recursos materiais disponíveis são finitos. A compreensão de um sistema maior, complexo e materialmente fechado implica que os recursos naturais utilizados pela economia não podem ser infinitamente renovados ou reciclados sem perdas.

A fim de avançar com esse entendimento, torna-se necessário ter a compreensão das distinções conceituais entre sistemas isolados, fechados e abertos. Os sistemas ditos isolados correspondem àqueles que não trocam matéria nem energia com o ambiente externo. Isso significa dizer que tudo o que ocorre dentro do sistema permanece nele, sem que haja influências externas ou transferências para fora. O único exemplo razoável é o do próprio universo que, por definição, este inclui tudo o que existe, ou seja, não há nada “fora” dele com o qual ele possa trocar matéria ou energia. Na física, os sistemas isolados são muitas vezes usados como uma forma de simplificação teórica para facilitar o estudo de leis como a conservação de energia e momento. No entanto, é importante ressaltar que sistemas totalmente isolados são raros na prática, já que sempre existe algum tipo de interação com o ambiente ao redor.

No extremo oposto estão os sistemas abertos, que trocam matéria e energia com o ambiente ao seu redor. Essa interação possibilita que esses sistemas recebam insumos (como energia ou matéria-prima) e liberem produtos, calor ou resíduos para o meio externo, como é o caso da economia. Por fim, os sistemas fechados são

aqueles que só importam e exportam energia, mas não matéria. Ou seja, a massa do sistema permanece constante, mas ele pode ganhar ou perder calor ou realizar trabalho. Na prática, é o exemplo do planeta Terra que recebe energia do sol na forma de radiação solar e emite energia de volta para o espaço na forma de radiação térmica. Em termos gerais, a Terra não troca matéria com o espaço, com algumas exceções, como a entrada de meteoritos e a perda de gases leves para o espaço, mas essas trocas no contexto geral, são insignificantes, visto que a maior parte da matéria na Terra permanece dentro do sistema.

Mas o ponto central, para essa discussão, é a compreensão de que a Terra é permeada por um fluxo de energia altamente significativo, porém limitado e não crescente. Essa energia ingressa como luz solar e é liberada como calor dissipado, seguindo leis termodinâmicas. O grave problema é que a teoria econômica convencional não considera, ou não quer considerar tais princípios biofísicos. E segue com postulados alicerçados na ilógica ideia do crescimento contínuo, cuja expansão da atividade humana não enfrenta limites impostos pelo meio ambiente. No entanto, sendo a economia um subsistema aberto dentro de um vasto sistema fechado, qualquer expansão da macroeconomia acarreta em custos, implica alguma contrapartida natural. Isso quer dizer que o crescimento econômico não acontece no vazio, tampouco é isento de custos.

É nesta lógica que Georgescu-Roegen tece reflexões sobre o processo econômico a partir da termodinâmica e lançou rigorosas críticas à Economia Neoclássica, principalmente, no que diz respeito a sua matriz mecanicista, que permaneceu conduzindo, de forma soberana, o pensamento econômico mesmo depois do mecanicismo, como dogma, ter sido praticamente superado tanto nas ciências físicas quanto na filosofia. Sobre este aspecto, Georgescu argumentou que a “prova disso — e ela é flagrante — é a representação, nos manuais atuais, do processo econômico por um diagrama circular que encerra o movimento de vai e vem entre a produção e o consumo num sistema totalmente fechado” (Georgescu-Roegen, 2012, p.55).

Portanto, a visão da Economia Neoclássica contradiz sentenciosamente com a ciência que estuda as leis fundamentais que governam o universo – a física – em especial a termodinâmica, cujo princípios carecem de certo detalhamento para aclarar a compreensão sobre suas implicações e conexões.

#### 4.4 Fluxo Econômico

Conforme já pontuado anteriormente, a obra de Georgescu-Roegen *The Entropy Law and the Economic Process* (1971) representa a gênese da crítica ecológica à ciência econômica tradicional, pois sua visão pré-analítica da economia rejeita a concepção fechada e circular da economia e as analogias mecânicas que orientaram a teoria econômica convencional. Nesta obra, Georgescu descreve o processo econômico como a transformação entrópica irrevogável de recursos da natureza (de baixa entropia), em resíduos (de alta entropia) que são depositados nos ecossistemas. Nas suas próprias palavras:

se o processo entrópico não fosse irrevogável, ou seja, se a energia de um pedaço de carvão ou de uma dada quantidade de urânio pudesse ser usada seguidas vezes não haveria escassez na vida do homem” (1971, p.6).

O sistema de produção altera os recursos naturais transformando-os em produtos que a sociedade demanda e valoriza, mas essa transformação produz inevitavelmente algum tipo de resíduo, que não entra novamente no sistema produtivo. Por conseguinte, Georgescu ressalta que a ocorrência de mudanças qualitativas na economia não deve ser tratada como uma questão periférica, mas como uma questão primordial, pois mesmo em um nível físico básico, sempre há algum tipo de mudança qualitativa, como a transformação de energia “útil” em energia “inútil. Seguindo essa lógica, Cechin e Veiga (2010, p.439) argumentam que:

O sistema produtivo o que faz? Transforma recursos naturais em produtos que a sociedade valoriza. Mas não é só. Essa transformação produz necessariamente algum tipo de resíduo, que não entra de novo no sistema produtivo. Se a economia pega recursos de qualidade de uma fonte natural e despeja resíduos sem qualidade para a economia de volta para a natureza, então não é possível tratar a economia como um ciclo fechado e isolado da natureza.

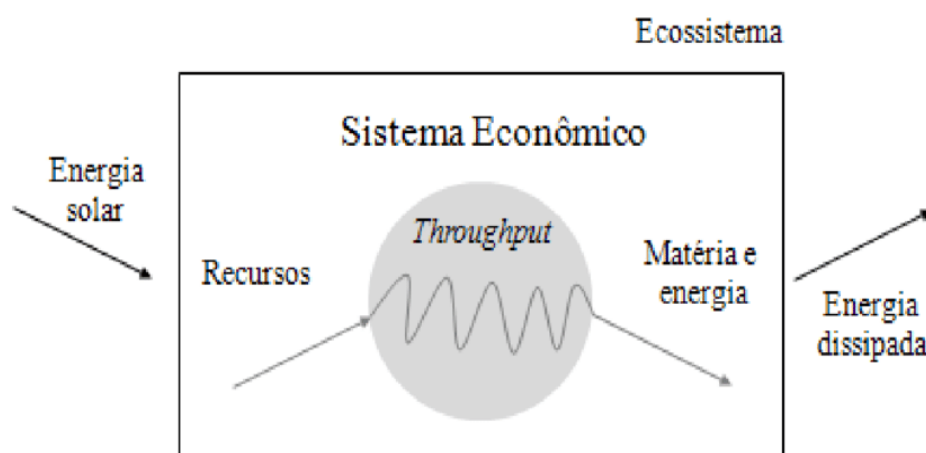
Georgescu-Roegen expõe que a energia se apresenta sob dois estados qualitativamente distintos, onde o primeiro estado refere-se à energia utilizável ou livre (e pode ser convertida em calor ou em trabalho mecânico) e o segundo estado refere-se à energia não utilizável ou presa (que não está acessível). E apresenta como exemplo:

Quando queimamos um pedaço de carvão, a sua energia química não sofre diminuição nem aumento. Mas sua energia livre inicial se dissipou de tal maneira em forma de calor, de fumaça e de cinza que o homem não pode mais utilizá-la. Ela se degradou em energia presa. (Georgescu-Roegen, 2012, p. 58-59).

Sob esta perspectiva, Georgescu argumenta que, enquanto a energia utilizável ou livre se apresenta como estrutura ordenada e disponível, a energia presa é dispersada e desordenada. “É essa a razão pela qual a entropia se define também como uma medida de desordem”. (Georgescu-Roegen, 2012, p. 59). À vista disso, a Figura 8 procura retratar a compreensão das interações entre a produção econômica e o meio ambiente, apreendendo o sistema econômico como parte do todo maior que constitui a natureza e que a essa se submete de uma forma ou de outra (Cavalcanti, 2010).

### Figura 8: Modelo Biofísico do Sistema Econômico

(fluxos de matéria e energia)



Fonte: Cavalcanti, 2010

Este modelo biofísico, que propõe uma perspectiva holística, destaca o fluxo de matéria e energia como elementos centrais para compreender as interações entre o processo econômico e meio ambiente, e enfatiza que a economia deve ser vista como um subsistema dentro de um sistema maior, o ecossistema terrestre, que é finito e que está sujeito às leis físicas, como a entropia. Georgescu-Roegen (1971), ao apresentar o conceito de entropia, que apanhou emprestado da termodinâmica para a economia, confrontou a Economia Neoclássica, ao apontar que o principal engano

desta escola reside em ignorar que os processos econômicos estão subordinados aos processos biofísicos, de tal sorte que o planeta Terra concerne a um sistema fechado quanto à matéria e um sistema aberto quanto à energia; e a economia, enquanto subsistema integrado à natureza, submete-se à segunda lei da termodinâmica, onde:

a quantidade de entropia de qualquer sistema isolado termodinamicamente tende a aumentar com o tempo até alcançar um valor máximo. A unidirecionalidade do calor traduz-se na irreversibilidade do tempo. Aplicados à economia, tais axiomas físicos impossibilitam a caracterização desta como um sistema circular, fechado, isolado ou reversível. (Georgescu-Roegen, 1971).

É sempre útil observar que os impactos da economia sobre os ecossistemas naturais dependem muito da sua escala produtiva, bem como do tamanho da sua população e de seu produto per capita. Então, o modelo de crescimento ininterrupto estabelecido pela economia convencional leva a exaustão dos recursos da natureza e à insustentabilidade do planeta. Com esta observação, e analisando o fluxo econômico de matéria e energia, tem-se à primeira vista a constatação de que tudo o que o processo econômico faz é extrair recursos valiosos da natureza para transformar em coisas que produzem energia dissipada e resíduos. No entanto, o alcance do sistema econômico é, sem dúvida, muito mais abrangente. Tal como enfatiza Georgescu-Roegen (1971, p.282):

O verdadeiro “produto” do processo econômico não consiste em um fluxo físico de resíduos, mas sim em um fluxo de gozo da vida (*enjoyment of life*). [...] Se não reconhecermos esse fato e não introduzirmos no nosso arsenal analítico o conceito de gozo da vida, não estaremos no mundo econômico. E nem estaremos aptos a desvendar a verdadeira fonte do valor econômico, que é o valor que a vida tem para todo o ser vivo.

Neste sentido, é importante ter em vista que o desfrute da vida está diretamente relacionado ao acesso a bens e serviços, e para que estes sejam produzidos são necessárias matéria e energia; sendo estas degradadas pelo processo econômico. Georgescu-Roegen (1977, p.309) argumenta que:

sabemos que a matéria-energia terrestres, bem como a radiação solar que chega ao nosso globo, degradariam, estando a vida presente ou não. De fato, esse argumento é pertinente, mas a vida insiste em continuar em sua plenitude, conforme o tempo que lhe couber. Todavia, de todas as espécies, a humana é, sem dúvida, a que mais impacta negativamente o meio-ambiente, comprometendo não somente os ecossistemas, mas também as chances de oportunidades futuras dos membros de sua própria espécie.

Em vista disso, Georgescu argumentou que o crescimento econômico contínuo é insustentável devido à inevitável degradação dos recursos naturais, por isso, a economia deve respeitar os limites biofísicos do planeta, uma vez que, a busca por crescimento ilimitado leva a danos ambientais irreversíveis. É importante enfatizar que, embora o termo “decrescimento” não tenha sido diretamente formulado por Georgescu-Roegen, suas ideias foram primordiais para o movimento que defende a redução planejada na produção e no consumo como forma de conquistar a sustentabilidade e evitar o colapso ambiental. Sobre este aspecto, no título de seu livro “O decrescimento: Entropia, ecologia e economia”, na sua apresentação em edição brasileira, José Eli da Veiga faz o importante alerta em relação a expressão “decrescimento”, advertindo que:

Um sério problema, contudo, merece um alerta nesta apresentação, pois o termo que Grinevald e Rens escolheram para título vem causando muita confusão ao induzir muita gente a pensar que G-R concordaria com os propósitos simplistas de alguns segmentos da chamada “ecologia política” que consideram o decrescimento como a principal e mais oportuna bandeira de renovação de seus sonhos anticapitalistas. Talvez seja por isso que as melhores obras sobre o tema estejam preferindo utilizar a expressão “sem crescimento” para analisar o que poderia ser o futuro da dinâmica econômica, ou mesmo da prosperidade geral. Assim como a pragmática proposta de “decrecer crescendo”. (VEIGA, 2012, p. 12).

Para Georgescu, é indiscutível que os recursos da natureza são representativos de valor econômico, mas que há uma grande diferença qualitativa e de valor entre o que é absorvido no processo econômico e o que dele resulta e é lançado no meio ambiente. Em suas próprias palavras:

Como economista não ortodoxo que sou, eu acrescentaria que aquilo que entra no processo econômico consiste em *recursos naturais de valor* e o que é rejeitado consiste em *resíduos sem valor*. Essa diferença qualitativa está confirmada, embora em outros termos, por uma divisão particular e até mesmo singular da física conhecida pelo nome de termodinâmica. Do ponto de vista da termodinâmica, a matéria-energia absorvida pelo processo econômico o é num estado de *baixa entropia* e sai num estado de *alta entropia*. (Georgescu-Roegen, 2012, p. 57).

Esta visão tem implicações de grande relevância para as questões de sustentabilidade e conservação dos recursos naturais, visto que essa concepção preconiza o fato de que o crescimento econômico contínuo não é factível, dentro das premissas da sustentabilidade ambiental, devido à natureza entrópica do processo

econômico. Deste modo, Georgescu-Roegen contribuiu substantivamente para uma reflexão crítica sobre o papel da atividade econômica e seus impactos nos ecossistemas, defendendo uma abordagem evolucionária e complexa da economia, que leva em conta as mudanças qualitativas e irreversíveis dos processos produtivos.

#### **4.4.1 Modelo fundo-fluxo: o que a função de produção não contempla**

Como contribuição para a teoria da produção, Georgescu-Roegen propôs o modelo fundo-fluxo, que analisa, de forma crítica, o significado da função de produção neoclássica, destacando a relevância da entropia na economia. Este modelo diferencia os elementos do processo produtivo que são “fundos” (recursos duráveis) daqueles que são “fluxos” (recursos consumíveis), com o propósito de enfatizar a importância dos fatores de fundo para a sustentabilidade ecológica e também para a própria manutenção do processo produtivo (Mueller, 2012).


Georgescu, lamentou que o excesso de formalização matemática na teoria neoclássica da produção tenha desconsiderado um pré-requisito científico essencial, que é ter uma base física sólida. Desta forma, o modelo fundo-fluxo procura reparar essa lacuna, onde os fatores de fundo referem-se aos estoques de recursos naturais, como água, minerais, florestas, dentre outros, que são limitados e finitos. Os fatores de fluxo, referem-se aos processos de extração, produção, consumo e descarte no ambiente. São, portanto, as atividades que ocorrem ao longo do tempo e que afetam os fundos (Mueller, 2005).

O modelo fundo-fluxo destaca ainda, a importância da estrutura e da duração dos processos produtivos, numa perspectiva que desafia a visão tradicional da economia, com importantes implicações para a sustentabilidade e a complexidade dos sistemas econômicos. Desta forma, enquanto a função de produção, de Robert Solow, representa uma abstração matemática que ignora os limites físicos e termodinâmicos do sistema produtivo — tratando insumos como fatores substituíveis e infinitamente disponíveis — o modelo fundo-fluxo, desenvolvido por Georgescu-Roegen e posteriormente ampliado por Herman Daly, propõe uma abordagem biofísica que reconhece a realidade material e entrópica da produção. Ao incorporar a noção de entropia, o modelo fundo-fluxo revela que a atividade econômica não pode ser

dissociada dos limites ecológicos, exigindo uma reformulação dos paradigmas de crescimento e eficiência que predominam na teoria econômica convencional.

É importante mencionar que o modelo fundo-fluxo não é representado por uma função matemática tradicional, como a função de produção. Em vez disso, é expresso por uma estrutura conceitual que descreve o processo econômico como um sistema entrópico, baseado em leis da termodinâmica. A fim de elucidar esses aspectos, o quadro 2 estabelece uma análise comparativa entre o modelo fundo-fluxo conforme formulado por Nicholas Georgescu-Roegen, e a função de produção neoclássica proposta por Robert Solow. Enquanto o primeiro incorpora os limites físicos e entrópicos da atividade econômica, reconhecendo a distinção entre recursos renováveis e não renováveis e a irreversibilidade dos processos produtivos, o segundo se fundamenta em uma abstração matemática que pressupõe a substitutibilidade entre fatores de produção e ignora as restrições impostas pelas leis da termodinâmica. A comparação evidencia tensões epistemológicas entre uma abordagem biofísica da economia e os pressupostos tradicionais da teoria do crescimento.

## Quadro 2. Análise comparativa: modelo Fundo-fluxo e a função de produção

Aspectos	<b>Fundo-Fluxo</b> (Georgescu-Roegen) 	<b>Função de Produção</b> (Robert Solow) $Y=A.f(K,L)$ 
Natureza do Modelo	Biofísico, temporal e ecológico	Abstrato, matemático e econômico
Visão de Economia	Processo entrópico Irreversível	Sistema mecânico reversível
Elementos Centrais	Fundo e fluxos	Capital (K) e Trabalho (L)
Recursos Naturais	Essenciais e insubstituíveis	Substituíveis por capital (K) e Tecnologia (A)
Crescimento Econômico	Condicionalizados pelos limites físicos e entropia	Potencialmente ilimitados via tecnologia (A)
Tempo no Processo	Essencial	Implícito ou ignorado
Sustentabilidade	Requer redução do consumo e reorganização da produção	Pode ser mantida com inovação tecnológica
Paradigma Científico	Evolucionário e Ecológico	Mecanicista e otimizador

Fonte: Elaboração própria.

### 4.4.2 Principais críticas à Economia Neoclássica

Georgescu-Roegen argumenta que a teoria econômica, baseada em analogias que não correspondem à realidade dos processos produtivos, se deleitou com o uso de modelos mecanicistas, e foi pega de surpresa com a eclosão da poluição resultante da atividade econômica. E mesmo diante da indubitabilidade dos impactos ambientais nos diversos ecossistemas, a teoria econômica não reconheceu de fato o papel dos recursos naturais no processo econômico. Sobre este aspecto, o autor expressa que:

It is natural that the appearance of pollution should have taken by surprise an economic science which has delighted in playing around with all kinds of mechanistic models. Curiously, even after the event economics gives no signs of acknowledging the role of natural resources in the economic process.

Economists still do not seem to realize that, since the product of the economic process is waste, waste is an inevitable result of that process and ceteris paribus increases in greater proportion than the intensity of economic activity. (Georgescu-Roegen, 1971).

Em sua análise, Georgescu-Roegen destacou a importância em perceber os impactos ambientais provindos do crescimento econômico, considerando os limites ambientais que a economia deveria acatar. Desta forma, possibilitou sobrelevar a essência entrópica do funcionamento da economia, abrindo campo para a construção de análises mais realistas sobre a complexidade das atividades antropogênicas provenientes das atividades produtivas (Mueller 2012). Por conseguinte, Georgescu forneceu um hodierno arcabouço conceitual baseado nos fluxos de matéria e energia da produção e consumo econômicos. Sua frutuosa contribuição representam uma grande ruptura com a visão da economia vigente, visto que, rejeitou tanto a visão fechada e circular da economia convencional quanto as analogias mecânicas que sempre as orientava.

Deste modo, Georgescu teceu severas objeções aos princípios da Economia Neoclássica, questionando seus fundamentos e propondo uma abordagem inovadora enraizada nos princípios da termodinâmica. Apontou que a Economia Neoclássica ignorou a dimensão energética, considerando a energia como um mero fator de produção, não compreendendo sua função essencial como base motriz de toda atividade econômica. Destacou também que, a energia não se limita a ser um insumo, mas constitui uma condição indispensável para a transformação de recursos, sendo que a Lei da Entropia estabelece limites à quantidade de trabalho útil que pode ser obtida de qualquer fonte de energia. Desta maneira, suas reflexões acerca da sustentabilidade e das restrições ao crescimento econômico desafiaram os postulados centrais da Economia Neoclássica e, por isso, causaram grande incomodo ao *"mainstream economic thought"*.

#### **4.4.2.1 O Contraponto à Teoria de Solow e Stiglitz.**

Georgescu levantou críticas fundamentais às concepções de Robert Solow e Joseph Stiglitz, notadamente em relação à forma como eles compreendiam os recursos naturais e a viabilidade de crescimento econômico ilimitado. O cerne da

discordância de Georgescu-Roegen residia na completa ignorância das Leis da Termodinâmica, em especial a Lei da Entropia, nos modelos de crescimento neoclássico propostos por Solow e Stiglitz. Visto que estes, não consideram a tendência natural e inexorável dos sistemas em direção à desordem. Neste sentido, Georgescu criticou a ideia de crescimento econômico ilimitado — que é uma premissa implícita na função de produção de Solow — argumentando não ser sustentável o crescimento contínuo devido aos limites ecológicos e a finitude dos recursos naturais.

Um ponto central de sua crítica ao modelo neoclássico está na questão da irreversibilidade dos processos econômicos, visto que as atividades econômicas são intrinsecamente entrópicas. Ou seja, o processo produtivo consome recursos naturais de baixa entropia e os transforma em resíduos de alta entropia. Essa dissipação, inevitável e irreversível, de matéria e energia não foi considerada por Solow e Stiglitz.

Outro aspecto significativo de suas objeções diz respeito a ideia de substitutibilidade perfeita entre capital e recursos naturais, uma vez que Solow e Stiglitz defendiam fervorosamente a alta substitutibilidade entre esses fatores produtivos, argumentando que, conforme os recursos naturais se tornassem mais limitados, os avanços tecnológicos possibilitariam sua substituição por capital ou por alternativas tecnológicas inovadoras. Georgescu refutava essa perspectiva, defendendo que a substituição dos recursos naturais é imperfeita, pois eles são, em essência, finitos e insubstituíveis em suas funções fundamentais para a produção e sustentação da vida. Ele também destacou que o capital, sendo derivado dos próprios recursos naturais, não pode ser considerado um substituto absoluto.

Desta forma, Georgescu criticou a visão tradicional da função de produção de Robert Solow (considerada como pedra angular da teoria do crescimento econômico neoclássico). Argumentou contra a forma como este modelo de crescimento trata os recursos naturais e a sustentabilidade. Como já comentado, Georgescu repudiou a ideia de que os fatores de produção (K e L) podem substituir indefinidamente os recursos naturais, criticando com veemência a extrema simplificação com a qual esta função de produção trata às complexidades dos processos produtivos e como ignora os limites físicos impostos pela entropia, que implica que matéria e energia não podem ser recicladas completamente e indefinidamente.

Em vista disso, Georgescu-Roegen (1971) aponta para a existência de profundas inconsistências e limitações na função de produção de Solow, que mesmo

sendo este modelo neoclássico improcedente e insustentável – posto que não reflete a realidade complexa da economia, nem tampouco dos sistemas de que ela faz parte – é, até o presente, frequentemente utilizado para medir o crescimento econômico das diferentes realidades econômicas ao redor do mundo.

A luz do exposto, é fundamental ter em mente que as ideias de desenvolvimento para Georgescu-Roegen e, portanto, para a Economia Ecológica não convergem com as ideias de desenvolvimento postuladas pelos modelos neoclássicos. A esse respeito, Mueller (2012, p.506) aduz que as noções de desenvolvimento para a Economia Ecológica têm muito mais a ver com a noção de evolução, no âmbito de um conceito especial de equilíbrio dinâmico. Deixando claro que a perspectiva de futuro para a humanidade está associada à estabilidade do ecossistema global. Por conseguinte, a crítica de Georgescu-Roegen à substitutibilidade na função de produção de Solow faz parte de um legado mais amplo e mais complexo, que questiona um paradigma que busca freneticamente um crescimento econômico linear e ilimitado perante as limitações físicas do mundo real.

As ideias inovadoras de Georgescu-Roegen foram cruciais para o desenvolvimento de seu pensamento bioeconômico, ao estabelecer uma estrutura teórica robusta que integra os princípios da termodinâmica à análise econômica.

#### **4.5 A Bioeconomia de Georgescu-Roegen**

A bioeconomia entrópica de Georgescu-Roegen foi profundamente influenciada pelas teorias alemãs da energética social do século XIX, que exploravam a integração da biofísica, na explicação de processos econômicos de produção, trabalho e consumo, buscando entender como os princípios da física, especialmente a termodinâmica, poderiam ser aplicados às ciências sociais. Essas ideias surgiram em um contexto de industrialização acelerada e mudanças sociais significativas, onde a energia era vista como um elemento central para o progresso econômico e social.

Como já abordado, Georgescu também foi intensamente influenciado pelo institucionalismo e pela economia evolucionista proposta por Schumpeter, especialmente no que diz respeito a abordagem das mudanças dinâmicas qualitativas nos métodos de produção econômica. Sua concepção de uma economia evolutiva,

sem equilíbrio estático e, portanto, antimecanicista, revela também grande afinidade com a visão de processo econômico dinâmico desenvolvida pela Escola Austríaca de Economia, representada por Carl Menger, Bohm-Bawerk e Ludwig von Mises. É importante ementar que Georgescu teve seus primeiros "*insights*" sobre sua teoria bioeconômica a partir de sua vivência com a vida econômica camponesa ao retornar à Romênia nos anos 1940. No livro *Energy and Economic Myths*, publicado em 1976, Georgescu observa que:

A ideia de que o processo econômico não é um análogo mecânico, mas uma transformação entrópica e unidirecional começou a girar em minha mente há muito tempo, quando testemunhei os poços de petróleo do campo de Ploesti, da fama de ambas as Guerras Mundiais, secando um por um e quando tomei consciência da luta dos camponeses romenos contra a deterioração de seu solo agrícola pelo uso contínuo e também pelas chuvas. No entanto, foi a nova representação de um processo que me permitiu cristalizar meus pensamentos ao descrever pela primeira vez o processo econômico como a transformação entrópica de recursos naturais valiosos (baixa entropia) em resíduos sem valor (alta entropia). Posso me apressar em acrescentar que este é apenas o lado material do processo. O verdadeiro produto do processo econômico é um fluxo imaterial, o gozo da vida, cuja relação com a transformação entrópica da matéria-energia ainda está envolta em Mistério. (Georgescu-Roegen, 1976, p.xiv, traduzido pela autora).

Ao publicar *The Entropy Law and the Economic Process* (1971), Georgescu deu excepcional contribuição com a incorporação do modelo teórico da termodinâmica física na análise econômica, especificamente, pelo uso da Lei da Entropia, que é descrita por ele como "a mais econômica de todas as leis naturais" e "a raiz principal da escassez econômica". Desta forma, Georgescu, com base na entropia e crítico ao paradigma econômico convencional, estabeleceu o modelo da bioeconomia, cuja base consiste em um sólido arcabouço teórico dinâmico para a economia, propondo que a energia física contém um estoque natural limitado, o que estabelece restrições ao crescimento econômico.

A bioeconomia proposta por Georgescu-Roegen pode ser estruturada em dois aspectos primordiais, o primeiro refere-se aos processos exossomáticos da evolução humana, enquanto o segundo destaca a importância qualitativa e irreversível das inovações no contexto do desenvolvimento econômico. Estes dois aspectos são cruciais para a compreensão do arcabouço teórico que fundamenta o desenvolvimento da bioeconomia de Georgescu. O conceito de evolução

exossomática, de J.A. Lotka<sup>41</sup>, refere-se à capacidade dos seres humanos para evoluir não apenas por meio de processos biológicos, mas também através do desenvolvimento de ferramentas, tecnologias e culturas, ou seja, além dos limites biológicos.

Sob essa perspectiva, Georgescu integrou o conceito de evolução exossomática, proposto por Lotka, ao campo da bioeconomia, apontando como a humanidade usa recursos externos ao próprio corpo para “sustentar” o progresso econômico e tecnológico. Para Lotka há dois tipos de instrumentos evolucionários: endossomáticos e exossomáticos. Os instrumentos endossomáticos são, por exemplo: pernas, garras, asas etc., que são determinados pelas características genéticas singulares dos indivíduos. Por sua vez, os instrumentos exossomáticos são aqueles obtidos no meio em que os indivíduos estão inseridos, criados e utilizados pelos seres humanos para ampliar suas capacidades naturais. Desta maneira, Georgescu-Roegen (1975) aponta que os seres humanos foram capazes de transcender suas limitações biológicas ao desenvolver uma série de instrumentos exossomáticos que permitiram a evolução humana para além dos limites endossomáticos.

Não obstante, ao transcender o modelo de evolução biológica, a humanidade passou a ser dependente da evolução mecânico-industrial, baseada, essencialmente, em componentes externos (exossomáticos), como dinheiro, energia, ferramentas manufaturadas e recursos naturais. Nesse raciocínio, o processo econômico — que é formado a partir do papel desempenhado pelos componentes exossomáticos — torna-se elemento crucial e indispensável para a evolução humana, destacando a humanidade dos demais seres vivos.

O aspecto que ressalta o caráter qualitativo e irreversível das inovações evidencia que cada avanço tecnológico transforma o mundo de maneira efetiva, sem possibilidade de retorno ao estado anterior. Uma vez que uma nova tecnologia é adotada em larga escala, seus efeitos — econômicos, sociais e ambientais — são

---

<sup>41</sup> Alfred James Lotka, foi um matemático, físico-químico e estatístico polonês-americano (1880-1949). Explorou o conceito de consumo exossomático em seus estudos sobre energética e evolução. Analisou como os seres humanos utilizam energia e ferramentas externas ao corpo para realizar trabalho e sustentar a vida.

profundos e permanentes. O que obriga a humanidade a pensar com muito mais responsabilidade no ritmo e direção do desenvolvimento econômico. A interação desses conceitos é fundamental para a compreensão da bioeconomia de Georgescu, visto que esta nega as determinações puramente econômicas e/ou biológicas. Conforme escreveu:

A sobrevivência da humanidade apresenta um problema inteiramente diferente daquele de todas as outras espécies. Não é apenas biológica nem apenas econômica. É bioeconômica. Seus contornos gerais dependem das múltiplas assimetrias existentes entre as três fontes de baixa entropia que, juntas, constituem o dote da humanidade – a energia gratuita recebida do Sol, de um lado, e a energia gratuita e as estruturas materiais ordenadas, armazenadas nas entranhas da Terra, de outro. (Georgescu-Roegen, 1975, p. 369) traduzido pela autora.

Então, Georgescu, incorporou essa noção ao seu trabalho sobre a lei da entropia, enfatizando que a utilização de recursos naturais e energéticos segue um processo irreversível, o que impõe limites ao crescimento econômico. Destacou que a evolução exossomática, embora tenha permitido avanços significativos, também trouxe desafios, como o esgotamento de recursos e impactos ambientais.

Para facilitar o entendimento dessas questões, os autores Tei, Chung e Sãvoiu (2018) sintetizaram os princípios fundamentais do pensamento bioeconômico de Georgescu-Roegen, que refletem sua perspectiva termodinâmica dos processos econômicos bem como o papel da entropia nesse processo.

**Quadro 3.** Princípios bioeconômicos de Georgescu-Roegen

Princípios Fundamentais	Princípios Derivados
<p><b>1.</b> As mudanças qualitativas causadas pelas extensões do corpo humano (instrumentos exossomáticos) contribuem inevitavelmente para a estagnação do progresso da economia, e a degradação do meio ambiente pela espécie humana anula o processo econômico que o sustenta;</p>	<p>I. O otimismo tecnológico da economia é absolutamente irracional e infundado;            II. A produção envolve a transformação de um estoque limitado de matérias-primas e energia; qualquer crescimento econômico é apenas aparente, o da produção por entrada, e implicitamente uma degradação entrópica real dos recursos energéticos.</p>
<p><b>2.</b> A entropia do sistema econômico fechado aumenta continuamente e irreversivelmente até um valor máximo, e a energia disponível torna-se indisponível, até o desaparecimento do crescimento econômico por falta de correlação com a crescente escassez de recursos (o princípio da falta de substitutibilidade absoluta na bioeconomia);</p>	<p>III. A Terra tem recursos e energia limitados e não deve ser tratada como propriedade de uma determinada geração;            IV. A necessidade de conservação de recursos e energia continua sendo fundamental;            V. Os excessos e a 'criminalidade bioeconômica' do consumismo devem ser desencorajados, e os recursos devem se tornar globais, o que inclui os recursos humanos, que nunca são permitidos livre mobilidade;</p>
<p><b>3.</b> O princípio termodinâmico expandido mostra que a matéria está sujeita à mesma degradação que a energia (por exemplo, borracha, plástico);</p>	<p>VI. As políticas bioeconômicas não envolvem riscos, pois o processo econômico é irreversível e a variável histórica é impossível de ser modificada ou ajustada;</p>
<p><b>4.</b> Mesmo quando útil e eficiente, nenhum sistema de reciclagem pode interromper a degradação dos recursos - no máximo, ele a retardará.</p>	<p>VII. A restrição da vida se concentra no conforto exossomático, curto e tumultuado, ou na expansão de um estilo de vida mais monótono e duradouro.            O processo econômico excessivamente estruturado e monopolizado tem uma entropia cada vez maior.</p>

**Fonte:** Tei, Chung e Săvoiu (2018).

Diante do exposto neste capítulo, torna-se evidente que os postulados de Georgescu-Roegen eram muito radicais e contrários ao paradigma dominante da Economia Neoclássica, que é historicamente fundamentado — e ainda hoje apoiado — por modelos matemáticos de otimização e equilíbrio.

Assim sendo, suas teorias questionavam a “sustentabilidade” do capitalismo, do comunismo, da globalização e do desenvolvimento tecnológico, sugerindo o declínio proposital da economia humana, dentro de uma ética de responsabilidade e solidariedade com as gerações futuras e com os demais seres vivos (Veiga, 2010). Por conseguinte, sua visão de uma economia que respeita os limites ecológicos é central para a vertente da economia ecológica, chamada economia da sobrevivência, que será tratada posteriormente, e que busca garantir que as atividades econômicas não comprometam a capacidade das futuras gerações de atenderem suas próprias necessidades (Mueller, 2012).

Veiga (2012) alude que a contribuição de Georgescu-Roegen foi essencial para a análise econômica, pois demonstrou aos praticantes de todas as ciências a completa inconsistência de teorias que seguem ignorando a segunda lei da termodinâmica. Para este autor, Georgescu seria o “[...] mais clarividente analista econômico dessa era que mal começa a ser chamada de Antropoceno<sup>42</sup>”. Esse reconhecimento enfatiza não só a relevância do trabalho de Georgescu, mas também a necessidade de repensar fundamentos econômicos frente às realidades ambientais e energéticas atuais.

A luz do que foi apresentado, notabiliza-se que a ruptura epistemológica de Georgescu-Roegen representa uma revolução científica na economia, no sentido atribuído por Thomas Kuhn<sup>43</sup>, ao introduzir uma nova maneira de compreender e

---

<sup>42</sup> O Antropoceno é um termo atribuído para descrever uma nova era geológica caracterizada pelos profundos e extensos impactos das atividades humanas no planeta. Esse conceito propõe que, devido às transformações causadas pela intervenção humana, estamos experienciando uma época distinta das eras geológicas que o antecederam.

<sup>43</sup> Thomas Samuel Kuhn (1922 – 1996), foi um físico e filósofo estadunidense, conhecido por sua teoria das revoluções científicas, que introduziu o conceito de “paradigma” e “ruptura” na filosofia da ciência. Para Kuhn, um paradigma é um conjunto de práticas que define uma disciplina científica durante um período específico. Os paradigmas são estabelecidos durante os momentos de revolução científica. A ideia de ruptura é central para a teoria de Kuhn. Ele argumentou que a ciência não progride apenas através do acúmulo gradual de conhecimento. Em vez disso, há momentos de “ruptura” ou revolução científica, onde o paradigma existente é substituído por um novo. Esses momentos de ruptura representam uma descontinuidade no desenvolvimento do conhecimento científico. Portanto, a noção

analisar as relações entre economia e meio ambiente. Com isso, suas teorias tiveram um papel decisivo na consolidação da Economia Ecológica como escola de pensamento econômico. Sua influência na atualidade é evidente em diversos movimentos e debates que questionam o paradigma dominante do desenvolvimento baseado no consumo ilimitado de recursos naturais e na geração crescente e insustentável de resíduos.

Os pressupostos teóricos de Georgescu-Roegen exerceram grande influência em diversos teóricos, como Herman Daly, Serge Latouche, Joan Martinez-Alier, Robert Costanza, René Passet, dentre outros, que posteriormente se tornaram autores relevantes neste campo do conhecimento. Ademais, sua contribuição para o Clube de Roma em 1968 oportunizou a explanação e discussão de suas teorias em um novo patamar, com perspectiva de formulação de políticas consoantes as suas premissas. Embora Georgescu, não tendo participação direta na elaboração do relatório “*The Limits to Growth*” de 1972, suas ideias já haviam influenciado o pensamento de muitos membros do Clube de Roma bem como os debates acerca dos limites do crescimento econômico (Levallois, 2010).


Não obstante, as ideias de Nicholas Georgescu-Roegen foram ignoradas pela corrente dominante, que as reputavam como teorias pessimistas, já que não consideravam as prerrogativas das mudanças tecnológicas, econômicas, educacionais e políticas que acompanham o desenvolvimento de uma sociedade e que geralmente possuem potencialidades de atenuar os impactos ambientais decorrentes. Assim sendo, Georgescu-Roegen não recebeu o reconhecimento amplo que merecia durante sua vida, ainda que suas contribuições sejam significativas para a economia. Isso pode ser atribuído a alguns motivos, dentre os quais estão o fato de que este autor adotou uma visão heterodoxa, com potencial para ruptura epistemológica em relação ao desenvolvimento de uma economia baseada em biomas, que não se encaixava, de modo algum, nos modelos convencionais de crescimento econômico.

---

de “ruptura” de Kuhn refere-se a esses momentos de mudança radical na ciência, onde um paradigma é substituído por outro. Ver: Thomas Kuhn. *The structure of scientific revolutions*. University of Chicago press, 2012.

Georgescu defendeu que a biologia e a economia deveriam convergir, uma vez que, o processo econômico é “uma extensão da essência biológica do homem” (1975, p.352), desta forma, expressou a opinião de que “economics will have to merge into ecology” (Georgescu-Roegen 1975, p. 374), propondo o diagnóstico do declínio proposital e necessário da economia humana e um programa bioeconômico para alcançá-lo (Levallois, 2010). Tais ideias impactaram sobremaneira a comunidade acadêmica, até mesmo àqueles que o prestigiaram no início. Se a ascensão acadêmica de Georgescu-Roegen, no campo da economia, se deu pelo reconhecimento que lhe dedicaram importantes economistas da época, como Paul Samuelson que o descreveu como "O economista dos economistas", o banimento ocorreu pelas mesmas mãos (Mueller, 2005, p. 690).

Em suma, o pensamento de Georgescu-Roegen desafiou a visão hegemônica da economia, uma vez que, rejeitou seus modelos tradicionais de equilíbrio, abraçando assim uma abordagem sistêmica, complexa e evolutiva que causou grande resistência no meio acadêmico. Assim, Georgescu foi condenado academicamente e em 1976 foi banido da universidade de Vanderbilt, por defender a tese de que a economia seria absorvida pela ecologia. Não obstante, seu legado cresceu com o passar do tempo e atualmente este autor é reconhecido como precursor da Economia Ecológica. Georgescu-Roegen faleceu em 1994 sem ter suas críticas aos modelos de Solow e Stiglitz devidamente respondidas (Cechin; Veiga, 2010).



## 5. ENTROPIA, EVOLUÇÃO E NEGUENTROPIA: A ESTABILIDADE DO ECOSISTEMA GLOBAL

Autopoiese é a explicação do vivo [...] uma explicação do que é o viver e, ao mesmo tempo, uma explicação da fenomenologia observada no constante vir-a-ser dos seres vivos no domínio de sua existência. (Maturana e Varela, 1972)

## 5.1 A Aparente Contradição

A suposta incompatibilidade entre o conceito de Entropia e a Teoria da Evolução de Darwin tem sido um tema central de debate científico por muitos anos. A Segunda Lei da Termodinâmica postula que a entropia, ou desordem, de um sistema isolado sempre tende a aumentar ao longo do tempo. Em contrapartida, a Teoria da Evolução de Darwin descreve como a vida na Terra evoluiu de formas mais simples para formas mais complexas e organizadas ao longo de grandes escalas temporais. Essa progressão em direção à complexidade e ordem nos sistemas biológicos parece, à primeira vista, desafiar a tendência universal ao aumento da desordem imposta pela Lei da Entropia. No entanto, o conceito de neguentropia em sistemas abertos oferece uma resolução para essa aparente contradição. É sobre isso que este capítulo se debruçará.

Compreende-se que, a segunda Lei da Termodinâmica é uma lei física fundamental baseada em observações empíricas universais sobre as inter conversões de calor e energia. Neste entendimento e, já existindo, no presente estudo, a análise detalhada sobre a Lei da Entropia (capítulo 4), o esboço desta, nesta subseção, será conciso. Destarte, diversas interpretações da Segunda Lei da termodinâmica foram desenvolvidas por cientistas como Clausius, Kelvin e Carnot, cada uma tratando de abordar questões particulares da física. Contudo, o axioma da Lei da entropia remete ao conceito de desordem e irreversibilidade em sistemas termodinâmicos, onde a entropia de um sistema isolado tende a aumentar com o tempo, até atingir um estado de equilíbrio máximo. Isto é, a consequência de longo prazo, ou a hipótese sobre o destino final do universo, entendido como um sistema isolado, é a “morte térmica”, onde toda a energia disponível seria distribuída uniformemente, até atingir um estado de entropia máxima.

Essa condição está bem elucidada pela interpretação da entropia formulada por Von Clausius (1867), onde estabelece que, para que a energia seja convertida em trabalho, deve haver uma diferença de temperatura entre as partes distintas do sistema<sup>44</sup>. Isso é conhecido como o princípio de Carnot, segundo o qual a eficiência

---

<sup>44</sup> Para exemplificar, considere o funcionamento de uma usina termoeletrica. Para gerar eletricidade, ela queima combustível para aquecer a água e transformar em vapor. Esse vapor, a alta temperatura,

máxima de uma máquina térmica depende da diferença de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria. Quanto maior essa diferença, maior é a eficiência potencial. Portanto, a energia flui do mais quente para o mais frio, permitindo que o trabalho seja realizado. O equilíbrio termodinâmico é alcançado quando um sistema atinge um estado em que não há mais troca de energia ou matéria com o ambiente e todas as partes do sistema estão em equilíbrio mecânico, químico e térmico. Este é o estado final de um sistema isolado — quando o sistema atinge um equilíbrio térmico completo — e, neste estado, o sistema atinge sua entropia máxima, não havendo mais energia disponível para realizar trabalho útil.

Em 1944, o físico austríaco Erwin Schrödinger, publicou o livro *"What is Life?"* onde propôs uma abordagem inovadora para compreender os fenômenos da vida à luz da física. A obra tornou-se um marco por estabelecer um elo pioneiro entre a física e a biologia, antecipando conceitos que mais tarde fundamentariam a biologia molecular. Schrödinger se debruçou sobre a aparente contradição entre a biologia e a segunda lei da termodinâmica, a qual afirma que, em um sistema isolado, a entropia tende sempre a aumentar. No entanto, os organismos vivos parecem contrariar essa tendência universal ao conservar e até aumentar sua organização interna ao longo do tempo, como evidenciado pelo processo evolutivo, que leva à formação de sistemas biológicos cada vez mais complexos.

Para explicar esse aparente paradoxo, Schrödinger propôs o conceito de neguentropia ou entropia negativa, argumentando que os organismos vivos preservam sua organização (estrutura e complexidade) ao importar ordem do ambiente externo, principalmente na forma de energia livre, como a proveniente da luz solar ou de nutrientes. Desta maneira, a evolução pode levar ao surgimento de estruturas biológicas cada vez mais organizadas, mas isso não viola a segunda lei da termodinâmica. A chave está em compreender que os seres vivos não são sistemas isolados, pois interagem constantemente com o ambiente, trocando energia e matéria, o que permite que reduzam sua entropia localmente, ao mesmo tempo em que

---

passa por turbinas e gera trabalho (eletricidade). No final, o vapor se condensa em água, agora a uma temperatura mais baixa. Se não houvesse essa diferença de temperatura (o calor do vapor vs a temperatura mais baixa da água condensada), não seria possível gerar eletricidade de forma eficiente. A diferença de temperatura é essencial para o fluxo de energia e a realização de trabalho.

contribuem para o aumento da entropia total do sistema. Desse modo, a evolução biológica pode ser compreendida como um processo dissipativo, pois utiliza os fluxos de energia disponíveis para formar estruturas altamente organizadas, contanto que, no processo, contribua para o aumento da entropia do sistema global.

Dado o exposto, cabe elucidar que Clausius formulou a Lei da entropia, referindo-se ao universo — um sistema isolado — onde a entropia aumenta de forma contínua e irrevogavelmente, visto que neste não há intercâmbio de energia com seu exterior. Todavia, em sistemas abertos, como por exemplo florestas (que são os sistemas de interesse para este estudo), são sistemas que podem reduzir sua entropia com o auxílio de fontes externas de energia. As florestas conseguem reduzir sua entropia devido a energia que recebem do sol, através do processo de fotossíntese, onde as plantas transformam a energia solar em energia química, armazenada em moléculas com a glicose. Essa energia é utilizada para construir biomassa, crescendo e mantendo a estrutura do ecossistema. Dessa maneira, através do ciclo de nutrientes, os elementos essenciais para a vida como nitrogênio, carbono, potássio e fósforo circulam através dos ecossistemas.

Assim, a fotossíntese representa a principal via de entrada de energia na biosfera, ao suprir a base da cadeia alimentar e liberar oxigênio para a atmosfera. Com isso, as florestas conseguem manter baixos níveis de entropia ao absorver de forma contínua energia externa, promovendo a formação de estruturas organizadas e complexas.

### **5.1.1 Evolução e Aumento da Complexidade**

Charles Darwin, em seu livro “A Origem das Espécies”, publicado em 1859, formulou a sua teoria da Evolução por seleção natural, onde explica como os organismos evoluem ao longo das gerações por meio da transmissão de características físicas ou comportamentais. O princípio central da teoria reside na seleção natural, onde indivíduos que possuem atributos que favorecem sua adaptação ao ambiente têm maiores chances de sobreviver e se reproduzir, transmitindo essas qualidades vantajosas para as gerações seguintes. Neste sentido, ao longo das gerações, características que conferem vantagens de sobrevivência e reprodução

tornam-se progressivamente mais comuns em uma população, impulsionando mudanças evolutivas.

De acordo com Darwin (1859), a seleção natural explica como espécies geneticamente distintas podem derivar de um ancestral comum. Esse mecanismo pode levar a alterações graduais em características fenotípicas, como cor ou tamanho, ao longo de várias gerações, fenômeno denominado microevolução. No entanto, com tempo suficiente e acúmulo de mudanças, podem surgir novas espécies, um processo conhecido como macroevolução. As adaptações físicas e comportamentais que sustentam a seleção natural resultam de alterações no DNA, especificamente nos genes presentes nos gametas, que transmitem material genético aos descendentes. Tais alterações, conhecidas como mutações, são o motor dessas variações.

Embora Darwin não tivesse certeza do mecanismo pelo qual as características eram transmitidas, ele não acreditava que a evolução necessariamente se movesse em direção a uma maior complexidade. Em vez disso, ele tinha uma visão sobre a evolução muito mais sutil e focada na adaptação (aptidão) ao ambiente do que em uma progressão linear inevitável rumo à complexidade crescente. Desta forma, Darwin defendeu que a seleção natural favorece organismos mais adaptados ao ambiente, independentemente de serem mais complexos ou simples (Halliday, 2022).

Estudos atuais de pesquisadores, como Ricard Solé e Simon Levin, têm investigado a forma como a complexidade que emerge nos ecossistemas está intrinsecamente relacionada a processos de auto-organização e à adaptação coletiva das espécies envolvidas. A literatura recente destaca que a complexidade não é aleatória, mas sim uma resposta adaptativa a pressões ambientais e interações evolutivas (Solé; Levin, 2022). Neste sentido, há ampla documentação científica indicando que os ecossistemas, ao longo do tempo, tendem a alcançar níveis mais elevados de complexidade, evidenciado pelo aumento na variedade de espécies e nas interdependências entre elas (Deng, Jie et al., 2024).

Essa complexidade se reflete na crescente diversidade de espécies e na elaborada rede de interações que se formam entre elas. Essa afirmação pode ser justificada com base em diversos estudos ecológicos que mostram como os ecossistemas evoluem para formas mais complexas ao longo do tempo, especialmente quando não há grandes perturbações externas, cujos principais fundamentos que sustentam essa ideia são: aumento da diversidade de espécies,

interdependência e redes tróficas, teoria da sucessão ecológica e importância ecológica da complexidade.

Uma lei da natureza proposta recentemente, amplia a teoria evolutiva de Darwin, abrangendo todos os sistemas naturais complexos, sejam eles vivos ou inanimados, postulando que tais sistemas evoluem rumo a estados de maior organização, diversidade e complexidade<sup>45</sup>. A complexidade oferece acesso a nichos biológicos que organismos mais simples são incapazes de explorar, conferindo uma vantagem adaptativa. Características com elevado grau de sofisticação e de instintos podem surgir gradualmente, muitas vezes sendo reutilizadas de estruturas pré-existentes, processo conhecido como exaptação (Wong et al., 2023).

Todavia, indubitavelmente, Darwin trouxe à ciência uma das maiores contribuições ao demonstrar que a organização e funcionalidade complexas dos seres vivos podem ser explicadas por um processo natural — a seleção natural — sem necessidade de apelar para um agente externo ou divindade. Sua teoria da evolução incorpora elementos de acaso e necessidade, aleatoriedade e determinismo, profundamente entrelaçados na essência da vida. Compreender os mecanismos pelos quais a complexidade surge através da evolução pode fornecer *insights* sobre os princípios fundamentais que governam a auto-organização em sistemas naturais, tanto biológicos quanto não biológicos.

## 5.2 As Estruturas Dissipativas de Prigogine

Como já explicado, o mundo natural revela uma ampla variedade de fenômenos em que ordem e complexidade emergem de forma espontânea, contrariando a ideia de um universo que inevitavelmente tende à uniformidade e ao caos. Exemplos como as reações químicas oscilantes, os padrões formados em fluidos e, sobretudo, a própria vida, demonstram um grau de organização que a termodinâmica tradicional, centrada no conceito de equilíbrio, não conseguiu explicar de maneira satisfatória.

---

<sup>45</sup> Estudo realizado por cientistas do Instituto Carnegie, o Instituto Tecnológico da Califórnia (Caltech) e a Universidade de Cornell, juntamente com filósofos da Universidade de Colorado. Foi publicado em 2023, no periódico científico *Proceedings of the National Academy of Sciences*.

Décadas depois da proposta de Schrödinger, Ilya Prigogine, um químico belga de origem russa, levou essa ideia adiante ao expandir o campo da termodinâmica para incluir sistemas que funcionam longe do estado de equilíbrio. Em sua teoria dos sistemas dissipativos, Prigogine transformou a compreensão sobre a emergência da ordem e da complexidade, destacando o papel construtivo da irreversibilidade nos processos naturais. Ele provou que, em determinadas condições, sistemas abertos que interagem com o ambiente, trocando energia e matéria, podem se organizar espontaneamente em estruturas complexas e estáveis (Mueller, 2012). Cabe sublinhar que, Schrödinger lançou a semente ao apontar que a vida desafia a entropia ao importar ordem, e Prigogine forneceu o arcabouço físico-matemático que demonstra como essa dinâmica acontece em sistemas reais. Suas contribuições, em conjunto, lançam luz sobre os caminhos pelos quais a complexidade pode emergir espontaneamente em um universo inclinado à desordem.

Desse modo, Prigogine inaugura o conceito de sistemas dissipativos para descrever uma categoria específica de estruturas termodinâmicas, definindo que um sistema dissipativo corresponde a um sistema termodinamicamente aberto que opera longe do equilíbrio termodinâmico, mantendo uma constante troca de energia e matéria com o seu ambiente. Essa propriedade de abertura é fundamental, pois permite que o sistema receba insumos de baixa entropia (altamente organizados) e consiga expelir resíduos de alta entropia (menos organizados) para o exterior, garantindo, dessa forma, a manutenção de sua organização interna. Isso contrasta com os sistemas conservativos que não realizam trocas significativas de energia ou matéria com o meio ao seu redor (Prigogine; Kondepudi; Da Costa, 1999)

Com isso, as estruturas dissipativas exibem um conjunto de características distintas que as diferenciam dos sistemas de equilíbrio, são elas: auto-organização, manutenção por dissipação, amplificação de flutuações, quebra de simetria espontânea, seleção de estados e sensibilidade, autocura e aumento da produção de entropia. Estas características e suas descrições estão dispostas na Tabela 2.

**Tabela 2. Principais Características dos Sistemas Dissipativos**

Característica	Descrição	Exemplos
Auto-organização	Emergência espontânea de ordem	Células de Bénard, reação BZ, organismos vivos
Manutenção por Dissipação	Requer troca contínua de energia e matéria	Todos os exemplos listados
Amplificação de Flutuações	Aleatoriedade microscópica leva à ordem macroscópica	Início da convecção, oscilações químicas
Quebra de Simetria Espontânea	Estruturas resultantes carecem da simetria dos processos geradores	Formação de padrões na reação BZ
Seleção de Estados e Sensibilidade	Ambiente influencia as formas específicas	Adaptação de organismos ao seu habitat
Autocura	Capacidade de recuperação de perturbações	Regeneração em sistemas biológicos
Aumento da Produção de Entropia (Geral)	Ordem local ao custo da desordem global	Todos os exemplos listados

**Fonte:** Prigogine; Kondepudi; Da Costa (1999). Elaboração própria.

É importante destacar que, os sistemas dissipativos não estão restritos a um tipo específico de matéria ou energia, pois abrangem desde fenômenos físico-químicos, como reações oscilatórias e formação de estruturas complexas em fluidos; também sistemas biológicos, incluindo o metabolismo celular e o desenvolvimento de organismos, e até mesmo sistemas sociais e econômicos, constituindo, portanto, um princípio fundamental de organização na natureza. A característica primordial desses sistemas reside em sua aptidão para persistirem em estados de não equilíbrio dinâmico, mediante a troca contínua de energia e matéria com o ambiente, dissipando entropia para o exterior e, conseqüentemente, promovendo a gênese e a sustentação de estruturas complexas e auto-organizadas. Tal conceito enfatiza a intrínseca interconexão e os padrões comuns de auto-organização observados em distintos estratos da realidade.

Por último, a inclusão dos organismos vivos como estruturas dissipativas foi o principal impulso para o trabalho de Prigogine, fornecendo uma estrutura termodinâmica lógica para explicar a emergência e a preservação da complexidade inerente à vida (Mueller 2012). Essa contribuição crucial para a termodinâmica fora do equilíbrio foi consagrada com o Prêmio Nobel de Química em 1977. Posteriormente, esta teoria foi aplicada aos sistemas vivos sendo utilizada principalmente pela Biologia e Ecologia.

### 5.3 Complexidade e Ordem: a Neguentropia como motor dos ecossistemas

A neguentropia, refere-se ao inverso da entropia, onde as coisas se tornam mais ordenadas, requerendo organização, estrutura e função, o oposto da aleatoriedade ou caos. O termo foi cunhado pelo físico francês Léon Brillouin e popularizado por Erwin Schrödinger, em sua obra "O que é a vida? O aspecto físico da célula viva" (2025). Neste sentido, a neguentropia, também conhecida como entropia negativa, descreve a diferença entre a energia em um sistema e a energia máxima possível nesse sistema. Albert Szent-Györgyi propôs a substituição do termo neguentropia por "sintropia" e é também conhecida como "entropia livre" (potencial termodinâmico de Massieu-Planck).<sup>46</sup>

Em linhas gerais, a neguentropia é um princípio fundamental nos sistemas vivos, permitindo a preservação da ordem e da complexidade interna frente à tendência universal à desorganização. Schrödinger ressaltou que os organismos se "nutrem de entropia negativa", importando e armazenando organização para manter baixos níveis entrópicos. Esse processo se expressa claramente quando seres vivos transformam materiais desordenados, como alimentos, em estruturas altamente organizadas, como células e tecidos. Tal propriedade também é observada em sistemas sociais, que conseguem se reorganizar, e em ecossistemas florestais, que sustentam sua estrutura mesmo em condições adversas. Neste último caso, as florestas tropicais úmidas podem ser consideradas sistemas neguentrópicos por excelência, na medida em que demonstram uma notável capacidade de manter sua organização e complexidade diante da tendência natural à desordem e à perda de estrutura.

Ao atuar como uma força contrária à entropia, a neguentropia pode ser vista como o motor desses sistemas, responsável por conservar a funcionalidade, a diversidade e a manutenção da vida. Para a maioria dos ecossistemas terrestres e aquáticos, a principal fonte de neguentropia é a energia solar. A luz do sol é uma forma de energia altamente organizada e de baixa entropia. Através da fotossíntese (captura

---

<sup>46</sup> What is the Second Law of Thermodynamics? <https://www.youtube.com/watch?v=mGDJO2M7RBg>

e organização da energia), os organismos produtores (principalmente plantas e algas) usam a energia do sol para transformar dióxido de carbono e água em moléculas orgânicas complexas. Esse processo essencial cria ordem a partir de componentes mais simples, armazenando energia de baixa entropia na forma de energia química contida nas ligações dessas moléculas. Essa energia armazenada flui através dos diferentes níveis tróficos (herbívoros, carnívoros e decompositores).

A cada transferência de energia, uma parte é dissipada como calor, resultando no aumento da entropia, enquanto outra fração é empregada para manter a ordem e o crescimento dos organismos em cada nível. A energia de baixa entropia capturada e organizada pela fotossíntese sustenta a criação e manutenção de estruturas biológicas complexas e, embora, a energia flua através do ecossistema, a matéria (nutrientes, carbono, água, etc.) é ciclada. Esses ciclos, movidos pela energia, garantem a disponibilidade dos elementos indispensáveis à vida e promovem a organização do sistema.

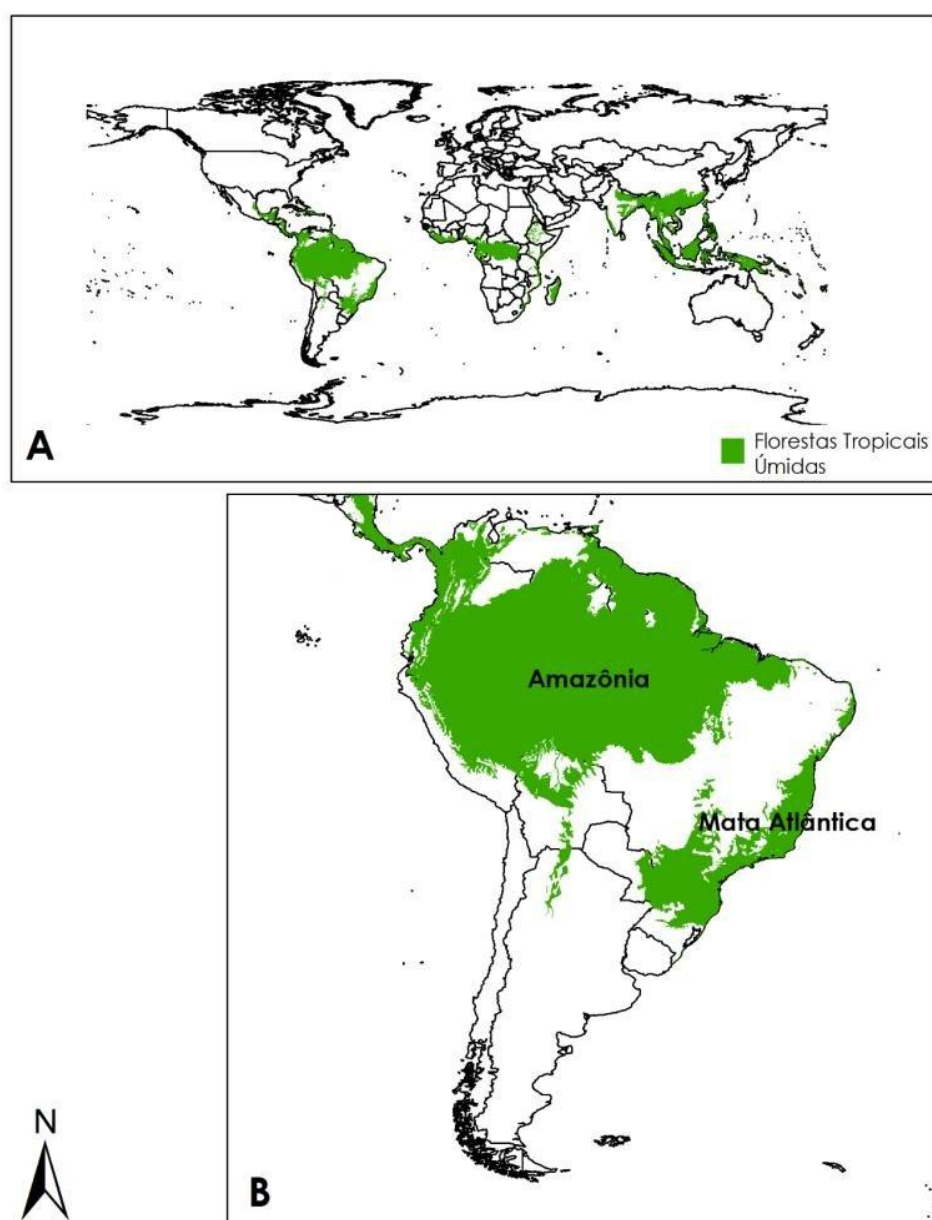
Em suma, a lei da entropia, estabelece que a desordem em um sistema isolado tende a aumentar. Por outro lado, a teoria da evolução de Darwin explica o aumento da complexidade e organizações nos seres vivos ao longo do tempo. A aparente contradição entre essas duas ideias é resolvida ao considerar o conceito de neguentropia em sistemas abertos. A neguentropia, portanto, impulsionada principalmente pela entrada constante de energia solar e sua captura pelos organismos produtores, é a chave que permite os ecossistemas manterem sua organização, sustentar a vida e desenvolver a complexidade.

### **5.3.1 Neguentropia em Florestas Tropicais Úmidas**

Conforme discutido, sistemas altamente complexos, como florestas tropicais úmidas, captam e transformam energia solar em biomassa de forma extremamente eficiente, mantendo uma estrutura organizada e biodiversa. Além dessa eficiência ecológica, esses biomas atuam como grandes sumidouros de carbono, reduzindo significativamente os níveis de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Sua capacidade de estabilizar o clima regional e global influencia o regime de chuvas e a manutenção dos ciclos hidrológicos essenciais.

Nesse entendimento, a figura 9, adaptada do trabalho de Olson et al. (2001), apresenta um mapa global inovador das ecorregiões terrestres, evidenciando zonas de alta riqueza biológica, Como as florestas tropicais da Amazônia, do Congo e do sudeste asiático.

**Figura 9.** Ecorregiões Terrestres do Mundo



**Fonte:** Adaptado com base nos dados de Olson et al. (2001).

Essa representação geográfica possibilita tanto a definição de zonas estratégicas para a conservação quanto a análise das relações ecológicas que conectam distintos biomas e seus processos naturais. A proposta considera as particularidades ecológicas regionais e os níveis específicos de ameaça enfrentados por cada área, permitindo o alinhamento de ações globais de preservação da biodiversidade. Os autores definiram ecorregiões como áreas geográficas que compartilham características ecológicas semelhantes, incluindo tipos predominantes de vegetação, fauna, clima e processos ecológicos.

Cada ecorregião constitui uma unidade distinta de biodiversidade, essencial para entender e proteger a diversidade da vida na Terra. O estudo de Olson e seus colaboradores objetivou oferecer uma base científica sólida para o planejamento estratégico global da conservação ambiental. No contexto da atual crise ecológica — marcada por alterações climáticas, erosão da biodiversidade e intensificação dos processos de degradação ambiental — a neguentropia desses sistemas desempenha um papel crucial na manutenção da resiliência ecossistêmica e da estabilidade biofísica planetária.

### **5.3.1.1 A Amazônia como Prioridade Global de Conservação**

A Amazônia é amplamente reconhecida como uma das regiões mais estratégicas para a conservação ambiental em escala global. Segundo Olson et al. (2001), sua relevância decorre de uma combinação singular de fatores ecológicos, biogeográficos e climáticos que a tornam um dos ecossistemas mais complexos e biodiversos do planeta. Com uma extensão que abrange nove países sul-americanos, a floresta amazônica abriga aproximadamente 10% das espécies conhecidas no mundo, incluindo altos níveis de endemismo e uma diversidade de habitats que favorecem processos evolutivos únicos.

Além de sua riqueza biológica, a Amazônia desempenha um papel determinante na regulação dos sistemas planetários, especialmente no ciclo do carbono e na dinâmica hidrológica continental. A evapotranspiração da floresta contribui significativamente para a formação de chuvas em outras regiões da América do Sul, enquanto sua vegetação atua como um dos maiores sumidouros de carbono da Terra, mitigando os efeitos das mudanças climáticas. Nesse contexto, Olson et al.

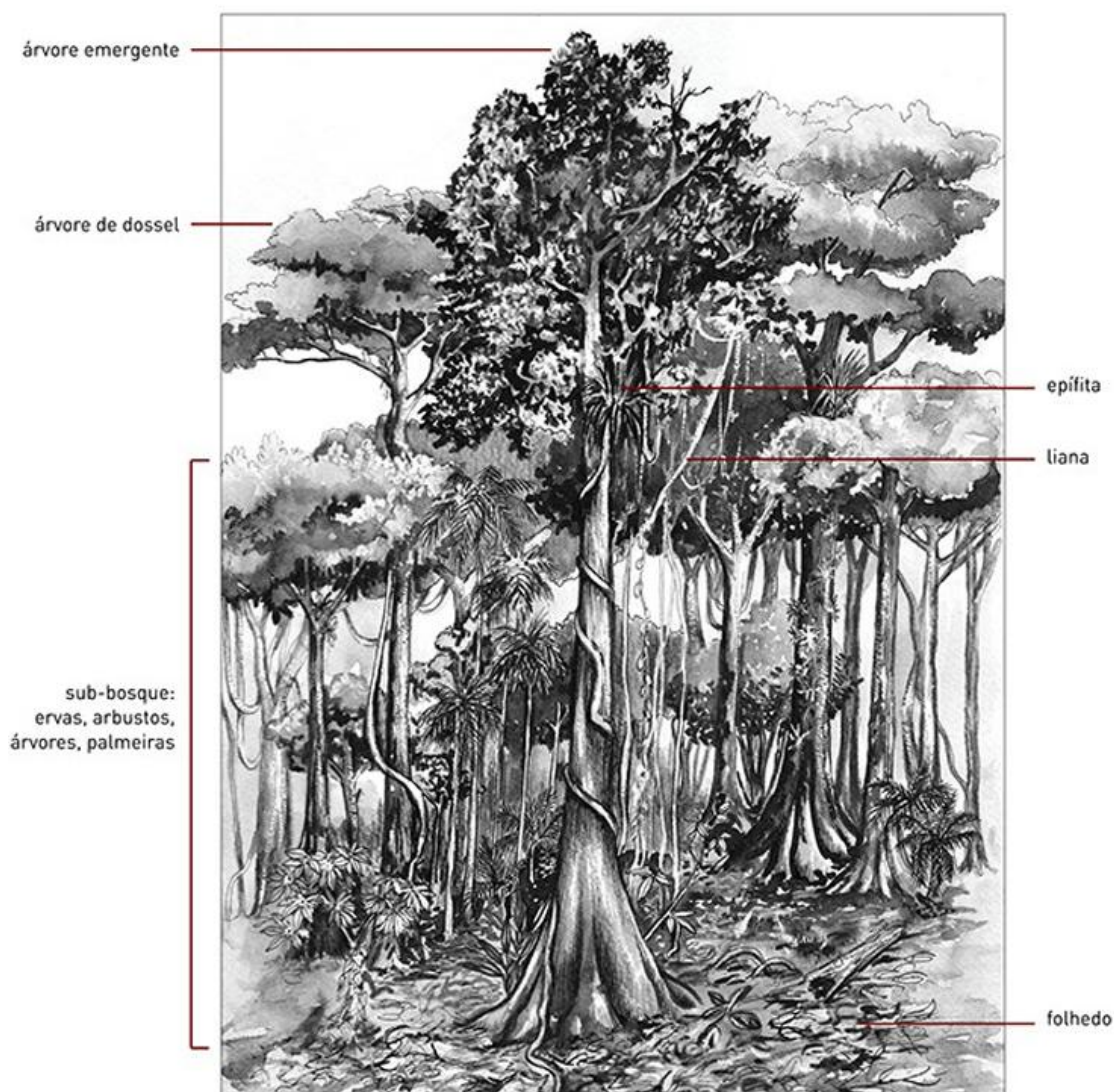
(2001) destacam a Amazônia como uma das principais prioridades globais de conservação, devido à sua notável complexidade ecológica, à elevada riqueza de espécies e ao seu papel determinante na estabilidade dos sistemas planetários. O bioma amazônico abriga uma ampla variedade de ecorregiões internas, como florestas de terra firme, florestas alagadas (várzeas e igapós), campinaranas e savanas amazônicas. Cada uma dessas unidades possui comunidades biológicas únicas, o que reforça a singularidade ecológica da Amazônia e sua importância estratégica para a conservação da biodiversidade global.

No entanto, esse equilíbrio ecológico tem sido ameaçado por pressões antrópicas crescentes, como o desmatamento, a fragmentação de habitats e a expansão de atividades econômicas não sustentáveis. Por isso, torna-se urgente compreender os mecanismos que sustentam a funcionalidade ecológica da floresta Amazônica e promover estratégias de conservação que considerem sua relevância em escala regional e global.

Conforme já explicado, as florestas tropicais úmidas, como a floresta amazônica, destacam-se como ecossistemas exemplares de alta neguentropia. E, embora estejam submetidas à inevitável tendência ao aumento da entropia no universo, essas florestas conseguem preservar uma notável organização, diversidade e complexidade. Essa capacidade de manter a ordem decorre do constante fluxo de energia solar, que alimenta os processos biológicos e sustenta o funcionamento do bioma.

A figura 9 demonstra como a floresta tropical úmida apresenta uma organização vertical sofisticada, composta por camadas distintas como a emergente, o dossel, o sub-bosque e o folhedo. Esta última corresponde à camada de matéria orgânica morta que se acumula sobre o solo da floresta, formada principalmente por folhas caídas, flores, galhos, frutos e restos de animais em decomposição. O folhedo é um componente essencial do ecossistema amazônico, desempenhando funções ecológicas vitais" (Costa, Longhi e Fávero, 2018).

**Figura 10.** Diversidade vertical da floresta tropical Úmida



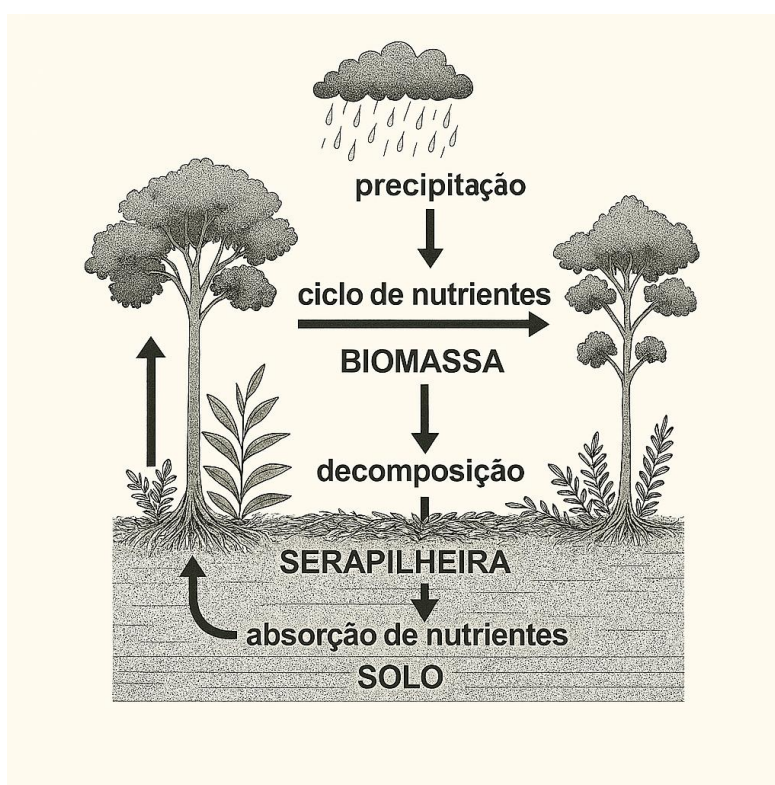
**Fonte:** MUSA - Museu da Amazônia

Cada uma dessas camadas é habitada por espécies específicas, adaptadas às variações de luz, umidade e recursos disponíveis, formando uma rede intrincada de interdependências. Com uma biodiversidade excepcional, as florestas tropicais úmidas, como a Amazônia, a Mata Atlântica, o Congo e as florestas do Sudeste Asiático, ocupam menos de 7% da superfície terrestre, mas abrigam mais da metade das espécies vivas do planeta — incluindo plantas, animais, fungos e microrganismos (Embrapa, 2025).

Essa riqueza biológica é uma expressão clara de alta neguentropia, refletindo um vasto acúmulo de informações genéticas e adaptações complexas desenvolvidas ao longo de milhões de anos de evolução.

O ciclo de nutrientes nas florestas tropicais úmidas é outro exemplo que ilustra perfeitamente a neguentropia em ação. A figura 11 destaca os principais processos ecológicos que sustentam esse sistema altamente eficiente.

**Figura 11:** Ciclo de Nutrientes nas Florestas Tropicais Úmidas



**Fonte:** Adaptado de ANDRADE, A. G. de; URQUIAGA, S.; FARIA, S. M. de (1999)

A precipitação atua como agente essencial na redistribuição de nutrientes, favorecendo processos como a lixiviação e a infiltração no solo. A serapilheira alimenta o solo com matéria orgânica que é transformada em nutrientes minerais por micro-organismos. Esses nutrientes são rapidamente absorvidos pelas raízes das plantas, que contam com a parceria de fungos micorrízicos para ampliar essa

captação. A vegetação, por sua vez, redistribui esses nutrientes internamente até que voltem ao solo através da queda de folhas e demais resíduos, fechando o ciclo (Andrade; Urquiaga; Faria, 1999). Desta forma, a decomposição rápida e a reciclagem eficiente da matéria orgânica permitem que os nutrientes sejam prontamente absorvidos pelas plantas, garantindo a elevada produtividade do ecossistema, mesmo diante da baixa concentração de nutrientes no solo (Jordan, 1980).

Essa dinâmica sintrópica sustenta a densa biomassa e a complexa teia alimentar característica da floresta tropical úmida. Além disso, a própria criação da biosfera, marcada pela geração de uma atmosfera rica em oxigênio através da fotossíntese de cianobactérias alimentadas pela energia solar, representa um exemplo emblemático de neguentropia em escala planetária, onde as florestas tropicais desempenham um papel vital.

Não obstante, a integridade das florestas tropicais enfrenta ameaças cada vez maiores devido às atividades antrópicas, como o desmatamento para fins agrícolas, pecuários, de extração de madeira e minerais. A degradação e a perda dessas florestas resultam na redução da biodiversidade e na interrupção dos ciclos de nutrientes e da regulação climática, configurando uma reversão da neguentropia e um aumento da entropia em níveis local e global. Por isso, a conservação das florestas tropicais é crucial não apenas para preservar a biodiversidade, mas também para garantir a regulação climática global e a sustentabilidade dos serviços ecossistêmicos que elas fornecem.

The background of the slide is a soft, out-of-focus photograph of a sunset over a body of water. In the foreground, the dark silhouette of a boat is visible on the left, with a person's head and shoulders partially seen. The water reflects the warm, golden light of the setting sun, creating a shimmering effect. The overall atmosphere is peaceful and contemplative.

## 6. ABORDAGENS RECENTES

Os sistemas vivos são ilhas de baixa entropia em um universo de crescente desordem.

Erwin Schrödinger

## 6.1 A Bioeconomia Contemporânea

Como tema em ascensão, a bioeconomia se caracteriza por uma diversidade de conceitos e abordagens teóricas. Essa multiplicidade reflete os variados contextos econômicos, culturais e ambientais que influenciam as diferentes interpretações sobre o papel da bioeconomia para a sustentabilidade ambiental. Deveras, os debates globais sobre bioeconomia intensificaram-se, notadamente, após a inclusão desse conceito em políticas de desenvolvimento econômico de países europeus. Essas iniciativas buscam auxiliar o velho continente na transição de uma economia baseada em combustíveis fósseis para uma economia sustentada por recursos biológicos.

Neste cenário, Costa *et al.* (2022) apontam que, a abordagem atual de bioeconomia se enquadraria para atuar como um instrumento de mitigação de emissões de gases de efeito estufa e promover a transição energética, além de incentivar a geração de novos postos de trabalho, o desenvolvimento de tecnologias e a expansão de mercados. Os autores informam também que essa visão de bioeconomia não necessariamente teria como foco principal a valorização ou conservação da biodiversidade terrestre, tampouco seria orientada para atender às necessidades de regiões biodiversas, como a região Amazônica.

É relevante apontar que, embora o conceito de bioeconomia tenha sido apresentado nos anos 1970 por Georgescu-Roegen, e tenha sido ignorado por décadas, o debate voltou à pauta na atualidade, nas agendas políticas, científica e econômica, assumindo relevância crescente. Como mencionado, a ampla diversidade de atores envolvidos no campo da bioeconomia gera uma variedade de definições e abordagens relacionadas a esse domínio do conhecimento. Diante dessa complexidade, as interpretações mais comuns sobre a bioeconomia frequentemente ressaltam o uso da biotecnologia e da engenharia genética no desenvolvimento de produtos e processos inovadores. Não obstante, outras abordagens – outrora menos destacadas e que atualmente ganharam mais evidência – enfatizam a importância da conservação da biodiversidade e da utilização mais responsável dos recursos da natureza. Desta maneira, a comunidade científica concentra seus esforços na definição e na caracterização das múltiplas perspectivas da bioeconomia que prevalecem na atualidade, onde:

Uma comparação entre as múltiplas definições de bioeconomia adotadas no Brasil e no exterior por diferentes setores e regiões revela como a palavra bioeconomia pode, às vezes, significar ideias bastante distintas – como, por um lado, uma monocultura ou, por outro lado, manejo sustentável de florestas nativas – para diferentes grupos de interesse e vertentes científicas. (Costa, F.de A *et al.*,2022).

### **6.1.1 Os tipos de Bioeconomia**

O relevante estudo bibliométrico de Bugge, Hansen e Klitkou (2016), identificou que as definições de bioeconomia mais frequentemente observadas entre os anos de 2005 e 2014 podem ser agrupadas em três tipos ou abordagens principais: 1) Biotecnológica; 2) Biorecursos e; 3) Bioecológica. Essas categorias são definidas com base nos fatores mais significativos para sua aplicação prática e formulação na realidade concreta. Em vista disso, os autores identificam essas três abordagens ou rotas conceituais com base em quatro critérios principais, que são: i) adesão dos objetivos básicos à sustentabilidade ou ao crescimento econômico; ii) principais estratégias de geração de excedente econômico; iii) principais drives e mediadores de inovação; iv) abordagem espacial. Desta forma, Bugge, Hansen e Klitkou (2016), apontam que os tipos de bioeconomia podem ser entendidos da seguinte maneira:

#### **1) A Bioeconomia Biotecnológica**

Esta abordagem, prioriza o crescimento econômico e a criação de postos de trabalho, enquanto, de forma secundária, busca atender aos critérios de sustentabilidade. Está focada na pesquisa e aplicação de biotecnologias avançadas para transformar recursos biológicos em produtos de alto valor agregado e na sua comercialização para diversos setores. Desta forma, o uso de tecnologias na produção e sua integração nos setores de comércio e serviços emerge como a principal fonte de geração de excedentes e impulsionamento econômico. Isso está alinhado à perspectiva dos autores, que entendem o debate na área como baseado em um modelo linear de interação entre ciência, tecnologia e produção (Bugge, Hansen e Klitkou, 2016).

Desta forma, esta abordagem está em fase com os postulados da Economia Ambiental Neoclássica, na medida em que compartilha similaridades quanto ao papel

da inovação tecnológica, visto que esta, com sua presumida capacidade de substituição, poderia oferecer soluções para os desafios relacionados ao abastecimento e à escassez. Quanto a abordagem espacial, Bugge, Hansen e Klitkou (2016) argumentam que a bioeconomia biotecnológica se caracteriza pela concentração em áreas estratégicas, como polos especializados em alta tecnologia biotecnológica, centros de pesquisa estatais de excelência ou regiões de destaque geográfico que acabam sendo as mais favorecidas.

## **2) A Bioeconomia de Biorecursos**

A bioeconomia de biorecursos tem como objetivo conciliar a necessidade de crescimento econômico com a sustentabilidade dos ecossistemas, por meio da introdução de biorecursos que assegurem a geração de excedente econômico (Bugge; Hansen; Klitkou, 2016). Desta forma, possui o foco em pesquisa, desenvolvimento e demonstração em setores-chaves que estejam relacionados com matérias-primas biológicas. Está baseada na utilização de recursos biológicos renováveis, como biomassa, para a produção de energia, materiais e produtos químicos. Ou seja, é focada na implementação de inovações derivadas dos recursos naturais, que se destacam como a principal fonte de lucratividade.

Nesta abordagem, tanto os aspectos econômicos quanto os ambientais são considerados igualmente relevantes. No entanto, percebe-se uma ênfase maior no desenvolvimento de tecnologias voltadas para bioprodutos, enquanto os aspectos ambientais relacionados à proteção e aos impactos dessas tecnologias são frequentemente tratados como garantidos, baseando-se na suposição de que a transição ocorrerá de forma ambientalmente sustentável (Bugge, Hansen e Klitkou, 2016). Por conseguinte, o uso do solo emerge como o elemento central para viabilizar esse tipo de bioeconomia, onde o excedente econômico é gerado por processos contínuos de inovação, que favoreçam a criação ou otimização do uso de materiais naturais, aprimoramento das técnicas de manejo e reciclagem de resíduos. Esses processos se tornam sustentáveis graças aos avanços na produtividade do solo e às técnicas que promovem sua preservação e mitigam a degradação (Bugge, Hansen e Klitkou, 2016).

### 3) A Bioeconomia Bioecológica

Esta abordagem enfatiza a conservação da biodiversidade e o manejo sustentável dos ecossistemas naturais, valorizando práticas que respeitem os ciclos naturais e que promovam o equilíbrio entre o uso dos recursos e a preservação ambiental. Na classificação de Bugge, Hansen e Klitkou (2016), esta vertente diz respeito a sistemas econômicos nos quais o critério de sustentabilidade se sobrepõe aos de crescimento unilateral da economia. Neste entendimento, esta abordagem trata, essencialmente, de um paradigma distinto dos dois tipos anteriores, visto que, a visão da bioeconomia bioecológica traz a primazia da questão ambiental em relação a econômica (Bugge; Hansen; Klitkou, 2016).

Desta maneira, a Bioeconomia Bioecológica adota a mesma premissa da Economia Ecológica, considerando o sistema econômico como um subsistema de um sistema mais amplo. Por isso, a literatura referente a esse tipo de bioeconomia frequentemente apresenta uma visão crítica em relação às ideias de crescimento econômico contínuo e ao uso de biorecursos defendidas pelas outras abordagens mencionadas. Tais críticas baseiam-se nos efeitos adversos do uso de biorecursos, que podem oferecer riscos à saúde humana, nas desigualdades de acesso a esses recursos e nos dilemas éticos envolvidos (Bugge, Hansen e Klitkou, 2016).

No que concerne à geração de excedente econômico, este é alcançado por meio da transição para uma economia circular e sustentável, onde os principais pilares dessa abordagem incluem a conservação dos ecossistemas, promoção da biodiversidade o acesso sustentável aos serviços ecossistêmicos e a prevenção da degradação do solo. Ademais, os bioresíduos originados do sistema produtivo são considerados somente após rigorosos processos de reciclagem e reutilização (Bugge, Hansen e Klitkou, 2016).

Os autores ressaltam que, nesta vertente bioecológica, os fatores que impulsionam a inovação, os ganhos de produtividade e a redução de custos consistem em práticas orgânicas e ecológicas, as quais exigem a diminuição ou até mesmo a substituição das técnicas tradicionais, por serem intensivas em capital e de alto impacto negativo. Em relação à abordagem espacial, a Bioeconomia Bioecológica tem seu foco direcionado para soluções regionalizadas que valorizam a diversidade, a

cultura e os conhecimentos etnológicos, buscando apreender e respeitar suas características culturais, sociais e históricas.

Aqui também, pesquisa e inovação são aspectos-chave. No entanto, elas se dirigem para soluções locais, baseadas em diversidade, reuso de matéria e energia, além de manejo ecológico de espécies e de suas interações. É o caso de sistemas agrícolas que reduzem (ou eliminam) o uso de insumos agroquímicos e fontes de energia externas ao sistema. Predomina a busca de soluções produtivas/ reprodutivas baseadas em interações entre espécies e sistemas vivos, cujos resultados substituam parcial ou integralmente processos físicos, químicos e mecânicos convencionais, criando sistemas de ciclo completo, com forte componente de circularidade. (Costa, *et al.*, 2022).

No trabalho de Vivien *et al.* (2019), denominado "*The Hijacking of the Bioeconomy*", semelhante aos achados de Bugge, Hansen e Klitkou (2016), identificaram também três abordagens distintas de bioeconomia, cada uma com características e objetivos específicos. A Bioeconomia do tipo I (Bioecológica), cuja visão enfatiza a sustentabilidade forte e os limites ambientais do planeta. Neste tipo, a bioeconomia é concebida como um modelo para estruturar a economia dentro de limites ecológicos rigorosos, com foco na conservação, no uso eficiente dos recursos e na promoção da justiça social. Sua efetivação envolve a substituição dos combustíveis fósseis por biomassa de maneira sustentável, respeitando sempre a capacidade de suporte dos ecossistemas. Percebe-se, novamente, que essa abordagem está em harmonia com os fundamentos da Economia Ecológica.

A Bioeconomia tipo II (Bioindustrial), nesta abordagem há o foco no papel da biotecnologia e da inovação como promotores do crescimento econômico e da competitividade industrial. A biomassa é predominantemente tratada como uma matéria-prima destinada a substituir os recursos fósseis em processos industriais, com destaque para a produção de biocombustíveis, bioprodutos e materiais inovadores. Embora seja a sustentabilidade um aspecto considerado, o enfoque principal recai no avanço tecnológico e no crescimento econômico. A Bioeconomia do Tipo III (Biorrefinarias): esse tipo é orientado pela ideia de que as matérias primas e combustíveis fósseis serão substituídos pela biomassa, através de modelos produtivos com processos ou tecnologias similares.

Com o objetivo de condensar essas informações, o Quadro 4 fornece uma síntese dos três tipos de bioeconomia que, segundo estes autores, estão caracterizados da seguinte forma:

**Quadro 4. Tipos de Bioeconomia de acordo com Vivien et al. (2019)**

	Bioeconomia de Tipo I	Bioeconomia de Tipo II	Bioeconomia de Tipo III
<b>Exponentes</b>	Georgescu-Roegen (1975, 1978)	OECD (2009, 2017a, b, c)	Langeveld et al. (2010) EC (2012, 2018)
<b>Definições</b>	Uma economia ecológica, compatível com a biosfera	Uma economia de base científica impulsionada pela biotecnologia industrial	Uma economia baseada na biomassa
<b>Relação Natureza e Economia</b>	Megatendências com “tecnologias prometeicas”, enquanto se aguarda o advento de Prometeu III, a economia da prudência e da partilha	Perspectiva de uma quinta onda de Kondratiev baseada na ascensão da biotecnologia. A “economia das promessas tecno científicas”	A biorrefinação no centro da transição ecológica (Perspectiva a vários níveis). A economia da aprendizagem
<b>Sustentabilidade</b>	Abordagem “sustentabilidade forte” e perspectiva do decrescimento	Abordagem “sustentabilidade fraca”	Abordagem “Sustentabilidade fraca”
<b>Governança</b>	Deliberação democrática e planejamento ecológico	Mercantilização do conhecimento. Defesa dos direitos de propriedade intelectual	Política orientada por missões - Backcasting para identificar futuros desejáveis para a bioeconomia através da identificação de produtos e da coordenação das partes interessadas
<b>Tensões e Paradoxos</b>	Contra especialização em vez de soluções técnicas concretas. Críticas de grupos sociais que permanecem à margem dos centros de decisão. O decrescimento não está na agenda dos decisores.	Conflitos e concorrência no registo de patentes, mas a acumulação de conhecimentos continua a ser problemática. Como podem os processos biotecnológicos serem integrados em produtos multitecnológicos complexos? Como manter as promessas revolucionárias como uma solução única em todos os domínios de aplicação? Resistência social aos organismos geneticamente modificados.	Substituição de produtos ou funções por novos produtos (químicos e materiais). Provavelmente, aumento da pressão sobre os recursos e a terra.

Fonte: Vivien et al. (2019), elaboração própria.

Na categorização proposta por Vivien *et al.* (2019), a Bioeconomia Biotecnológica (Tipo II) adota uma abordagem de **sustentabilidade fraca**. Isto quer dizer que esta não considera a integridade dos ecossistemas como uma premissa essencial, uma vez que, adota um paradigma tecnológico e produtivo no qual o controle e até mesmo a degradação dos ecossistemas são vistos como aceitáveis, desde que aumentem a produtividade e a eficiência de processos econômicos.

Na Bioeconomia de Biorecursos (Tipo III), tal como a abordagem anterior, também dá ênfase ao papel da tecnologia, mas ao mesmo tempo reconhece a variedade de áreas e agentes envolvidos, além da influência determinante de suas interações na evolução dos processos de inovação. Em contrapartida, a questão espacial possui uma dinâmica significativamente distinta da abordagem Biotecnológica, pois focaliza as áreas rurais, conferindo a esta localização um papel primordial, evidenciando a importância dos recursos naturais. Isso poderia, como consequência, estimular o dinamismo das áreas rurais, fomentando a diversificação e criação de novos produtos com alto valor agregado.

No entanto, a abordagem espacial mantém-se de forma bastante genérica, desconsiderando as particularidades dos ecossistemas e as interações sociais presentes. Desta forma, segundo a análise de Vivien *et al.* (2019), essa concepção também está atrelada a uma abordagem de **sustentabilidade fraca**, dado que está associada às demandas de padronização e escala próprias de um paradigma tecnológico e produtivo, onde produtividade e eficiência são priorizadas em detrimento das singularidades regionais e da conservação da integridade de ecossistemas.

Por outro lado, na perspectiva da Bioeconomia Bioecológica (Tipo I) há o reconhecimento de que a economia deve operar dentro dos limites da biosfera. Nesta, os processos econômicos são projetados para respeitar esses limites ecológicos rigorosos, buscando um equilíbrio entre economia e ecologia. Dessa maneira, a visão da Bioeconomia Bioecológica é caracterizada por uma abordagem de **sustentabilidade forte**, visto que é compatível com os postulados que favorecem a sustentabilidade ambiental. Essa abordagem busca integrar práticas regionalizadas e sustentáveis, como o uso de recursos renováveis e a valorização da biodiversidade, para garantir que as atividades humanas não comprometam os sistemas naturais que sustentam a vida. Além disso, ela enfatiza a importância de uma economia circular, onde resíduos são reaproveitados e o desperdício é minimizado.

## 6.2 Transição Energética e Mudanças Climáticas

A preocupação com os impactos negativos decorrentes do uso de combustíveis fósseis como principal fonte de energia, como as mudanças climáticas, tem ocupado um espaço significativo nas agendas governamentais. O papel da energia como recurso essencial ao crescimento e desenvolvimento econômico, aliado à histórica dependência predominante de fontes não renováveis para sua produção, evidencia um dilema entre as dimensões econômica e ambiental. Este impasse constitui ponto central na discussão atual da bioeconomia, especialmente sob a ótica da Bioeconomia Bioecológica (ou Bioeconomia de tipo I), conforme apresentada por Vivien et al. (2019) e fundamentada nas ideias de Nicholas Georgescu-Roegen, que via o processo econômico como um processo macroevolucionário que pode ser preservado a longo prazo, desde que reconheça que o metabolismo biofísico humano é rigorosamente restrito pelos limites finitos da biosfera.

Desta forma, há uma grande tensão inerente entre a busca por crescimento econômico, historicamente impulsionada por fontes de energia não renováveis, e a necessidade de respeitar os limites ecológicos do planeta para garantir a sustentabilidade a longo prazo.

### 6.2.1 Dilemas da transição

A complexidade das questões que envolvem a transição energética torna evidente que a busca por sua solução está longe de ser convergente, especialmente devido às dificuldades associadas à compreensão do conceito de energias limpas ou renováveis, posto que, todas as formas de energia, mesmo as consideradas limpas, acarretam impactos ambientais. O termo "energias renováveis" diz respeito às fontes de energia provenientes de recursos naturais que se renovam ou são reabastecidas de maneira contínua e sustentável. Nessa categoria, segundo o *Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC, incluem-se a energia geotérmica, energia solar, energia hidrelétrica, energia oceânica, energia eólica e a bioenergia (biomassa). O IPCC ressalta que essas fontes são fundamentais para mitigar as mudanças

climáticas, pois têm um grande potencial para diminuir de forma significativa as emissões de GEE.

Entretanto, é evidente que, a elevada complexidade das estruturas de custos, aliada às incertezas acerca do êxito dessas tecnologias mais limpas, apresentam-se como obstáculos significativos para esse processo de transição. Cumpre assinalar, que a consolidação da matriz energética predominante, amplamente baseada na utilização de combustíveis fósseis, demandou um extenso período de investimentos contínuos em sistemas energéticos e instalações de grandes estruturas, o que se configura em outro obstáculo adicional à transição energética de baixo carbono.

Convém destacar ainda que, as estruturas energéticas mais limpas representam uma ameaça à lucratividade das grandes corporações energéticas dominantes, que auferem consideráveis recursos por meio do controle das matrizes tradicionais. Nesta situação, tanto os empresários quanto o próprio Estado, que exerce controle sobre o acesso ao petróleo, demonstram menor disposição em investir em tecnologias inovadoras devido às elevadas incertezas e às baixas taxas de retorno esperadas no curto e médio prazo. Entretanto, o relatório das Nações Unidas relacionado a sustentabilidade e crescimento econômico aponta para o fato de que:

Continuar operando nas trajetórias usuais de crescimento econômico irá exacerbar ainda mais a pressão exercida sobre os recursos e o meio ambiente natural do planeta, os quais já se aproximam de limites em que a vida se torna insustentável. Ficar onde se está não é mais uma opção. Mesmo se pararmos a máquina de crescimento econômico global agora, a depleção e a poluição de nosso ambiente natural ainda permanecerão, por causa dos padrões de consumo e método de produção prevalentes. (United Nations, 2011).

É fundamental a compreensão de que, embora as fontes renováveis sejam atualmente consideradas com uma das soluções mais promissora para reduzir as emissões de GEE, seu desenvolvimento ainda depende de infraestrutura alimentada por combustíveis fósseis. Por exemplo, apesar de o Sol ser uma fonte de energia renovável, os sistemas fotovoltaicos utilizados para capturar essa energia não podem ser classificados como totalmente renováveis, pois sua fabricação requer recursos provenientes de processos energéticos não renováveis. Da mesma forma, tecnologias amplamente elogiadas, como carros elétricos, turbinas eólicas e painéis solares,

incorporam metais de terras raras<sup>47</sup> em sua produção, cuja extração e processamento são intensivamente dependentes de combustíveis fósseis.

Mueller (2012, p. 501) argumenta que a cada momento, a sociedade conta com um complexo tecnológico, compreendendo uma matriz de receitas factíveis (as que permitem realizar o que se deseja) e não factíveis (com as quais se gostaria de contar, mas que ainda não estão disponíveis). O problema é que, para a economia vigente, das tecnologias factíveis, interessam apenas as economicamente viáveis (Georgescu-Roegen, 1986, p.15). Para que um complexo tecnológico funcione adequadamente, é indispensável o suprimento contínuo de matéria e energia. Porém, de acordo com as leis da termodinâmica, esses recursos não podem ser criados do nada, por isso torna-se essencial estabelecer processos que consiga transformar matéria e energia disponíveis no meio ambiente em formas que possam ser utilizadas em outras atividades. O principal desafio da atualidade reside na grande dificuldade de elaboração e acesso a essas tecnologias, as quais Georgescu denomina de tecnologia *prometeana*<sup>48</sup>.

Georgescu-Roegen (1971) utiliza o conceito de tecnologias prometeanas para explicar práticas que, ao tentar superar os limites naturais, acabam intensificando o uso de recursos finitos e acelerando o desgaste ecológico, em outras palavras, tecnologias prometeanas são aquelas que buscam superar os limites naturais por meio de soluções técnicas cada vez mais complexas e intensivas em energia.

---

<sup>47</sup> Os metais de terras raras são elementos químicos encontrados na crosta terrestre, conhecidos por suas propriedades únicas e amplamente utilizados em tecnologias modernas. São chamados de “raros” devido a sua concentração ocorrer em poucos locais ao redor do mundo, mas nestes locais, sua concentração é abundante. A extração desses metais é complexa, sendo estes essenciais para a fabricação de diversos produtos como: ímãs superpotentes (utilizados em turbinas eólicas, motores elétricos e equipamentos de alta tecnologia); telescópios espaciais e lasers (para aplicações científicas e industriais); baterias de carros elétricos (fundamentais para o armazenamento de energia); dispositivos eletrônicos (computadores, telas de TV e smartphones). A extração e o processamento desses metais frequentemente dependem de energia fóssil, o que gera impactos ambientais significativos. Além disso, sua importância geopolítica é alta, com países como Estados Unidos e China disputando o controle desses recursos. Ver no documentário *Planet of the Humans*, produzido por Michael Moore e dirigido por Jeff Gibbs. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Zk11vL7czE&list=WL>.

<sup>48</sup> O termo faz referência ao mito de Prometeu, que roubou o fogo dos deuses para dá-lo aos humanos, simbolizando o poder da técnica para dominar a natureza.

Georgescu aponta que essas tecnologias, em vez de considerar os ciclos naturais, atuam como extensões artificiais que podem causar impactos irreversíveis. Argumenta ainda que, no que diz respeito à energia, a humanidade até hoje obteve acesso basicamente a duas tecnologias prometeanas: a do controle do fogo e a da máquina à vapor.

Esse estado de coisas evidencia que, embora as alternativas no uso de energias renováveis representem avanços significativos em relação às fontes fósseis, essas alternativas ainda estão longe de serem substitutos completamente sustentáveis. As fontes de energias renováveis apresentam um ritmo de expansão relativamente lento na composição da matriz energética global, resultando em uma contribuição ainda restrita para a oferta total de energia primária. De tal forma que, os combustíveis fósseis ainda representam cerca de 80% da oferta total de energia primária global, enquanto as energias renováveis têm avançado lentamente, e continuam com uma participação limitada (IEA, 2016). Em 2023, as fontes renováveis corresponderam a aproximadamente 22% do consumo final global de energia, mostrando um crescimento em relação aos anos anteriores (Irena, 2024). Este panorama evidencia a necessidade de estratégias mais robustas para contribuir para a integração das energias renováveis, a fim de que desempenhem um papel mais significativo no cenário energético mundial.

Analisando a entropia, em sua visão mais ampla, e considerando os desafios da sustentabilidade econômica, verifica-se que a transição energética só será efetiva mediante uma transformação social profunda, dado que o consumo de combustíveis fósseis está intrinsecamente ligado ao modelo de vida estabelecido pela sociedade capitalista desde a Revolução Industrial. Portanto, o maior desafio não reside apenas na produção de energia renovável, mas também na reformulação dos padrões de produção e consumo, além da redução da escala econômica, permitindo um uso mais consciente e sustentável da energia.

Portanto, sob a perspectiva da Economia Ecológica, a transição energética transcende a mera substituição de fontes de energia, para uma mudança paradigmática na forma como os processos econômicos interagem com os ecossistemas. Desse modo, é necessário que a economia integre sua análise econômica e seus processos produtivos aos limites físicos do planeta, exigindo uma reavaliação da eficiência energética e a priorização de fontes renováveis que

respeitem os limites ecológicos. Assim, a transição energética, percebida como um processo capaz de promover a sustentabilidade ambiental, precisa também encorajar o avanço de novos estilos de desenvolvimento, com novas configurações de estruturas produtivas para a constituição de sociedades verdadeiramente resilientes.

### **6.3. A Economia da Sobrevivência e Vertentes Recentes**

O termo “economia da sobrevivência” foi empregado por Charles C. Mueller para descrever uma perspectiva da Economia Ecológica que é focada no desenvolvimento de longo prazo e, portanto, na interação entre sistemas econômicos e sistemas ambientais. Este termo também foi mencionado por Karl Polanyi que ressaltou a dependência humana em relação ao ambiente físico para sua existência. Mas o fato é que a expressão “economia da sobrevivência”, está fortemente associado a autores originários como Nicholas Georgescu-Roegen e Kenneth Boulding, que focaram suas atenções nos limites biofísicos do crescimento econômico e na necessidade de uma economia sustentável dentro dos limites planetários (Mueller, 2012). Desta forma, a economia da sobrevivência, assim como todo o corpo da Economia Ecológica, corresponde a uma abordagem que considera a sustentabilidade a longo prazo das atividades econômicas, levando em conta os limites impostos pela natureza, sendo fundamentada na lei da entropia.

Neste percurso, a economia da sobrevivência avança um estágio adicional, adotando a abordagem de decrescimento e sustentabilidade, reforçando a urgência de garantir que as gerações futuras tenham os recursos necessários para viver com qualidade, concentrando-se na preservação e regeneração dos recursos naturais, bem como na redução do consumo e desperdício. Em essência, essa abordagem pode ser considerada com uma variação da Economia Ecológica com aplicação prática e urgente de seus postulados, ressaltando a premente necessidade de ações para evitar um colapso ambiental e possibilitar um futuro sustentável.

Nicholas Georgescu-Roegen e Kenneth Boulding, como autores que forneceram as bases fundantes para a economia da sobrevivência, compartilham ideias semelhantes sobre a importância da lei da entropia na evolução a longo prazo da sociedade industrial. Entretanto, Georgescu era mais cético em relação ao papel

da tecnologia na resolução dos problemas ecológicos, acreditando que a tecnologia não poderia superar os limites impostos pela entropia. Boulding, embora também cético, era mais esperançoso sobre o potencial da inovação tecnológica para mitigar alguns desafios ambientais (Mueller, 2012).

Como já exposto neste estudo, Georgescu-Roegen ficou conhecido por sua obra "*The Entropy Law and the Economic Process*" (1971) onde ele aplica a entropia à economia, enfatizando a irreversibilidade dos processos econômicos e a degradação ambiental. Notadamente, Georgescu tinha uma perspectiva pessimista em sua avaliação sobre o comportamento da sociedade humana e sua interação com os recursos naturais. Em seu artigo *Energy and the economic Myths* (1975), expôs que:

Talvez o destino dos homens seja ter uma vida curta, mas impetuosa, uma existência excitante e vertiginosa, em vez de monótona e vegetativa. Deixemos outras espécies – as amebas, por exemplo – que não têm ambições espirituais, herdarem uma terra banhada de sol. (Georgescu-Roegen, 1975, p.379. Traduzido pela autora).

Por sua vez, Kenneth Boulding ficou conhecido por seu ensaio *The Economics of the Coming g Spaceship Earth* (1966), onde usa a metáfora da Terra como uma nave espacial com recursos limitados, ressaltando a necessidade de uma economia de estado estacionário. Boulding, utiliza uma conceituação mais ampla, embora menos precisa de entropia, entendendo-a como perda de potencial, onde:

O que detectamos na história da humanidade é a constante interação de dois processos, que atuam em sentidos opostos, dos quais um às vezes domina o outro. Um processo é o do princípio da entropia, interpretado como o princípio da exaustão de um dado potencial [...] mas essa perda de potencial é constantemente contraposta por processos de criação de potencial. (Boulding, 1980, p.184 e 187, *apud* Mueller, 2012)

Esta citação de Boulding, conforme referenciada por Mueller (2012), descreve a interação contínua entre dois fenômenos opostos, que são o princípio da entropia e a criação de potencial, onde o primeiro refere-se à tendência natural de degradação e perda de potencial energético e de recursos ao longo do tempo, enquanto o segundo, contrapõe a entropia, simbolizando os esforços humanos e naturais, ideias ou soluções que incluem regeneração ambiental, inovações tecnológicas e avanços sociais. A interação entre esses dois processos sugere que, apesar da humanidade enfrentar desafios relacionados à limitação de recursos, há também uma capacidade

contínua de adaptação e inovação, ressaltando a força da resiliência e a engenhosidade humanas frente às adversidades.

Em termos econômicos e ecológicos, isso significa dizer que os recursos naturais se esgotam e a energia disponível para realizar trabalho útil diminui e, em contrapartida, na criação de potencial existem processos que criam ou renovam potencial. Mueller (2012, p.499) argumenta que a evolução futura da sociedade humana será determinada, de um lado, por sua capacidade de reduzir a perda de potencial que gera e, do outro, por sua eficiência em recriar potencial. Reforçando essa perspectiva, afirma-se que a humanidade, mesmo diante de desafios significativos, demonstra uma habilidade notável para se adaptar e inovar, utilizando sua criatividade e resiliência para mitigar malefícios, superar adversidades e criar novas possibilidades.

Neste sentido, Kenneth Boulding acredita no potencial do princípio da *autopoiese*, cujo conceito foi desenvolvido pelos biólogos chilenos Francisco Varela e Humberto Maturana, em seu livro “De máquinas e seres vivos - autopoiese: a organização do vivo”, lançado em 1972. A autopoiese refere-se à capacidade dos sistemas vivos de se auto-organizarem e se auto manterem, criando e renovando continuamente seus próprios componentes. Desta forma, Boulding compartilha uma visão semelhante em termos de sistemas econômicos e ecológicos que necessitam ser sustentáveis e hábeis para se renovar. Segundo ele:

em um sistema estocástico um evento de dada probabilidade, por mais reduzida que esta seja, eventualmente ocorrerá desde que se passe um período de tempo suficientemente longo. E, uma vez ocorrido o evento, alteram-se as probabilidades de eventos na sua imediata vizinhança, simplesmente porque a ocorrência muda a estrutura do sistema. (Boulding, 1980 apud Mueller, 2012, p.499).

Boulding aponta para o inexorável esgotamento do estoque de recursos energéticos atualmente conhecidos e para o fato de que ainda não surgiram fontes alternativas viáveis de energia para resolver essa questão. Contudo, ele se apoia no princípio da autopoiese para argumentar que “não é impossível que se achem formas de recriar o potencial que vai se esgotando” (Mueller, 2012, p.500). Isso evoca, ao Prometheus III, referido por Georgescu-Roegen (1971), no qual seja possível transformar qualitativamente a energia e gerar simultaneamente uma reação em cadeia autossustentável, produzindo um grande excedente de energia disponível para

outros processos. Neste ponto, Georgescu-Roegen denota admitir a possibilidade de recriação de potencial, todavia, foi enfático em afirmar que esta recriação está muito longe de ocorrer, fazendo inclusive um alerta para o que chamou de falsas dádivas prometeanas<sup>49</sup>.

Um ponto que merece especial atenção, é o fato de que Georgescu e Boulding, marcados pela turbulenta crise do petróleo da década de 1970, apontaram como principal ameaça à sobrevivência da humanidade a crescente escassez de energia de baixa entropia armazenada no planeta. Embora reconhecessem os problemas de poluição e degradação causados pelo frenético crescimento econômico, a apreensão primordial deles residia no rápido esgotamento e no perigo de uma escassez crítica de capital energético.

Por conseguinte, perspectivas de variantes mais recentes da economia da sobrevivência deslocaram o foco principal de suas preocupações para os impactos desestabilizadores e irreversíveis causados pela aceleração entrópica. Desta forma, pesquisadores da economia da sobrevivência, estão cada vez mais preocupados em analisar com maior profundidade como o ritmo acelerado do crescimento econômico gera impactos desestabilizadores de crescente intoxicação ambiental de longo prazo, criando desequilíbrios ecológicos difíceis de reparar, ficando em um segundo plano as questões que envolvem o esgotamento de recursos naturais.

Sobre esse aspecto Robert Ayres (1996), destaca que os maiores riscos à estabilidade do ecossistema global não estão relacionados ao iminente esgotamento de recursos não renováveis de baixa entropia, mas sim nos impactos causados pelo processo de aceleração entrópica promovido pelo sistema econômico sobre o equilíbrio da natureza.

O globo terrestre como um sistema tem certa capacidade de assimilar elementos tóxicos e de se limpar e rejuvenescer. Mas as atividades antropogênicas estão produzindo rejeitos muito mais rapidamente que o permitido pela capacidade de regeneração da natureza (Ayres, 1995, p.2-3).

---

<sup>49</sup> *Promethean delusions* ou *Promethean follies* são um conceito crucial na crítica de Nicholas Georgescu-Roegen à visão econômica convencional e à fé excessiva no poder da tecnologia para superar os limites biofísicos do sistema terrestre.

Na perspectiva de Ayres (1995), a crescente intoxicação ambiental emerge como um subproduto inevitável do crescimento contínuo da produção e do metabolismo industrial, impulsionado por fluxos de materiais e energia que, seguindo as leis da termodinâmica, geram resíduos e poluição que desestabilizam os sistemas naturais e ameaçam o bem-estar humano. Sua análise, baseada nos princípios da termodinâmica e na avaliação dos fluxos de materiais, focaliza a urgência de uma compreensão aprofundada sobre os mecanismos econômicos para que seja factível a implementação de políticas eficazes para diminuir a produção de poluentes e fomentar uma economia alinhada com os limites ecológicos da Terra.

Desta forma, a "intoxicação" não é um problema isolado, mas uma consequência intrínseca de um sistema econômico que não internaliza adequadamente seus custos ambientais e opera em desacordo com as leis naturais. Outra vertente recente da economia da sobrevivência está vinculada ao Programa da Biodiversidade, subsidiado pelo Instituto Beijer<sup>50</sup> da Academia Real de Ciências da Suécia. Este programa concentra-se em questões de Economia Ecológica, onde uma de suas principais áreas de pesquisa é a importância da biodiversidade para a resiliência do ecossistema global.

A humanidade está inserida na biosfera e a molda em escalas locais e globais, do passado ao futuro. Ao mesmo tempo, a humanidade depende fundamentalmente da capacidade da biosfera de sustentar o desenvolvimento. (Beijer Institute, 2024).

O instituto Beijer destaca a importância da resiliência dos ecossistemas para preservar suas funções e serviços essenciais (alimentos, água limpa, preservação da resiliência de ecossistemas e regulação do clima), mesmo diante de alterações e perturbações. Essa perspectiva do grupo — que também tem como pano de fundo a teoria das estruturas dissipativas de Prigogine — focaliza o estudo do papel da biodiversidade na manutenção da estabilidade do quase-equilíbrio de ecossistemas.

Deste modo, a diversidade biológica é essencial para a capacidade de auto-organização do sistema global e sua habilidade de responder à degradação causada pelas atividades humanas. Sobre este aspecto, Mueller (2012, p.520) argumenta que:

---

<sup>50</sup> *Beijer Institute of Ecological Economics*: <https://beijer.kva.se/>

O esforço de pesquisa se iniciou pelo estabelecimento dos papéis centrais da diversidade de espécies no ecossistema global. Estes seriam basicamente dois: as diversas espécies propulsionam os fluxos de energia e de matéria – os ecociclos –e, ao fazerem isto, determinam as propriedades funcionais do ecossistema; e a diversidade fornece ao ecossistema resiliência em face de surpresas, de eventos extraordinários. No seu papel de sustentar ciclos biofísicos no contexto de uma hierarquia de ecossistemas, a diversidade biológica tem, portanto, um valor inestimável; ela é parte fundamental da capacidade de auto-organização do sistema global e, portanto, da sua habilidade de responder a pressões impostas pela degradação antrópica.

A magnitude da perda de espécies que ocorre no ecossistema global frequentemente passa despercebida em sua totalidade. A crise de extinção se estende muito além do foco midiático usual sobre o desmatamento das florestas tropicais úmidas, especialmente na Amazônia brasileira. A degradação de habitats e a consequente perda de biodiversidade são processos que ocorrem há séculos, ganhando ímpeto com a homogeneização da agricultura subsidiada pelo PMQG (que resulta na intoxicação de habitats por pesticidas e fertilizantes químicos), com a intensificação da formação de pastagens, pesca predatória, mineração, dentre outras atividades econômicas.

Os pesquisadores do Instituto Beijer advertem que, persistindo os atuais ritmos alarmantes de devastação da biodiversidade, a capacidade de recuperação do ecossistema global poderá ser severamente comprometida, correndo o risco de atingir um estado crítico com difícil chance de reversão. Isso traz implicações relevantes para as políticas de sustentabilidade, pois enfatiza a necessidade de proteger e recuperar a biodiversidade como ação indispensável para garantir a integridade dos ecossistemas e promover o bem-estar humano no longo prazo.

#### **6.4 Modelo Econômico Nequentrópico: Integração entre Crescimento e Conservação**

A arraigada oposição existente entre o crescimento econômico e a conservação de ecossistemas representa um dos maiores desafios da contemporaneidade. Como demonstrado ao longo deste estudo, historicamente, o desenvolvimento econômico, vinculado ao crescimento contínuo da produção, tem sido pautado pela exploração intensiva de recursos naturais, o que ostensivamente resulta em impactos como

degradação ambiental, redução da biodiversidade e desequilíbrios climáticos. Contudo, a crescente conscientização sobre a magnitude dos desafios ambientais globais têm impulsionado a busca por soluções integradas que compatibilize as metas de preservação e conservação de biomas com os objetivos mais amplos de crescimento econômico com inclusão social. Neste sentido, tornou-se imperativo explorar diversas perspectivas teóricas e abordagens práticas que busquem transcender essa dicotomia, para então oferecer caminhos que vislumbre um futuro sustentável, onde a prosperidade econômica e a saúde ambiental se reforcem mutuamente.

Nesta percepção, a busca por um futuro sustentável requer uma compreensão profunda do conceito de sustentabilidade em sua totalidade. A definição amplamente reconhecida, apresentada pela Comissão Brundtland das Nações Unidas em 1987, que caracteriza a sustentabilidade como a habilidade de "atender às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as futuras gerações atenderem às suas próprias necessidades" ressalta a importância de uma perspectiva de longo prazo e da equidade intergeracional.

Perspectivas atuais, mais abrangentes, definem a sustentabilidade como a capacidade de criar e manter comunidades e ecossistemas saudáveis, equitativos e diversos. Esta definição atualizada enfatiza a interdependência dos sistemas naturais e a importância da justiça social e ambiental como elementos intrínsecos da sustentabilidade. Desta forma, a evolução do conceito de sustentabilidade espelha o crescente entendimento das complexas relações entre as atividades humanas e o meio ambiente, enfatizando a necessidade de um equilíbrio dinâmico que possa assegurar o bem-estar das gerações presentes e futuras.

Por isso, para a compreensão dos limites biofísicos que a sustentabilidade deve acatar, é basilar considerar a perspectiva termodinâmica — particularmente a Lei da entropia — conforme elaborada por Georgescu-Roegen, abordada no capítulo 4, que desafia a noção de um crescimento ilimitado em um planeta finito, evidenciando a necessidade de modelos econômicos substantivos, que reconheçam e respeitem esses limites biofísicos. Contudo, conforme exposto no capítulo 5, apesar da tendência universal ao aumento da entropia, sistemas abertos como economias e florestas — contrariando essa tendência natural para a desordem e degradação — podem reduzir sua entropia interna importando recursos e energia do ambiente. Este é o princípio da neguentropia que diz respeito à habilidade de um sistema em manter

ou aumentar sua organização e ordem, mesmo em um ambiente que naturalmente se inclina para o caos e a desordem.

Entende-se, com base no que foi abordado por este estudo, que a atividade econômica configura-se como um processo dissipativo fundamentalmente limitado pela segunda lei da termodinâmica e pela capacidade dos ecossistemas da Terra de absorver resíduos e regenerar recursos naturais. Desta forma, a principal crítica da Economia Ecológica recai sobre a práxis econômica convencional que, orientada pela tradição teórica da Economia Neoclássica, negligencia a escala humana frente à finitude da biosfera, promovendo uma visão descolada dos limites biofísicos do planeta.

Destarte, torna-se imperativa a adoção de um modelo econômico neguentrópico, capaz de reconhecer e respeitar de forma explícita esses limites biofísicos. É nesta direção que o trabalho de Ilya Prigogine, sobre as estruturas dissipativas, abordado no capítulo 5, oferece contribuições valiosas ao demonstrar como a ordem pode emergir a partir do caos, e também ao evidenciar que tal organização permanece condicionada aos fluxos de energia e matéria disponíveis, reafirmando os limites impostos pela natureza.

Neste sentido, a compreensão da economia como um sistema dissipativo implica reconhecer que, a produção de bens e serviços não ocorre em um vácuo abstrato, mas sim em interação constante com os ciclos naturais, exigindo energia e matéria e gerando resíduos. Desta forma, a emergência de ordem, à luz das evidências apresentadas por Prigogine, não elimina os limites impostos pelos fluxos que sustentam essa organização, mas revela que a complexidade pode surgir em ambientes abertos, desde que haja disponibilidade de recursos e capacidade de dissipação.

Por conseguinte, em vez de perseguir um equilíbrio estático, a economia neguentrópica reconhece a instabilidade dinâmica e a não-linearidade como características inerentes e, mais do que isso, como oportunidades para auto-organização e inovação. Prigogine demonstrou que, longe do estado de equilíbrio, os sistemas podem atingir "pontos de bifurcação" onde as flutuações os impulsionam para estados novos, mais complexos e ordenados. A implicação estratégica é que as políticas (públicas, econômicas e organizacionais) não devem visar suprimir todas as mudanças ou manter um estado fixo, mas sim promover a

adaptabilidade e a resiliência, permitindo que o sistema navegue e “salte” para níveis mais altos de complexidade durante períodos de instabilidade. Isso envolve a compreensão e o gerenciamento de “pontos de inflexão” e o design para a robustez sistêmica, indo além da mera busca por eficiência.

Uma das implicações mais significativas é que um modelo neguentrópico não se sustenta sob a regência exclusiva das forças de mercado, pois requer uma estrutura de governança robusta que molde ativamente o comportamento econômico em direção à neguentropia sistêmica, potencialmente desafiando estruturas de poder existentes, incentivos financeiros e valores culturais que priorizam a acumulação material. Por isso, superar esses “bloqueios” exige não apenas novas tecnologias, mas fundamentalmente mudanças institucionais e comportamentais.

Logo, para superar a dicotomia entre o crescimento econômico e conservação de ecossistemas, é necessário “reconceitualizar” os fundamentos teóricos da economia. Em vez de enxergá-la como uma máquina estática em busca de equilíbrio, deve-se compreendê-la como um sistema complexo, dinâmico e adaptativo — uma estrutura dissipativa que evolui em constante interação com o meio ambiente. Nesse paradigma, a economia, tal como os organismos vivos, precisa trocar continuamente energia e matéria com a biosfera para sustentar e ampliar sua organização interna (neguentropia), ao mesmo tempo em que libera entropia de forma compatível com a capacidade de suporte da Terra. Esse novo olhar desloca radicalmente o foco da busca por crescimento material ilimitado para a valorização do desenvolvimento qualitativo, da organização sistêmica, da resiliência e do bem-estar coletivo. Numa perspectiva econômica sob o olhar da complexidade — que enxerga o sistema econômico como algo vivo, em constante movimento, perpetuamente se “recalculando” e se reconstruindo — oferecendo uma estrutura conceitual poderosa para compreender essa transformação.

Portanto, torna-se premente a sistematização e adoção de um modelo conceitual inovador, capaz de incorporar a complexidade dinâmica dos sistemas socioecológicos contemporâneos. Diante dos desafios impostos pela crise ambiental e pela limitação dos paradigmas econômicos convencionais, é necessário avançar para uma estrutura teórica que reconheça a economia como um sistema vivo, aberto, adaptativo e interdependente da biosfera. Nesse contexto, propõe-se o Modelo

Conceitual Neguentrópico, disposto no quadro 5, que articula fundamentos ecológicos, princípios da termodinâmica de sistemas abertos e abordagens da economia da complexidade, oferecendo uma base analítica e normativa para o desenvolvimento de práticas econômicas regenerativas, resilientes e socialmente justas.

**Quadro 5. Modelo Conceitual Neguentrópico – Proposta Sistemática**

<b>Elementos</b>	<b>Fundamentos</b>	<b>Exemplos sugeridos</b>
Princípio estruturante	Neguentropia como força de organização e complexidade ecológica	Energia solar, fluxo circular da floresta, metabolismo agroecológico
Base teórica	Economia Ecológica, Termodinâmica, Prigogine, Georgescu-Roegen	Daly, Martinez-Alier, Ayres, Mueller
Unidade de análise	Sistema Econômico como subsistema do Sistema Ecológico	Amazônia, florestas tropicais, territórios tradicionais
CrITÉRIOS operacionais	Limites biofísicos, irreversibilidade, não-linearidade, resiliência ecológica	Avaliação qualitativa e territorializada
Soluções neguentrópicas	Processos que mantêm ou aumentam complexidade ecológica e social	Agroecologia, extrativismo regenerativo, tecnologias apropriadas
Objetivo normativo	Desenvolvimento com qualidade, sem exceder a carga ecológica	Equidade intergeracional, justiça ambiental

**Fonte:** Elaboração própria.

O Modelo Conceitual Neguentrópico propõe uma abordagem sistêmica e transdisciplinar para a construção de uma economia ecologicamente integrada, fundamentada na lógica da complexidade e na dinâmica dos sistemas vivos. Em contraste com modelos econômicos tradicionais que buscam estabilidade e eficiência linear, esta proposta reconhece a instabilidade, a não-linearidade e a irreversibilidade como características inerentes aos sistemas ecológicos e sociais. Inspirado nas

contribuições de Ilya Prigogine sobre sistemas longe do equilíbrio e pontos de bifurcação, o modelo valoriza a neguentropia — ou seja, a capacidade de gerar ordem e complexidade — como princípio estruturante da organização econômica.

A base teórica do modelo articula saberes da Economia Ecológica, da Termodinâmica e das ciências da complexidade, incorporando os trabalhos de autores apresentados neste estudo, como Georgescu-Roegen, Prigogine, Daly, Martinez-Alier e Ayres. Essa perspectiva permite compreender o sistema econômico como um subsistema inserido e condicionado pelo sistema ecológico maior, implicando uma mudança na unidade de análise e na forma de avaliar os processos econômicos. Os critérios operacionais passam a considerar os limites biofísicos, a resiliência ecológica e a territorialidade, exigindo avaliações qualitativas que respeitem as especificidades locais.

As soluções propostas por este modelo envolvem práticas que mantêm ou ampliam a complexidade ecológica e social, como a agroecologia, os extrativismos regenerativos e o uso de tecnologias apropriadas. Tais práticas não apenas promovem a sustentabilidade, mas também fortalecem os vínculos comunitários e culturais, contribuindo para a justiça socioambiental. Por fim, o objetivo normativo do modelo é o desenvolvimento com equidade, sem ultrapassar a carga ecológica dos sistemas, assegurando justiça ambiental tanto entre gerações quanto dentro das gerações atuais.

Desta forma, dentro dos princípios do modelo conceitual neguentrópico apresentado, as economias podem buscar compatibilizar crescimento e conservação de ecossistemas, buscando a neguentropia, através de mudanças substantivas que dizem respeito à:

**i) Redefinição do propósito da economia:** conversão do crescimento quantitativo para o desenvolvimento qualitativo. Isso envolve parar com a "*Growthmania*", que foca no PIB como o principal indicador de sucesso econômico e priorizar o bem-estar humano, a justiça social/ambiental e a saúde ecológica, para haver efetivas melhoras na qualidade de vida das pessoas dentro dos limites planetários, em vez de simplesmente aumentar a produção e o consumo. Isso implica em métricas de sucesso que vão além do PIB, incorporando indicadores de sustentabilidade, equidade e qualidade de vida.

**ii) Manter uma escala econômica sustentável:** definida por fluxos de matéria e energia mantidos em níveis sustentáveis, ou seja, economias que dão ênfase na melhoria da qualidade de vida e na distribuição justa da riqueza disponível, e onde o uso de recursos naturais e a geração de resíduos sejam compatíveis com a capacidade de regeneração e absorção do meio ambiente.

**iii) Transição para fontes de energia renovável:** Faz-se necessário reduzir a dependência de recursos naturais e energia e transicionar para uma economia ecoeficiente, através da produção mais limpa e da transição para fontes de energia renovável. Neste entendimento, é também crucial a adoção de modelos econômicos circulares que priorizem a redução do desperdício e promovam a reutilização, remanufatura e reciclagem de produtos e materiais. Tais medidas contribuem significativamente para o declínio da dependência da extração constante de recursos naturais. Outro ponto importante a considerar é o fomento a sistemas de transporte público eficazes e modais de transporte ativos, bem como o estímulo à agricultura sustentável e à produção de alimentos em escala local, além da implementação de políticas de uso da terra que preservem os ecossistemas naturais.

**iv) Fortalecer a resiliência e a adaptação:** Construir economias resilientes, capazes de lidar com as transformações ambientais e sociais, como escassez de recursos e mudanças climáticas. Construir políticas de estímulos às atividades econômicas de caráter não predatório, combinadas com uma forte presença de políticas de comando e controle e de salvaguarda de direitos territoriais de populações tradicionais e indígenas (Fernandes, *et al.*, 2022). Também assume relevância a aplicação de recursos em infraestrutura verde, diversificação das atividades econômicas, incentivo à agricultura familiar e aos sistemas alimentares locais, além da elaboração de estratégias de adaptação às mudanças climáticas em diferentes escalas.

Como já abordado, as florestas movimentam-se para a neguentropia através da absorção de energia solar, da manutenção dos ciclos biogeoquímicos e da absorção de água e minerais. Desta forma, as florestas conseguem reduzir a entropia interna, crescendo e mantendo a ordem e complexidade do ecossistema. Neste entendimento, a preservação de florestas tropicais, como a Amazônica, é essencial para garantir a estabilidade dos ecossistemas, tanto locais quanto globais.

Considerada a maior floresta tropical do planeta, a Amazônia representa um ponto-chave de biodiversidade que desempenha um papel fundamental no equilíbrio ecológico mundial (IPAM, 2023). Além disso, ela funciona como um significativo sumidouro de carbono, absorvendo grandes quantidades de dióxido de carbono da atmosfera e ajudando na regulação do clima global. A Floresta Amazônica também impacta o ciclo da água global, liberando grandes volumes de vapor d'água na atmosfera, o que influencia padrões climáticos em regiões distantes (WRI, 2023).

Neste cenário, as comunidades tradicionais, incluindo povos indígenas, são atores essenciais na conservação florestal. Com conhecimentos ecológicos profundos acumulados ao longo de milhares de anos, essas comunidades desenvolvem práticas sustentáveis de manejo da floresta e atuam como seus guardiões naturais. Estudos recentes indicam que terras indígenas demarcadas apresentam níveis de desmatamento muito inferiores em comparação a outras áreas<sup>51</sup>. Práticas como o uso de plantas medicinais, manejo do fogo e agricultura sustentável promovem a resiliência da floresta.

Por isso, respeitar os direitos dessas populações e apoiar seus modos de vida é crucial para a proteção da Amazônia e da estabilidade do ecossistema global. Nesta direção, a Bioeconomia Bioecológica, como economia real em florestas tropicais, apresenta-se como um caminho promissor ao valorizar a floresta em pé e o conhecimento das comunidades locais. A esse respeito, Costa, F. *et al.* (2022) expõe que:

diante dessa nova fronteira do pensamento econômico e da necessidade de preservar o equilíbrio biótico e climático do planeta sem sacrificar o desenvolvimento local, entende-se que a bioeconomia em florestas tropicais como a Amazônia deve, principalmente ter por fundamento a conservação

---

<sup>51</sup> O Instituto Socioambiental (ISA) realiza monitoramentos contínuos e publica relatórios que evidenciam a menor taxa de desmatamento em terras indígenas. Um estudo recente mostrou que as Terras Indígenas (TIs) nos biomas Caatinga, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal permanecem 31,5% mais preservadas do que as áreas circundantes. Eles também apontam que na Amazônia, áreas fora de TIs são aproximadamente 16 vezes mais desmatadas do que aquelas dentro. Um outro relatório conjunto da Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) e do Fundo para o Desenvolvimento dos Povos Indígenas da América Latina e o Caribe (FILAC) constatou que, as florestas em territórios indígenas foram muito mais bem conservadas do que outras florestas na América Latina e no Caribe.

Para essas e outras informações acessar: <https://www.socioambiental.org/en/socio-environmental-news/undemarcated-indigenous-lands-are-more-vulnerable-in-the-caatinga-forest> e; <https://www.filac.org/how-to-tackle-deforestation-give-indigenous-people-their-land-rights/>

integral do bioma – entendido como um sistema vivo, diverso e livre de desmatamento – e, ao mesmo tempo, integrar-se tanto a um sistema econômico como a uma paisagem socioecológica marcada pela interação com sociedades humanas e floresta.

Esse modelo econômico propõe um desenvolvimento que equilibre prosperidade e conservação ecológica, garantindo a preservação da floresta para as futuras gerações. Isso quer dizer que, a Bioeconomia Bioecológica surge como um modelo eficiente, integrado e prático para o desenvolvimento sustentável, pautado na utilização consciente de recursos da sociobiodiversidade do próprio bioma, com respeito aos processos ecológicos.

Portanto, a superação da dicotomia entre crescimento e conservação ambiental não é um obstáculo intransponível, mas sim um desafio que requer a integração de diversas perspectivas e estratégias que foram aqui abordadas. Para este propósito, a Economia Ecológica oferece uma base teórica robusta e sensata, que incorpora princípios ecológicos ao pensamento e às políticas econômicas, propondo uma transição para um modelo mais justo e sustentável. Ao adotar os princípios da sustentabilidade e integrar considerações ecológicas em modelos econômicos factíveis, pode-se criar um futuro em que as atividades econômicas sejam ambientalmente sustentáveis e, ao mesmo tempo, contribuam ativamente para a restauração e fortalecimento do capital natural, levando a um mundo mais resiliente, equitativo e próspero para as gerações atuais e futuras.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista os objetivos estabelecidos por este estudo, ficou evidente que a trajetória histórica do pensamento econômico em relação ao crescimento e aos impactos ambientais dele decorrentes revela uma evolução significativa. A notar que na Escola Fisiocrata (século XVIII), o *Tableau Économique*, de François Quesnay, pode ser considerado como um dos primeiros modelos de fluxo circular da economia. Quesnay usou tal modelo para defender que a economia deveria seguir leis naturais e que o Estado deveria evitar interferências que atrapalhassem o fluxo do “*laissez-faire, laissez-passer*”. É como se ele tivesse desenhado um mapa da economia “ideal”, com a terra no centro de tudo, considerando a agricultura como a única atividade verdadeiramente produtiva. Essa visão influenciou fortemente Adam Smith, que depois expandiu a ideia de produtividade para além da agricultura, provocando uma mudança de enfoque econômico, corroborada pela primeira revolução industrial. Tal mudança refere-se à transição do pensamento fisiocrata para uma visão mais ampla, em que a produtividade e a geração de riqueza poderiam vir de diversos setores, especialmente da indústria e do comércio.

Por conseguinte, a Economia Clássica (século XVIII), em todo seu percurso, tratou a natureza de forma periférica, enxergando-a principalmente como fonte inesgotável de insumos sujeitos a retornos decrescentes. E foi nessa perspectiva que os economistas clássicos, assim como também os marxistas, embora com visões bem distintas, tenderam a ver o ambiente natural principalmente através de uma lente antropocêntrica, onde a natureza é percebida e tratada como um recurso a ser utilizado para atender às necessidades humanas e ao desenvolvimento econômico. Ou seja, tanto o pensamento clássico quanto o marxista contribuíram para uma visão instrumental da natureza.

Com o surgimento da escola marginalista, por volta da década de 1870 — que corresponde a fase inicial da Segunda Revolução Industrial, onde o meio ambiente já começava a sofrer os impactos do acelerado processo de industrialização — foi criada a teoria da utilidade marginal decrescente e o centro das preocupações dos economistas foi deslocado para o princípio marginal, havendo, com isso, mudanças na abordagem econômica, tanto em termos teóricos quanto metodológicos, com a

aplicação de analogias mecânicas trazidas da física newtoniana para a análise econômica.

Neste trajeto, cabe frisar que a Escola Neoclássica tentou, fervorosamente e de forma equivocada, gerenciar as questões ambientais como “externalidades”, por intermédio de mecanismos de mercado. Embora fosse considerada “inovadora” para a época, essa abordagem tratava os impactos ambientais como efeitos colaterais “não intencionais” do processo econômico. A limitação dessa abordagem reside no fato de que, ao recorrer exclusivamente a mecanismos como impostos e subsídios — a exemplo da *proposta de Pigou* — os economistas neoclássicos subestimaram a complexidade ecológica e a interdependência entre sistemas naturais e econômicos.

Desta forma, a Economia Neoclássica, que se tornou a corrente hegemônica no século XX, consolidou uma abordagem que, embora mais sofisticada em sua análise de mercado, seguiu atribuindo ao meio ambiente um papel secundário. Seus princípios fundamentais e a forma como abordou os impactos ambientais revelam uma miopia temporal e material que sistematicamente subvaloriza a integridade ambiental de longo prazo e a equidade intergeracional. Apesar de ser a corrente teórica predominante na análise econômica, a Economia Neoclássica só passou a incorporar a dimensão ambiental em seus fundamentos analíticos a partir da década de 1960, período em que o crescimento contínuo do sistema econômico passou a ser identificado como fonte de desordens ambientais, levando à contestação dos seus pressupostos, métodos e aplicações por outras correntes teóricas.

Neste sentido, a Economia Ambiental (que é uma derivação da Economia Neoclássica), surgiu como resposta à crise ecológica, passando a incorporar os recursos naturais e os impactos ecológicos nas análises econômicas, na busca de soluções dentro das premissas do próprio pensamento econômico neoclássico. Na realidade, a Economia Ambiental Neoclássica utiliza o conceito de sustentabilidade de forma performática, priorizando ações simbólicas e instrumentos de mercado que mantêm a lógica do crescimento econômico irrestrito, mas que não promovem transformações estruturais nas relações entre economia e natureza.

Cumprir destacar que, até meados da década de 1960, nenhuma escola econômica deu atenção direcionada à entrada de recursos naturais e à saída de resíduos provenientes dos processos produtivos. O paradigma dominante não conseguiu ou não quis integrar as realidades biofísicas fundamentais de um planeta

finito. Esse trajeto da não consideração inicial (Economia Clássica) à internalização superficial (Economia neoclássica e Ambiental) culmina na necessidade de uma mudança de paradigma fundamental e necessária em direção ao realismo biofísico, corroborada pela Economia Ecológica, que foi guiada pelas substantivas percepções entrópicas de Nicholas Georgescu-Roegen.

Georgescu-Roegen, fundador da Economia Ecológica, previu com notável antecedência as preocupações centrais que hoje impulsionam os debates sobre a sustentabilidade ambiental do desenvolvimento. Ele foi um dos primeiros a reconhecer que o processo econômico não ocorre de forma isolada, e sim transcorre, como sistema aberto, com uma entrada de materiais de baixa entropia e uma saída inevitável de resíduos de alta entropia. Essa perspectiva diferenciada o destacou de todas as outras escolas de pensamento econômico da época, que consistentemente falharam em considerar essa dimensão material. Por isso, a visão frutuosa de Georgescu representou uma verdadeira ruptura paradigmática na Economia, na acepção proposta por Thomas Kuhn, visto que, apesar das inúmeras divergências entre as diferentes escolas econômicas — clássica, marxista, neoclássica, keynesiana, Schumpeteriana, dentre outras — todas elas, sem exceção, compartilhavam a premissa de um sistema econômico isolado do ambiente natural. Todas essas escolas, talvez por “dependência de trajetória”, focaram na circulação de mercadorias e, portanto, na visão de um processo econômico circular e fechado, operacionalizado pelo paradigma mecânico.

Não obstante, Georgescu-Roegen revolucionou o pensamento econômico ao introduzir uma perspectiva biofísica que questionou as bases das teorias anteriores. Isto significa dizer que, ao aplicar a Lei da Entropia à economia, Georgescu deslocou fundamentalmente a compreensão da escassez de um conceito puramente econômico para um biofísico, onde toda atividade econômica leva inevitavelmente à degradação irreversível dos recursos naturais. Isso redefine a tão chamada “produção” econômica, não como um ato de criação, mas fundamentalmente como um processo de transformação entrópica. Essa visão desafia diretamente a ideia de crescimento material perpétuo.

Uma questão interessante que vale a pena ser ressaltada, uma vez que pode suscitar reflexões posteriores, é o fato de que Georgescu-Roegen, ao desenvolver sua teoria bioeconômica baseada na segunda lei da termodinâmica, não incorporou o

modelo das estruturas dissipativas de Ilya Prigogine — que descreve como sistemas abertos podem gerar ordem a partir do caos — e preferiu focar exclusivamente na irreversibilidade e na degradação entrópica dos processos econômicos, sem considerar a possibilidade de auto-organização e complexificação oferecida pela teoria das estruturas dissipativas. Esta reflexão se faz pertinente pois, apesar desses dois autores (que são contemporâneos) atuarem em campos distintos — economia e físico-química — suas ideias convergem em torno da termodinâmica e da irreversibilidade dos processos naturais.

Neste sentido, foi visto neste estudo que Georgescu-Roegen demonstrou uma preocupação central com os limites físicos e ecológicos impostos ao crescimento econômico, priorizando uma crítica filosófica e termodinâmica à Economia Neoclássica. Sua abordagem enfatizou a irreversibilidade dos processos econômicos e a degradação entrópica dos recursos naturais, sem recorrer aos mecanismos internos de auto-organização dos sistemas. Em contraste, Ilya Prigogine desenvolveu uma teoria voltada à termodinâmica de sistemas longe do equilíbrio, propondo que sistemas abertos são capazes de formar estruturas dissipativas, que correspondem às configurações organizadas que emergem da dissipação de energia. Desta forma, para Prigogine, a entropia não representa apenas desordem ou destruição, mas pode também constituir uma fonte de ordem e complexidade, como evidenciado em sistemas biológicos, ecossistemas e estruturas sociais. A instabilidade, nesse contexto, torna-se um vetor de transformação, possibilitando o surgimento de novas formas organizadas por meio de bifurcações e processos de auto-organização.

Sob essa perspectiva, a ausência de uma interlocução direta entre Georgescu-Roegen e a teoria de Prigogine pode ser atribuída a distintos fatores epistemológicos e históricos. Em primeiro lugar, os dois autores operavam em campos disciplinares distintos, em uma conjuntura histórica pouco propícia ao desenvolvimento de estudos transdisciplinares. Desta forma, enquanto Georgescu-Roegen se dedicava à crítica dos fundamentos da teoria econômica, Prigogine concentrava-se em modelos físico-químicos e matemáticos. Além disso, a obra principal de Georgescu-Roegen *The Entropy Law and the Economic Process* foi publicada em 1971, período em que a teoria das estruturas dissipativas de Prigogine ainda se encontrava em desenvolvimento. Embora Prigogine tenha recebido o Prêmio Nobel em 1977 por seu trabalho intitulado *His contributions to non-equilibrium thermodynamics, particularly*

*the theory of dissipative structures*, suas ideias só passaram a ser amplamente aplicadas fora da física nos anos subsequentes, podendo haver uma questão de *timing* e acesso às ideias. É plausível também considerar que Georgescu-Roegen tenha mantido certo ceticismo quanto à aplicabilidade das estruturas dissipativas à problemática da finitude dos recursos naturais, uma vez que, mesmo diante de reorganizações sistêmicas, os fluxos energéticos permanecem limitados.

Contudo, no contexto contemporâneo, torna-se cada vez mais evidente a necessidade de integrar essas duas perspectivas. Isso porque a abordagem de Georgescu-Roegen oferece uma compreensão crítica dos limites biofísicos e ecológicos que condicionam os sistemas econômicos, enquanto a teoria de Prigogine fornece ferramentas conceituais para pensar em processos adaptativos e evolutivos que ocorrem dentro desses limites. Tal integração é fundamental para o avanço de uma epistemologia sistêmica voltada à sustentabilidade e à transição ecológica.

De todo modo, é evidente que Georgescu-Roegen antecipou, de maneira pioneira e intelectualmente rigorosa, problemáticas que hoje se configuram como centrais nas discussões sobre a sustentabilidade ambiental do desenvolvimento, evidenciando a relevância de sua contribuição teórica para os debates contemporâneos. Paradoxalmente, essa mesma lucidez analítica foi, em sua época, motivo de marginalização: ao confrontar diretamente a lógica dominante da economia neoclássica e ao explicitar suas limitações — sobretudo a concepção do processo econômico como um sistema de moto-perpétuo que ignora transformações qualitativas e dinâmicas — Georgescu-Roegen acabou sendo ignorado por um campo econômico ainda preso a paradigmas mecanicistas e lineares, incapaz de assimilar a complexidade e o caráter disruptivo de sua abordagem evolutiva e entrópica da economia.

Por conseguinte, as ideias visionárias de Georgescu-Roegen não encontraram receptividade em sua época. No entanto, a partir do início do século XXI, elas começaram a ser resgatadas e vêm ganhando crescente reconhecimento, tanto pela gradativa consciência da gravidade das questões ambientais globais, quanto pela compreensão de que sistemas complexos não podem ser compreendidos e plenamente explicados por meio de modelos científicos reducionistas e estáticos. Destarte, a redescoberta do raciocínio lógico e empírico contidos nas ideias de Georgescu-Roegen vem ganhando espaço, especialmente, no campo da Economia

Ecológica e em suas vertentes mais atuais que operam fora do paradigma do equilíbrio.

Diante das evidências apresentadas, a hipótese inicial deste estudo foi plenamente confirmada, pois verificou-se que os modelos da Economia Ambiental de orientação neoclássica operam com pressupostos como previsibilidade, reversibilidade e substitutibilidade do capital natural, premissas que se mostram inadequadas frente à complexidade, à não-linearidade e à irreversibilidade dos sistemas ecológicos. Desse modo, a investigação revelou que tais modelos falham por não captar as dinâmicas multifacetadas dos ecossistemas e suas interações profundas com os processos produtivos, ignorando aspectos cruciais como incertezas, assimetrias de informação e limites biofísicos. Essa limitação teórica da Economia Ambiental compromete a capacidade de resposta às reais implicações ambientais da atividade econômica, ao minimizar ou negligenciar os impactos irreversíveis e a degradação sistêmica do meio ambiente.

Por conseguinte, os modelos analíticos da tradição neoclássica, alicerçados em premissas de otimização e substituição entre capitais natural e artificial, demonstram uma fragilidade conceitual ao abordar a integridade dos ecossistemas. O empenho de internalizar externalidades por meio de mecanismos de mercado, embora útil em determinadas situações, falha em não reconhecer a existência de limites biofísicos e a natureza insubstituível de muitos serviços ecossistêmicos. A crença fervorosa na “*Growthmania*”; no modelo linear de produção, cujo mecanismo é “extrair→transformar→consumir→descartar”; na capacidade de precificação e compensação para todos os danos ambientais ignoram a dimensão sistêmica e a imprevisibilidade dos sistemas complexos.

Em contraste inequívoco, a Economia Ecológica apresenta um arcabouço teórico robusto que valida plenamente as deficiências apontadas na hipótese. Ao conceber a economia como um subsistema da biosfera, ela reconhece as leis da termodinâmica (primeira e segunda) como nucleares, demonstrando que matéria e energia não podem ser criadas nem destruídas, e que os processos produtivos, por sua própria natureza, resultam na geração de entropia. A irreversibilidade de diversos impactos ambientais — como a contaminação de recursos hídricos e a perda de biodiversidade — constitui um princípio fundamental da análise ecológica, a qual não admite reversão plena nem compensações monetárias irrestritas.

Neste sentido, a não-linearidade dos sistemas ecológicos, descrita por pontos de inflexão e limiares de onde pequenas mudanças podem levar a desdobramentos imprevisíveis e até mesmo desproporcionais — como o colapso de ecossistemas ou a escalada de crises climáticas — é central para a Economia Ecológica. Instrumentos analíticos como os fluxos de energia e matéria; a capacidade de suporte; além dos serviços ecossistêmicos, considerados intrínsecos e insubstituíveis; possibilitam uma análise mais adequada à complexidade dos sistemas ecológicos do que os modelos lineares de equilíbrio adotados pela Economia Ambiental Neoclássica.

À luz desse diagnóstico, torna-se justificável a proposição de um modelo alternativo, fundamentado nos princípios da Economia Ecológica e da neguentropia, capaz de incorporar a complexidade dos sistemas naturais e promover uma abordagem mais integrada e sustentável das relações entre economia e ecologia. Assim sendo, a validação da hipótese desta tese não é meramente um exercício acadêmico; ela traz implicações significativas tanto para a formulação de políticas públicas eficazes, quanto para a compreensão mais aprofundada dos limites biofísicos do crescimento e, portanto, da necessidade de uma nova forma de pensar a economia. Tal constatação é crucial para orientar estratégias que promovam um desenvolvimento socioambiental legítimo e sustentável.

Diante do que foi discutido neste estudo, a questão que permeia toda sua extensão é se seria possível conceber e implementar um modelo conceitual inovador capaz de conciliar as aspirações de crescimento com padrões qualitativos e éticos, enquadrando as estratégias de desenvolvimento dentro dos limites de um projeto de sustentabilidade genuíno. Perspectivas recentes e mais abrangentes da Economia Ecológica acreditam nessa possibilidade. E atualmente, embora o esgotamento de recursos naturais continue sendo relevante, o foco se ampliou, e a principal preocupação recai sobre a capacidade limitada do planeta em absorver os resíduos e poluentes oriundos das atividades produtivas.

Em vista disso, as novas vertentes da Economia Ecológica, destacam a importância da resiliência dos ecossistemas para preservar suas funções e serviços essenciais, mesmo diante de perturbações. Essas novas abordagens — fundamentadas também na teoria das estruturas dissipativas de Prigogine — concentram-se na análise do papel da biodiversidade na manutenção da estabilidade do quase-equilíbrio de ecossistemas. Isso reforça que a diversidade biológica

desempenha um papel fundamental na auto-organização do ecossistema global e em sua aptidão para reagir aos impactos provocados pelas ações humanas.

Nesta lógica, a noção de sustentabilidade assume uma definição mais abrangente, sendo tratada como a capacidade de criar e manter comunidades e ecossistemas saudáveis, equitativos e diversos. Essa evolução do conceito de sustentabilidade enfatiza a interdependência dos sistemas naturais e a importância da justiça ambiental e social como elementos intrínsecos da sustentabilidade. Destarte, atenta-se que, para a verdadeira apreensão dos limites naturais ou biofísicos que a sustentabilidade deve acatar é fundamental considerar a perspectiva termodinâmica (Lei da Entropia), que confronta a ideia predominante de crescimento ilimitado em um planeta finito.

A análise realizada apontou também que apesar da tendência universal ao aumento da entropia, sistemas abertos como economias e florestas contrariam essa tendência natural para a desordem e degradação e podem reduzir sua entropia interna importando recursos e energia do ambiente. Neste princípio negentrópico — que diz respeito à habilidade de um sistema em manter ou aumentar sua organização e ordem, mesmo em um ambiente que se inclina para a desordem e caos — pode possibilitar a criação de novas formas de organização econômica mais inteligentes e adaptáveis. Desta forma, as economias podem buscar compatibilizar crescimento e conservação de ecossistemas, buscando a neguentropia, através de mudanças significativas que dizem respeito à redefinição do propósito da economia, mantendo uma escala econômica sustentável e realizando a transição para fontes de energias renováveis.

Diante do entendimento de que a conservação das florestas tropicais é essencial não somente para proteger a biodiversidade, mas também para assegurar o equilíbrio climático global e a continuidade dos serviços ecossistêmicos que elas fornecem, as vertentes atuais apontam para formas mais substantivas de conservar os ecossistemas naturais. Essas estratégias percebem que conservar florestas além de ser uma questão ambiental, também constitui uma oportunidade econômica, de inclusão e de justiça climática.

Neste contexto, a Bioeconomia Bioecológica se apresenta como paradigma produtivo e reprodutivo voltado para biomas de alta biodiversidade, como as florestas tropicais — em especial a Amazônia — que atua e transforma territórios, pautada por

critérios de sustentabilidade que se sobrepõem à lógica de crescimento unilateral da economia. Por essa razão, embora frequentemente invisibilizada pelos indicadores convencionais, revela-se como ação neguentrópica eficaz ao atender às demandas atuais, valorizando a floresta em pé e o conhecimento das comunidades locais. Ela propõe um modelo de desenvolvimento que valoriza a biodiversidade e os recursos naturais como ativos econômicos, ao mesmo tempo em que preserva os ecossistemas que os sustentam. Essa conciliação é explicada através do uso sustentável da biodiversidade, do uso de tecnologias a favor da natureza, da inclusão social e da valorização do conhecimento tradicional aliada à economia de baixo carbono. Deste modo, a Bioeconomia Bioecológica não vê a natureza como obstáculo ao crescimento, mas como parceira estratégica para um futuro mais justo e resiliente.

Tendo em vista os argumentos apresentados ao longo deste estudo, torna-se possível compreender que a qualidade de vida está intrinsecamente ligada à saúde da natureza, e isso exige uma mudança profunda na maneira como a sociedade pensa e age no mundo. A ciência ainda enfrenta inquietações quanto ao desconhecimento substancial dos limites impostos pela natureza. A capacidade de regeneração dos ecossistemas em escala planetária ainda não é plenamente compreendida, tampouco se sabe até que ponto a degradação pode avançar sem provocar alterações abruptas e irreversíveis. Soma-se a isso a incerteza quanto às implicações dessas rupturas para o bem-estar humano. Diante disso, torna-se estratégica a priorização da sustentabilidade, com foco na defesa da resiliência dos sistemas ecológicos dos quais a humanidade depende para sua sobrevivência.

Mas, as grandes questões da humanidade costumam gritar em silêncio e quase ninguém quer ouvi-las. Há, na marcha acelerada do progresso, um silêncio incômodo, aquele das perguntas que foram deixadas de lado, ignoradas, esquecidas. Em nome do crescimento irrestrito, empilha-se certezas frágeis sobre fundamentos equivocados. A paisagem que sustenta a vida é tratada como cenário, e não condição da própria existência. Entre o ruído das máquinas e a pressa das decisões, a voz da natureza se perde, mas ela está ali, sutil e insistente... como quem ainda tenta alertar a todos do que se aproxima.

## REFERÊNCIAS

- ABRAMOVAY, Ricardo. **Paradigmas do capitalismo agrário em questão**. Edusp, 2012.
- ACSELRAD, H.; BEZERRA, G. DAS N.; MELLO, C. C. DO A. O que é justiça ambiental. Rio de Janeiro: Garamond Universitária, 2009.
- ACSELRAD, Henri et al. **Conflitos ambientais no Brasil**. Relume Dumará, 2014.
- ANDRADE, A. G. de; URQUIAGA, S.; FARIA, S. M. de. *Ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais*. Rio de Janeiro: **Embrapa Solos**, 1999. 50 p. (Embrapa Solos. Documentos, 13).
- AFLISIA, Noza; ALIE, Anang Azharie; HARYANTI, Erni. Critical Study of the Modern Science Epistemology. **Asian Journal of Multidisciplinary Research & Review (AJMRR)**, v. 2, n. 1, p. 1-21, 2021.
- AHMAD, Munir; WU, Yiyun. Combined role of green productivity growth, economic globalization, and eco-innovation in achieving ecological sustainability for OECD economies. **Journal of Environmental Management**, v. 302, p. 113980, 2022.
- ALTVATER, E. *Der Preis des Wohlstands, oder Umweltplünderung und neue Welt(un)ordnung*. Münster (Westfälisches Dampfboot): 1992 [português: *O preço da riqueza. Pilhagem ambiental e a nova (des)ordem mundial*. São Paulo (Editora da Universidade Estadual Paulista): 1995.
- \_\_\_\_\_. Existe um marxismo ecológico. A teoria marxista hoje. Problemas e perspectivas. Buenos Aires, CLACSO, Consejo Latinoamericano de Ciências Sociales. Editorial/Editor 2007, p. 360-385.
- \_\_\_\_\_. O capitalismo fóssil e seu ambiente social e natural. **Revista Baru-Revista Brasileira de Assuntos Regionais e Urbanos**, v. 3, n. 1, p. 143-164, 2017.
- ARIÈS, Paul. **Décroissance ou barbarie**. Lyon: Golias, 2005.
- AUSTIN, Kelly F. Ecologically unequal exchange. **Handbook on Inequality and the Environment: 0**, p. 44, 2023.
- AYRES, R.; AYRES, L.W. *Industrial Ecology: Toward Closing the Materials Cycle*. Cheltenham, Inglaterra: Edward Elgar, 1996.
- AZEVEDO, Thiago Vargas Escobar. **A Filosofia da Fisiocracia: Metafísica, política, economia**. Almedina Brasil, 2023.
- BACCARO, Lucio; BLYTH, Mark; PONTUSSON, Jonas (Ed.). **Diminishing returns: The new politics of growth and stagnation**. Oxford University Press, 2022.
- BALLESTERO, M. H. **Economía ambiental y economía ecológica: un balance crítico de su relación**. **Economía y Sociedad**. Costa Rica, V. 13, n. 33-34, p. 55-

65, dez. 2008. Disponível

em<:<http://www.revistas.una.ac.cr/index.php/economia/article/view/74/47>>

Acessado: 07/08/2023.

BACKHOUSE, Roger E. **História da economia mundial**. Estação Liberdade, 2007

BARBIER, Edward B. Introduction to the environmental Kuznets curve special issue. **Environment and Development Economics**, v. 2, n. 4, p. 369-381, 1997.

BLAIKIE, P. et BROOKFIELD, H (eds). Land Degradacion and Society. London: Methuen, 1987.

BELL, J. F. História do pensamento econômico. 3.ed. Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1982.

BENTON, Ted. Marxism and natural limits: an ecological critique and reconstruction. *New left review*, n. 178, p. 51, 1989.

BLANCHARD, Olivier; SHEEN, Jeffrey. **Macroeconomia; Edição Australásia**. Pearson Ensino Superior UA, 2013.

BORGES, Valter Divino. As leis de Newton e a sua interdisciplinaridade. 2020. *Environmental Law & Policy*. [epi.yale.edu](http://epi.yale.edu)

BORGHESI, Simone. The environmental Kuznets curve: a survey of the literature. **Available at SSRN 200556**, 1999.

BOUGRINE, Hassan. The Neoclassical School. In: **A Brief History of Economic Thought**. Edward Elgar Publishing, 2022. p. 54-72.

BRUNDTLAND, Gro Harlem et al. *Nosso futuro comum*. Nova York , v. 8, 1987.

BRUNDTLAND, G. Harlem (1987), *Our Common Future*. Report of the World Commission on Environment and Development. Versão online: <http://www.undocuments.net>

BUGGE, Markus M.; HANSEN, Teis; KLITKOU, Antje. What is the bioeconomy?. In: **From Waste to Value**. Routledge, 2019. p. 19-50.

CAVALCANTI, Clóvis. Concepções da economia ecológica: suas relações com a economia dominante e a economia ambiental. **Estudos avançados**, v. 24, p. 53-67, 2010.

CARNOT NLS. Reflexões sobre a força motriz do fogo e sobre as máquinas equipadas para desenvolver essa potência. Nova York: Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos; 1824.

CECHIN, Andrei. A natureza como limite da economia: a contribuição de Georgescu-Roegen. *São Paulo: Senac*, 2010.

CECHIN, Andrei Domingues; VEIGA, José Eli da. A economia ecológica e evolucionária de Georgescu-Roegen. **Brazilian Journal of Political Economy**, v. 30, p. 438-454, 2010.

CLAUSIUS, Rudolph. The Mechanical Theory of Heat: with its applications to the steam-engine and to the physical properties of bodies. London: John VanVoorst, 1867.

CMMAD –Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. Nosso Futuro Comum. Rio de Janeiro: Ed. Fundação Getúlio Vargas, 1991.

COSTA, Francisco de Assis. **Economia camponesa nas fronteiras do capitalismo: teoria e prática nos EUA e na Amazônia brasileira**. Núcleo de Altos Estudos Amazônicos, 2012.

\_\_\_\_\_. **Elementos para uma economia política da Amazônia: historicidade, territorialidade, diversidade, sustentabilidade**. Francisco de Assis Costa, 2012.

\_\_\_\_\_. Mercado e produção de terras na Amazônia: avaliação referida a trajetórias tecnológicas. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas**, v. 5, p. 25-39, 2010.

\_\_\_\_\_. Grande empresa e agricultura na Amazônia: dois momentos, dois fracassos (Paper 094). **Papers do NAEA**, v. 7, n. 1, 1998.

\_\_\_\_\_. **Formação agropecuária da Amazônia: os desafios do desenvolvimento sustentável**. Francisco de Assis Costa, 2012.

\_\_\_\_\_. As múltiplas faces da Amazônia. **FAPESP, Bêlé**m, 2019.

\_\_\_\_\_. **A brief economic history of the Amazon (1720-1970)**. Cambridge Scholars Publishing, 2018.

\_\_\_\_\_. Mudança estrutural na economia agrária da Amazônia: uma avaliação inicial usando os censos agropecuários (1995, 2006 e 2017). 2020.

COSTA, Francisco et al. Uma bioeconomia inovadora para a Amazônia: conceitos, limites e tendências para uma definição apropriada ao bioma floresta tropical. **Texto para discussão. São Paulo, Brasil: WRI Brasil**, 2022.

COSTA, Malcon do Prado; LONGHI, Solon Jonas; FÁVERO, Alessandro Abreu. Arquitetura e estrutura vertical da comunidade arbórea de uma floresta estacional subtropical. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 4, p. 1443-1454, 2018.

COSTANZA, Robert et al. **An introduction to ecological economics**. CRC Press, 1997.

DALY, Herman E. & FARLEY, Joshua. **Ecological Economics: Principles and Applications**. Washington: Island Press, 2003

DALY, Herman E. Steady-state economics versus growthmania: a critique of the orthodox conceptions of growth, wants, scarcity, and efficiency. **Policy Sciences**, p. 149-167, 1974.

\_\_\_\_\_. Economia ecológica. In: Haddad BM, Salomão BD, editores. Dicionário de economia ecológica. Cheltenham, Reino Unido: Edward Elgar; 2023. pág. 149

\_\_\_\_\_. **Entropy, growth, and the political economy of scarcity** [1979]. In: SMITH, Kerry (Org.). Scarcity and growth reconsidered. New York: Earthscan, 2011.

\_\_\_\_\_. The steady-state economy. 2008.

\_\_\_\_\_. **Steady-state economics: with new essays**. Island press, 1991.

\_\_\_\_\_. Beyond Growth – The economics of sustainable development. Boston: Beacon Press, 1996.

\_\_\_\_\_. A Economia do Século XXI. Porto Alegre: Mercado Aberto, 1984.

DA MOTTA, Ronaldo Seroa. **Economia ambiental**. FGV Editora, 2006.

DARWIN, Charles. **On the origin of species, 1859**. London, UK:: Routledge, 2004.

DELONG, J. Bradford; EICHENGREEN, Barry. The Marshall Plan: History's most successful structural adjustment program. 1991.

DENG, Jie et al. The development of ecological systems along paths of least resistance. **Current Biology**, v. 34, n. 20, p. 4813-4823. e14, 2024.

DE ZATARIN, Joseph. LA THÉORIE DES TÂTONNEMENTS CHEZ WALRAS. **Revue d'économie politique**, v. 82, n. 6, p. 1222-1228, 1972.

### **Dictionary of Economics - Oxford Reference**

<https://www.oxfordreference.com/abstract/10.1093/acref/9780199237043.001.0001/acref-9780199237043>

DINDA, Soumyananda. Environmental Kuznets curve hypothesis: a survey. **Ecological economics**, v. 49, n. 4, p. 431-455, 2004.

DORNINGER, Christian et al. Global patterns of ecologically unequal exchange: Implications for sustainability in the 21st century. **Ecological economics**, v. 179, p. 106824, 2021.

DORNBUSCH, Rudiger; FISCHER, Stanley; STARTZ, Richard. **Macroeconomía**. Bookman Editora, 2013.

DOSI, Giovanni. Technological paradigms and technological trajectories: a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. **Research policy**, v. 11, n. 3, p. 147-162, 1982.

EMBRAPA. *Ecossistemas tropicais abrigam mais de três quartos de todas as espécies de plantas e animais do planeta*. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/36090520/tropical-ecosystems-host-more-than-three-quarters-of-the-planets-plant-and-animal-species>. Acesso em: 18 abr. 2025.

ERKINJON O'G'LI, Nishonboyev Doniyor. O Caráter do Desenvolvimento das Relações Econômicas Internacionais. **Horizontes da Informação: American Journal of Library and Information Science Innovation (2993-2777)**, v. 8, pág. 29-33, 2023.

ESCOBAR, Yesid Carvajal. Interdisciplinariedad: desafío para la educación superior y la investigación. **Luna azul**, n. 31, p. 156-169, 2010.

FEIJÓ, Ricardo Luis Chaves. Repensando a revolução marginalista: uma síntese da recente crítica historiográfica às interpretações do período. **Análise Econômica**, v. 16, n. 30, 1998.

FERNANDES, Danilo Araújo et al. Por uma bioeconomia da sociobiodiversidade na Amazônia: lições do passado e perspectivas para o futuro. **Made Centro de Pesquisa em Macroeconomia das Desigualdades**, v. 23, p. 1-12, 2022.

FOLHES, Ricardo Theophilo; FERNANDES, Danilo Araújo. A dominância do paradigma tecnológico mecânico-químico-genético nas políticas para o desenvolvimento da bioeconomia na Amazônia (Paper 540). **Papers do NAEA**, v. 31, n. 1, 2022.

FURTADO, Celso. O mito do desenvolvimento econômico. São Paulo: Círculo do Livro: Companhia das Letras, 1974.

\_\_\_\_\_. **Formação econômica do Brasil**. Companhia das Letras, 2020.

Foster, John Bellamy. "Marx's Theory of Metabolic Rift: Classical Foundations for Environmental Sociology." *American Journal of Sociology*, vol. 105, no. 2, 1999, pp. 366-405.; Burkett, Paul. "Marx and Nature: A Red and Green Perspective." St. Martin's Press, 1999.

FRIEDRICH, Johannes; GE, Mengpin; PICKENS, Andrew. A trajetória dos 10 maiores emissores de carbono desde o Acordo de Paris em gráficos interativos. **Brasil: WRI Brasil**, v. 9, 2023.

FREY, K. A dimensão político-democrática nas teorias de desenvolvimento sustentável e suas implicações para a gestão local. *Ambiente & Sociedade*, Campinas, n. 9, p. 115-148, jul./dez. 2001.

FREITAS, Rosana de Carvalho Martinelli; NÉLSIS, Camila Magalhães; NUNES, Letícia Soares. A crítica marxista ao desenvolvimento (in) sustentável. **Revista Katálysis**, v. 15, p. 41-51, 2012.

FRIEDMANN, Harriet. Mudanças na divisão internacional do trabalho: complexos agroalimentares e agricultura de exportação. In: **Rumo a uma nova economia política da agricultura**. Routledge, 2021. p. 65-93

GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas. **Analytical economics: issues and problems**. Harvard University Press, 1966.

\_\_\_\_\_. *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1971.

----- . O decrescimento: entropia, ecologia e economia. São Paulo: Editora Senac, 2012. Apresentação e Organização de: Jacques Grinevald, Ivo Rens. Tradução de: Maria José Perillo Isaac

GIVENS, Jennifer E.; HUANG, Xiaorui; JORGENSON, Andrew K. Ecologically unequal exchange: A theory of global environmental injustice. **Sociology Compass**, v. 13, n. 5, p. e12693, 2019.

GODARD, O. O desenvolvimento sustentável: paisagem intelectual. In: CASTRO, E.; PINTON, F. (Org.). *Faces do trópico úmido*. Conceitos e questões sobre desenvolvimento e meio ambiente. Belém: UFPA, 1997.

GODOI, Deborah; LOBO, Marina; CAMARERO, Nina. Debate Agrário Clássico.2020.

GROSSMAN, Gene M.; KRUEGER, Alan B. Economic growth and the environment. **The quarterly journal of economics**, v. 110, n. 2, p. 353-377, 1995.

GUNDERSON, Lance H. Ecological resilience--in theory and application. **Annual review of ecology and systematics**, p. 425-439, 2000.

HALL, Charles AS et al. How We Got to Where We Are Today: A Brief History of Economic Thought and Its Paradoxes. **Energy and the Wealth of Nations: An Introduction to Biophysical Economics**, p. 23-65, 2018.

HALLIDAY, Thomas. **Otherlands: uma jornada pelos mundos extintos da Terra** . Random House, 2022.

HARDIN, Garrett. **The Tragedy of the Commons**: The population problem has no technical solution; it requires a fundamental extension in morality. *Science*, Vol 162. Issue 3839. 1968. pp.1243-1248. <https://doi.org/10.1126/science.162.3859.1243>

HE, Rong et al. Corporate carbon accounting: a literature review of carbon accounting research from the Kyoto Protocol to the Paris Agreement. **Accounting & Finance**, v. 62, n. 1, p. 261-298, 2022.

HERNÁNDEZ CERVANTES, Tania. Breve exposición de las contribuciones de Georgescu Roegen a la economía ecológica y un comentario crítico. **Argumentos (México, DF)**, v. 21, n. 56, p. 35-52, 2008

HOWARTH, Richard B.; NORGAARD, Richard B. Environmental valuation under sustainable development. In: **The Economics of Sustainability**. Routledge, 2017

HORNBORG, Alf. ¿ Cornucopia o Juego de Suma-Cero? Epistemología de la Sustentabilidad 2. **Journal of World-Systems Research**, v. 9, n. 2, p. 205-216, 2003.

HOBSBAWM, Eric. Era dos extremos: o breve século XX: 1914-1991. São Paulo: Companhia das Letras, 1995, p.253-281.

HOBSBAWM, Eric J. **Da revolução industrial inglesa ao imperialismo**. Forense-Universitária, 2003

IACGB – INTERNATIONAL ADVISORY COUNCIL ON GLOBAL BIOECONOMY. Expanding the sustainable bioeconomy: vision and way forward. Communiqué of the Global Bioeconomy Summit 2020. Berlin: IACGB, 2020. Disponível em: [https://gbs2020.net/wp-content/uploads/2020/11/GBS2020\\_IACGB-Communique.pdf](https://gbs2020.net/wp-content/uploads/2020/11/GBS2020_IACGB-Communique.pdf). Acesso em: 31 agosto 2023.

IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY). Key World Energy Statistics 2016. IEA, 2016. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2016.pdf>. Acesso em: 16 abr.2025.

International Division of Labour. *Oxford Reference*. Retrieved 20 Oct. 2023, from <https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/oi/authority.20110803100007544>

IPAM Amazônia (Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia) (2023) Disponível em <https://ipam.org.br/pesquisadores-comparam-abordagens-para-entender-emissoes-de-co2-na-amazonia/> Acesso em: 24 abr. 2025.

IRENA (2024), World Energy Transitions Outlook 2024: 1.5°C Pathway, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

JACKSON, Tim. **Prosperity without growth: Foundations for the economy of tomorrow**. Taylor & Francis, 2016.

JAPIASSÚ, Carlos Eduardo; GUERRA, Isabella Franco. 30 anos do relatório Brundtland: nosso futuro comum e o desenvolvimento sustentável como diretriz constitucional brasileira. **Revista de Direito da Cidade**, v. 9, n. 4, p. 1884-1901, 2017.

JEVONS, William Stanley. **A teoria da economia política**. Macmillan, 1879.

JORDAN, C. *et al.* **Nutrient Scavenging of Rainfall by the Canopy of an Amazonian Rain Forest**. *Biotropica* 12: 61-66. 1980.

KERSCHNER, Christian. Economic de-growth vs. steady-state economy. **Journal of cleaner production**, v. 18, n. 6, p. 544-551, 2010.

KOHAN, Néstor et al. Teorías del imperialismo y la dependencia desde el sur global. Editorial Cienflores, 2022.

KUHN, Thomas S. **The structure of scientific revolutions**. University of Chicago press, 2012.

KUJAWSKI, G.M. Ecologia: qual o verdadeiro lugar do homem? O Estado de São Paulo, São Paulo, Caderno 2, ano 1, n. 4, p. 4, 06 jul.1980.

LEFF, Enrique. Ecología y capital: racionalidad ambiental, democracia participativa y desarrollo sustentable. México/Argentina: SigloVeintiuno Editores, 1994.

\_\_\_\_\_. Epistemologia Ambiental. 3 ed. São Paulo: Cortez, 2002.

\_\_\_\_\_. Racionalidade Ambiental: a reapropriação social da natureza. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 2006

\_\_\_\_\_. Complexidade, racionalidade ambiental e diálogo de saberes **Educação e realidade**, v. 34, n. 03, p. 17-24, 2009.

\_\_\_\_\_. **Discursos sustentáveis**. Tradução de Silvana Cobucci Leite. São Paulo: Cortez, 2010, p. 23.

\_\_\_\_\_. Complexidade, interdisciplinaridade e saber ambiental. **Olhar de professor**, v. 14, n. 2, p. 309-335, 2011.

\_\_\_\_\_. **Ecologia política: da desconstrução do capital à territorialização da vida**. SciELO-Editora da Unicamp, 2021.

LEVALLOIS, Clément. Can de-growth be considered a policy option? A historical note on Nicholas Georgescu-Roegen and the Club of Rome. **Ecological economics**, v. 69, n. 11, p. 2271-2278, 2010.

LOVE, Joseph L. Raul Prebisch e as origens da doutrina da troca desigual. Revista Latino-Americana de Pesquisa, v. 3, pág. 45-72, 1980.

LUTZENBERGER, José A.; DREYER, Lilian. **Garimpo ou gestão: crítica ecológica ao pensamento econômico**. Pelo Planeta, 2009

MAFFEO, Aníbal José. La Guerra de Yom Kippur y la crisis del petróleo de 1973. **Revista relaciones internacionales**, v. 25, n. 1, p. 2-6, 2003.

MANKIW, N. Gregory et al. Introdução à economia. 2005.

MARQUES, Luiz. **Capitalismo e colapso ambiental**. Editora da Unicamp, 2018.

MARTINEZ-ALIER, Joan; JUSMET, Jordi Roca. **Economía ecológica y política ambiental**. Fondo de Cultura económica, 2015. (ALIER; JUSMET, 2015)

MARTÍNEZ-ALIER, Joan. **Land, water, air and freedom: The making of world movements for environmental justice**. Edward Elgar Publishing, 2023.

\_\_\_\_\_. Da economia ecológica ao ecologismo popular. Blumenati: Ed. FURB, 1998.

\_\_\_\_\_. Ecological economics. 2001.

\_\_\_\_\_. et al. Sustainable de-growth: Mapping the context, criticisms and future prospects of an emergent paradigm. **Ecological economics**, v. 69, n. 9, 2010.

\_\_\_\_\_. **Economia ecológica**. *International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences*, v. 22, 2015.

\_\_\_\_\_. **Economia ecológica**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Economia, 1996.

MARTINEZ-ALIER, Joan et al. **Is there a global environmental justice movement?** *The Journal of Peasant Studies*, v. 43, n. 3, p. 731-755, 2016.

MARSHALL, Alfred. **Principles of economics: unabridged eighth edition**. Cosimo, Inc., 2009.

MARX, Karl. *O Capital: crítica da economia política*. São Paulo: Abril Cultural, 1983.

MAYUMI K, Giampietro G. Entropia em economia ecológica. In: Proops J, Safonov P, editores. *Modelagem em economia ecológica*. Cheltenham, Reino Unido: Edward Elgar; 2004. p. 80-101

MENGER C. *Princípios de economia política* São Paulo: Abril Cultural, 1983 (1871).

MIROWSKI, Philip. **More heat than light: economics as social physics, physics as nature's economics**. Cambridge University Press, 1991.

MORIN, Edgar; LISBOA, Eliane. **Introdução ao pensamento complexo**. Porto Alegre: Sulina, 2007.

MOULIN, Carolina Stange Azevedo. Georgescu-Roegen/Daly versus Solow/Stiglitz à luz da estrutura das revoluções científicas de Kuhn. **Cadernos do Desenvolvimento**, v. 15, n. 27, p. 37-62, 2020.

MUELLER, Charles C. O debate dos economistas sobre a sustentabilidade: uma avaliação sob a ótica da análise do processo produtivo de Georgescu-Roegen. **Estudos Econômicos (São Paulo)**, v. 35, p. 687-713, 2005.

\_\_\_\_\_. **Os economistas e as relações entre o sistema econômico e o meio ambiente**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1ª reimpressão, 2012.

\_\_\_\_\_. Avaliação de duas correntes da economia ambiental: a escola neoclássica e a economia da sobrevivência. **Brazilian Journal of Political Economy**, v. 18, p. 278-303, 2022.

MUELLER, Antony P. 150 anos “Princípios da Economia” de Carl Menger: Um legado duradouro. **MISES: Interdisciplinary Journal of Philosophy, Law and Economics**, v. 9, 2021.

MUNDIAL, Banco. Relatório sobre o desenvolvimento mundial 1992: desenvolvimento e meio ambiente. **Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas**, 1992.

NASCIMENTO, Elimar Pinheiro do. Trajetória da sustentabilidade: do ambiental ao social, do social ao econômico. **Estudos avançados**, v. 26, p. 51-64, 2012.

NOSS, Reed F. Beyond Kyoto: forest management in a time of rapid climate change. **Conservation biology**, v. 15, n. 3, p. 578-590, 2001.

ONU- **United Nations Organization** <https://www.un.org/en/observances/biological-diversity-day/convention>.

PEREIRA, Lisanil da Conceição Patrocínio. A AGRICULTURA CAMPONESA: QUESTÃO PARA DEBATE, 2005

PIGOU, Arthur. **The economics of welfare**. Routledge, 2017.

PIKETTY, Thomas. **O capital no século XXI**. Editora Intrínseca, 2014.

PRATA, Beverly J. et al. Mergulha na destruição total” e nos limites do capitalismo histórico. **Capitalismo em transformação: movimentos e contramovimentos no século XXI**. Cheltenham: Elgar, pág. 35-45, 2019

PRIGOGINE, Ilya; KONDEPUDI, Dilip; DA COSTA, Madalena Poole. **Termodinâmica: Dos motores térmicos às estruturas dissipativas**. 1999.

PRIGOGINE, Ilya; STENGERS, Isabelle. **A nova aliança: metamorfose da ciência**. Tradução de Miguel Faria e Maria Joaquina Machado Trincheira. Brasília: Universidade de Brasília, 1991, p. 87.

PROCTOR, Robert. **Value-free science?: Purity and power in modern knowledge**. Harvard University Press, 1991.

QUESNAY, François. **Tableau économique**. British Economic Association, 1894.

REDCLIFT, Michael. **Development and the environmental crisis: Red or green alternatives**. Routledge, 2010.

RAO, Y. V. C. **An introduction to thermodynamics**. Universities Press, 2004.

RAO, Brinda. La lucha por las condiciones de producción y la producción de las condiciones para la emancipación: las mujeres y el agua en Maharashtra, India. **Ecología política**, n. 1, p. 32-42, 1991.

RAWORTH, Kate. **Doughnut economics: seven ways to think like a 21st-century economist**. Chelsea Green Publishing, 2017.

REBÊLO, Felipe Cesar. Clássicos, marxistas e marginalistas: uma análise econômico-jurídica. *Revista Publicum*, v. 3, n. 2, p. 106-133, 2017.

SACHS, IGNACY. *Ecodesenvolvimento: crescer sem destruir*. São Paulo: Editora Vértice, 1981.

\_\_\_\_\_. *Estratégias de transição para o século XXI: desenvolvimento e meio ambiente*. São Paulo: Studio Nobel/Fundap, 1993.

\_\_\_\_\_. *Caminhos para o desenvolvimento sustentável*. Editora Garamond, 2000.

SAMPAIO JR, Plínio de Arruda. Desenvolvimentismo e neodesenvolvimentismo: tragédia e farsa. ***Serviço Social & Sociedade***, p. 672-688, 2012.

SAMUELSON, Paul A.; NORDHAUS, William D. ***Economía***. AMGH Editora, 2012.

SÁNCHEZ, Luis Enrique. ***Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos***. Oficina de textos, 2020.

SANTOS, Roberto Santana et al. O capitalismo dependente brasileiro e a globalização neoliberal: três momentos de uma inserção subalterna (1980-2016). 2019.

SCHRÖDINGER, Erwin. *O que é a vida? O aspecto físico da célula viva*. Edições Rare Treasure, 2025.

SCHMIDT, A. *El concepto de naturaleza en Marx*. Siglo XXI. México D.F., 1976.

SCOTT, Allen J. ***Metropolis: From the division of labor to urban form***. Univ of California Press, 2022.

SCREPANTI, Ernesto; ZAMAGNI, Stefano. ***Um esboço da história do pensamento econômico***. OUP Oxford, 2005.

SMITH, Adam. *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*. ***Readings in economic sociology***, p. 6-17, 2002 (1776).

SOHN, Louis B. Stockholm declaration on the human environment, the. ***Harv. Int'l LJ***, v. 14, p. 423, 1973.

SOLE, Ricard; LEVIN, Simon. Ecological complexity and the biosphere: the next 30 years. ***Philosophical Transactions of the Royal Society B***, v. 377, n. 1857, p. 20210376, 2022.

SOLOW, Robert. An Almost Practical Step toward Sustainability. *Resources Policy*, p. 162-172, set. 1993.

\_\_\_\_\_. Neoclassical growth theory. *Handbook of macroeconomics*, 1, 637-667, 1999.

\_\_\_\_\_. The economics of resources or the resources of economics, *American Economics Review*, Vol 64, pages 1-14, 1974.

SPENCER, Barbara J.; DIMAND, Robert W. The Diagrams of the Solow-Swan growth model. In: **Famous Figures and Diagrams in Economics**. Edward Elgar Publishing, 2010.

STERN, David I. The rise and fall of the environmental Kuznets curve. **World development**, v. 32, n. 8, p. 1419-1439, 2004.

STIGLITZ, Joseph. A neoclassical analysis of the economics of natural resources. [1979]. In: SMITH, Kerry (Org.). *Scarcity and Growth Reconsidered*. New York: Earthscan, 2011.

TEI, Yuichi; CHUNG, Ung-Il; SĂVOIU, Gheorghe. From bioeconomics to bioeconopysis in the context of (bio) diversity and modern morality. **Amfiteatru Economic**, v. 20, n. 49, p. 754- 770, 2018.

TIETENBERG, Tom; LEWIS, Lynne. **Environmental and natural resource economics**. Routledge, 2018.

THOMAS, Kuhn. The structure of scientific revolutions. **International Encyclopedia of Unified Science**, v. 2, n. 2, 1962.

UNEP- UN Environment Programme < <https://www.unep.org/pt-br/quem-somos/contato> > acessado em 22 de agosto de 2023.

VAN DEN BERGH, J. C. J. M. Themes, approaches, and differences with environmental economics. **Tinbergen Institute Recuperado el**, p. 18-01, 2010.

VEIGA, José Eli da. Apresentação à edição brasileira. In: GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas. **O decrescimento**. Entropia. Ecologia. Economia. Apresentação e organização Jacques Grinevald elvo Rens; tradução Maria José Perillo Isaac. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2012, p. 9-16.

VEIGA, José Eli da. Indicadores de sustentabilidade. **Estudos avançados**, v. 24, p. 39-52, 2010.

VIVIEN, F.-D. et al. The hijacking of the bioeconomy. **Ecological economics**, v. 159, p. 189- 197, 2019.

VIZEU, Fabio; MENEGHETTI, Francis Kanashiro; SEIFERT, Rene Eugenio. Por uma crítica ao conceito de desenvolvimento sustentável. **Cadernos Ebape. br**, v. 10, p. 569-583, 2012.

VON BERTALANFFY, Ludwig. Teoría general de los sistemas. **México: Editorial Fondo de Cultura Económica**, v. 336, 1976.

WAIRIU, Morgan. Land degradation and sustainable land management practices in Pacific Island Countries. **Regional Environmental Change**, v. 17, p. 1053-1064, 2017.

WALKER, Brian. Conserving biological diversity through ecosystem resilience. **Conservation biology**, v. 9, n. 4, p. 747-752, 1995.

WEBER, Gabriel; CABRAS, Ignazio. The Ecological Economy of Georgescu-Roegen. **Economic Theory and Globalization**, p. 221-238, 2019.

WOLF, M. J., Emerson, J. W., Esty, D. C., de Sherbinin, A., Wendling, Z. A., et al. (2022). *2022 Environmental Performance Index*. New Haven, CT: Yale Center

WONG, Michael L. et al. On the roles of function and selection in evolving systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 120, n. 43, p. e2310223120, 2023.

World Resources Institute (WRI) Brasil (2023): Disponível em <<https://www.wribrasil.org.br/noticias/florestas-em-terras-indigenas-estao-entre-os-ultimos-sumidouros-de-carbono-da-amazonia>> Acesso em: 20 abr. 2025.