

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS

**BIOECONOMIA E A DISPONIBILIDADE DE RECURSOS NATURAIS: UMA ABORDAGEM
TEÓRICA E QUANTITATIVA**

KAIKE ALVES DE SA

MARIANA
2025

KAIKE ALVES DE SA

Bioeconomia e a Disponibilidade de Recursos Naturais: Uma Abordagem Teórica e Quantitativa

Monografia apresentada ao Curso de Ciências Econômicas do Instituto de Ciências Sociais Aplicadas (ICSA) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) como requisito à obtenção do grau de Bacharel em Ciências Econômicas

Orientadores: Prof. Dr. Diogo Ferraz; Prof. Dra. Francisca Diana Ferreira Viana

MARIANA
2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S111b Sa, Kaike Alves De.
Bioeconomia e a disponibilidade de recursos naturais [manuscrito]:
uma abordagem teórica e quantitativa. / Kaike Alves De Sa. - 2025.
57 f.: il.: color., tab..

Orientadora: Profa. Dra. FRANCISCA DIANA FERREIRA VIANA.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Sociais Aplicadas. Graduação em Ciências
Econômicas .

1. Econometria. 2. Economia. 3. Recursos Naturais. I. VIANA,
FRANCISCA DIANA FERREIRA. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III.
Título.

CDU 330.15

Bibliotecário(a) Responsável: Essevalter De Sousa - Bibliotecário Coordenador
CBICSA/SISBIN/UFOP-CRB6a1407



FOLHA DE APROVAÇÃO

Kaike Alves de Sa

Bioeconomia e a disponibilidade de recursos naturais: uma abordagem teórica e quantitativa

Monografia apresentada ao Curso de Ciências Econômicas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Ciências Econômicas

Aprovada em 03 de setembro de 2025

Membros da banca

Dra. Francisca Diana Ferreira Viana - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Diogo Ferraz - Membro externo (Universidade de São Paulo)
Dr. Francisco Horácio Pereira de Oliveira - Membro interno (Universidade Federal de Ouro Preto)

Francisca Diana Ferreira Viana, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 15/09/2025



Documento assinado eletronicamente por **Francisca Diana Ferreira Viana, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/09/2025, às 10:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0977984** e o código CRC **9E1C35B9**.

RESUMO

A bioeconomia surge como um modelo econômico estratégico para conciliar o crescimento econômico com a sustentabilidade. Entretanto, a mensuração de sua eficácia é dificultada pela escassez de abordagens que tratem de forma integrada a relação entre bioeconomia e eficiência no uso de recursos naturais. Esta pesquisa aborda o problema da falta de indicadores capazes de avaliar o desempenho da bioeconomia de maneira ampla, considerando os impactos sociais, ambientais e econômicos. Diante disso, o objetivo geral do trabalho é analisar a relação entre a bioeconomia e a eficiência no uso de recursos naturais, a partir de uma abordagem teórica e empírica. A análise parte da hipótese de que uma maior eficiência no uso de recursos naturais, mensurada por um índice multidimensional, está associada a um melhor desempenho bioeconômico, refletido na redução das emissões de gases de efeito estufa. Para testar essa hipótese, foram utilizados dados de um painel de dez países, compreendendo o período de 2000 a 2020. A metodologia combina uma revisão sistemática da literatura e uma análise econométrica, na qual se propõe o Índice de Eficiência de Recursos Naturais (IERN), cuja relação com o desempenho bioeconômico é testada por meio de um modelo de dados em painel. O principal resultado revela uma correlação negativa e estatisticamente significativa entre o IERN defasado e as emissões de gases de efeito estufa. Adicionalmente, a revisão sistemática identificou lacunas na literatura, como a escassez de pesquisas em países em desenvolvimento. Os resultados validam o IERN como uma ferramenta para a formulação de políticas públicas e reforçam que a transição para uma bioeconomia sustentável depende de estratégias adaptadas a contextos regionais, especialmente em nações com alta dependência de recursos naturais.

Palavras-chave: Bioeconomia; Recursos Naturais; Índice de Eficiência; Revisão Sistemática; Econometria.

ABSTRACT

The bioeconomy emerges as a strategic economic model to reconcile economic growth with sustainability. However, measuring its effectiveness is hindered by the scarcity of approaches that address, in an integrated manner, the relationship between the bioeconomy and the efficient use of natural resources. This research addresses the issue of a lack of indicators that can comprehensively evaluate the performance of the bioeconomy, taking into account its social, environmental, and economic impacts. In this context, the study's general objective is to analyze the relationship between the bioeconomy and the efficient use of natural resources, employing both theoretical and empirical approaches. The analysis is based on the hypothesis that greater efficiency in the use of natural resources, as measured by a multidimensional index, is associated with improved bioeconomic performance, as reflected in reduced greenhouse gas emissions. To test this hypothesis, panel data from ten countries, covering the period from 2000 to 2020, were used. The methodology combines a systematic literature review and an econometric analysis, in which the Natural Resource Efficiency Index (IERN) is proposed, and its relationship with bioeconomic performance is tested through a panel data model. The main result reveals a statistically significant and negative correlation between the lagged IERN and greenhouse gas emissions. Additionally, the systematic review identified gaps in the literature, such as the scarcity of research in developing countries. The results validate the IERN as a tool for public policy formulation and reinforce that the transition to a sustainable bioeconomy depends on strategies adapted to regional contexts, especially in nations with high dependence on natural resources.

Keywords: Bioeconomy; Natural Resources; Efficiency Index; Systematic Review; Econometrics.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
1.1 OBJETIVOS.....	7
2 CAPÍTULO I - UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	8
2.1 INTRODUÇÃO	8
2.2 MÉTODO	9
2.3 RESULTADOS.....	11
2.4 GAPS DA LITERATURA	18
2.5 CONCLUSÃO	21
3 CAPÍTULO II - UMA ANÁLISE ECONOMETRICA	22
3.1 INTRODUÇÃO	22
3.2 JUSTIFICATIVA/RELEVÂNCIA.....	23
3.3 MÉTODO	24
3.3.1 BASE DE DADOS	24
3.3.2 CONSTRUÇÃO DO ÍNDICE DE EFICIÊNCIA DE RECURSOS NATURAIS	28
3.3.3 MODELO ECONOMETRICO.....	30
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
3.4.1 ANÁLISE DA ESTATÍSTICA DESCRITIVA DO IERN.....	33
3.4.2 ANÁLISE DA ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS SUBÍNDICES DO IERN	37
3.4.3 CORRELAÇÃO NOS SUBÍNDICES DO IERN	41
3.4.4 RESULTADOS DO MODELO ECONOMETRICO	42
3.5 CONCLUSÃO	45
4 CONCLUSÃO GERAL	48
REFERÊNCIAS	49
ANEXOS	55

1 INTRODUÇÃO

A intensificação das pressões ambientais, a escassez de recursos naturais e a urgência por um desenvolvimento sustentável têm impulsionado a busca por novos modelos econômicos. Nesse contexto, a bioeconomia surge como alternativa estratégica, integrando crescimento econômico, conservação ambiental e equidade social. Fundamentada no uso sustentável de recursos biológicos, em tecnologias de baixo impacto e na inovação sistêmica, ela propõe uma transição para modelos produtivos circulares, regenerativos e de baixo carbono (BUGGE; HANSEN; KLITKOU, 2016; LIOBIKIENE et al., 2019).

A bioeconomia surge como um modelo econômico estratégico para enfrentar os desafios ambientais contemporâneos, especialmente as mudanças climáticas e a transição para um desenvolvimento sustentável. Assim, pode ser definida como uma economia em que os recursos biológicos renováveis substituem os fósseis, servindo como base para a produção de materiais, químicos e energia (HINDERER; BRÄNDLE; KUCKERTZ, 2021). Esse conceito engloba visões distintas, como a tecnológica, que prioriza inovações e eficiência de mercado, e a socioecológica, que enfatiza mudanças nos padrões de consumo e produção sustentável.

A bioeconomia não apenas promove a descarbonização, mas também busca alinhar-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, embora sua implementação exija superar desafios como investimentos setoriais e a integração de políticas públicas. Porém, como destacado por Heimann (2019), sua implementação sem regulamentações sustentáveis pode gerar tanto sinergias quanto conflitos com os ODS, já que, enquanto a bioeconomia apoia a produção industrial limpa, seus impactos socioeconômicos e ambientais são ambíguos ou negativos, dependendo das políticas adotadas.

O modelo estratégico proposto pela bioeconomia é um modelo que seja capaz de conciliar o crescimento econômico com a sustentabilidade, mas, atualmente, enfrenta obstáculos resultantes da diversidade de prioridades regionais e da complexidade de coordenar ações em âmbito global. Nota-se também que as estratégias de bioeconomia variam amplamente conforme os contextos econômico, tecnológico e ecológico de cada país (PAPADOPOULOU; LOIZOU; CHATZITHEODORIDIS, 2022).

Os recursos naturais ocupam um papel central na lógica da bioeconomia, uma vez que são a base para a geração de biomassa, o desenvolvimento de bioprodutos e a substituição de combustíveis fósseis. No entanto, o uso eficiente e sustentável desses recursos ainda representa um desafio significativo, especialmente quando se busca mensurar seu impacto sobre o desempenho econômico e ambiental de diferentes países (LEITÃO, 2016). A compreensão da relação entre a bioeconomia e a disponibilidade de recursos naturais exige abordagens que integrem múltiplas dimensões, ambientais, econômicas e sociais, e que sejam capazes de captar a complexidade dessa interação.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral analisar a relação entre bioeconomia e eficiência no uso de recursos naturais, a partir de uma abordagem teórica e empírica, tendo como objetivos específicos:

1. Identificar os principais recursos naturais empregados em iniciativas bioeconômicas em diferentes países, incluindo terras aráveis, florestas, biodiversidade e água.
2. Examinar as estratégias e práticas bioeconômicas implementadas em contextos diversos de disponibilidade de recursos naturais.
3. Mapear lacunas de conhecimento na literatura existente sobre bioeconomia e recursos naturais e sugerir áreas prioritárias para futuras investigações.
4. Identificar os principais indicadores tradicionais utilizados na mensuração da bioeconomia, destacando suas limitações na avaliação da eficiência no uso de recursos naturais.
5. Propor um Índice Composto de Eficiência de Recursos Naturais (IERN), integrando dimensões ambientais, econômicas e sociais.
6. Aplicar um modelo econométrico de dados em painel para testar a relação entre o IERN e o desempenho econômico, avaliando a validade do indicador e sua utilidade como ferramenta para monitoramento e formulação de políticas públicas sustentáveis.

Para alcançar o objetivo geral, o trabalho foi estruturado em dois blocos complementares, uma etapa teórica e uma etapa empírica, cada uma com objetivos específicos. Portanto, a monografia está estruturada da seguinte forma: o Capítulo I apresenta a revisão sistemática da literatura, abordando os fundamentos teóricos, os métodos de seleção e análise dos estudos e os resultados identificados. O Capítulo II descreve a metodologia de construção do IERN, detalha as variáveis utilizadas, a base de dados, os procedimentos econométricos adotados e discute os resultados obtidos. A conclusão final integra os achados das duas partes, ressaltando suas contribuições e propondo recomendações para futuras pesquisas e políticas públicas.

2 CAPÍTULO I - UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

2.1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a bioeconomia surgiu como possível caminho para enfrentar os desafios globais relacionados ao esgotamento dos recursos naturais, às mudanças climáticas e à busca por um desenvolvimento mais sustentável (BUGGE; HANSEN; KLITKOU, 2016). A bioeconomia envolve a utilização de biomassa renovável, processos biotecnológicos e inovação tecnológica para substituir materiais e combustíveis fósseis, impulsionando a transição para uma economia de baixo carbono, além de buscar conciliar o crescimento econômico com a preservação ambiental e o bem-estar social, promovendo uma economia mais circular e regenerativa (MEJIAS et al., 2019).

A literatura científica busca compreender os fatores que influenciam as estratégias para promover novos modelos de desenvolvimento sustentável (i.e., Bioeconomia ou Economia Circular) (FERRAZ; PYKA, 2023). Entretanto, a distribuição desigual entre os países de recursos naturais (i.e., terras aráveis, florestas, recursos minerais e água) cria desafios e oportunidades para a implementação de iniciativas bioeconômicas (SCARLAT et al., 2015). Isto pode gerar desequilíbrios na capacidade de produção da bioeconomia e na sustentabilidade ambiental e social. A questão ganha ainda mais relevância no contexto contemporâneo, em que a crescente pressão sobre os recursos naturais, devido ao aumento da população e às mudanças climáticas, exige abordagens inovadoras e sustentáveis para o uso desses recursos (FEITOSA; MOREIRA, 2024).

A influência dos recursos naturais na bioeconomia é espacialmente variável (SCARLAT et al., 2015). Isto porque diferentes regiões podem apresentar características e disponibilidade de recursos distintos. A abundância de recursos naturais, como minerais, hidrocarbonetos, água, terras agricultáveis, florestas e entre outros, dos países da América Latina, por exemplo, tem sido interpretada mais como um risco do que como uma oportunidade por parte relevante da literatura sobre desenvolvimento econômico (PAMPLONA; CACCIAMALI, 2017). Portanto, a análise deste fenômeno requer uma abordagem que leve em conta a dimensão nacional e regional, a fim de capturar a complexidade das interações entre recursos naturais, práticas sustentáveis e diferentes contextos socioeconômicos. Além de contribuir com a transição para uma economia mais sustentável, a bioeconomia está diretamente ligada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) (POZZETTI; FERREIRA; SILVA, 2021). A bioeconomia pode impactar positivamente diversos ODS, como o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), ao promover o uso de biocombustíveis e fontes renováveis de energia, e o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global

do Clima), ao reduzir a emissão de gases de efeito estufa por meio de tecnologias inovadoras e da substituição de combustíveis fósseis. Além disso, a conservação da biodiversidade e o manejo sustentável de florestas e terras aráveis, promovidos pela bioeconomia, estão diretamente relacionados ao ODS 15 (Vida Terrestre) (SGOBBE et al., 2024).

A transição para uma bioeconomia moderna traz desafios significativos, como garantir a sustentabilidade das matérias-primas de biomassa, aumentar a eficiência no seu uso e alcançar economias de escala na mobilização desses recursos (SCARLAT et al., 2015).

Este capítulo tem como objetivo geral realizar uma revisão sistemática da literatura para examinar a relação entre os recursos naturais e a influência de estratégias e práticas voltadas para o desenvolvimento da bioeconomia, considerando as dimensões ambientais, sociais e econômicas do desenvolvimento sustentável. Tendo como objetivos específicos:

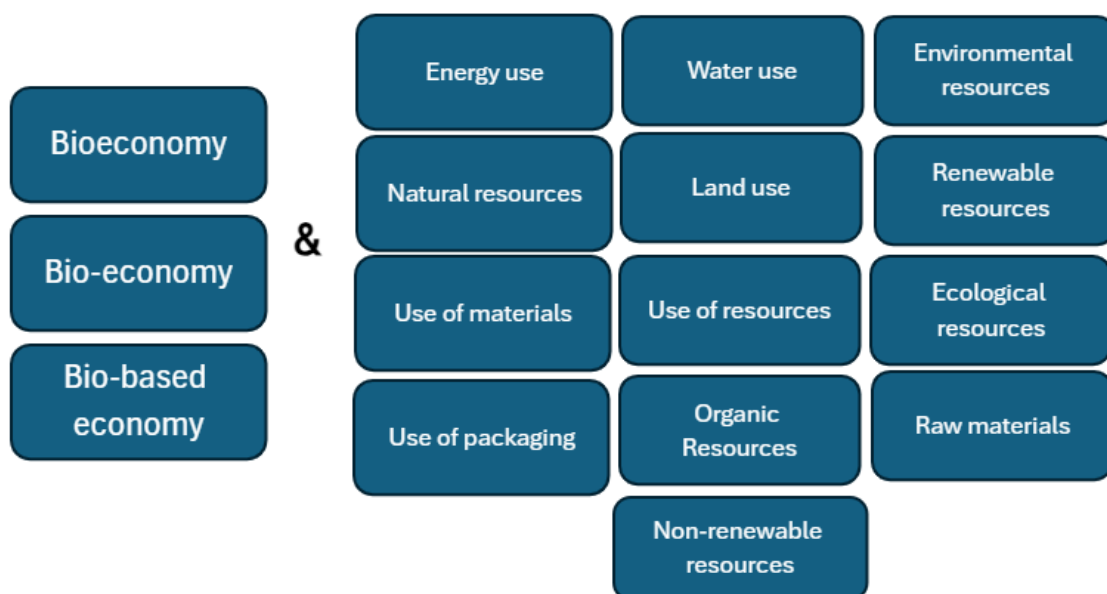
1. Identificar os principais recursos naturais empregados em iniciativas bioeconômicas em diferentes países, como terras aráveis, florestas, biodiversidade e água.
2. Examinar as estratégias e práticas bioeconômicas implementadas em contextos diversos de disponibilidade de recursos naturais.
3. Mapear lacunas de conhecimento na literatura existente e indicar áreas prioritárias para futuras investigações sobre bioeconomia e uso de recursos naturais.

2.2 MÉTODO

A primeira etapa desse capítulo consistiu na análise de artigos que já realizaram revisões sistemáticas da literatura sobre temas relacionados à bioeconomia, recursos naturais, Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), disponibilidade de recursos e políticas públicas. Foram identificados e analisados 11 artigos que empregaram metodologia de revisão sistemática, os quais forneceram insights sobre abordagens metodológicas e lacunas na literatura. Estes artigos estão apresentados na tabela A.1, em anexo.

Posteriormente, realizou-se uma busca inicial na base de dados Web of Science, utilizando as palavras-chave “Natural Resources” e “Systematic Literature Review”. O objetivo dessa etapa foi identificar trabalhos existentes na área, compreender o panorama da pesquisa e levantar as palavras-chave mais relevantes para serem empregadas na etapa principal do estudo. Essa busca resultou na análise de 60 artigos. A análise concentrou-se em identificar palavras-chave que poderiam ser utilizadas como sinônimos de “recursos naturais” na literatura científica, abrangendo conceitos como bioeconomia, uso de energia, recursos renováveis e não renováveis, água, terras e materiais, entre outros aspectos relacionados ao desenvolvimento sustentável e à gestão de recursos. A figura 1 mostra as palavras-chave utilizadas na pesquisa conforme a análise.

Figura 1. Palavras-chave utilizadas na pesquisa

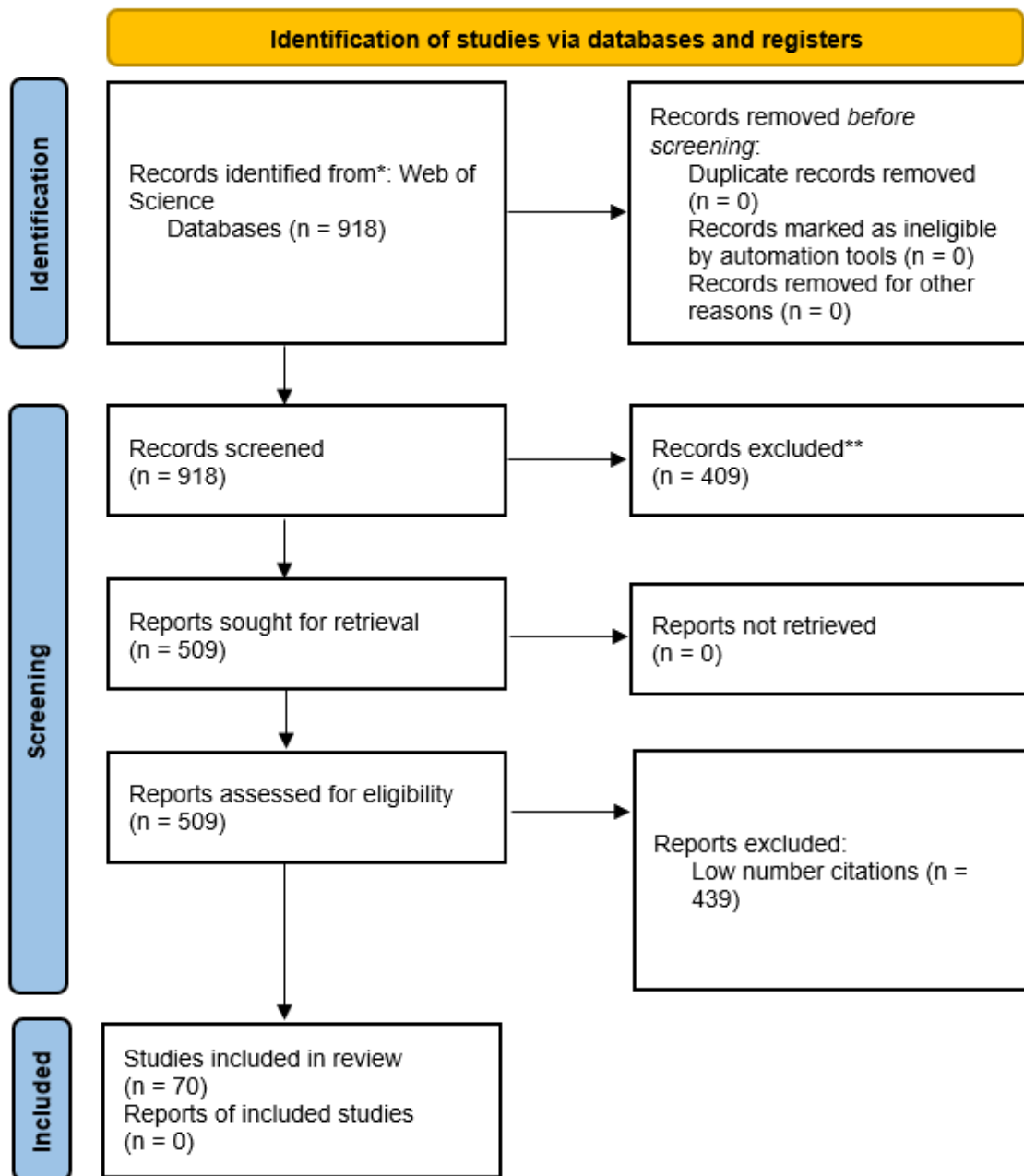


Fonte: Elaborada pelo autor

Com as palavras-chave definidas, a estratégia de busca foi estruturada de acordo com o protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Esse protocolo foi adotado para fornecer uma estrutura padronizada para a condução de revisões sistemáticas, com foco na triagem de estudos, extração de dados e síntese dos resultados.

Na etapa principal da pesquisa, foram identificados 918 artigos na base de dados Web of Science, utilizando a combinação de palavras-chave selecionadas. Os artigos passaram por uma triagem inicial, na qual foram excluídos estudos duplicados e aqueles que não apresentavam relação direta com o tema ou área de pesquisa. Em seguida, conforme as etapas previstas pelo PRISMA, os títulos e resumos dos artigos restantes foram analisados para verificar a compatibilidade com o tema do estudo. Os artigos mais relevantes, com maior aderência ao tema e expressividade em número de citações, foram selecionados para a leitura completa. A figura 2 resume o protocolo desta pesquisa.

Figura 2. Protocolo PRISMA da Revisão Sistemática da Literatura

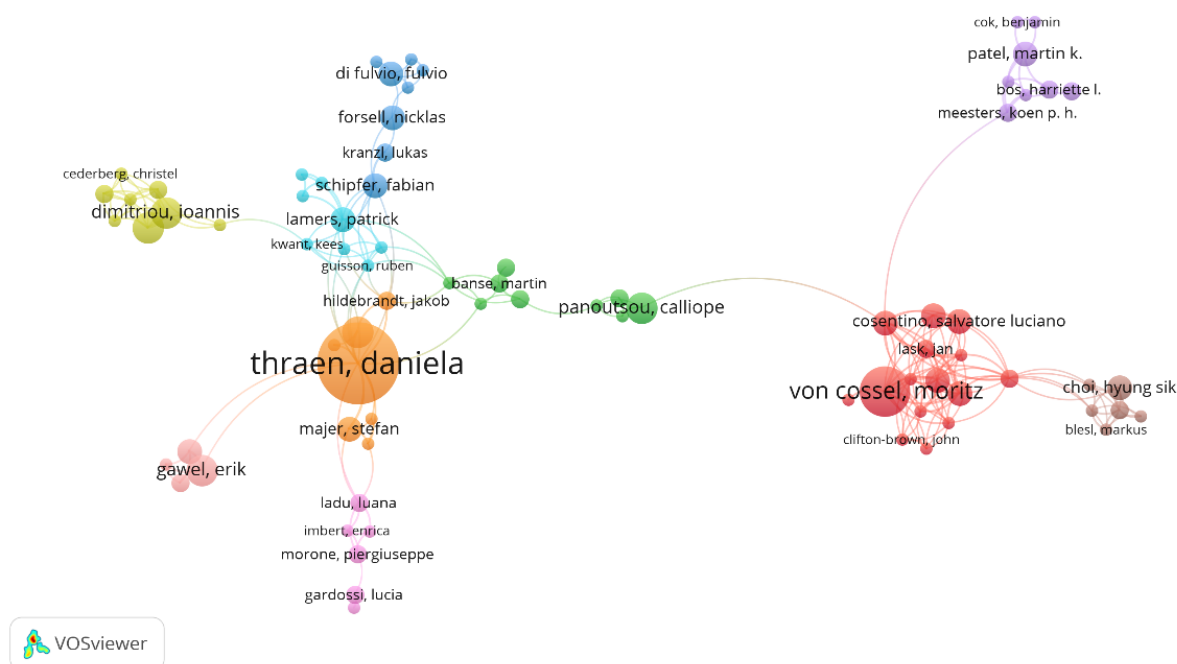


Fonte: Elaborada pelo autor

2.3 RESULTADOS

A partir de uma análise bibliométrica dos artigos encontrados na área, a figura 3 apresenta o mapa de coautoria gerado a partir dos 509 artigos analisados na pesquisa. O VOSviewer agrupa os autores e coautores em clusters e indica grupos que frequentemente colaboram entre si (DOS SANTOS; QUADROS, 2024). Os nós representam as publicações e as correlações são sinalizadas por setas; cada cluster de autoria é sinalizado por cores diferentes.

Figura 3. Mapa de coautoria elaborado no VOSviewer



Fonte: Elaborada pelo autor

Os clusters identificados no mapa de coautoria evidenciam a relação entre os principais temas abordados na literatura. A análise do mapa de coautoria, gerado pelo VOSviewer, revelou 11 clusters principais, que permitem observar as relações temáticas entre dois principais grupos de pesquisa. No primeiro bloco, os clusters destacados foram os clusters vermelhos, com biodiversidade e bioenergia, marrom, com agricultura e biocombustíveis, roxos, em emissão de gases e biocombustíveis, e verdes, com biomassa e bioenergia. O cluster vermelho assume uma posição central, com maior relevância os artigos de Von Cossel, nos quais nota-se uma interconexão temática com os demais clusters do bloco, traçando forte ligação entre biodiversidade, bioenergia e suas aplicações em agricultura, emissão de gases e uso de biomassa.

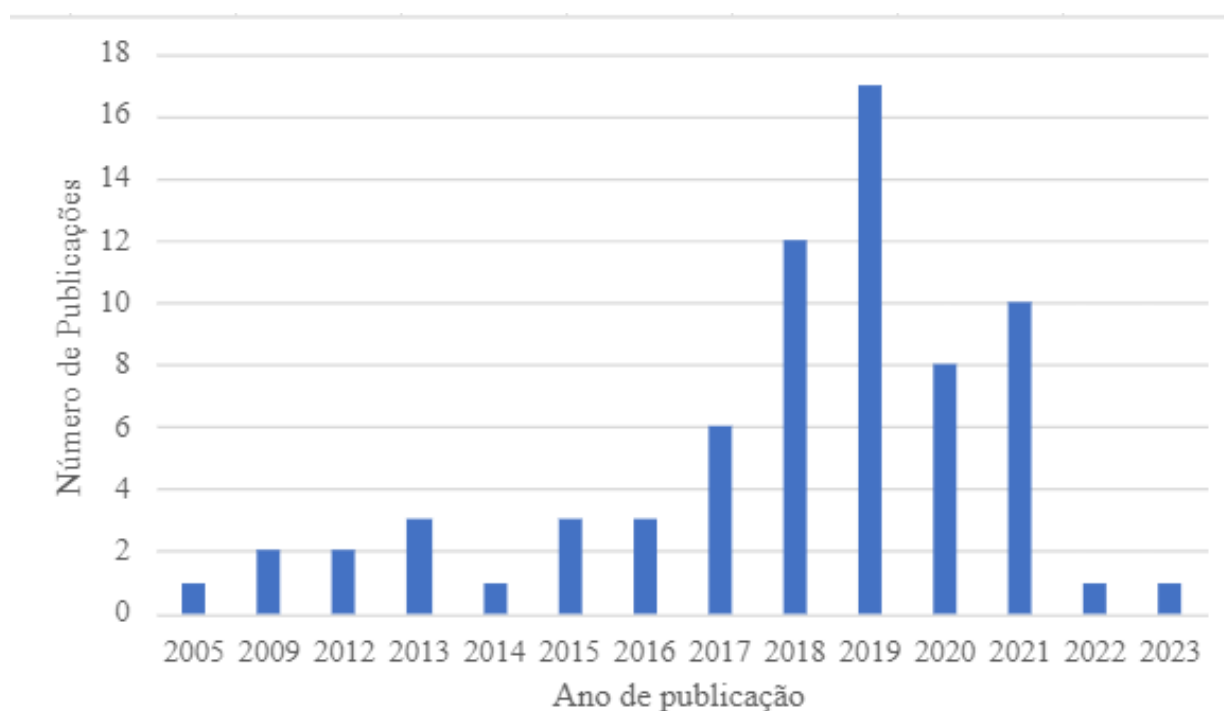
No segundo bloco, os clusters identificados foram de cor laranja, em sustentabilidade e circularidade de recursos, azul claro, em biocombustíveis, azul escuro, como transição energética, verde em biomassa e bioenergia, amarelo, tratando do uso de terras e biomassa, rosa, em transição energética e rosa claro, com emissão de gases e florestas, tendo o cluster laranja ocupando a posição central, destacando Thraen e Majer (2018), que estudam a conexão central da sustentabilidade e circularidade de recursos com temas como transição energética, biocombustíveis, uso de terras e emissão de gases.

Além disso, a análise evidenciou que o cluster verde, biomassa e bioenergia, atua como uma interseção temática entre os dois blocos. Panoutsou e Alexopoulou (2020)

conectam os temas de biodiversidade e bioenergia, do bloco 1, com aqueles relacionados à sustentabilidade, transição energética e uso de terras, do bloco 2. Essa interseção ressalta o papel fundamental da biomassa e da bioenergia como eixos centrais na pesquisa, ao abordar estratégias e práticas bioeconômicas que podem integrar aspectos ambientais, agrícolas e energéticos nos diferentes domínios. Embora seja destacada a interseção entre os clusters, há lacunas no entendimento de como a biomassa e a bioenergia podem ser enquadradas em outros domínios teóricos, como governança, economia política e impactos sociais. Uma maior exploração dessas conexões poderia expandir a aplicabilidade da bioeconomia para além do foco técnico e ambiental, promovendo uma compreensão mais abrangente e inclusiva.

Ao analisar as 70 publicações revisadas sistematicamente, a figura 4 apresenta as publicações ao longo do tempo e revela uma evolução significativa até 2019, seguida por uma queda nos anos seguintes. Houve um maior número de publicações entre 2017 e 2021.

Figura 4. Publicações ao longo do tempo



Fonte: Elaborada pelo autor

Esse período coincide com a intensificação de iniciativas globais para promover o desenvolvimento sustentável, como a implementação da Agenda 2030 da ONU, no final de 2015, e a popularização dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), além do Plano de Ação para a Economia Circular (2020), que incentivou tanto a academia quanto o setor produtivo a adotar práticas baseadas em eficiência de recursos e inovação tecnológica. Da mesma forma, as estratégias de bioeconomia começaram a ganhar espaço como resposta às

crescentes preocupações com a crise climática e o esgotamento de recursos naturais (ZILBERMAN et al., 2018).

Também nesse período, os artigos analisados apontam que organizações internacionais e governos reconheceram a necessidade de promover pesquisas que abordem a transição para uma economia de baixo carbono, como ao entender sobre diferentes estilos de vida e o impacto nas pegadas ambientais na Europa (VITA et al., 2019). Financiamentos específicos também foram direcionados para áreas como energias renováveis e manejo sustentável de florestas, para identificar como recursos florestais podem ser utilizados de forma mais sustentável (KARVONEN et al., 2017). Essa priorização estimulou estudos focados no desenvolvimento de tecnologias biológicas e processos que aumentassem a eficiência no uso de recursos naturais (CHANDEL et al., 2020).

A tabela 1 auxilia na análise das regiões estudadas na literatura; nota-se um foco em estudos globais, representando 48,57% das publicações. Muitas dessas publicações exploram técnicas e práticas que podem ser aplicadas em diferentes contextos para promover a bioeconomia.

Tabela 1. Regiões analisadas na literatura

Países	Contagem	Porcentagem
Mundo	34	48,57%
União Europeia	15	21,43%
Alemanha	7	10,00%
Finlândia	4	5,71%
Nepal	1	1,43%
Estados Unidos	1	1,43%
Itália	1	1,43%
Itália e Alemanha	1	1,43%
Malásia	1	1,43%
China	1	1,43%
Áustria	1	1,43%
Espanha	1	1,43%
Holanda	1	1,43%
França	1	1,43%
Total Geral	70	100,00%

Fonte: Elaborada pelo autor

Esses estudos focaram em tecnologias que podem ser aplicadas em diferentes regiões e países, e permitem o uso sustentável de recursos naturais, como o desenvolvimento de

biocombustíveis, o processamento de biomassa, a reciclagem de resíduos orgânicos e a utilização de recursos renováveis em substituição aos materiais fósseis.

A União Europeia (UE) surge como uma das regiões mais pesquisadas, representando 21,43% das publicações. Refletindo o forte compromisso da UE com a transição para uma economia mais sustentável, impulsionada por políticas e estratégias inovadoras voltadas para a economia circular e bioeconomia, a EU tem reiterado cada vez mais a necessidade de focar em sua agenda ambiental e de sustentabilidade, promovendo iniciativas e investimentos significativos em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias verdes, incentivando práticas bioeconômicas entre seus estados-membros.

A Alemanha, com 10% das publicações, destaca-se entre os países europeus, sendo um dos pioneiros na implementação de políticas voltadas para a bioeconomia. O país investe amplamente em pesquisa para o desenvolvimento de soluções biotecnológicas e químicas que promovam o uso sustentável dos recursos, alinhando-se com as metas de sustentabilidade da União Europeia. As práticas bioeconômicas na Alemanha são amplamente incentivadas por meio de políticas de apoio à inovação e à economia circular, o que explica o interesse científico no país.

A Finlândia, com 5,71% das publicações, também aparece como um caso relevante, devido ao seu foco em bioeconomia florestal e em iniciativas de conservação ambiental. Outros países e regiões, como China, Malásia e Nepal, com menor percentual de estudos (1,43% cada), representam contextos específicos em que a bioeconomia é analisada a partir de desafios locais, como a alta densidade populacional e a necessidade de soluções sustentáveis para recursos limitados. Embora o número de publicações seja menor, os estudos trazem contribuições importantes, ao explorar a adaptação de tecnologias bioeconômicas em realidades distintas.

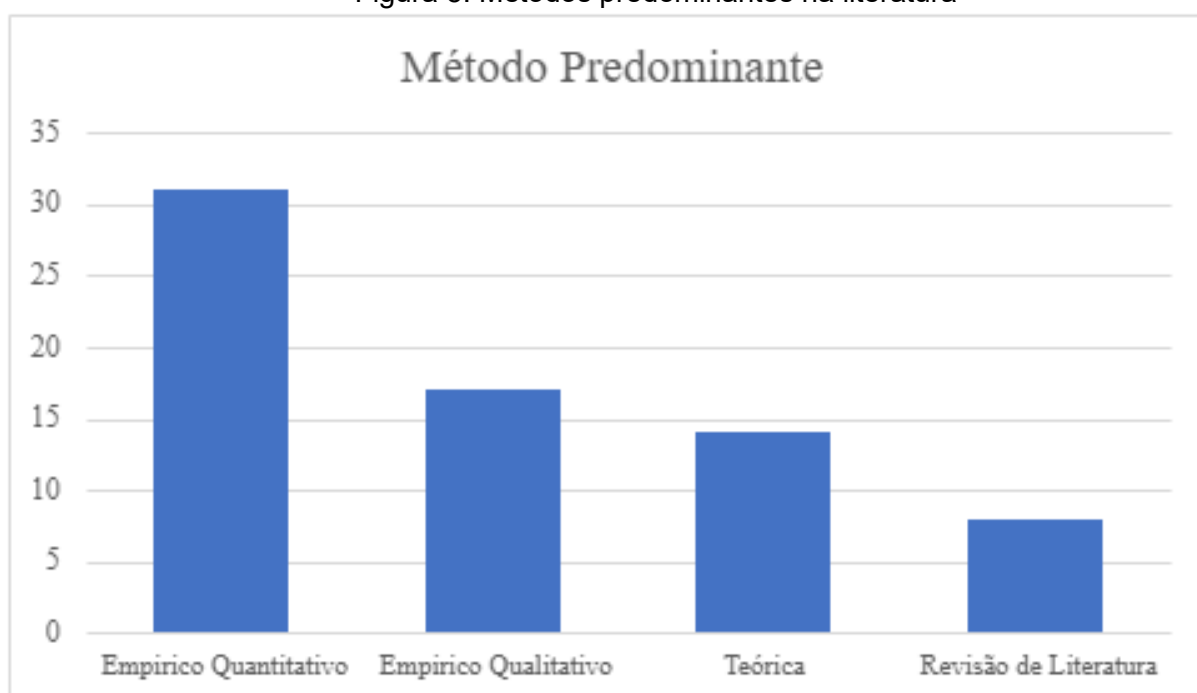
Há predominância de estudos sobre bioeconomia em países desenvolvidos, especialmente na Europa, com sua agenda ambiental consolidada e alto nível de investimentos em pesquisa, que lideram o debate e as publicações na área. Isso cria um descompasso, uma vez que as práticas e tecnologias desenvolvidas e estudadas em contextos europeus nem sempre são totalmente aplicáveis ou adequadas à realidade de outras regiões, onde há diferentes condições ambientais, sociais e econômicas.

Há ausência de estudos focados em países em desenvolvimento na literatura sobre bioeconomia. Com uma vasta diversidade biológica, grandes áreas de florestas tropicais e extensos recursos hídricos e minerais, regiões como a América Latina ou blocos econômicos, como BRICS, que possuem características que poderiam traçar fortes polos para práticas de bioeconomia, incluindo a produção de biocombustíveis, a agricultura sustentável e o manejo de recursos florestais. Faltam investimentos e incentivos para pesquisas locais sobre bioeconomia, o que limita a produção acadêmica e científica focada na realidade latino-

americana. Muitos países que estão em desenvolvimento ainda enfrentam desafios econômicos e sociais que priorizam outras áreas, como saúde e educação. Como resultado, poucos recursos são destinados a pesquisas específicas sobre como adaptar e implementar algumas práticas estudadas em outros países em seus contextos.

Na figura 5 pode-se analisar os métodos predominantes nos 70 artigos revisados com profundidade. Os artigos foram divididos em quatro métodos principais. (i) Empírico quantitativo, (ii) Empírico qualitativo, (iii) Teóricas e (iv) Revisão de literatura.

Figura 5. Métodos predominantes na literatura



Fonte: Elaborada pelo autor

Empírico quantitativo é o método mais utilizado, evidenciando um foco na quantificação dos impactos e na análise de resultados práticos, como eficiência de recursos e impacto econômico de práticas bioeconômicas. O foco em estudos quantitativos está voltado a necessidade de dados concretos que embasem políticas e práticas sustentáveis, também voltados a estudos que exploram o rendimento de biocombustíveis, a redução de emissões ou o aproveitamento de resíduos de forma mensurável

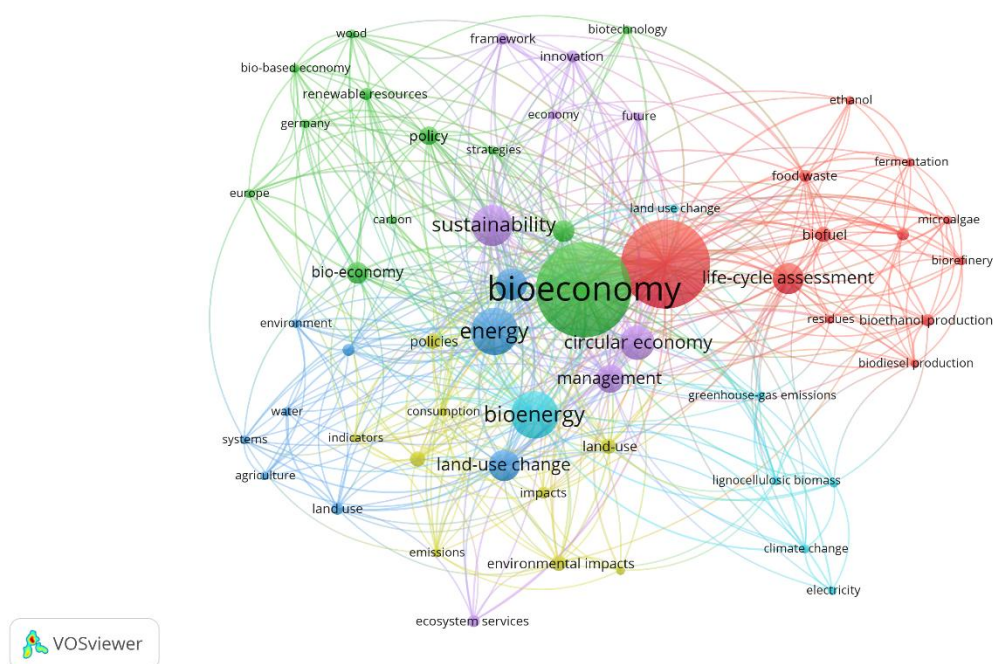
O segundo método mais utilizado é o empírico qualitativo, que busca explorar os aspectos sociais, culturais e políticos da bioeconomia. No geral, os artigos que utilizaram o método empírico qualitativo, analisaram regiões ou países muito específicos, e reconheceram a necessidade de entender as diferentes práticas e como adaptá-las a diferentes realidades.

As publicações teóricas e as revisões foram os métodos menos utilizados nos estudos. Enquanto os estudos teóricos ajudam a definir e entender mais a área, trazendo a possibilidade de uma maior compreensão sobre a bioeconomia e a relação com os recursos

naturais, as revisões de literatura também são importantes, revelando lacunas e direcionamentos para futuras pesquisas.

Para identificar os principais recursos naturais utilizados em iniciativas bioeconômicas e em diferentes países, foi elaborado um mapa de frequência de palavras-chave a partir dos 70 artigos sistematizados, apresentado na figura 6, que permite identificar os termos mais recorrentes. A abordagem possibilitou mapear não apenas os recursos naturais mais citados, mas também as interconexões entre eles e os principais tópicos relacionados à bioeconomia.

Figura 6. Mapa de frequência de palavras-chave



Fonte: Elaborada pelo autor

Pela análise, foram identificados seis clusters principais, cada um destacando um conjunto específico de palavras-chave:

Cluster 1 - Produção de biocombustíveis e avaliação de ciclo de vida - Este agrupamento é caracterizado por termos como produção de biodiesel, produção de bioetanol, biomassa, biorrefinaria e avaliação do ciclo de vida, indicando um foco na produção de biocombustíveis e no uso de biomassa em biorrefinarias, com ênfase na avaliação de impactos ambientais e no reaproveitamento de resíduos e alimentos. Elementos como bioeconomia circular e microalgas destacam inovações tecnológicas e estratégias amplamente utilizadas para alcançar uma bioeconomia circular.

Cluster 2 - Políticas, economia e recursos renováveis - Agrupado por palavras como bioeconomia, biotecnologia, política, recursos renováveis e estratégias, este agrupamento aborda a bioeconomia sob uma perspectiva de governança, especialmente em países como

a Alemanha e na Europa, onde estratégias relacionadas à economia baseada em recursos biológicos renováveis são amplamente discutidas e aplicadas. O uso de madeira e alimentos aponta para recursos específicos amplamente utilizados em setores industriais.

Cluster 3 - Agricultura, energia e uso da terra - Este agrupamento conecta agricultura, energia, biocombustíveis e uso da terra, indicando o papel fundamental do manejo da terra na produção de energia e biocombustíveis. Tópicos como mudança no uso da terra e desenvolvimento sustentável reforçam a preocupação com a sustentabilidade dos sistemas produtivos e os impactos ambientais relacionados.

Cluster 4 - Impactos ambientais e políticas - Com palavras como biodiversidade, consumo, emissões e impactos ambientais, o agrupamento explora os impactos ecológicos das práticas relacionadas à bioeconomia. Tópicos como políticas públicas, gestão de resíduos e indicadores destacam a importância de métricas e regulações para mitigar os efeitos ambientais negativos.

Cluster 5 - Economia circular e serviços ecossistêmicos - Este agrupamento está centrado em economia circular, serviços ecossistêmicos, sustentabilidade e inovação, abordando a integração entre a economia circular, gestão sustentável de recursos e inovação. A presença de termos como estrutura organizacional e gestão reforça a importância de práticas administrativas para a bioeconomia.

Cluster 6 - Bioenergia, mudanças climáticas e energias renováveis - Com foco em bioenergia, mudanças climáticas, energia renovável e biomassa lignocelulósica, este agrupamento trata da relação entre bioenergia e mitigação das mudanças climáticas. Termos como eletricidade e emissões de gases de efeito estufa evidenciam a importância de integrar fontes renováveis ao setor energético, reduzindo emissões.

O uso da terra e a mudança no uso da terra conectam os agrupamentos 3 e 6, destacando a relação entre bioenergia e agricultura sustentável. Além disso, a sustentabilidade, presente nos agrupamentos 5 e 4, mostra estratégias voltadas para a economia circular e a redução de impactos ambientais. O conceito de bioeconomia circular, presente no agrupamento 1, também dialoga com a economia circular do agrupamento 5, reforçando o alinhamento entre inovações tecnológicas e sustentabilidade.

2.4 GAPS DA LITERATURA

A revisão sistemática da literatura sobre bioeconomia e recursos naturais revelou a presença de várias lacunas que podem ser exploradas em pesquisas futuras. Esses gaps, que abordam tanto aspectos teóricos quanto metodológicos, destacam áreas em que a literatura atual ainda não oferece respostas completas ou integra suficientemente as complexidades envolvidas. Para melhor compreensão, esses gaps foram divididos em quatro

categorias principais: (i) Teoria, (ii) Tópicos faltantes, (iii) Dados e (iv) Métodos, conforme apresentado na tabela 2.

Tabela 2. Gaps da literatura

Categorias	Gaps
Teoria	G1. Desconexão entre técnicas e práticas. G2. Falta de integração teórica entre bioeconomia e outras áreas relacionadas.
Tópicos faltantes	G3. Faltam estudos focados em países e regiões em desenvolvimento. G4. É necessário entender a adaptação de tecnologias em condições adversas.
Dados	G5. Faltam dados regionais e locais. G6. Ausência de dados mais recentes.
Métodos	G7. Estudos quantitativos dominam, mas não exploram questões qualitativas importantes. G8. Ausência de estudos longitudinais. G9. Faltam novos indicadores para avaliar e monitorar o desempenho e o impacto das práticas bioeconômicas.

Fonte: Elaborada pelo autor

Dentro da categoria de teoria, dois gaps centrais foram identificados. O primeiro é a desconexão entre técnicas e práticas que conecte as tecnologias bioeconômicas com a realidade prática de sua implementação. Muitas das soluções bioeconômicas exploradas nos artigos sistematizados, como a produção de biocombustíveis ou o uso de biomassa, são desenvolvidas com base em modelos teóricos ou em contextos controlados. No entanto, faltam estudos que explorem como essas tecnologias podem ser aplicadas de forma prática em diferentes regiões e setores, especialmente aqueles com capacidades limitadas de inovação ou infraestrutura.

O segundo gap na teoria é a falta de integração teórica entre a bioeconomia e outras áreas relacionadas, como a sustentabilidade, a economia circular e a gestão de recursos naturais. Embora a bioeconomia seja frequentemente tratada como um campo independente, há necessidade de conectar suas práticas e teorias com essas outras áreas para uma abordagem mais holística e eficiente.

Na categoria de tópicos faltantes, dois gaps foram destacados. O primeiro está relacionado à falta de estudos focados em países e regiões em desenvolvimento, que são contextos críticos para a implementação de práticas bioeconômicas. A maioria dos estudos concentra-se em países desenvolvidos e na região europeia, com ênfase em modelos e tecnologias que podem não ser viáveis ou adequados para regiões com desafios econômicos, sociais e ambientais distintos. A adaptação dessas biotecnologias em países da África ou da América Latina, onde os contextos de uso da terra e os padrões de consumo de energia variam amplamente, precisa ser mais analisada.

O segundo gap é a necessidade de entender a adaptação de tecnologias em condições adversas, como em regiões com limitações em infraestrutura ou em eventos

climáticos extremos. Tecnologias como os biocombustíveis, que exigem infraestruturas específicas de produção e distribuição, podem não ser viáveis em áreas rurais ou em locais afetados por secas prolongadas ou tempestades. Estudar como adaptar essas soluções para tais condições é crucial para aumentar a eficácia das práticas bioeconômicas.

Em relação aos dados, dois gaps importantes foram identificados. O primeiro é a falta de dados regionais e locais, que dificulta a aplicação de soluções bioeconômicas adequadas a contextos específicos. Grande parte da literatura sobre bioeconomia utiliza dados globais ou nacionais, que não capturam as variações regionais ou locais. Para garantir a eficácia das políticas públicas e das iniciativas privadas, é essencial que se obtenham e se utilizem dados mais detalhados e localizados, considerando as condições ambientais, sociais e econômicas de cada região;

Outro gap relevante é a ausência de dados mais recentes. Embora a bioeconomia seja um campo dinâmico, com avanços tecnológicos rápidos, muitos estudos ainda dependem de dados desatualizados, visto que o número de estudos relacionados ao tema caiu consideravelmente a partir de 2021, o que limita a aplicação de soluções inovadoras e a avaliação de seu impacto atual.

A categoria de métodos revelou três lacunas importantes. O primeiro gap é a dominação de estudos quantitativos, que frequentemente negligenciam as questões qualitativas essenciais para entender o impacto das práticas bioeconômicas nas comunidades locais. Embora os dados quantitativos, como a produção de biomassa ou a redução das emissões de gases de efeito estufa, sejam fundamentais para mensurar os resultados, eles não conseguem captar nuances importantes, como a aceitação social das novas tecnologias, a mudança nos hábitos de consumo ou as práticas culturais. A introdução de estudos qualitativos poderia proporcionar uma visão mais completa do impacto das práticas bioeconômicas.

O segundo gap é a ausência de estudos longitudinais. A maioria dos estudos sistematizados analisa os efeitos de curto prazo das práticas, como o aumento da produção de biocombustíveis ou a eficiência energética de novas tecnologias. No entanto, é crucial entender os efeitos de longo prazo dessas práticas, especialmente em termos de sustentabilidade e impactos socioeconômicos. Um estudo longitudinal, que acompanhe o impacto da adoção de biotecnologias ao longo dos anos, poderia fornecer insights valiosos sobre a viabilidade de políticas e práticas bioeconômicas.

O terceiro gap em métodos é a falta de novos indicadores para avaliar o desempenho e o impacto das práticas bioeconômicas. Os indicadores tradicionais, como a quantidade de biomassa produzida ou a redução das emissões de CO₂, são úteis, mas não capturam completamente o efeito das práticas bioeconômicas nas comunidades ou no meio ambiente. A criação de novos indicadores, que considerem o impacto social, os recursos naturais e a

sustentabilidade econômica, seria importante para monitorar e melhorar as práticas bioeconômicas.

2.5 CONCLUSÃO

Este capítulo teve como objetivo analisar a relação entre recursos naturais e estratégias bioeconômicas a partir de uma revisão sistemática da literatura, buscando identificar avanços, desafios e lacunas na produção científica sobre o tema. A pesquisa partiu do reconhecimento de que a bioeconomia, apesar de seu potencial para promover desenvolvimento sustentável, ainda carece de abordagens integradas que considerem simultaneamente dimensões ambientais, sociais e econômicas, especialmente em contextos de alta vulnerabilidade socioambiental.

Os resultados evidenciaram a predominância de estudos voltados a aspectos técnicos, com ênfase em biocombustíveis, bioenergia, sustentabilidade e economia circular, tendo a biomassa como elemento integrador central. Verificou-se ainda uma concentração geográfica dos estudos em países desenvolvidos, especialmente na União Europeia, com escassa representação de regiões como América Latina e África, mesmo estas possuindo alto potencial bioeconômico. A pouca presença de métodos qualitativos e a limitada articulação com campos como governança e economia política revelam lacunas relevantes na compreensão das dinâmicas socioculturais e institucionais que influenciam a implementação da bioeconomia em diferentes realidades.

Ao propor caminhos para superar os desequilíbrios temáticos, metodológicos e geográficos identificados, o capítulo colabora para o avanço do campo e para a formulação de políticas públicas mais sensíveis às especificidades locais. No entanto, dentre as limitações pode-se destacar que só foi utilizada a base de dados Web of Science, que pode ter levado à exclusão de literaturas importantes, além da pesquisa ter utilizado apenas estudos na língua inglesa, que também pode ter restringido o escopo da análise.

Para pesquisas futuras, sugere-se o aprofundamento de estudos empíricos em países em desenvolvimento, com metodologias mistas que combinem dados quantitativos e qualitativos, além do desenvolvimento de indicadores multidimensionais que permitam avaliar com maior precisão os impactos da bioeconomia, além do aprofundamento nos gaps da literatura indicados no estudo.

Conclui-se que a bioeconomia possui potencial estratégico para impulsionar uma transição sustentável, mas, para que esse potencial se concretize, é fundamental que as estratégias adotadas considerem a gestão eficiente e justa dos recursos naturais centrais à bioeconomia, promovendo seu uso sustentável, equitativo e adaptado às diferentes realidades geográficas e socioeconômicas.

3 CAPÍTULO II - UMA ANÁLISE ECONOMETRICA

3.1 INTRODUÇÃO

Conforme apresentado pelo Capítulo I deste trabalho, ainda são escassas na literatura abordagens que tratam de forma integrada a relação entre bioeconomia e eficiência no uso de recursos naturais que, embora úteis, não capturam plenamente os efeitos sistêmicos das práticas bioeconômicas sobre os ecossistemas e as comunidades.

A revisão sistemática da literatura identificou como um dos principais gaps metodológicos a ausência de novos indicadores capazes de avaliar e monitorar o desempenho da bioeconomia de maneira mais ampla. Esse indicador deveria considerar, além dos aspectos ambientais, os impactos sociais e econômicos associados ao uso dos recursos naturais, permitindo análises mais robustas e alinhadas com os princípios da sustentabilidade.

Nesse sentido, este capítulo propõe o Índice de Eficiência de Recursos Naturais (IERN), uma ferramenta que busca preencher a lacuna metodológica identificada ao integrar três dimensões fundamentais da bioeconomia: ambiental, econômica e social. O IERN reconhece que a sustentabilidade da bioeconomia depende da interação complexa entre sistemas ecológicos, dinâmicas econômicas e equidade social; portanto, ao agregar essas dimensões, permite orientar políticas que equilibrem eficiência e justiça socioambiental.

Este capítulo tem como objetivo geral Construir um Indicador de Eficiência de Recursos Naturais (IERN) e aplicá-lo em um modelo econométrico de dados em painel, com o objetivo de analisar a relação entre a eficiência no uso dos recursos naturais e as emissões de gases estufas, enquanto proxy para o avanço da bioeconomia, de diferentes países ao longo do tempo. Tendo como objetivos específicos:

1. Identificar os principais indicadores tradicionais utilizados na mensuração da bioeconomia, destacando suas limitações na avaliação da eficiência no uso de recursos naturais.
2. Propor um Índice Composto de Eficiência de Recursos Naturais (IERN), que integre dimensões ambientais, econômicas e sociais.
3. Aplicar um modelo econométrico de dados em painel para testar a relação entre o IERN e as emissões de gases estufas, enquanto proxy para o avanço da bioeconomia nos países analisados, de forma a avaliar empiricamente a validade do indicador e sua utilidade como ferramenta de monitoramento e formulação de políticas públicas sustentáveis.

3.2 JUSTIFICATIVA/RELEVÂNCIA

A identificação dos indicadores tradicionais utilizados na mensuração da bioeconomia é fundamental para compreender os limites das abordagens atuais. Dentre os principais indicadores identificados por estudos prévios, incluem-se indicadores como a quantidade de biomassa disponível, a área cultivada de biomassa energética e a redução das emissões de CO₂, e são amplamente utilizados por estudos e instituições internacionais para representar avanços na bioeconomia. (ECONOMETRICS, 2014; VAN LEEUWEN et al., 2013; EUROPEAN COMMISSION 2012). No entanto, esses indicadores apresentam uma visão parcial e ainda com grande área a ser explorada. (KARDUNG et al., 2021)

Embora capturem aspectos produtivos e ambientais específicos, os indicadores tradicionais não necessariamente refletem o uso eficiente dos recursos naturais, que são fundamentais para o funcionamento da bioeconomia, nem os impactos socioeconômicos envolvidos no processo produtivo (FERREIRA et al., 2022). Por exemplo, a produção intensiva de biomassa pode gerar ganhos econômicos e redução de emissões em determinados contextos, mas ao custo de alta exploração hídrica, perda de biodiversidade e impactos negativos sobre comunidades locais (PINHEIRO; GOUDARD; BARBOSA, 2021).

Assim, o uso isolado desses indicadores pode levar à superestimação do desempenho bioeconômico e à formulação de políticas que não consideram adequadamente a sustentabilidade do uso de recursos no longo prazo (FERREIRA et al., 2022).

Então, o Índice Composto de Eficiência de Recursos Naturais (IERN) proposto é central para o avanço na mensuração da bioeconomia, por visar superar as limitações dos indicadores tradicionais. Ao integrar dimensões ambientais, econômicas e sociais, com foco nos recursos naturais utilizados, o IERN permitirá uma visão holística e mais precisa da eficiência no uso dos recursos naturais. Especificamente, na dimensão ambiental, o índice incorporará variáveis que avaliem a quantidade de recursos naturais empregados. No aspecto econômico, o IERN integrará indicadores que capturem o valor agregado gerado por unidade de recurso utilizado ou que incentivem uma maior exploração desses recursos, refletindo a eficiência produtiva e o retorno econômico das práticas sustentáveis. Já na dimensão social, o índice busca incluir métricas que mensurem os impactos sobre as comunidades locais.

A aplicação de um modelo econométrico de dados em painel é fundamental para testar empiricamente a relação entre o IERN e o desempenho bioeconômico dos países selecionados. A abordagem permite a análise de dados observados ao longo do tempo para diferentes países, controlando tanto para características específicas de cada país quanto para variações temporais que possam influenciar os resultados.

Ao integrar o IERN como variável explicativa e indicadores que representem as emissões de gases estufas, enquanto proxy para o avanço da bioeconomia, como variável

dependente, o modelo econométrico busca identificar se existe uma relação estatisticamente significativa entre a eficiência no uso dos recursos naturais e os resultados alcançados pela bioeconomia. Essa estratégia busca não só validar o IERN como indicador, mas também sua utilidade prática como ferramenta de monitoramento e de apoio à formulação de políticas públicas.

O estudo pretende demonstrar que a eficiência no uso dos recursos naturais, conforme mensurada pelo IERN, é um componente relevante que pode explicar variações no desempenho bioeconômico, oferecendo insights para a promoção de estratégias de desenvolvimento mais sustentáveis e integradas.

3.3 MÉTODO

Esse tópico apresenta os aspectos metodológicos deste capítulo, destacando as variáveis utilizadas, o recorte geográfico e temporal dos dados e os procedimentos de coleta e análise. Além disso, também discorre sobre o modelo econométrico que será empregado para testar, empiricamente, a relação entre a eficiência no uso dos recursos naturais e o desempenho bioeconômico dos países. Será feita uma análise exploratória e explicativa, que adota uma abordagem quantitativa e uma modelagem estatística.

3.3.1 BASE DE DADOS

Mensurar a sustentabilidade e o desempenho de sistemas produtivos vinculados à bioeconomia necessita do uso de indicadores capazes de captar múltiplas dimensões do desenvolvimento. Assim, indicadores compostos surgem como ferramentas essenciais para sintetizar diferentes variáveis em um único índice, facilitando a comparação entre países, regiões e ao longo do tempo (NARDO et al., 2005). Esses indicadores combinam dados ambientais, econômicos e sociais, permitindo uma análise integrada do uso de recursos naturais e seus impactos. Entre as abordagens, a estruturação baseada na lógica de inputs e outputs tem destaque por poder evidenciar a eficiência com que os sistemas transformam um no outro, unindo econometria, teoria, matemática e análise estatística (MIERNYK, 2020).

A construção de indicadores compostos baseados na lógica de inputs e outputs tem sido utilizada há algum tempo em contextos da bioeconomia, como no estudo dos impactos do uso de terras, ao comparar o potencial nacional e regional da bioeconomia e ao estudar aspectos de implementação da bioeconomia em regiões (TOBBEN et al., 2022; JURGA; LOIZOU; ROZAKIS, 2021; BRIZGA; MICEIKIENĖ; LIOBIKIENĖ, 2019). Essa abordagem permite mensurar o quanto de resultado, nesse caso, econômico, social ou ambiental, é

gerado a partir do uso de determinados recursos, possibilitando comparações entre países ou regiões e entre diferentes períodos (VAN DE WAL; DE JAGER, 2001).

Nota-se que o objetivo e a usabilidade do modelo e do índice vêm da capacidade de transformar recursos naturais em bem-estar social e crescimento econômico com o mínimo de impacto negativo. Assim, selecionar inputs que expressem o uso direto ou indireto dos recursos naturais, e outputs que reflitam os benefícios econômicos e sociais gerados a partir desse uso, é essencial para avaliar a eficiência dos sistemas produtivos sob a ótica da sustentabilidade. O Índice de Eficiência de Recursos Naturais (IERN), portanto, surge com o objetivo de integrar as múltiplas dimensões do desempenho bioeconômico, ambiental, social e econômico, em um único índice.

Assim, na dimensão ambiental, foram selecionadas três variáveis, a variação da cobertura florestal (VCF), tratada como input, por representar o impacto do uso da terra sobre os ecossistemas, sendo que taxas negativas de cobertura indicam pressão sobre os recursos naturais e perda de biodiversidade (BARROS et al., 2021), a produtividade hídrica agrícola (PHA), medida pelo valor gerado por metro cúbico de água utilizado, que reflete a eficiência do uso da água na produção de biomassa, um dos principais recurso utilizados na bioeconomia (HATFIELD; DOLD, 2019; ULLAH et al., 2019) e é especialmente relevante em contextos de escassez hídrica, seja regional ou sazonal (BOUTRAA, 2010). Já o uso de energias renováveis (UER) expressa o grau de transição energética e o compromisso com a redução das emissões de gases de efeito estufa, sendo um dos pilares da sustentabilidade ambiental (QAZI et al., 2019).

Na dimensão econômica, a renda proveniente do uso de recursos naturais (RRN) é frequentemente usada como indicador de uso de recursos naturais não-renováveis, o que tem efeito direto sobre a sustentabilidade de um modelo econômico (BEN-SALHA; DACHRAOUI; SEBRI, 2021; AGBOOLA; BEKUN; JOSHUA, 2021) e é essencial na análise do indicador, foi incluído como um input por mediar a dependência de rendas naturais e a eficiência ambiental de longo prazo. A variável subsídios a combustíveis fósseis (SCF) foi incluída como input negativo, por representar um custo ambiental pela manutenção de padrões de produção baseados em fontes de energia poluentes, o qual vai na contramão da bioeconomia (VICTOR, 2009), a variável valor agregado agrícola (VAA) é tratada como um output por refletir a eficiência produtiva da terra, fundamental para avaliar o retorno econômico do uso do solo (WANG et al., 2020).

As variáveis estão listadas na tabela 3, juntamente com a descrição, fonte, se foi do tipo input ou output e a sigla utilizada para formulação do modelo.

Tabela 3 – Variáveis utilizadas no Índice de Eficiência de Recursos Naturais

Dimensão	Variável	Descrição	Fonte	Tipo	Sigla
<i>Ambiental</i>	Variação da cobertura florestal (% ao ano)	Percentual da variação da área florestal por ano	World Bank / FAOSTAT	Input	VCF
	Produtividade e hídrica agrícola (USD/m3)	Valor gerado por unidade de água utilizada na agricultura	AQUASTAT / World Bank	Output	PHA
	Uso de energias renováveis (% na matriz energética)	Participação de fontes renováveis na matriz energética total	World Bank (WDI)	Output	UER
	Renda de recursos naturais (% do PIB)	Renda do uso de recursos naturais não-renováveis	World Bank (WDI)	Input	RRN
<i>Econômica</i>	Subsídios a combustíveis fósseis (USD\$)	Valor utilizado para subsidiar fontes de energia não renováveis	IMF / IEA	Input	SCF
	Valor agrícola agregado (USD/ha)	Valor gerado pela produção agrícola	FAOSTAT	Output	VAA
	Gastos públicos em educação (% do PIB)	Percentual do PIB investido em educação	World Bank (WDI)	Input	GPE
<i>Social</i>	Emprego em agricultura (% da PEA)	Participação da população economicamente ativa ocupada em setores ligados à bioeconomia	World Bank (WDI)	Output	EEA
	Expectativa de vida (Anos de vida)	Anos de expectativa de vida ao nascer	World Bank (WDI)	Output	EDV

Fonte: Elaborada pelo autor

No campo social, como input temos os gastos públicos com educação, por representar o investimento em capital humano, essencial para formar profissionais capazes de atuar nos setores bioeconômicos. Maior investimento pode refletir maior capacidade de geração de resultados sociais e econômicos sustentáveis (URMETZER et al., 2020). Como outputs, a proporção de emprego em agricultura (EEA) mede a inserção da população economicamente ativa em setores bioeconômicos, refletindo o potencial da bioeconomia para gerar trabalho e

renda sustentável (JIADUO et al., 2023). Já a expectativa de vida ao nascer é um indicador social bem completo, que reflete as condições de saúde, nutrição, saneamento e acesso a serviços básicos, alguns dos objetivos da bioeconomia. (MACHADO; PAMPLONA, 2008).

A seleção dessas variáveis visa permitir uma análise abrangente do uso de recursos naturais sob uma perspectiva sistêmica, integrando os três pilares da sustentabilidade. Além disso, todas as variáveis foram escolhidas com base em sua disponibilidade em bases internacionais, sendo elas FAOSTAT (2025), World Bank (2025), AQUASTAT (2025), IMF (2025) e IEA (2025).

Uma vez definidas as variáveis a serem utilizadas, a base de dados deste estudo será composta por uma amostra global de países, selecionada no período de 2000 a 2020.

A escolha dos países considerou três critérios principais: (i) diversidade geográfica, de forma a garantir a representação de diferentes continentes e biomas; (ii) relevância no cenário da bioeconomia e da sustentabilidade ambiental, como foco em políticas públicas; e (iii) disponibilidade e consistência de dados nas bases internacionais utilizadas.

A amostra contempla países desenvolvidos, como Estados Unidos, Alemanha, Canadá e Japão, ao se destacarem por sua infraestrutura de dados, investimentos em inovação e práticas centrais da bioeconomia, políticas públicas e ambientais consolidadas. Inclui também economias emergentes e em desenvolvimento, como Brasil, Índia, China, México e África do Sul, que apresentam desafios importantes no uso eficiente de recursos naturais, além de serem diferentes regiões que tratam de seus recursos naturais de diferentes formas, mas que também apresentam oportunidades estratégicas no avanço da bioeconomia. Também há a presença da Austrália, representando a Oceania e que complementa o grupo com um caso relevante para a análise de regiões áridas e estratégias de sustentabilidade em contextos climáticos e regionais adversos.

A escolha do período de 2000 a 2020 ocorreu principalmente devido à disponibilidade de dados e à relevância temporal das mudanças nos sistemas produtivos, ambientais e sociais, tanto nos países desenvolvidos quanto nos emergentes.

A variável SCF foi considerada a partir de 2010 devido à disponibilidade de dados consistentes sobre subsídios a combustíveis fósseis nas fontes disponíveis. Embora dados anteriores não estejam disponíveis, as tendências dos últimos anos ainda refletem as dinâmicas econômicas essenciais para a análise dos subsídios para fontes de energia não renováveis.

3.3.2 CONSTRUÇÃO DO ÍNDICE DE EFICIÊNCIA DE RECURSOS NATURAIS

Uma vez definidas as variáveis utilizadas, juntamente com seu recorte temporal e geográfico, a construção do Índice de Eficiência de Recursos Naturais (IERN) segue com a sistematização das variáveis apresentadas.

Nota-se que as variáveis têm escalas distintas, como variações percentuais e valores monetários; assim, há a necessidade de normalizar os dados (JACOBS; SMITH; GODDARD, 2004). Será realizada a padronização pelo método mínimo – máximo, conforme a fórmula:

$$X' = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

Em que X' é o valor da variável inicialmente e X_{min} e X_{max} são os valores mínimos e máximos observados para cada variável naquele recorte. Este método garante que todas as variáveis fiquem na mesma faixa, 0 a 1, e podem ser comparadas de maneira equivalente, independentemente da sua unidade de medida inicialmente (MAZZIOTTA; PARETO, 2021).

Na construção de um índice composto como o Índice de Eficiência de Recursos Naturais (IERN), é necessário garantir que todas as variáveis apontem para a mesma direção interpretativa; nesse caso, valores mais altos devem indicar maior eficiência no uso dos recursos naturais.

Porém, algumas variáveis selecionadas representam impactos negativos e devem passar por um processo pelo qual inverta os seus valores, conforme a fórmula abaixo, de modo que elas possam ser comparadas com os demais indicadores e agregadas corretamente ao índice (SEIFORD; ZHU, 2002).

$$X'_{invertido} = 1 - X'$$

A variação da cobertura florestal (VCF) é uma variável de impacto negativo, uma vez que, quanto maior é a variação na cobertura florestal, maior é a degradação ambiental. Portanto, a inversão dessa variável é necessária, pois valores mais altos de variação da cobertura florestal indicam maior perda de recursos naturais, o que contraria o objetivo de mensurar a eficiência no uso desses recursos.

A renda de recursos naturais não renováveis (RRN) também é uma variável a ser invertida, já que a dependência de recursos naturais não renováveis, como petróleo e minerais, é um indicador de ineficiência no uso dos recursos naturais. Quanto maior essa dependência, maior a pressão sobre os recursos naturais finitos, o que é um indicativo de que o modelo de desenvolvimento não é sustentável a longo prazo. Portanto, valores mais altos

dessa variável devem ser invertidos, pois eles indicam maior exploração de recursos não renováveis, o que reduz a eficiência global.

Os subsídios a combustíveis fósseis (SCF) são outro fator negativo e devem ser invertidos, pois os subsídios a combustíveis fósseis incentivam o uso de fontes de energia poluentes, como o carvão, o petróleo e o gás natural. Isso resulta em uma ineficiência no uso de recursos naturais, pois a dependência de fontes de energia não-renováveis agrava os problemas ambientais.

Por fim, os Gastos Públicos em Educação (GPE), apesar de serem uma variável positiva em muitos contextos, serão invertidos neste estudo. O elevado gasto público com educação pode, em certos contextos, indicar ineficiência na alocação dos recursos, caso os resultados educacionais não acompanhem esse gasto. Assim, valores mais altos de GPE podem sugerir uma menor eficiência na utilização dos recursos, já que maiores investimentos podem ser necessários em sistemas educacionais menos eficientes.

Devido ao caráter multidimensional do IERN, nota-se a necessidade da organização das variáveis em três dimensões: ambiental, econômica e social, conforme proposto anteriormente na definição das variáveis. A criação de subíndices por dimensão tem como principal objetivo manter maior clareza analítica ao modelo econométrico, de forma a facilitar a interpretação dos resultados (NARDO et al., 2005), permitindo identificar de maneira mais precisa o desempenho de cada país em aspectos específicos da eficiência no uso de recursos naturais, direcionando as áreas que mais demandam foco de políticas públicas.

Para cada dimensão, o subíndice é calculado pela média dos valores normalizados das variáveis:

$$\text{Subíndice}_{\text{dimensão}} = \frac{Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n}{n}$$

onde $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$, são os valores previamente normalizados de cada variável da dimensão, e n é o número de variáveis dentro da dimensão.

Subíndice ambiental:

$$\text{Subíndice}_{\text{ambiental}} = \frac{\text{VCF} + \text{PHA} + \text{UER}}{3}$$

Subíndice econômico:

$$\text{Subíndice}_{\text{econômico}} = \frac{\text{RRN} + \text{SCF} + \text{VAA}}{3}$$

Subíndice social:

$$\text{Subíndice}_{\text{social}} = \frac{\text{GPE} + \text{EEA} + \text{EDV}}{3}$$

Uma vez que as variáveis já foram normalizadas, invertidas e divididas em subíndices, a construção do IERN se dará pela média aritmética simples dos três subíndices. A média

aritmética simples assegura o mesmo peso e importância para cada dimensão da bioeconomia, ambiental, social e econômica, conforme analisados por estudos prévios (BARRERA-ROLDÁN; SALDIVAR-VALDÉS, 2002; GAN et al., 2017), além de refletir o impacto do uso de recursos naturais de forma ampla e integrada na bioeconomia.

O IERN, portanto, será calculado por:

$$IERN = \frac{\text{Subíndice}_{\text{ambiental}} + \text{Subíndice}_{\text{econômico}} + \text{Subíndice}_{\text{social}}}{3}$$

Portanto, o índice final varia entre 0 e 1, onde valores próximos a 1 indicam maior eficiência no uso de recursos naturais de forma sustentável e integrada, enquanto valores próximos a 0 representam menor eficiência.

Por fim, nota-se que durante a construção do índice, algumas células ficaram em branco por não haver dados disponíveis para todos os países e anos. Como cada subíndice, ambiental, econômico e social, e o próprio IERN são calculados pela média simples das variáveis disponíveis, a falta de algum valor não prejudica o cálculo, já que é feita a média apenas das variáveis efetivamente observadas. Não houve caso em que todas as variáveis de uma dimensão estivessem ausentes para um mesmo país e ano; assim, todos os subíndices puderam ser calculados normalmente.

3.3.3 MODELO ECONOMÉTRICO

Para analisar empiricamente a relação entre a eficiência no uso de recursos naturais, mensurada pelo Índice de Eficiência de Recursos Naturais (IERN), e o desempenho bioeconômico dos países, será estimado um modelo econométrico com dados em painel.

O modelo de dados em painel é utilizado quando se deseja analisar dados que envolvem múltiplas unidades ao longo de vários períodos temporais. A aplicação de dados em painel permite que se capturem as variações ao longo do tempo e efeitos individuais que podem influenciar as variáveis de interesse, como o desempenho bioeconômico. Esses efeitos, se não controlados, podem gerar vieses na estimativa dos parâmetros do modelo (BALTAGI, 2008).

A equação econométrica para testar a relação entre o IERN e o desempenho bioeconômico é dada por:

$$Y_{it} = \alpha + \beta_1 IERN_{it} + \beta_2 X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it}$$

Onde it é o país e o ano, respectivamente, Y_{it} é a variável dependente, ou seja, a variável que o modelo busca explicar. Neste estudo será adotado o total de emissões de gases de efeito estufa, excluindo atividades de mudanças no uso do solo e crescimento florestal, focando em emissões diretas, como energia, indústria e transporte, como proxy para

mensurar o desempenho bioeconômico. A escolha das emissões de gases de efeito estufa como indicador se dá com base na literatura que indica forte relação da bioeconomia com a mitigação das mudanças climáticas (KARVONEN et al., 2017; KARDUNG et al., 2021; O'DONOGHUE et al., 2019).

O α é o intercepto do modelo, representando o valor esperado da variável dependente Y_{it} , quando todas as variáveis explicativas forem iguais a zero. Os β_n no modelo representam o quanto uma mudança de uma unidade na variável explicativa afeta a variável dependente, assumindo tudo ou mais constante.

$IERN_{it}$ é a variável de interesse central do modelo, conforme descrito em 3.2. O coeficiente β_1 mede o impacto marginal do IERN sobre as emissões de gases estufas, ou seja, o quanto, em média, um aumento de uma unidade no índice eleva o desempenho bioeconômico. A variável dependente, o IERN, e as variáveis de controle estão apresentadas na tabela 4, juntamente com a sua descrição, fonte e sigla.

Tabela 4 – Variáveis do modelo econométrico

Variável	Descrição	Fonte	Sigla
Emissões totais de GHG	Emissões totais de gases de efeito estufa, excluindo uso da terra, mudança de uso e florestas	World Bank (WDI)	GHG
IERN	Índice de Eficiência de Recursos Naturais	Elaborado pelo autor	IERN
Uso de energias renováveis	Participação das fontes renováveis no consumo total de energia	World Bank (WDI)	ENR
Valor agregado da indústria	Valor agregado pela indústria, representando a estrutura produtiva (% do PIB)	World Bank (WDI)	IND

Fonte: Elaborada pelo autor

A variável X_{it} agrupa variáveis de controle que podem influenciar as emissões de gases estufas e que devem ser mantidas constantes para isolar o efeito do IERN. O modelo

incluiu duas variáveis de controle; a variável que mede o uso de energias renováveis é fundamental para mensurar o grau de substituição de fontes fósseis por fontes limpas de energia. O consumo de fontes renováveis, como solar, eólica, hidrelétrica e biomassa, influencia nas emissões ao substituir fontes fósseis altamente poluentes, como carvão e petróleo (HE et al., 2022).

A segunda variável de controle no modelo é o valor agregado pela indústria no PIB, por representar a estrutura produtiva da economia e o peso relativo do setor industrial. A variável no modelo permite comparar economias com diferentes graus de industrialização e distinguir o impacto da composição econômica de outros fatores, como tecnologias limpas ou políticas ambientais (WADANAMBI et al., 2020).

Por fim, o coeficiente β_2 mede o impacto conjunto dessas variáveis de controle sobre as emissões de gases estufas. Os termos μ_i e λ_t são os efeitos fixos por país e efeitos fixos por ano, respectivamente. O μ_i controla características que não mudam ao longo do tempo, como geografia, instituições ou cultura. Já λ_t captura eventos ou mudanças globais que afetam todos os países no mesmo período, como crises econômicas internacionais, pandemias ou mudanças tecnológicas globais. O termo ε_{it} é o erro aleatório, reunindo fatores não explicitados pelo modelo.

Na análise com dados em painel, é necessário escolher entre um modelo com efeitos fixos ou efeitos aleatórios. A escolha entre os modelos de efeitos fixos e efeitos aleatórios será feita a partir do teste de Hausman, teste que verifica se os efeitos individuais dos países estão correlacionados com as variáveis explicativas do modelo. A hipótese nula do teste sugere que não há correlação, sendo mais adequado o uso do modelo de efeitos aleatórios. Por outro lado, se a hipótese nula for rejeitada, indica-se o modelo de efeitos fixos como mais apropriado, por apresentar estimadores consistentes mesmo na presença de correlação entre os efeitos não observados e as variáveis independentes.

Após a escolha do modelo, será conduzido um conjunto de testes econométricos que verificam a robustez dos dados e a validade das estimativas. Serão avaliadas as questões: (i) multicolinearidade, (ii) heterocedasticidade, (iii) autocorrelação dos resíduos e (iv) normalidade dos erros (WOOLDRIDGE, 2006).

O primeiro teste que será realizado é o teste de multicolinearidade, que ocorre quando duas ou mais variáveis independentes estão fortemente correlacionadas entre si. A presença de multicolinearidade pode prejudicar a interpretação dos coeficientes do modelo e inflar suas variâncias. Para verificar a multicolinearidade, será calculado o Fator de Inflação da Variância (VIF). Valores de VIF superiores a 10 indicam a presença de multicolinearidade significativa.

Em seguida, será testada a presença de heterocedasticidade, que ocorre quando a variância dos erros não é constante entre as observações, podendo comprometer a eficiência dos estimadores. Será utilizado o teste de Wald modificado para heterocedasticidade entre os

grupos no modelo de efeitos fixos, conforme proposto por Greene et al. (2008). Se for identificada heterocedasticidade, serão aplicadas correções robustas nos erros padrão.

Posteriormente, será realizado o teste de autocorrelação, que verifica a presença de correlação entre os erros das observações ao longo do tempo. A autocorrelação é um problema comum em modelos de séries temporais e pode ser observada em dados em painel, afetando a eficiência das estimativas (BALTAGI et al., 2007). Para verificar, será utilizado o teste de Wooldridge, que testa a autocorrelação nos erros de um modelo de dados em painel (DRUKKER, 2003; WOOLDRIDGE, 2010). Caso seja identificada autocorrelação, será realizada a correção necessária nos erros padrão, assegurando a consistência dos resultados.

Por fim, outro possível problema econométrico que será considerado é o da endogeneidade, que ocorre quando uma ou mais variáveis explicativas estão correlacionadas com o erro do modelo. A endogeneidade pode surgir por omissão de variáveis relevantes, simultaneidade entre as variáveis dependente e independente, ou erro de medição nas variáveis explicativas, comprometendo a consistência dos estimadores. Caso seja identificada, para lidar com esse problema será adotada uma abordagem baseada no uso de variáveis defasadas. Ao utilizar valores passados das variáveis explicativas, reduz-se a possibilidade de correlação com os termos de erro contemporâneos, mitigando o viés de endogeneidade e melhorando a confiabilidade das estimativas.

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção busca apresentar e analisar os resultados obtidos a partir da construção do Índice de Eficiência de Recursos Naturais (IERN) e de seus subíndices, sendo eles ambiental, econômico e social, para o período de 2000 a 2020, nos dez países selecionados.

3.4.1 ANÁLISE DA ESTATÍSTICA DESCRITIVA DO IERN

Os valores do IERN foram calculados para cada um dos países analisados ao longo do período de 2000 a 2020. A tabela 5 mostra as estatísticas descritivas do índice, que incluem a média, o desvio padrão e os valores mínimos e máximos.

Tabela 5 – Estatística Descritiva do IERN por país (2000 – 2020)

País	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Austrália	0.345	0.027	0.292	0.393
Brasil	0.487	0.019	0.458	0.519
Canadá	0.446	0.055	0.327	0.516
China	0.415	0.036	0.321	0.496
Alemanha	0.538	0.036	0.467	0.621
Índia	0.520	0.030	0.460	0.579
Japão	0.567	0.043	0.467	0.602
México	0.388	0.039	0.326	0.443
África do Sul	0.432	0.066	0.289	0.531
Estados Unidos	0.362	0.032	0.298	0.432

Fonte: Elaborada pelo autor

Analisando o desvio padrão, observa-se que Canadá e África do Sul apresentam maiores desvios, o que sugere maior variação do IERN ao longo do tempo nesses países. Porém, o Brasil e a Índia apresentam valores mais baixos de desvio padrão, indicando maior estabilidade no comportamento do índice ao longo dos anos. Além disso, é possível observar ainda que o país com o maior valor do índice é a Alemanha, enquanto o menor valor é da África do Sul, o que reforça a diferença de performance entre os países, tanto em níveis médios quanto extremos.

Nota-se que o Japão se destaca com a maior média de IERN entre os países analisados. Esse bom desempenho pode ser atribuído à forte priorização de práticas sustentáveis no país, aliada a investimentos em tecnologias verdes e políticas públicas voltadas para eficiência energética, sendo um dos países com menor emissão de carbono do mundo (VIOLA, 2011). O Japão tem um histórico de integração de inovação tecnológica com sustentabilidade, especialmente após os impactos da crise do petróleo nos anos 1970, que impulsionou uma transformação em sua matriz energética e na gestão de recursos naturais.

A Alemanha, que ocupa a segunda posição, reflete seu próprio compromisso histórico com a transição energética e também de toda a União Europeia, com políticas públicas de promoção de fontes renováveis (ĆETKOVIĆ; BUZOGÁNY, 2016). Posteriormente, Índia apresenta uma posição que, apesar dos desafios socioeconômicos e de crescimento populacional, mostra os avanços que o país tem registrado em políticas de uso eficiente da água, transformação de resíduos em energia e produtos, junto de metas claras de transição energética e estruturação de cadeias produtivas (PANT et al., 2019).

Logo em seguida, o Brasil está com uma média que reflete tanto sua riqueza em recursos naturais quanto as dificuldades enfrentadas nas questões ambientais, visto que o Brasil apresenta uma das matrizes energéticas mais limpas, devido ao alto uso de hidrelétricas, além de elevada produtividade hídrica agrária, o índice tende a ter de

aumentar (BONDARIK; PILATTI; HORST, 2018). Porém, o Brasil ainda tem enfrentado desafios significativos em termos de desmatamento e impactos ambientais associados à expansão agropecuária (SAMBUICHI et al., 2012) e todos os custos ambientais e sociais do uso de hidrelétricas (TERRIN; BLANCHET, 2019).

Nas posições seguintes, Canadá, África do Sul e China têm médias intermediárias. O Canadá tem a chamada “vantagem verde”, por apresentar alta disponibilidade de recursos naturais em regiões como Saskatchewan, Alberta e British Columbia, áreas que, associadas a políticas públicas voltadas para o estímulo a práticas sustentáveis, proporcionam um elevado potencial de eficiência (SURISSETTY; KOZINSKI; DALAI, 2012), porém seu desempenho é impactado por outros fatores estruturais. O Canadá possui uma economia baseada na exploração de recursos naturais e atividades intensivas no uso destes, o que pode levar a uma menor eficiência.

A África do Sul apresenta uma maior variabilidade; o país é historicamente baseado na exploração mineral e na geração de energia a partir de carvão, o que compromete sua eficiência, mas, nos últimos anos, o país tem diversificado sua matriz energética, com investimentos em energia solar, eólica e biomassa (AKINBAMI; OKE; BODUNRIN, 2021). A China apresenta um cenário de transição, no qual, apesar de ser um dos maiores emissores globais e com maiores custos ambientais, tem investido em energias renováveis e tecnologias verdes nos últimos anos, o que contribui para sua melhoria na eficiência, além de investir em políticas públicas focadas na melhoria das condições de vida (WANG et al., 2019).

O México enfrenta algumas dificuldades na implementação de políticas eficazes para a conservação e o uso sustentável dos recursos naturais; o aumento de renda tem gerado um impacto negativo na demanda por recursos naturais. A elevação da renda tem levado a um aumento no consumo de bens intensivos em recursos naturais, como carne bovina e laticínios, que exigem grandes áreas de terra e contribuem para a pressão sobre os ecossistemas. Isso mostra uma ineficiência no uso de recursos, que se intensifica pela falta de políticas públicas e ambientais adequadas para acompanhar o aumento da demanda (ALIX-GARCIA et al., 2013); tais fatores podem influenciar negativamente o IERN.

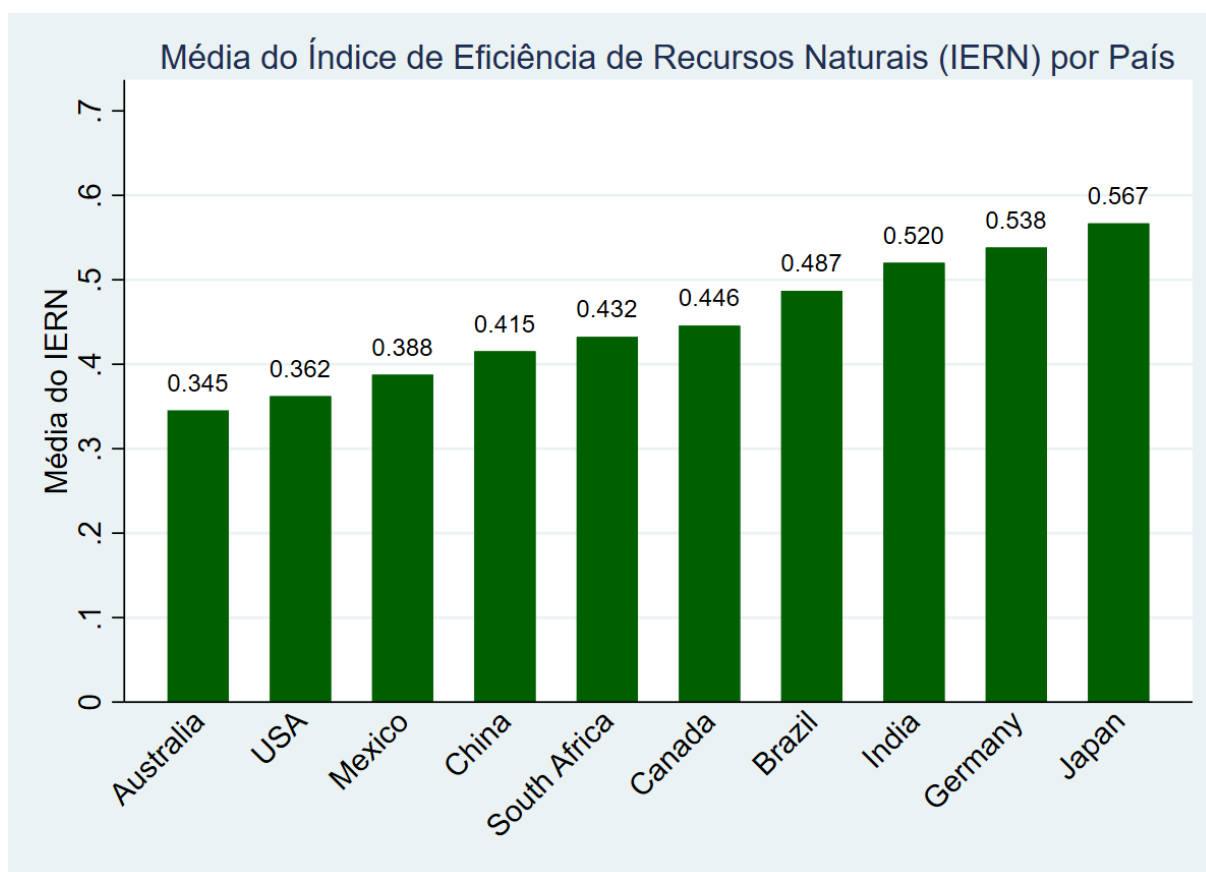
Por fim, Estados Unidos e Austrália apresentam as menores médias de IERN. Nos Estados Unidos, a baixa eficiência no uso de recursos naturais pode ser explicada por diversos fatores estruturais e institucionais. A forma de gerir os recursos naturais nos EUA foi historicamente desenvolvida pressupondo a estabilidade climática e o equilíbrio ecológico, o que não condiz com o cenário mundial. O fato de não se adaptar ao atual cenário tem contribuído para a degradação dos ecossistemas e o uso ineficiente dos recursos (WEST et al., 2009). Além disso, os Estados Unidos poderiam alcançar maiores reduções de emissões de gases estufas com os recursos já utilizados, como mostram

estudos prévios, uma vez que não tem sido feita uma boa alocação desses em políticas de longo prazo (GILLINGHAM; STOCK, 2018)

Observa-se que a Austrália passa por desafios complexos de gestão ambiental, caracterizada por grande variabilidade natural e vários fatores não lineares, como mudanças climáticas e desmatamento. O país tem adotado uma abordagem integrada, buscando metas alcançáveis e utilizando informações para avaliar o estado do meio ambiente de maneira mais realista (CURTIS; LEFROY, 2010). Porém, as complexidades da gestão e implementação de políticas ambientais, juntamente com o alto nível de produção de combustíveis fósseis, mantêm o IERN baixo.

A figura 7 apresenta a evolução das médias do IERN ao longo dos anos por país.

Figura 7 - Índice de Eficiência de Recursos Naturais (IERN) por País



Fonte: Elaborada pelo autor

As diferenças entre as médias do IERN refletem não apenas os recursos naturais disponíveis, mas principalmente as escolhas políticas, tecnológicas e sociais feitas ao longo do tempo, evidenciando que a eficiência no uso de recursos naturais é resultado de uma

combinação complexa entre governança, desenvolvimento tecnológico e priorização da sustentabilidade.

Como apresentado anteriormente, o IERN é dividido em três subíndices: ambiental, econômico e social. A análise desses subíndices traz uma compreensão mais detalhada no que tange à utilização eficiente dos recursos naturais, considerando não apenas o desempenho econômico, mas também os aspectos ambientais e sociais relacionados à bioeconomia. A estatística descritiva fornece uma visão geral do comportamento das variáveis dentro desses subíndices, permitindo uma compreensão das distribuições dos dados, das variações entre os países e de possíveis padrões que podem surgir ao longo dos anos.

3.4.2 ANÁLISE DA ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS SUBÍNDICES DO IERN

A Tabela 6 apresenta as estatísticas descritivas dos subíndices Ambiental (AMB), Econômico (ECO) e Social (SOC) do IERN para os países analisados no período de 2000 a 2020.

Tabela 6: Estatísticas descritivas dos subíndices Ambiental, Econômico e Social (2000-2020)

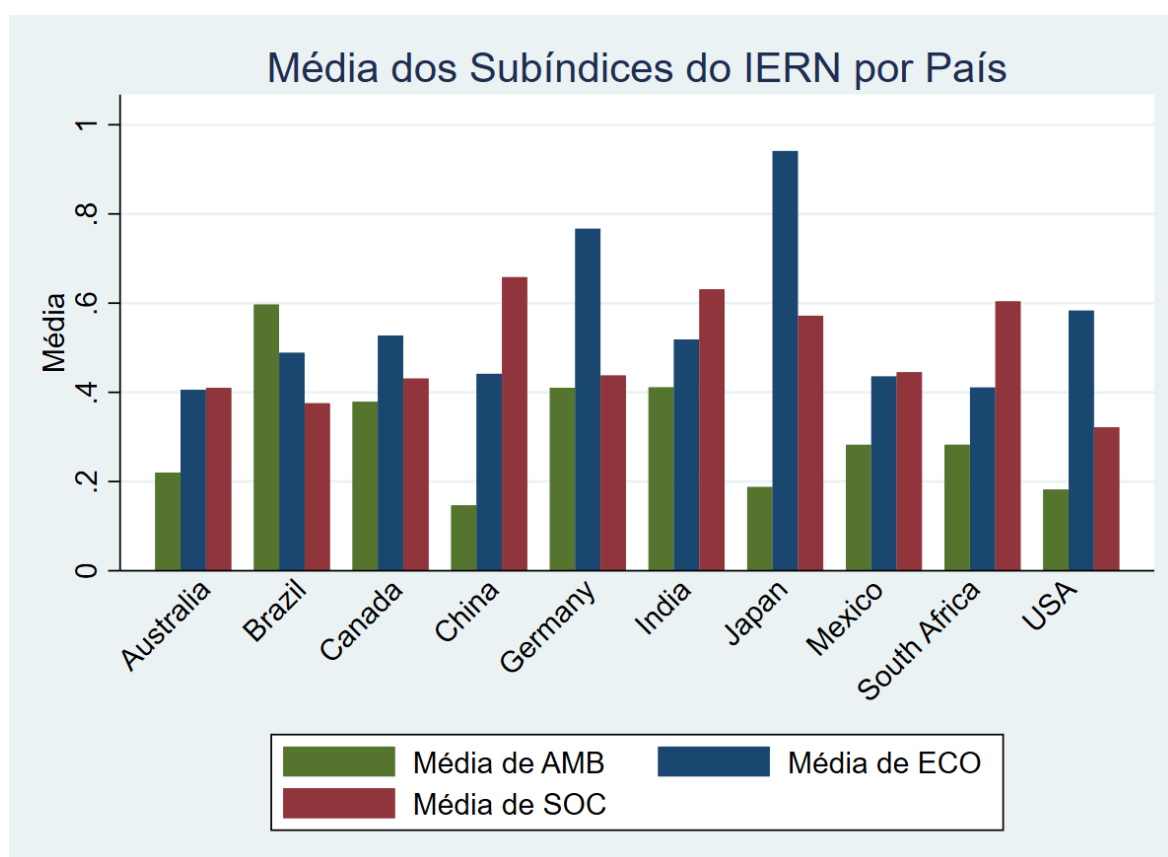
País	Subíndice Ambiental (AMB)	Subíndice Econômico (ECO)	Subíndice Social (SOC)
Australia	Média: 0.220 Desvio Padrão: 0.081 Mín: 0.074 Máx: 0.292	Média: 0.406 Desvio Padrão: 0.107 Mín: 0.146 Máx: 0.557	Média: 0.410 Desvio Padrão: 0.020 Mín: 0.356 Máx: 0.441
Brasil	Média: 0.597 Desvio Padrão: 0.042 Mín: 0.506 Máx: 0.653	Média: 0.489 Desvio Padrão: 0.081 Mín: 0.367 Máx: 0.623	Média: 0.375 Desvio Padrão: 0.056 Mín: 0.309 Máx: 0.473
Canadá	Média: 0.379 Desvio Padrão: 0.031 Mín: 0.254 Máx: 0.408	Média: 0.527 Desvio Padrão: 0.149 Mín: 0.316 Máx: 0.698	Média: 0.431 Desvio Padrão: 0.020 Mín: 0.376 Máx: 0.459
China	Média: 0.146 Desvio Padrão: 0.077 Mín: 0.076 Máx: 0.295	Média: 0.441 Desvio Padrão: 0.084 Mín: 0.214 Máx: 0.572	Média: 0.658 Desvio Padrão: 0.070 Mín: 0.568 Máx: 0.778
Alemanha	Média: 0.410 Desvio Padrão: 0.111 Mín: 0.212 Máx: 0.661	Média: 0.767 Desvio Padrão: 0.028 Mín: 0.724 Máx: 0.813	Média: 0.438 Desvio Padrão: 0.027 Mín: 0.377 Máx: 0.485
Índia	Média: 0.411 Desvio Padrão: 0.035 Mín: 0.351 Máx: 0.468	Média: 0.518 Desvio Padrão: 0.079 Mín: 0.344 Máx: 0.653	Média: 0.631 Desvio Padrão: 0.033 Mín: 0.576 Máx: 0.684
Japão	Média: 0.188 Desvio Padrão: 0.083	Média: 0.941 Desvio Padrão: 0.057	Média: 0.572 Desvio Padrão: 0.017

	Mín: 0.007 Máx: 0.241	Mín: 0.798 Máx: 0.984	Mín: 0.549 Máx: 0.603
México	Média: 0.282 Desvio Padrão: 0.043 Mín: 0.096 Máx: 0.307	Média: 0.435 Desvio Padrão: 0.111 Mín: 0.255 Máx: 0.616	Média: 0.445 Desvio Padrão: 0.026 Mín: 0.407 Máx: 0.504
África do Sul	Média: 0.283 Desvio Padrão: 0.052 Mín: 0.070 Máx: 0.339	Média: 0.411 Desvio Padrão: 0.145 Mín: 0.011 Máx: 0.583	Média: 0.604 Desvio Padrão: 0.050 Mín: 0.497 Máx: 0.695
Estados Unidos	Média: 0.182 Desvio Padrão: 0.085 Mín: 0.020 Máx: 0.245	Média: 0.583 Desvio Padrão: 0.070 Mín: 0.483 Máx: 0.667	Média: 0.321 Desvio Padrão: 0.048 Mín: 0.269 Máx: 0.410

Fonte: Elaborada pelo autor

Ademais, a figura 8 também apresenta a média dos valores de cada subíndice entre os países ao longo do período analisado.

Figura 8 – Média dos Subíndices do IERN por país



Fonte: Elaborada pelo autor

A análise das médias de cada país divididas por subíndices permite identificar padrões e destacar as particularidades de cada nação no que tange ao seu impacto ambiental, econômico e social relacionado ao uso sustentável dos recursos naturais.

Subíndice Ambiental (AMB)

O subíndice ambiental avalia a eficiência do uso dos recursos naturais no contexto ambiental; portanto, valores mais elevados indicam um maior compromisso com a preservação ambiental e práticas sustentáveis.

Primeiramente, nota-se que a Alemanha apresenta o valor máximo do subíndice ambiental, com uma variação considerável no desvio padrão, sugerindo que, enquanto a Alemanha adota boas práticas ambientais, o desempenho pode variar em diferentes regiões ou setores, refletindo um esforço contínuo para melhorar a sustentabilidade. Além disso, a Alemanha é referência em agricultura sustentável, com técnicas de irrigação e gestão de recursos hídricos, que são determinantes para o alto desempenho ambiental (KIRIKKALELI; ALI, 2024).

Observa-se que o Japão apresenta o valor mínimo no subíndice, que reflete as poucas práticas ambientais no país, devido fatores como a geografia do país, que gera uma base limitada de recursos naturais, dependendo fortemente de importações para atender às suas necessidades estruturais, além da agricultura sustentável no Japão, que enfrenta desafios, como a necessidade de mão de obra intensiva e dificuldades de ampliação da produção (ZHENMIAN; BIXIA; NAGATA, 2013).

O Brasil tem o maior valor médio para o subíndice entre os países analisados, mostrando a forte atuação do país na utilização de seus recursos naturais e políticas setoriais. A variação significativa no desvio padrão indica que, apesar de bons resultados, há áreas com desempenho inferior. Essa variação pode estar relacionada à pressão do desenvolvimento e às altas taxas de desmatamento no país nos últimos anos, uma vez que o desmatamento na Amazônia está diretamente ligado a atividades como expansão agropecuária e queimadas. Além disso, embora o Brasil tenha uma matriz energética majoritariamente renovável, a dependência de recursos hídricos o torna ainda mais vulnerável a variações climáticas, intensificando essa variação dentro do subíndice (SANTOS et al., 2017).

Enquanto a China apresenta o menor valor médio de todos os países, fruto da sobre-exploração dos recursos naturais, da utilização intensiva de insumos químicos na agricultura e da degradação do solo, que reduzem a produtividade e o valor agregado por hectare. Além disso, a rápida urbanização e industrialização no país tem levado a altos índices de degradação ambiental e dependência de fontes de energia não renováveis (FU et al., 2007)

Algumas nações adotam práticas mais eficazes e rigorosas de sustentabilidade, enquanto outras enfrentam maiores desafios, a grande variação em todo o subíndice ambiental indica que a proteção ambiental não está diretamente ligada à riqueza ou ao desenvolvimento econômico, mas depende fortemente de fatores como a estrutura política, os investimentos em iniciativas sustentáveis e a capacidade de implementar políticas públicas eficientes.

Subíndice Econômico (ECO)

O subíndice econômico reflete a eficiência econômica no uso dos recursos naturais, considerando o impacto econômico das práticas bioeconômicas, refletindo as estratégias adotadas na bioeconomia e no desenvolvimento sustentável.

O Japão destaca-se como o país com a maior média e o valor máximo no subíndice econômico, seguido pela Alemanha. Tal desempenho pode ser explicado pela forte orientação de ambos os países para a inovação tecnológica, por políticas de economia circular, que reduzem a dependência de extração de recursos naturais e práticas como uso eficiente de biomassa e reciclagem de nutrientes (MONTAG, 2023).

Nota-se que a Austrália tem a menor média no subíndice. A governança neoliberal na Austrália prioriza a instrumentalização econômica dos recursos naturais, tratando-os como capital a ser explorado para benefício produtivo, e a dependência de commodities, como mineração e agricultura extensiva, pouco eficiente e inovadora, além de ser muito variável conforme o clima ou desastres naturais, o que diminui drasticamente o subíndice (MULLEN, 2010; LOCKWOOD; DAVIDSON, 2010).

O valor mínimo do subíndice é registrado no México, podendo indicar que o país ainda depende fortemente de atividades econômicas baseadas na exploração de recursos naturais, como a extração de petróleo e gás, resultando em um baixo valor agregado por hectare, refletindo uma menor eficiência na utilização dos recursos naturais em termos econômicos. Além disso, o México sofre com a ineficiência no manejo de resíduos e faltas de políticas voltadas à economia circular, o que também reflete no índice (PADILLA-RIVERA et al., 2024).

A disparidade entre os valores máximo e mínimo do subíndice econômico aponta para um padrão no qual países com economias mais desenvolvidas e diversificadas, como o Japão e a Alemanha, obtêm melhores resultados em termos de valorização dos recursos naturais, enquanto países mais dependentes de commodities ou com altos subsídios a combustíveis fósseis, como o México e a Austrália, enfrentam maiores desafios para alcançar uma eficiência econômica semelhante.

Subíndice Social (SOC)

O subíndice social apresenta uma dinâmica entre os países que reflete tanto investimentos em capital humano quanto condições de vida da população.

O valor máximo do subíndice foi registrado pela China, resultado do aumento do investimento em educação superior, que promoveu acesso amplo ao ensino, com políticas governamentais. A modernização do setor agrícola, com a priorização da formação técnica e inovação, contribuiu para a produtividade do emprego rural, promovendo melhores

oportunidades de emprego e uma maior expectativa de vida, impulsionada por políticas sociais (ZHANG, 2024; LI et al., 2020).

Já os Estados Unidos apresentam o menor valor, em média, para o subíndice social, que pode ser caracterizado por alguns fatores. Primeiramente, os EUA têm um sistema educacional altamente descentralizado e com grande participação de instituições privadas e financiamento baseado em impostos locais, que pode gerar desigualdades regionais e acaba gerando acesso à pesquisa e ao desenvolvimento de maneira muito custosa (BRUSTEIN, 2007). Posteriormente, nota-se que atualmente a agricultura nos Estados Unidos é altamente mecanizada, o que reduz a demanda por mão de obra em meios de produção da bioeconomia (CALICIOGLU et al., 2019).

A variância dos valores mostra que países como a África do Sul e a China se destacam com padrões de variação mais elevados no subíndice social, o que reflete mudanças mais expressivas na performance social desses países ao longo do tempo, esperadas de países em desenvolvimento. Na China, a alta variação pode ser atribuída ao rápido processo de desenvolvimento socioeconômico e assimétrico observado nas últimas décadas, caracterizado pela forte expansão dos investimentos em educação e pela melhoria dos indicadores de saúde pública, que se refletiu em ganhos de expectativa de vida, porém com uma disparidade regional alta entre regiões costeiras e regiões mais ao interior (XING; HUANG; WANG, 2023)

Enquanto na África do Sul, a elevada variabilidade nos indicadores sociais reflete as tensões entre políticas econômicas e sociais no pós-apartheid. Enquanto existiam programas de reconstrução que priorizaram a educação e a saúde, surgiram programas que cortaram subsídios e reduziram investimentos em infraestrutura escolar, perpetuando desigualdades herdadas do apartheid (GRAY, 2006).

3.4.3 CORRELAÇÃO NOS SUBÍNDICES DO IERN

Nesse tópico, será explorado se há correlação entre os subíndices do Índice de Eficiência em Recursos Naturais (IERN). Analisar essa correlação é importante para entender a interdependência entre as diferentes dimensões que compõem o IERN. Além disso, a identificação de correlações entre os subíndices pode trazer luz sobre como esses aspectos se influenciam e indicar áreas em que políticas integradas podem ser mais eficazes.

Para realizar a análise, foi utilizado o teste de correlação de Pearson para calcular as correlações entre os subíndices ambientais (AMB), econômicos (ECO) e sociais (SOC) no período de 2000 a 2020. O teste também apresenta os valores de significância estatística (p-valor) para cada par de variáveis; o resultado será apresentado na tabela 7 abaixo.

Tabela 7- Correlação entre Subíndices do IERN

Variáveis	Coefficiente de Correlação	p-valor	Significância
AMB e ECO	-0.0502	0.4691	Não Significativo
AMB e SOC	-0.2504	0.0002	Significativo
ECO e SOC	0.0021	0.9754	Não Significativo

Fonte: Elaborado pelo autor

Primeiramente, há uma significância estatística na correlação entre as variáveis ambientais e sociais, mostrando que há uma correlação negativa e estatisticamente significativa entre os subíndices ambientais e sociais. Este resultado sugere que há um trade-off entre as duas dimensões, ou seja, melhorias em uma dimensão podem estar associadas a reduções na outra, indicando um possível conflito entre objetivos ambientais e sociais ou a necessidade de políticas integradas para equilibrar essas dimensões.

Analisando os indicadores que compõem os subíndices, conforme apresentados na tabela 1, pode-se evidenciar que pode haver um conflito entre a variação da cobertura florestal e o emprego na agricultura, já que uma redução do desmatamento pode limitar a expansão agrícola, principalmente em economias dependentes de agropecuária extensiva. Políticas de conservação florestal, como restrições ao desmatamento, reduzem a fronteira agrícola, limitando oportunidades de emprego em setores extensivos, como a pecuária e o cultivo de soja (BENHIN, 2006).

Pesquisas futuras podem analisar mais profundamente esses trade-offs e entender como políticas públicas podem ser elaboradas a fim de mitigar ou reduzir esses efeitos.

Por fim, nota-se que não há significância estatística entre os subíndices ambiental e econômico, nem nos subíndices econômico e social.

3.4.4 RESULTADOS DO MODELO ECONOMETRICO

Para analisar o desempenho bioeconômico dos países selecionados, foi utilizado um modelo econométrico de dados em painel para testar a relação entre o IERN e as emissões de CO₂, enquanto proxy para o avanço da bioeconomia nos países analisados, de forma a avaliar empiricamente a validade do indicador e sua utilidade como ferramenta de monitoramento e formulação de políticas públicas sustentáveis

A escolha entre os modelos de efeitos fixos e aleatórios foi feita com base no teste de Hausman, que testa se os efeitos individuais dos países estão correlacionados com as variáveis explicativas. O teste rejeitou a hipótese nula, indicando que o modelo de efeitos fixos é mais apropriado para a análise.

Após, foi calculado o Fator de Inflação da Variância (VIF), para verificar a presença de multicolinearidade entre as variáveis independentes, no qual valores acima de 10 indicam alta

multicolinearidade. O VIF médio foi 1,06 e nenhuma das variáveis apresentou valores acima de 10, indicando estar abaixo do limite de preocupação; portanto, a multicolinearidade não compromete a robustez das estimativas e não será um problema para o modelo.

Posteriormente, o teste de Wald indicou a presença de heterocedasticidade, ou seja, as variâncias dos erros não são constantes, assim, para garantir a robustez do modelo, serão utilizados erros padrão robustos. Além disso, o teste de Wooldridge indicou autocorrelação nos resíduos do modelo. Para corrigir ambos, foi utilizado o estimador de Driscoll-Kraay (FE-DK), por corrigir simultaneamente a heterocedasticidade e autocorrelação dentro do painel, assegurando maior robustez aos resultados.

Focando em testar o efeito do IERN, por fim, foram feitos testes de endogeneidade no índice, que indicam a presença desta. A endogeneidade no IERN sugere que as variáveis explicativas não estão completamente exógenas, o que poderia levar a estimativas viesadas, prejudicando a interpretação causal entre o IERN e as emissões de gases estufas. Para lidar com a endogeneidade, foi utilizado o IERN defasado, trazendo maior robustez e confiabilidade para os resultados, apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Resultados da Regressão com a Variável Dependente – Modelo FE-DK

Variáveis	Coefficientes
IERN_lag	-6627.72*** (2157.84)
ENR	-184.28*** (21.82)
IND	-243.26*** (52.42)
Constante	15536.74*** (2358.25)

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

O valor de IERN_lag é a variável defasada do Índice de Eficiência de Recursos Naturais (IERN), que representa a eficiência dos recursos naturais na bioeconomia no período anterior. As variáveis ENR e IND representam o uso de energias renováveis e o valor agregado pela indústria no PIB dos países analisados, respectivamente. O valor da Constante refere-se ao intercepto do modelo, ou seja, o valor das emissões de gases estufas quando todas as outras variáveis são zero. Além disso, foram analisadas 200 observações para 10 grupos, o asterisco (*) indica o nível de significância estatística, sendo *** para 1%, ** para

5% e * para 10% e os erros-padrão estão indicados abaixo dos valores estatísticos, em parênteses.

Nota-se que Índice de Eficiência de Recursos Naturais defasado apresentou coeficiente negativo e estatisticamente significativo a 1%, indicando que, quanto maior a eficiência no uso de recursos naturais em um período anterior, menores tendem a ser as emissões de gases estufas no período atual, mostrando um efeito benéfico da eficiência no uso de recursos sobre a sustentabilidade ambiental, comprovando a validade do IERN.

As variáveis de controle, o uso de energias renováveis na matriz energética e o valor agregado industrial, também apresentaram coeficientes negativos e estatisticamente significativos a 1%. No caso da ENR, o resultado mostra que quanto maior a participação de fontes renováveis na matriz energética, menor o nível de emissões, o que é esperado, já que a queima de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, utilizada por matriz energéticas tradicionais são a maior fonte de emissões de CO₂, um dos principais gases estufas (CANDRA et al., 2023).

Observa-se também que a variável IND indica que um maior valor agregado industrial está associado à redução de emissões, inicialmente contraintuitivo, mas que se explica uma vez que a indústria é, historicamente, um dos setores que mais emite poluentes no mundo. Porém, é notório que estudos apontam que o impacto do valor agregado do setor industrial no PIB não necessariamente diminui as emissões de GHG. Os resultados são heterogêneos e dependem do contexto específico de cada país, em países que há a predominância de ramos industriais intensivos em carbono, o crescimento industrial está associado a aumentos ou manutenção de emissões, enquanto em outros países, como França, Espanha e Argentina, foram observadas relações complexas, que indicam que o impacto do setor industrial varia conforme o estágio de desenvolvimento econômico e políticas locais (ALAM, 2015; MARTÍN-ORTEGA; GONZÁLEZ-SÁNCHEZ, 2023; OKERE et al., 2021).

No caso do presente estudo, na Alemanha, Japão, Estados Unidos e Canadá, o setor industrial tem passado por um processo de descarbonização, a adoção de fontes de energia renovável, melhora na eficiência energética dos processos produtivos, a automatização e o uso de tecnologias limpas têm possibilitado um aumento do valor agregado industrial sem um aumento nas emissões. Além disso, muitas dessas economias têm um perfil industrial voltado para setores de alta tecnologia, que possuem menor intensidade de carbono por unidade de valor produzido (GALEAZZI; STEINBUKS; ANADÓN, 2024).

Em outros países da amostra, como o Brasil, China, Índia e África do Sul, parte da expansão industrial ainda está associada à produção de bens com alta pegada de carbono, as indústrias tendem a emitir grandes quantidades de CO₂, especialmente quando alimentadas por carvão, ou gás natural (MOHAJAN, 2013; VOUMIK; SULTANA 2022),

indicando, portanto, que o resultado do modelo sobre a variável IND reflete características dos países analisados.

3.5 CONCLUSÃO

Por fim, diante da lacuna identificada na literatura quanto à escassez de indicadores capazes de avaliar de forma conjunta o desempenho e o impacto das práticas bioeconômicas, este capítulo teve como objetivo desenvolver um Índice de Eficiência de Recursos Naturais (IERN) para mensurar e comparar o desempenho bioeconômico de diferentes países no uso sustentável dos recursos naturais. Diferente dos indicadores tradicionais, que se concentram em métricas isoladas como a produção de biomassa ou a redução de emissões, o IERN busca integrar dimensões ambientais, econômicas e sociais a fim de trazer uma visão mais completa da eficiência no uso dos recursos naturais em contextos bioeconômicos.

Inicialmente, ao identificar os principais indicadores tradicionais utilizados na mensuração da bioeconomia, como a quantidade de biomassa disponível, a área cultivada com biomassa energética e a redução das emissões de CO₂, foram evidenciadas suas limitações em capturar de forma integrada a eficiência no uso de recursos naturais.

Levando em conta essa limitação, o IERN foi elaborado utilizando as variáveis que buscassem refletir diferentes dimensões da eficiência no uso de recursos naturais. No eixo ambiental, a variação da cobertura florestal foi incluída como um indicador da conservação ou degradação ambiental ao longo do tempo. A produtividade hídrica agrícola representa a eficiência no uso da água na produção agrícola, enquanto o uso de energias renováveis indica o grau de transição para fontes energéticas sustentáveis.

Na dimensão econômica, a renda de recursos naturais foi considerada para refletir o grau de dependência das economias em relação à exploração de recursos naturais, sinalizando pressões sobre a sustentabilidade de longo prazo. Já os subsídios a combustíveis fósseis foram incluídos por representarem incentivos que desestimulam a adoção de práticas sustentáveis. Além disso, o valor agrícola agregado foi adotado como um indicador de produtividade econômica do uso da terra, evidenciando o valor gerado por área cultivada.

Na dimensão social, foram utilizadas três variáveis: os gastos públicos em educação, como proxy de investimento em capital humano, o emprego em agricultura, indicando o nível de emprego em um dos principais setores da bioeconomia, e a expectativa de vida, como indicador de bem-estar social e resultado de políticas públicas e práticas sustentáveis.

As variáveis foram selecionadas com base em sua relevância teórica e empírica, amplamente discutidas na literatura sobre bioeconomia, sustentabilidade e eficiência no uso de recursos naturais. Além disso, também foi considerada a disponibilidade de dados em nível internacional. A análise foi feita para um conjunto de dez países que houvessem

representação regional e socioeconômica, sendo eles: Brasil, Alemanha, China, Índia, Estados Unidos, Japão, Canadá, México, Austrália e África do Sul.

Os resultados do estudo mostraram que, na análise descritiva do IERN, o Canadá e a África do Sul registraram as maiores variações ao longo do período, enquanto o Brasil e a Índia apresentaram maior estabilidade. Em termos de médias gerais, a Alemanha alcançou o valor mais alto do índice e a África do Sul o mais baixo, com o Japão destacando-se pela maior eficiência média e os Estados Unidos e a Austrália pelas menores. Ao desagregar nos subíndices, o ambiental apontou maior média na Alemanha e menor na China; o econômico foi liderado pelo Japão e teve o México como menor valor; o social teve a China no topo e os EUA no fim. A correlação de Pearson revelou um trade-off significativo entre as dimensões ambientais e sociais, sem relações lineares relevantes entre as demais.

Para validar o IERN, foi realizada uma regressão com efeitos fixos e erros padrão robustos de Driscoll-Kraay (FE-DK). A regressão foi aplicada para entender como o Índice, em suas diversas dimensões, se correlaciona com as emissões de CO₂, por serem frequentemente utilizadas como um proxy para avaliar a sustentabilidade das práticas econômicas e o impacto ambiental de diferentes modelos de desenvolvimento.

Os resultados econométricos reforçam a validade do índice como instrumento de análise e formulação de políticas sustentáveis. A associação negativa e estatisticamente significativa entre o IERN defasado e as emissões de CO₂ evidencia que maiores níveis de eficiência no uso de recursos naturais contribuem para a redução das emissões no período seguinte. Além disso, o impacto positivo do uso de energias renováveis e de diferentes estágios de industrialização entre os países da amostra destaca a importância de considerar o contexto nacional nas estratégias de transição para uma bioeconomia de baixo carbono.

Este capítulo contribui ao propor e aplicar um Índice de Eficiência de Recursos Naturais, inovando ao mensurar o desempenho bioeconômico com base em variáveis ambientais, econômicas e sociais integradas. Ao testar empiricamente a relação entre esse índice e as emissões de CO₂ por meio de um modelo econométrico robusto, a pesquisa valida o uso do IERN como ferramenta analítica para monitorar a sustentabilidade do uso dos recursos naturais.

Nota-se também que o capítulo fornece subsídios para a formulação de políticas públicas mais eficazes. Formuladores de políticas públicas devem adotar um conjunto integrado de iniciativas que considere simultaneamente as dimensões ambiental, econômica e social, evitando soluções isoladas que podem gerar trade-offs indesejáveis. É necessário que haja incentivos à recuperação e conservação ambiental, além de financiamentos para tecnologias limpas e que guiem para uma bioeconomia mais sustentável. Há também a necessidade de mais relevância ao âmbito social, garantindo uma transição justa e que leve em consideração empregos nos diversos setores diretamente afetados pela bioeconomia.

Dentre as limitações da pesquisa, destaca-se que o recorte temporal, 2000 a 2020, não leva em consideração avanços recentes da bioeconomia e diversas mudanças mundiais, além de não contemplar os dados do período anterior, o que pode limitar a aplicabilidade em outros cenários. Nota-se também que o recorte geográfico foi limitado a dez países com disponibilidade de dados comparáveis, o que reduz a capacidade de generalização para outros países com estruturas institucionais muito distintas. Havendo disponibilidade de dados, estudos futuros podem abranger outros recortes temporais e geográficos, aumentando a robustez do IERN e melhorando a replicabilidade.

Por fim, estudos futuros podem também integrar outros indicadores ao IERN, além de comparar o índice proposto com eles, analisando seus resultados, métricas e diferenças. Também é notório que agregar o IERN a métodos qualitativos que incluam estudos de caso pode trazer caminhos diretos para os formuladores de políticas públicas, trazendo maiores retornos para a sociedade.

4 CONCLUSÃO GERAL

Assim, conclui-se que esta pesquisa buscou analisar a relação entre bioeconomia e eficiência no uso de recursos naturais, integrando uma abordagem teórica, por meio de revisão sistemática da literatura, e uma análise empírica, com a construção do Índice de Eficiência de Recursos Naturais (IERN). Os resultados demonstram que a transição para uma bioeconomia sustentável depende não apenas de avanços tecnológicos, mas também de estratégias adaptadas às especificidades regionais, especialmente em países com alta dependência de recursos naturais.

A revisão sistemática evidenciou lacunas críticas na literatura, como a escassez de estudos em países em desenvolvimento e a predominância de abordagens quantitativas que negligenciam dimensões sociais e políticas. A análise bibliométrica destacou a centralidade de temas como biocombustíveis, biomassa e economia circular, porém apontou a necessidade de integrar perspectivas multidisciplinares para compreender os trade-offs entre eficiência, equidade e conservação ambiental.

O IERN, construído a partir de variáveis ambientais, econômicas e sociais, mostrou-se uma ferramenta válida para mensurar a eficiência no uso de recursos naturais. A análise econométrica revelou uma correlação negativa e estatisticamente significativa entre o índice defasado e as emissões de gases de efeito estufa, reforçando que maior eficiência no uso de recursos está associada a menores impactos ambientais. Países como o Japão e a Alemanha destacaram-se pelo desempenho no IERN, enquanto nações como a África do Sul e o México enfrentam desafios estruturais para equilibrar crescimento econômico e sustentabilidade.

Primeiramente, tem-se a recomendação da ampliação de estudos em países em desenvolvimento e a adoção de métodos quantitativos e qualitativos, simultaneamente, para capturar impactos socioinstitucionais. Além disso, o IERN pode orientar a formulação de políticas integradas, como incentivos à transição energética e programas de conservação adaptados a contextos regionais.

Nota-se, portanto, que empresas e governos devem priorizar a eficiência no uso de recursos naturais como estratégia central para alinhar crescimento econômico, redução de emissões e equidade social.

Por fim, esta pesquisa reforça que a bioeconomia não é apenas uma alternativa técnica, mas um projeto político e social que exige cooperação global, inovação inclusiva e governança eficaz. Há a urgência de repensar modelos de desenvolvimento, garantindo que a exploração de recursos naturais seja capaz de refletir para a sociedade toda a sua capacidade ambiental, econômica e social.

REFERÊNCIAS

- AGBOOLA, Mary Oluwatoyin; BEKUN, Festus Victor; JOSHUA, Udi. Pathway to environmental sustainability: Nexus between economic growth, energy consumption, CO₂ emission, oil rent, and total natural resources rent in Saudi Arabia. **Resources Policy**, v. 74, p. 102380, 2021.
- AKINBAMI, Olusola M.; OKE, Samuel R.; BODUNRIN, Michael O. The state of renewable energy development in South Africa: An overview. **Alexandria Engineering Journal**, v. 60, n. 6, p. 5077-5093, 2021.
- ALAM, Janifar. Impact of agriculture, industry and service sector's value added in the GDP on CO₂ emissions of selected South Asian countries. **World Review of Business Research**, v. 5, n. 2, p. 39-59, 2015.
- ALIX-GARCIA, Jennifer et al. The ecological footprint of poverty alleviation: evidence from Mexico's Oportunidades program. **Review of Economics and Statistics**, v. 95, n. 2, p. 417-435, 2013.
- BALTAGI, Badi H. Econometric analysis of panel data. Chichester: John Wiley & sons, 2008.
- BALTAGI, Badi H. et al. Testing for serial correlation, spatial autocorrelation and random effects using panel data. **Journal of econometrics**, v. 140, n. 1, p. 5-51, 2007.
- BARRERA-ROLDÁN, Adrián; SALDIVAR-VALDÉS, Américo. Proposal and application of a Sustainable Development Index. **Ecological Indicators**, v. 2, n. 3, p. 251-256, 2002.
- BARROS, Gustavo Belchior de et al. Mecanismos causadores de pressão e impacto ambiental sobre os ecossistemas e florestas nativas. Silvicultura e manejo florestal: técnicas de utilização e conservação da natureza. **Rio de Janeiro: Editora Científica LTDA**, v. 2, p. 233-252, 2021.
- BENHIN, James KA. Agriculture and deforestation in the tropics: a critical theoretical and empirical review. **AMBIO: A Journal of the Human Environment**, v. 35, n. 1, p. 9-16, 2006.
- BEN-SALHA, Ousama; DACHRAOUI, Hajer; SEBRI, Maamar. Natural resource rents and economic growth in the top resource-abundant countries: a PMG estimation. **Resources Policy**, v. 74, p. 101229, 2021.
- BONDARIK, Roberto; PILATTI, Luiz Alberto; HORST, Diogo José. Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no Brasil. **Interciencia**, v. 43, n. 10, p. 680-688, 2018.
- BOUTRAA, Tahar. Improvement of water use efficiency in irrigated agriculture: a review. **Journal of Agronomy**, v. 9, n. 1, p. 1-8, 2010.
- BRIZGA, Janis; MICEIKIENĒ, Astrida; LIOBIKIENĒ, Genovaitė. Environmental aspects of the implementation of bioeconomy in the Baltic Sea Region: An input-output approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 240, p. 118238, 2019.
- BRUSTEIN, William I. The global campus: Challenges and opportunities for higher education in North America. **Journal of studies in international education**, v. 11, n. 3-4, p. 382-391, 2007.

BUGGE, Markus M.; HANSEN, Teis; KLITKOU, Antje. What is the bioeconomy? A review of the literature. *Sustainability*, v. 8, n. 7, p. 691, 2016.

CALICIOGLU, Ozgul et al. The future challenges of food and agriculture: An integrated analysis of trends and solutions. *Sustainability*, v. 11, n. 1, p. 222, 2019.

CANDRA, Oriza et al. The impact of renewable energy sources on the sustainable development of the economy and greenhouse gas emissions. *Sustainability*, v. 15, n. 3, p. 2104, 2023.

ĆETKOVIĆ, Stefan; BUZOGÁNY, Aron. Varieties of capitalism and clean energy transitions in the European Union: When renewable energy hits different economic logics. *Climate Policy*, v. 16, n. 5, p. 642-657, 2016.

CHANDEL, Anuj K. et al. The role of renewable chemicals and biofuels in building a bioeconomy. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 14, n. 4, p. 830-844, 2020.

CURTIS, A. L.; LEFROY, E. C. Beyond threat-and asset-based approaches to natural resource management in Australia. *Australasian Journal of Environmental Management*, v. 17, n. 3, p. 134-141, 2010

DOS SANTOS, Glicia Vieira; QUADROS, Ruy. Capacidades dinâmicas para a transformação digital: uma análise bibliométrica exploratória com VOSviewer. *Revista de Gestão e Secretariado*, v. 15, n. 7, p. e3970-e3970, 2024.

DRUKKER, David M. Testing for serial correlation in linear panel-data models. *The stata journal*, v. 3, n. 2, p. 168-177, 2003.

ECONOMETRICS, Cambridge. Criteria and Indicators describing the regional bioeconomy. **BERST Building Regional BioEconomics** Website, 2014.

EUROPEAN COMMISSION: Directorate-General for Research and Innovation, Innovating for sustainable growth – A bioeconomy for Europe, **Publications Office**, 2012.

FEITOSA, Caciana; MOREIRA, Beatriz. Os impactos das mudanças climáticas na segurança alimentar e a necessidade urgente de medidas mitigadoras. *Cadernos de Agroecologia*, v. 19, n. 1, 2024.

FERRAZ, Diogo; PYKA, Andreas. Circular economy, bioeconomy, and sustainable development goals: a systematic literature review. *Environmental Science and Pollution Research*, p. 1-22, 2023.

FERREIRA, Valeria et al. Research trends and hotspots in bioeconomy impact analysis: a study of economic, social and environmental impacts. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 96, p. 106842, 2022.

FU, Bo-jie et al. Feature: environmental problems and challenges in China. 2007.

GALEAZZI, Clara; STEINBUKS, Jevgenijs; ANADÓN, Laura Diaz. Assessing the impact of renewable energy policies on decarbonization in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 199, p. 114444, 2024.

GAN, Xiaoyu et al. When to use what: Methods for weighting and aggregating sustainability indicators. *Ecological indicators*, v. 81, p. 491-502, 2017.

GILLINGHAM, Kenneth; STOCK, James H. The cost of reducing greenhouse gas emissions. **Journal of Economic Perspectives**, v. 32, n. 4, p. 53-72, 2018.

GRAY, Mel. The progress of social development in South Africa. **International Journal of Social Welfare**, v. 15, p. S53-S64, 2006.

GREENE, William H. et al. The econometric approach to efficiency analysis. **The measurement of productive efficiency and productivity growth**, v. 1, n. 1, p. 92-250, 2008.

HATFIELD, Jerry L.; DOLD, Christian. Water-use efficiency: advances and challenges in a changing climate. **Frontiers in plant science**, v. 10, p. 103, 2019.

HE, Yugang et al. Exploring the road toward environmental sustainability: natural resources, renewable energy consumption, economic growth, and greenhouse gas emissions. **Sustainability**, v. 14, n. 3, p. 1579, 2022.

HEIMANN, Tobias. Bioeconomy and SDGs: Does the bioeconomy support the achievement of the SDGs?. *Earth's Future*, v. 7, n. 1, p. 43-57, 2019.

HINDERER, Sebastian; BRÄNDLE, Leif; KUCKERTZ, Andreas. Transition to a sustainable bioeconomy. *Sustainability*, v. 13, n. 15, p. 8232, 2021.

JACOBS, Rowena; SMITH, Peter; GODDARD, Maria. Measuring performance: an examination of composite performance indicators. 2004.

JIADUO, Erti et al. The impact of agricultural employment and technological innovation on the environment: Evidence from BRICS nations considering a novel environmental sustainability indicator. **Sustainability**, v. 15, n. 20, p. 15083, 2023.

JURGA, Piotr; LOIZOU, Efstratios; ROZAKIS, Stelios. Comparing bioeconomy potential at national vs. regional level employing input-output modeling. **Energies**, v. 14, n. 6, p. 1714, 2021.

KARDUNG, Maximilian et al. Development of the circular bioeconomy: Drivers and indicators. **Sustainability**, v. 13, n. 1, p. 413, 2021.

KARVONEN, Jaakko et al. Indicators and tools for assessing sustainability impacts of the forest bioeconomy. **Forest ecosystems**, v. 4, p. 1-20, 2017.

KIRIKKALELI, Dervis; ALI, Minhaj. Resource efficiency, energy productivity, and environmental sustainability in Germany. **Environment, Development and Sustainability**, v. 26, n. 5, p. 13139-13158, 2024.

LEITÃO, Alexandra. Bioeconomy: the challenge in the management of natural resources in the 21st century. *Open Journal of Social Sciences*, v. 4, p. 26-42, 2016.

LI, Qiang et al. The effect of agricultural environmental total factor productivity on urban-rural income gap: Integrated view from China. **Sustainability**, v. 12, n. 8, p. 3327, 2020.

LIOBIKIENE, Genovaite et al. Evaluation of bioeconomy in the context of strong sustainability. *Sustainable development*, v. 27, n. 5, p. 955-964, 2019.

LOCKWOOD, Michael; DAVIDSON, Julie. Environmental governance and the hybrid regime of Australian natural resource management. **Geoforum**, v. 41, n. 3, p. 388-398, 2010.

MACHADO, João Guilherme Rocha; PAMPLONA, João Batista. A ONU e o desenvolvimento econômico: uma interpretação das bases teóricas da atuação do PNUD. **Economia e sociedade**, v. 17, p. 53-84, 2008.

MAJER, Stefan et al. Gaps and research demand for sustainability certification and standardisation in a sustainable bio-based economy in the EU. **Sustainability**, v. 10, n. 7, p. 2455, 2018.

MARTÍN-ORTEGA, Juan Luis; GONZÁLEZ-SÁNCHEZ, Mariano. Sectoral composition of GDP and greenhouse gas emissions: an empirical analysis in EU27. **Environment, Development and Sustainability**, p. 1-28, 2023.

MAZZIOTTA Matteo; PARETO Adriano. Everything you always wanted to know about normalization (but were afraid to ask). **Rivista Italiana di Economia Demografia e Statistica**, p. 41-52, 2021.

MEJIAS, Rafael Gouveia et al. Bioeconomia e suas aplicações. **ÍANDÉ: Ciências e Humanidades**, v. 2, n. 3, p. 105-121, 2019.

MIERNYK, William H. The elements of input-output analysis. 2020.

MOHAJAN, Haradhan. Greenhouse gas emissions of China. 2013.

MONTAG, Laura. Roadmap to a circular economy by 2030: a comparative review of circular business model visions in Germany and Japan. **Sustainability**, v. 15, n. 6, p. 5374, 2023.

MULLEN, John. Agricultural productivity growth in Australia and New Zealand. **The shifting patterns of agricultural production and productivity worldwide**, v. 5, p. 102-122, 2010.

NARDO, Michela et al. Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide. 2005.

O'DONOGHUE, Cathal et al. Measuring GHG emissions across the agri-food sector value chain: the development of a bioeconomy input-output model. **International Journal on Food System Dynamics**, v. 10, n. 1, p. 55-85, 2019.

OKERE, Kingsley Ikechukwu et al. Towards sustainability path in Argentina: the role of finance, energy mix, and industrial value-added in low or high carbon emission—application of DARDL simulation. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 39, p. 55053-55071, 2021.

PADILLA-RIVERA, Alejandro et al. Barriers, Challenges, and Opportunities in the Adoption of the Circular Economy in Mexico: An Analysis through Social Perception. **Recycling**, v. 9, n. 5, p. 71, 2024.

PAMPLONA, João Batista; CACCIAMALI, Maria Cristina. O paradoxo da abundância: recursos naturais e desenvolvimento na América Latina. **Estudos Avançados**, v. 31, n. 89, p. 251-270, 2017.

PANOUTSOU, Calliope; ALEXOPOULOU, Efthymia. Costs and Profitability of Crops for Bioeconomy in the EU. **Energies**, v. 13, n. 5, p. 1222, 2020.

PANT, Deepak et al. Towards the development of a biobased economy in Europe and India. **Critical reviews in biotechnology**, v. 39, n. 6, p. 779-799, 2019.

PAPADOPOULOU, Christina-Ioanna; LOIZOU, Efstratios; CHATZITHEODORIDIS, Fotios. Priorities in bioeconomy strategies: a systematic literature review. **Energies**, v. 15, n. 19, p. 7258, 2022.

PINHEIRO, Juliana Carvalho; GOUDARD, Naiara Rodrigues; BARBOSA, Neiva da Silva Gonçalves. Impactos e benefícios ambientais, econômicos e sociais dos biocombustíveis. **Bolsista de Valor**, v. 1, p. 349-358, 2010.

POZZETTI, Valmir César; FERREIRA, Marie Joan Nascimento; SILVA, Anderson Solimões. Bioeconomia: a economia do futuro, sob a ótica dos objetivos de desenvolvimento sustentável. **Percurso**, v. 6, n. 37, p. 346-363, 2021.

QAZI, Atika et al. Towards sustainable energy: a systematic review of renewable energy sources, technologies, and public opinions. **IEEE access**, v. 7, p. 63837-63851, 2019.

SAMBUICHI, Regina Helena Rosa et al. A sustentabilidade ambiental da agropecuária brasileira: impactos, políticas públicas e desafios. Texto para Discussão, 2012.

SANTOS, Thiago Oliveira et al. Os impactos do desmatamento e queimadas de origem antrópica sobre o clima da Amazônia brasileira: um estudo de revisão. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 11, n. 2, p. 157-181, 2017.

SCARLAT, Nicolae et al. The role of biomass and bioenergy in a future bioeconomy: Policies and facts. **Environmental development**, v. 15, p. 3-34, 2015.

SEIFORD, Lawrence M.; ZHU, Joe. Modeling undesirable factors in efficiency evaluation. **European journal of operational research**, v. 142, n. 1, p. 16-20, 2002.

SGOBBE, Vinicius. Bioeconomia: uma abordagem biotecnológica para o desenvolvimento sustentável. 2024.

SURISSETTY, Venkateswara Rao; KOZINSKI, Janusz; DALAI, Ajay Kumar. Biomass, availability in Canada, and gasification: an overview. **Biomass conversion and biorefinery**, v. 2, p. 73-85, 2012.

TERRIN, Kátia Alessandra Pastori; BLANCHET, Luiz Alberto. Direito de energia e sustentabilidade: uma análise dos impactos negativos das usinas hidrelétricas no Brasil. **Revista Videre**, v. 11, n. 22, p. 47-63, 2019.

TÖBBEN, Johannes Reinhard et al. Global land use impacts of bioeconomy: an econometric input-output approach. **Sustainability**, v. 14, n. 4, p. 1976, 2022.

ULLAH, Hayat et al. Improving water use efficiency, nitrogen use efficiency, and radiation use efficiency in field crops under drought stress: A review. **Advances in agronomy**, v. 156, p. 109-157, 2019.

URMETZER, Sophie et al. Learning to change: Transformative knowledge for building a sustainable bioeconomy. *Ecological Economics*, v. 167, p. 106435, 2020.

VAN DE PAS, Jirka. The bio-economy: definitions and measurement. **Wageningen UR**, 2015.

VAN DE WAL, Marc; DE JAGER, Bram. A review of methods for input/output selection. **Automatica**, v. 37, n. 4, p. 487-510, 2001.

VAN LEEUWEN, Myrna et al. (Ed.). Overview of the Systems Analysis Framework for the EU Bioeconomy. **SATBBE**, 2013.

VICTOR, David G. The politics of fossil-fuel subsidies. Available at SSRN 1520984, 2009.

VIOLA, Eduardo. Perspectivas internacionais para a transição para uma economia verde de baixo carbono1. **AMBIENTAL**, p. 43, 2011.

VITA, Gibran et al. The environmental impact of green consumption and sufficiency lifestyles scenarios in Europe: connecting local sustainability visions to global consequences. **Ecological economics**, v. 164, p. 106322, 2019.

VOUMIK, Liton Chandra; SULTANA, Tasnim. Impact of urbanization, industrialization, electrification and renewable energy on the environment in BRICS: fresh evidence from novel CS-ARDL model. **Heliyon**, v. 8, n. 11, 2022.

WADANAMBI, R. T. et al. The effects of industrialization on climate change. **J. Res. Technol. Eng.**, v. 1, n. 4, p. 86-94, 2020.

WANG, Lei et al. Globalization and carbon emissions: is there any role of agriculture value-added, financial development, and natural resource rent in the aftermath of COP21?. **Journal of Environmental Management**, v. 268, p. 110712, 2020.

WANG, Qinhua et al. Green technology innovation development in China in 1990–2015. *Science of the Total Environment*, v. 696, p. 134008, 2019.

WEST, Jordan M. et al. US natural resources and climate change: concepts and approaches for management adaptation. **Environmental management**, v. 44, p. 1001-1021, 2009.

WOOLDRIDGE, Jeffrey M. Econometric analysis of cross section and panel data. **MIT press**, 2010.

WOOLDRIDGE, Jeffrey M. **Introdução à econometria: uma abordagem moderna. Cengage Learning**, 2006.

XING, Zeyu; HUANG, Jing; WANG, Jing. Unleashing the potential: exploring the nexus between low-carbon digital economy and regional economic-social development in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 413, p. 137552, 2023.

ZHANG, Zijun. Development of Higher Education in China. **Lecture Notes in Education Psychology and Public Media**, v. 39, p. 166-174, 2024.

ZHENMIAN, Qiu; BIXIA, Chen; NAGATA, Akira. Review of sustainable agriculture: Promotion, its challenges and opportunities in Japan. **Journal of Resources and Ecology**, v. 4, n. 3, p. 231-241, 2013.

ZILBERMAN, David et al. Economics of sustainable development and the bioeconomy. **Applied Economic Perspectives and Policy**, v. 40, n. 1, p. 22-37, 2018

ANEXOS
Tabela A.1

Autor(es)	Método	Base de dados	Período	Artigos Analisados	Dimensão	Combinação	Contribuições	Limitações
Ferreira Gregorio et al. (Ferreira Gregorio et al. 2018)	SLR	Scopus	1960–2017	449	CE/BE	-	O contribui para a economia e gestão empresarial ao conduzir uma análise profunda das publicações relevantes sobre CBE (Economia Circular e de Bioeconomia).	Apenas a base de dados Scopus foi analisada, com foco em artigos acadêmicos, livros e capítulos. Uma avaliação subjetiva foi empregada para categorizar a literatura
D'Amato et al. (D'Amato et al. 2017)	Biblio	WoS	1990–2017	1943	CE/BE	-	Os autores envolvem-se em uma discussão abrangente que engloba as sobreposições, divergências, sinergias e limites associados aos conceitos de CBE.	A distribuição geográfica da literatura mostra os países de afiliação dos autores. Um número predeterminado de tópicos foi estabelecido antes da análise.
Prieto-Sandoval et al. (Prieto-Sandoval et al. 2018)	SLR	WoS	1990–2017	162	CE	Eco-inovação	Os autores contribuem para definir o conceito, princípios e determinantes de uma CE (Economia Circular). O estudo também apresenta tópicos de pesquisa futuros. O estudo analisou artigos acadêmicos.	O estudo analisou artigos acadêmicos. Os autores utilizaram apenas a Web of Science. Houve uma avaliação subjetiva dos artigos.

Reim et al. (Wiebke Reim et al. 2019)	SLR	Scopus	1990–2019	42	BE	Modelos de negócio circular	O estudo propõe uma agenda de pesquisa para uma melhor compreensão da implementação de modelos de negócios circulares e para conceituar as áreas essenciais para criar um modelo de negócio para uma bioeconomia.	O estudo não analisou indicadores, os métodos mais utilizados, as principais limitações dos artigos e recomendações futuras ou lacunas de pesquisa.
Biber-Freudenberg et al. (Biber-Freudenberg et al. 2020)	Survey/SLR	WoS	2010–2020	-	BE	ODS	O estudo analisou as chances e riscos do crescimento bioeconômico. Os autores revelaram quais inovações bioeconômicas estão mais associadas a benefícios e quais estão mais ligadas a riscos.	O estudo apenas discutiu estudos que utilizam implicações positivas ou negativas para os ODS na Bioeconomia. Publicações anteriores a 2010 foram excluídas
Sarja et al. (Sarja et al. 2021)	SLR	WoS/Scopus	2005–2018	69	CE	Organizações corporativas	O estudo fornece uma compreensão dos fatores para implementar CE em organizações corporativas.	As palavras-chave foram escolhidas por meio de strings de pesquisa. A revisão focou apenas em artigos de revistas em inglês.
Suchek et al. (Suchek et al. 2021)	SLR/Bibliô	WoS	2016–2020	83	CE	Modelos de negócio circular	Os autores analisaram tópicos de pesquisa entre inovação e CE. Identificou fatores que afetam o processo de transição.	Este estudo usou apenas artigos escritos em inglês sobre Negócios, Gestão e Economia.
Arsova et al. (Arsova et al.)	SLR	WoS/Scopus	1999–2021	82	CE	Contexto regional	O estudo analisou o entendimento do conceito	Os autores utilizaram strings subjetivas, filtros e critérios de

2022)							de CE e identificou lacunas na pesquisa.	inclusão/exclusão na pesquisa. O processo de triagem e manuseio de dados foi manual.
Gil and Martínez (Gil Lamata & Latorre Martínez 2022)	SLR	WoS	2000–2019	89	CE	Sustentabilidade	O estudo analisou conceitos de CE e sustentabilidade em profundidade. Os autores apresentaram uma agenda de pesquisa futura.	A produziu resultados subjetivos. Este estudo excluiu revistas SCI (Science Citation Index). Apenas uma base de dados foi analisada.
Papadopoulou et al. (Papadopoulou et al. 2022)	SLR	Scopus/AgEcon	2013–2022	68	BE	Estratégias	Este estudo mostrou a evolução dos tópicos de BE (Bioeconomia) e revelou que vários países ainda não adotaram estratégias de BE	Este estudo não analisou publicações sobre estratégias de BE. A literatura cinzenta e estudos não escritos em inglês não estão incluídos.
Salvador et al. (Salvador et al. 2022)	SLR/Interview	WoS/Scopus/ScienceDirect	-	114	CE/BE	Empresas	O estudo apresentou barreiras, desafios, impulsionadores e oportunidades para empresas de BE.	Os resultados foram derivados de um processo de busca sistemática utilizando termos específicos e bases de dados direcionadas.