

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
CENTRO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM AGRONEGÓCIOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONEGÓCIOS

ELEN PRESOTTO

**A DIMENSÃO DO VALOR BIOECONÔMICO NO SUBSISTEMA ECONÔMICO:  
APROXIMAÇÃO ENTRE O VALOR BIOFÍSICO E ECONÔMICO POR MEIO DA  
PROPOSIÇÃO DO MODELO DE INSUMO-PRODUTO EMERGÉTICO (MIPEM)**

Porto Alegre (RS), Brasil

Abril de 2022

ELEN PRESOTTO

**A DIMENSÃO DO VALOR BIOECONÔMICO NO SUBSISTEMA ECONÔMICO:  
APROXIMAÇÃO ENTRE O VALOR BIOFÍSICO E ECONÔMICO POR MEIO DA  
PROPOSIÇÃO DO MODELO DE INSUMO-PRODUTO EMERGÉTICO (MIPEM)**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronegócios do Centro de Estudos e Pesquisas em Agronegócios da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Agronegócios.

Orientador: Prof. Dr. Edson Talamini – UFRGS

Porto Alegre (RS), Brasil

Abril de 2022

### CIP - Catalogação na Publicação

Presotto, Elen

A DIMENSÃO DO VALOR BIOECONÔMICO NO SUBSISTEMA  
ECONÔMICO: APROXIMAÇÃO ENTRE O VALOR BIOFÍSICO E  
ECONÔMICO POR MEIO DA PROPOSIÇÃO DO MODELO DE  
INSUMO-PRODUTO EMERGÉTICO (MIPEM) / Elen Presotto. --  
2022.

117 f.

Orientador: Edson Talamini.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, Centro de Estudos e Pesquisas em  
Agronegócios, Programa de Pós-Graduação em  
Agronegócios, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Bioeconomia. 2. Análise Emergética. 3. Valor  
Bioeconômico. 4. Economia Biofísica. 5. Macroeconomia  
Ecológica. I. Talamini, Edson, orient. II. Título.

ELEN PRESOTTO

**A DIMENSÃO DO VALOR BIOECONÔMICO NO SUBSISTEMA ECONÔMICO:  
APROXIMAÇÃO ENTRE O VALOR BIOFÍSICO E ECONÔMICO POR MEIO DA  
PROPOSIÇÃO DO MODELO DE INSUMO-PRODUTO EMERGÉTICO (MIPEM)**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronegócios do Centro de Estudos e Pesquisas em Agronegócios da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Agronegócios.

Data de aprovação: 24/02/2022.

---

Prof. Dr. Edson Talamini – UFRGS (orientador)

---

Profa. Dra. Gabriela Allegretti – INBBIO

---

Prof. Dr. Leonardo Xavier – UFRGS

---

Prof. Dr. Marco Antonio Montoya – UPF

## AGRADECIMENTOS

Ao escrever estes agradecimentos, me vi sem palavras, pois é uma tarefa difícil agradecer, em um pequeno texto, a todas as pessoas que me ajudaram. Eu voltei no tempo... Foram anos de estudo, dedicação e muito esforço para chegar onde cheguei, e hoje me orgulho do que aprendi e evolui, tanto profissional como pessoalmente. Os resultados aqui apresentados só foram possíveis com o apoio, a compreensão, o amparo e a dedicação de muitas pessoas que me rodeiam. Gostaria de estender meus agradecimentos a todas que me ajudaram nesta jornada de estudos, em especial:

- ao meu orientador, prof. dr. Edson Talamini, por ter acreditado no meu potencial e me incentivar a ir além, assim como pela paciência e dedicação que sempre teve comigo, pelos ensinamentos e pelas considerações sempre muito valiosas para mim;
- aos professores da banca, dra. Gabriela Alegretti, prof. dr. Marco Antonio Montoya e prof. dr. Leonardo Xavier, pela disponibilidade e por terem aceitado o convite para a banca de tese. Fiquei muito feliz e honrada com a solicitude que encararam o convite, especialmente os professores Marco Antonio Montoya e Gabriela Alegretti, pelo conhecimento compartilhado desde a banca de projeto de tese;
- à minha família, por compreenderem minha ausência nos momentos que estava estudando, lendo ou construindo esta tese;
- aos(às) amigos(as) queridos(as), pelo carinho, pela amizade e paciência em entender a minha ausência e, algumas vezes, a recusa de convites. Em especial, às minhas amigas e colegas Patricia e Lauana, muito obrigada por estarem perto, mesmo longe fisicamente às vezes, por fazerem meus dias mais leves, por revisarem textos quando precisei e pelos conselhos profissionais, principalmente nestes últimos tempos. Também agradeço à minha amiga Vanessa, por sempre se importar com o andamento da minha pesquisa, por estar sempre perto, pelo incentivo e pela amizade. Ao Felipe, um grande amigo desde o mestrado e que dividiu comigo os últimos detalhes da semana de pré-banca de defesa de tese;
- aos meus colegas da turma de 2018, foi um imenso prazer conhecê-los, levarei todos comigo;

- à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Programa de Pós-Graduação em Agronegócios, pelas oportunidades que me foram dadas, por estudar em uma instituição pública e de qualidade que é excelência em ensino, pesquisa e extensão. À profa. Claudia Barros, do Departamento de Solos da UFRGS, e a todas as demais pessoas que enviei e-mail com dúvidas e me responderam com tanta paciência e solicitude;
- à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), por ter financiado minha pesquisa desde julho de 2019, pois sem esse recurso financeiro não seria possível eu finalizar esta pesquisa;
- ao Centro de Ensino Superior Riograndense (CESURG), pela oportunidade que me foi dada.

A todos, os meus mais sinceros agradecimentos.

*“Há um limite para o que podemos fazer com os números, e também há um  
para o que podemos fazer sem eles”*  
(GEORGESCU-ROEGEN, 2012, p. 37).

## RESUMO

A economia é um subsistema de um sistema maior: a biosfera. Por outro lado, a economia de valor monetário ou o sistema de preços vigentes não considera essa dependência da biosfera e não remunera todos os insumos que realmente são utilizados como fatores de produção. A exemplo disso, os recursos da natureza (valor biofísico), por vezes, são tidos como dados. A falha em não medir a contribuição dos recursos biofísicos ao processo produtivo do subsistema econômico implica em um *gap*, entre o valor monetário e o valor bioeconômico. Ao se admitir a lógica fundamentada nas leis da termodinâmica defendida por Georgescu-Roegen para a análise do subsistema econômico, verifica-se um limite de recursos disponíveis na biosfera que podem ser transformados em matéria e energia. Somado a isso, tem-se a irreversibilidade do processo, que é a perda em função da transformação e dos resíduos, que são parte das saídas e da degradação da energia em forma de entropia. Howard T. Odum aproxima a lógica do valor monetário e do valor biofísico ao propor a Análise Emergética de sistemas, padronizando a mensuração dos recursos econômicos, da natureza e de serviços usados em processos produtivos em uma unidade comum, o Joule de energia solar equivalente (seJ). Essa situação é ainda mais complexa em nível macroeconômico e torna-se um aspecto importante a ser orientado por políticas públicas que buscam o desenvolvimento sustentável de uma nação. Nesse sentido, o objetivo desta tese é propor o Modelo de Insumo-Produto Emergético (MIPEm) como método de avaliação do valor bioeconômico e sua apropriação entre os setores ou subsistemas da economia brasileira. Centra-se, sobretudo, na discussão do distanciamento (*gap*) entre o valor biofísico e monetário, propondo o conceito de valor bioeconômico como forma de aproximação entre o sistema econômico e o sistema biofísico. Metodologicamente, a ideia do MIPEm foi construída a partir de uma crítica à teoria neoclássica embasada nas leis da termodinâmica e no conceito teórico de valor bioeconômico. A construção da Matriz Insumo-Produto Emergética possibilitou a análise aplicada do MIPEm e sua validação para a economia brasileira. Os resultados encontrados permitem estabelecer o grau de intensidade da PEm e sua participação, os índices de encadeamento, a decomposição pelo uso da energia total (direta ou indireta) e a balança comercial. Em suma, verificou-se a existência de um *gap*, corroborado pelos resultados encontrados pelo MIPEm de grau de intensidade de apropriação do valor bioeconômico por unidade de demanda final.

**Palavras-chave:** Bioeconomia. Análise Emergética. Valor Bioeconômico. Economia Biofísica. Macroeconomia Ecológica.



## ABSTRACT

The economy is a subsystem of a larger system: the biosphere. On the other hand, the monetary value economy or the prevailing price system does not consider this dependence on the biosphere and does not remunerate all the inputs that are actually used as factors of production. For example, nature's resources (biophysical value) are sometimes taken for granted. The failure to measure the contribution of biophysical resources to the production process of the economic subsystem implies a gap between monetary value and bioeconomic value. By admitting the logic based on the laws of thermodynamics advocated by Georgescu-Roegen to analyze the economic subsystem, there are limited resources in the biosphere that can be transformed into matter and energy. Added to this is the irreversibility of the process, implying in the losses due to the transformation and the waste as part of the outputs and the energy degraded in the form of entropy. Howard T. Odum approaches the logic of monetary value and biophysical value by proposing the Energy Analysis of systems, standardizing the measurement of economic resources, nature and services used in productive processes in a common unit, the Joule of equivalent solar energy (seJ). This situation is even more complex at the macroeconomic level and becomes an important fact to be guided by public policies that seek the sustainable development of a nation. In this sense, the objective of this thesis is to propose the Energy Input-Output Model (EmIOM) as a method to evaluate the bioeconomic value and its appropriation among the sectors or subsystems of the Brazilian economy. Above all, it focuses on the discussion of the gap between biophysical and monetary values, proposing the concept of bioeconomic value as a way to bring the economic system and the biophysical system closer together. Methodologically, the idea of the EmIOM was built by criticizing the neoclassical theory faced with the inexorability of the laws of thermodynamics and the theoretical concept of bioeconomic value. The construction of the Energy Input-Output Matrix allowed EmIOM be applied and its results validated for the Brazilian economy. The findings allow establish the degree of intensity of the EmF and its participation, chaining indexes, the decomposition by the use of total energy (direct or indirect) and the trade balance. In summary, it was verified the existence of a gap corroborated by the degree of intensity that bioeconomic value is appropriated per unit of final demand obtained from the EmIOM.

**Keywords:** Bioeconomics. Energy Analysis. Bioeconomic Value. Biophysical Economics. Ecological Macroeconomics.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA .....	13
1.2 SÍNTESE METODOLÓGICA E ESTRUTURAL DA TESE .....	16
<b>2 A SUSTENTABILIDADE DO SUBSISTEMA ECONÔMICO: O GAP ENTRE O VALOR BIOFÍSICO E O VALOR MONETÁRIO</b> .....	<b>18</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	19
2.2 CRÍTICA À ABORDAGEM DA ECONOMIA NEOCLÁSSICA A PARTIR DAS LEIS DA TERMODINÂMICA .....	21
<b>2.2.1 Uma nova ideia de valor no subsistema econômico: “o valor bioeconômico”</b> .....	<b>24</b>
2.3 ABORDAGENS SOBRE O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: UMA APROXIMAÇÃO COM O VALOR BIOECONÔMICO .....	28
2.4 A EXPRESSÃO DO VALOR BIOECONÔMICO NA ECONOMIA: PROPOSIÇÃO DO MIPEM .....	32
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	36
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>37</b>
<b>3 INCORPORANDO O VALOR BIOECONÔMICO: DESEMPENHO DOS SUBSISTEMAS DA MATRIZ INSUMO-PRODUTO EMERGÉTICA</b> .....	<b>43</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	43
3.2 METODOLOGIA .....	46
<b>3.2.1 Dados utilizados para a construção da Matriz Emergética Nacional ...</b>	<b>47</b>
<b>3.2.2 Aplicação da análise emergética para a construção do vetor de energia e indicadores setoriais</b> .....	<b>49</b>
3.3 FORMALIZAÇÃO DOS INDICADORES EMERGÉTICOS SETORIAIS .....	50
3.4 RESULTADOS .....	55
3.5 DISCUSSÕES .....	60
3.6 CONCLUSÕES .....	61
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>62</b>
<b>APÊNDICE I – Estrutura que define a compatibilização de setores entre os dados da WIOD e MIP2010</b> .....	<b>69</b>
<b>APÊNDICE II – Detalhes dos cálculos na construção da análise emergética de fluxos anual para o Brasil</b> .....	<b>73</b>

<b>4 A DINÂMICA DO VALOR BIOECONÔMICO A PARTIR DO MODELO DE INSUMO-PRODUTO EMERGÉTICO .....</b>	<b>77</b>
4.1 INTRODUÇÃO .....	77
4.2 O MODELO DE INSUMO-PRODUTO E SUAS EXTENSÕES.....	80
4.2.1 As extensões do Modelo de Insumo-Produto em unidades físicas .....	82
4.2.2 O Modelo de Insumo-Produto Emergético (MIPEm) .....	83
4.2.3 Pegada Emergética no MIPEm .....	87
4.2.4 Índices de encadeamento .....	88
4.2.5 Fonte de dados da construção da Matriz Insumo-Produto Emergética .....	89
4.3 RESULTADOS.....	90
4.3.1 Índices de encadeamento .....	93
4.4 DISCUSSÕES.....	96
4.4.1 A sustentabilidade e a Pegada Emergética .....	96
4.4.2 Os avanços e as potencialidades metodológicas.....	97
4.5 CONCLUSÕES .....	99
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>100</b>
<b>APÊNDICE I – Decomposição do consumo de energia total setorial, Brasil, em (seJ/R\$) e % para o ano 2009 .....</b>	<b>105</b>
<b>APÊNDICE II – Composição pegada emergética setorial (S), Brasil, em (seJ/R\$) e % para o ano 2009 .....</b>	<b>107</b>
<b>APÊNDICE III – Balança comercial de energia virtual, Brasil, em (seJ/R\$) e % para o ano de 2009 .....</b>	<b>109</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>111</b>
5.1 LIMITAÇÕES DO ESTUDO .....	113
5.2 SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS .....	113
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>115</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A desproporcionalidade observada entre os preços nominais e as energias incorporadas médias não é explicada pela teoria econômica convencional (LEIVA, 2019). Nas análises puramente monetárias, passa despercebida parte dos insumos utilizados na produção, como os da natureza, que por vezes são tidos como dados. Ou seja, o valor monetário dos bens ou o preço de mercado nem sempre reflete o valor bioeconômico. Em resumo, o valor bioeconômico pode ser interpretado como a incorporação do valor biofísico ao valor monetário no processo produtivo de bens e serviços. É fundamentado nas leis da termodinâmica e na existência de um desacoplamento, no sentido de que não há correlação exata entre o preço do bem (\$) – valor monetário) no mercado e todo o valor bioeconômico utilizado no processo produtivo.

A exemplo disso, o Brasil tem em seus setores produtivos classificados como primários (o agronegócio, por exemplo) uma importância significativa na produção e exportação de alimentos (FAO, 2019), de modo que alguns insumos – como a radiação solar, a precipitação pluviométrica, a perda de solo e outros fatores que impactam a produção do setor – estão sendo reconhecidos parcialmente pelo fluxo, exclusivamente monetário, da formação dos preços dos bens pela ótica do mercado. Em resumo, parte do valor biofísico não é mensurado pelo sistema monetário.

Com isso, a preocupação com a escassez de recursos torna-se uma questão global que afeta o fornecimento de bens e serviços e a segurança alimentar. Mesmo com a ajuda da tecnologia, as leis da termodinâmica sugerem que há um “pico”, um ponto máximo marcado pela quantidade de recursos disponíveis e capacidade de carga do ecossistema. Desse modo, o uso de insumos no processo econômico sem um espaço para a ciclagem dos nutrientes implica a redução do estoque global de recursos biofísicos (BRADFORD *et al.*, 2019; MAYUMI, 2022).

Somado a isso, o processo de produção é entrópico e irreversível (ARTUZO *et al.*, 2021; GEORGESCU-ROEGEN, 2012), há uma perda de energia na geração de trabalho, embasada no conceito de entropia (GEORGESCU-ROEGEN, 1971). Ou seja, por mais eficientes que sejam as práticas utilizadas de produção, se contradiz o *mainstream* da economia neoclássica, de fluxo contínuo de recursos, por exemplo. Cabe ainda salientar a complexidade da realidade nas disparidades de acesso a necessidades básicas do ser humano entre os diferentes países do mundo, onde

políticas públicas de mitigação de degradação ambiental devem ser bem planejadas, pois podem afetar a redução de bem-estar, principalmente em populações mais pobres (HASEGAWA *et al.*, 2018; MOZ-CHRISTOFOLETTI; PEREDA, 2021).

Nesse mesmo sentido, Odum (1996) considera que as funções do ecossistema não são cumpridas caso o impacto da economia humana exceda a reposição dos ecossistemas e defende que é necessário respeitar o limite dessa proporção, ao passo que se possa chegar a um equilíbrio no ecossistema. Ao se admitir que o processo econômico é transformador de recursos e faz parte de um sistema maior, a biosfera, e sabendo que os recursos disponíveis pelo ecossistema são finitos, faz-se necessário o uso eficiente desses recursos naturais disponíveis, para prolongar o seu uso no tempo.

Algumas estratégias já são estudadas, como o *Energy Return on Investment* (EROI), definido como o mínimo a ser permitido para a sustentabilidade da sociedade (HALL; BALOGH; MURPHY, 2009), ou para o alcance da ecoeficiência, e visto como uma solução para aumentar a sustentabilidade, via desmaterialização do processo econômico com a redução da dependência energética (VEIGA, 2010). Há avanços também no campo da macroeconomia ecológica<sup>1</sup>, base deste estudo. Por um lado, estudos defendem que a demanda (keynesiana) tem papel central, razão pela qual se preocupam com fatores que possam gerar a falta dela e, com isso, o desemprego involuntário; por outro, há economistas ecológicos que focam nos efeitos negativos do processo de crescimento econômico sobre os sistemas biofísicos.

Esta tese defende como estratégia de orientação de políticas públicas o conceito de *systemic decoupling*, que se sustenta na ideia de que o processo econômico é um subsistema da biosfera, e por isso as leis da termodinâmica são base do conceito de valor bioeconômico, que deve orientar formuladores de políticas públicas para o desenvolvimento sustentável. Com esse escopo, a problemática na qual este estudo está embasado será apresentada a seguir e dedica-se a analisar o processo econômico não somente em sua lógica monetária, uma vez que pretende mensurar e estender a análise tradicional dos processos econômicos baseados puramente no valor monetário, incorporando o valor biofísico via valor bioeconômico.

---

<sup>1</sup> É uma discussão emergente e surge da relação do sistema econômico com o ecológico, somada à perspectiva da impossibilidade de crescimento infinito da economia, o que invalida um pressuposto importante da macroeconomia convencional: a possibilidade de manter um crescimento econômico indefinido (SAES, 2013).

## 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

O problema a ser examinado pela presente tese está na existência de um “*gap*”, desconsiderado pelo *mainstream* da ciência econômica, entre o valor de produção monetário – mensurado em unidades monetárias – e o valor biofísico – mensurado em unidades de energia – envolvidos na produção de bens. Essa afirmação se vale da observação de que o gasto de insumos com a produção de bens, na economia tradicional, é expresso em valores monetários, ou seja, só são contabilizados os recursos que geram gastos (custos de produção). Todavia, a lógica proposta por este estudo é embasada nas leis da termodinâmica, busca mensurar o valor bioeconômico, que é expresso em unidade física, e considera o uso de recursos da natureza, da economia e dos serviços para a produção de bens. Isso porque, por vezes, na economia tradicional o recurso natural é subestimado ou não considerado, ou seja, se está incorporando o valor biofísico ao valor monetário, com a análise em uma única unidade, o Joule de energia solar equivalente (seJ), via contabilidade emergética.

O sistema monetário remunera as pessoas pelo trabalho humano prestado ou pelo investimento de capital na aquisição de um bem, mas não pelo trabalho do ecossistema ou recurso natural utilizado como insumo que contribui para a produção de bens (CAMPBELL, 1998). Os sistemas ecológicos que os produzem são como investimentos de capital e estão sujeitos à exaustão, caso não sejam tomadas as providências para a substituição ou reabilitação deles (CAMPBELL, 1998).

Essa questão é mais complexa, pois o Brasil exerce uma participação significativa no comércio mundial de *commodities* (FAO, 2019), em especial os setores que envolvem as atividades agrícolas, que são grandes provedores de energia ao mesmo tempo em que são consumidores. Há de se salientar ainda as características biofísicas bastante ricas, como a relativa abundância de água e terras, por exemplo, mas que possuem certas diferenças para cada região do país. Por possuir grandes extensões de terras, há diferentes tipos de clima que influenciam na precipitação e temperatura (ALVARES *et al.*, 2013; FERREIRA; MELLO, 2005), tipos de solo e manejos de solo (MERTEN; MINELLA, 2013), por exemplo. O desafio, portanto, está em incorporar, minimamente, na análise de uso de recursos tradicionais, todos os insumos utilizados na produção de bens e serviços.

A proposta é mensurar a produção de bens e serviços a partir do uso de recursos biofísicos, econômicos e serviços que são fontes de matéria e energia para

o processo econômico, bem como aproximar a abordagem tradicional de uma visão sistêmica que inclua, minimamente, a lógica da sustentabilidade no processo econômico subsidiada, metodologicamente, pela Análise Emergética e pelo Modelo de Insumo-Produto Ecológico.

Na literatura, foram encontradas algumas pesquisas que mensuram a utilização de recursos naturais pelo processo econômico, com diferentes temáticas e evoluções metodológicas, com destaque para Du, Wang e Li (2022), Montoya (2020), Montoya *et al.* (2021), Overbury (1973), Pang *et al.* (2019) e Sun e An (2018). Entre os estudos encontrados, há preocupação crescente com a robustez metodológica em mensurar indicadores de sustentabilidade nacionais. Por ser uma temática complexa, utiliza-se a possibilidade da combinação de duas metodologias ou abordagens conjuntamente, como um diferencial (ALIZADEH; AVAMI, 2021; GUILHOTO, 2021; LOISEAU *et al.*, 2012).

Há estudos que aplicam análises conjuntamente para a economia da China e vêm empregando esforços em mensurar o desempenho econômico e ecológico, combinando a Análise Emergética pelas emissões de carbono com a clássica análise de Insumo-Produto para a China nos anos de 2005 (CHEN; CHEN, 2010) e 2007 (CHEN, Z. *et al.*, 2010).

Ainda foram encontrados estudos que utilizam Análise Emergética e de Insumo-Produto para mensurar a sustentabilidade setorial chinesa (SUN; AN, 2018) e a relação entre as atividades econômicas e a degradação do ecossistema (PANG *et al.*, 2019). Alguns estudos empregam o Modelo de Insumo-Produto e a pegada hídrica para analisar os requerimentos de água virtual e a mudança tecnológica no tempo (MONTTOYA; TALAMINI, 2021); e outros o Modelo de Insumo-Produto Ecológico e as emissões para mensurar a influência do uso de recursos renováveis e não renováveis nas mudanças climáticas (MONTTOYA *et al.*, 2021). No entanto, o que se percebe é que cada estudo citado centra-se em agregar uma parte do valor biofísico, como uso da água, uso de energia de combustíveis, emissões e degradação do ecossistema, mas nenhum dos estudos tenta evoluir na questão de agregar ao valor monetário o total de recursos utilizados da natureza, assim com as externalidades do processo produtivo.

Até onde se sabe, ainda não se encontrou até o momento uma análise voltada para o Brasil que mensure o valor bioeconômico das atividades produtivas, ficando essa lacuna teórica e empírica como a proposição de estudo deste trabalho. Diante

desse contexto, este estudo busca responder às seguintes questões: a proposição do Modelo de Insumo-Produto Emergético é capaz de mensurar o valor bioeconômico incorporado às atividades econômicas nacionais? Se sim, quais são os setores econômicos que mais se apropriam do valor bioeconômico?

Destaca-se como objetivo geral propor o Modelo de Insumo-Produto Emergético como método de avaliação do valor bioeconômico e da sua apropriação entre os setores da economia brasileira. Os objetivos específicos são:

- I. definir o conceito de valor bioeconômico a partir da crítica à teoria neoclássica, com base no paradigma do valor biofísico sustentado pelas leis da termodinâmica;
- II. construir a Matriz Insumo-Produto Emergética brasileira e identificar a sustentabilidade emergética das atividades produtivas setoriais a partir do uso do valor bioeconômico;
- III. construir e testar o Modelo de Insumo-Produto Emergético e avaliar a Pegada Emergética setorial com base no valor bioeconômico.

As contribuições desta pesquisa estão estruturadas em dois pilares: a relevância e o ineditismo de se estudar o processo de produção pela ótica do valor bioeconômico. A relevância do estudo se justifica pela intensificação de uso de recursos da natureza, desde a Revolução Industrial, sem respeitar a capacidade de carga da biosfera. Com esse enfoque, a sustentabilidade dos recursos assola agentes e formuladores de políticas públicas e traz à tona diversas discussões relacionadas aos atuais padrões de desenvolvimento e crescimento econômico dos países, de uso de recursos naturais, qualidade de vida, em que, sem o período necessário para a manutenção do estoque de recursos naturais, estes diminuem, resultando em degradação da natureza.

O ineditismo do estudo é em função de não terem sido encontrados trabalhos anteriores que busquem esta aproximação de análise do processo econômico nacional e da utilização do valor biofísico, que é testada a partir da aplicação do Modelo de Insumo-Produto Emergético e dos Índices Emergéticos para os diferentes setores produtivos do Brasil. Somado a isso, foi agregada a análise das externalidades (perda de solo e emissões) por compensação no nível macroeconômico. Isso porque a macroeconomia ecológica é uma proposta emergente dentro da literatura, com avanços em alguns aspectos, como descrito por Saes (2013) e Saes e Romeiro (2019).



Por fim, o Brasil é um *player* na produção de *commodities* em um mercado globalizado. Assim, para se garantir qualidade de vida sustentável tanto para a geração atual como para as futuras, é fundamental estudar o impacto do uso de recursos naturais, econômicos e humanos pelas atividades desempenhadas na economia nacional.

## 1.2 SÍNTESE METODOLÓGICA E ESTRUTURAL DA TESE

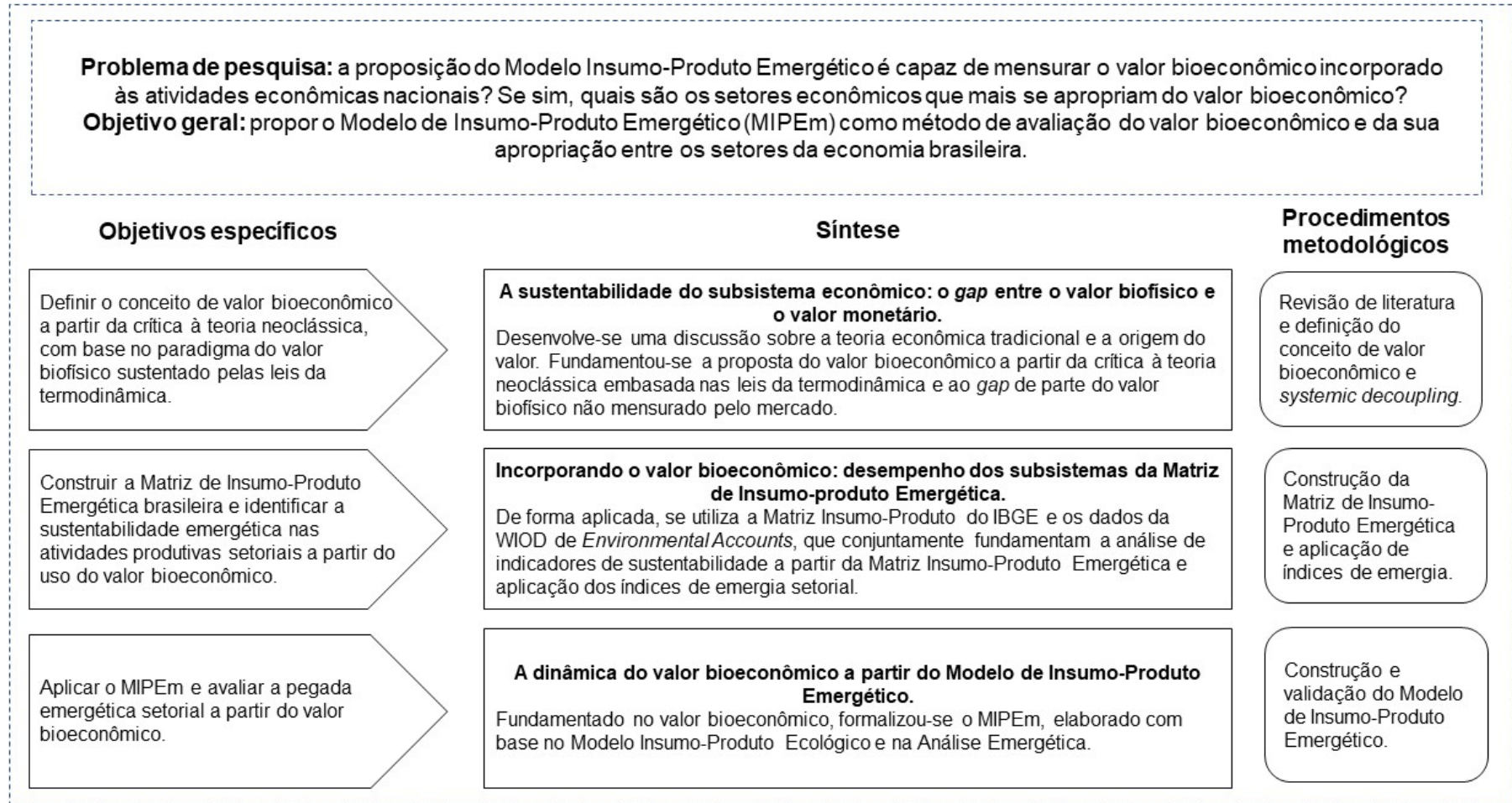
Com a problemática apresentada e os objetivos delineados, este trabalho busca atendê-los com uma proposta a ser desenvolvida por meio de três artigos completos. Na tentativa de traçar indicadores de sustentabilidade emergética dos setores analisados, mensurou-se o uso dos recursos naturais pelos setores da economia abordando a relação entre valor monetário e valor biofísico de cada atividade produtiva. Tais indicadores visam fornecer subsídios para tomadores de decisão e para formuladores de políticas públicas voltados a um desenvolvimento sustentável.

Esta tese, descrita em sua essência na Figura 1, a seguir, está dividida em cinco capítulos. O Capítulo I apresenta a introdução deste estudo, destaca o problema de pesquisa que originou a proposta de trabalho e traz as principais temáticas a serem discutidas. O artigo apresentado no Capítulo II formaliza uma revisão de literatura com uma crítica à economia neoclássica e sua ideia de valor a partir do paradigma do valor biofísico, além de fundamentar teoricamente a tese e sustentar a discussão e análise dos resultados.

No artigo que compõe o Capítulo III, apresenta-se a proposta de análise sobre os impactos das variações do uso de recursos renováveis e não renováveis a partir da aplicação da Análise Emergética, via construção da Matriz Insumo-Produto Emergética. Com base na análise dos indicadores emergéticos, busca-se mensurar a sustentabilidade da produção setorial a partir da incorporação da totalidade dos insumos utilizados.

Na sequência, o artigo apresentado no Capítulo IV fundamenta teórica e empiricamente a construção do Modelo de Insumo-Produto Emergético. Por fim, o Capítulo V desenvolve as considerações finais, frente aos resultados encontrados nos Capítulos II, III e IV, na busca de esclarecer a pergunta-problema e o objetivo geral deste estudo.

**Figura 1 – Síntese da estrutura desenvolvida na presente tese**



Fonte: A autora (2022).

## 2 A SUSTENTABILIDADE DO SUBSISTEMA ECONÔMICO: O GAP ENTRE O VALOR BIOFÍSICO E O VALOR MONETÁRIO<sup>2</sup>

**Resumo:** O subsistema econômico se utiliza de recursos de capital, natural e humano, por vezes desconsiderando a irreversibilidade do processamento de energia e o lucro das atividades econômicas a partir do uso desses recursos da biosfera, que são finitos. O objetivo deste estudo é identificar o paradigma do valor biofísico a partir da crítica à teoria neoclássica embasada nas leis termodinâmicas e propor uma nova ótica de análise a partir do valor bioeconômico. Trata-se, então, não somente de uma comparação teórico-descritiva dos pensamentos dos autores, mas também apresentar as ideias alternativas à teoria neoclássica no que tange à contribuição dos recursos naturais ao subsistema econômico. Propõe-se também uma análise a partir do valor bioeconômico, que avalia a sustentabilidade das atividades econômicas setoriais. A proposta em questão se desenvolve como alternativa para fornecer uma direção, avaliação e desempenho de políticas públicas, com a intensificação de ações coordenadas em setores estratégicos para o alcance do desenvolvimento sustentável. A relação apresentada neste estudo expressa uma tentativa de aproximação entre as visões da valoração de bens puramente monetária e o valor biofísico.

**Palavras-chave:** Bioeconomia. Emergia Macroeconômica. Economia Biofísica.

**Abstract:** The economic subsystem uses capital, natural and human resources, sometimes disregarding the irreversibility of energy processing and that economic activities profit from the use of these finite biosphere resources. The objective of this study is to identify the biophysical value paradigm from the critique of the neoclassical theory based on thermodynamic laws and to propose a new perspective of analysis based on bioeconomic value. Then, it is not only a theoretical and descriptive comparison of the authors' thoughts, but also to present alternative ideas to the neoclassical theory regarding the contribution of natural resources to the economic subsystem. We also propose an analysis based on the bioeconomic value, which assesses the sustainability of sectoral economic activities. The proposal in question is developed as an alternative to provide a direction, evaluation and performance of public policies, with the intensification of coordinated actions in strategic sectors to achieve sustainable development. The relationship presented in this study expresses an attempt to bring together the purely monetary views of asset valuation and the biophysical value.

**Keywords:** Bioeconomics. Macroeconomic Emergy. Biophysical Economics.

---

<sup>2</sup> Uma versão deste capítulo foi publicada no livro *Políticas públicas no Brasil: ferramentas essenciais ao desenvolvimento*, com o título "A proposição do Modelo de Insumo-Produto Emergético como ferramenta de planejamento de políticas públicas sustentáveis" (PRESOTTO; TALAMINI, 2022), e outra no XIV Encontro da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica, com o título "A sustentabilidade do subsistema econômico e a aproximação com o valor biofísico" (PRESOTTO; TALAMINI, 2021).

## 2.1 INTRODUÇÃO

Na teoria econômica, desde a fisiocracia, há uma preocupação frente à origem do valor e da riqueza, para eles a origem do valor está na terra (HUNT; LAUTZENHEISER, 2013). De encontro a isso, o pensamento da economia neoclássica deixa claro que o sistema econômico deriva da interação entre os agentes (consumidores, firmas e governo). O comportamento desses agentes no mercado, de escolher o melhor para si mesmo (princípio da otimização) a partir do valor da utilidade, conduz a um equilíbrio de mercado, ou seja, na formação do preço dos bens, um preço em equilíbrio é determinado pelo ponto em que a oferta e a demanda se igualam (VARIAN, 2014).

Ao contrário do que defende a teoria econômica tradicional, pioneiros como Georgescu-Roegen (1971), Daly (1968) e Odum (1996) desdobraram as leis da termodinâmica para compreender a lógica biofísica da economia (MELGAR-MELGAR; HALL, 2020). Dentro das abordagens encontradas, se percebe uma indefinição sobre se considerar ou não o valor biofísico<sup>3</sup> nas análises, como na teoria econômica neoclássica, na economia ambiental<sup>4</sup>, na economia ecológica<sup>5</sup> e na emergente Macroeconomia Ecológica.<sup>6</sup>

À medida que os fundamentos da microeconomia estruturam a análise de valor, para a solução básica de formação de preços, a análise marginal neoclássica se embasa na lógica de que a escala ótima é definida como o ponto em que os benefícios marginais do crescimento adicional são iguais aos custos marginais da redução da função do ecossistema que esse crescimento impõe (SPASH, 2020). A macroeconomia representa esse comportamento agregado, como, por exemplo, da renda, crescimento econômico e nível geral de preços (BRESSER-PEREIRA, 1976).

---

<sup>3</sup> Considera as leis da termodinâmica, ou seja, se refere ao valor de matéria e energia contidas em cada bem.

<sup>4</sup> Os primeiros modelos neoclássicos da chamada economia ambiental surgiram na década de 1960. Os estudos dividiram-se entre a teoria da poluição e a teoria dos recursos naturais. A primeira é baseada na teoria do bem-estar e dos bens públicos de Pigou (1932), que aponta a necessidade de internalização dos custos sociais da poluição visando alcançar um nível ótimo de poluição. Ao contrário disso, a segunda é influenciada pela análise de Hotelling (1931) e foca na necessidade de solucionar a questão da alocação intertemporal da extração dos recursos naturais (MUELLER, 1998; SAES, 2013).

<sup>5</sup> Seus autores fundadores, como Georgescu-Roegen (1971), Odum (1996) e Daly (1968), defendem análises embasadas nas leis da termodinâmica para o estudo de sistemas naturais e sociais (MELGAR-MELGAR; HALL, 2020), um campo transdisciplinar (BARKIN; CARRASCO, 2012). Voltada para uma sustentabilidade mais rígida do processo econômico, acredita, por exemplo, que não existe crescimento sustentável em função da finitude dos recursos (DALY, 2004).

<sup>6</sup> Busca-se aproximar a visão da análise na economia ecológica e as perspectivas da macroeconomia.

Assim, na macroeconomia tradicional define-se o fluxo circular da renda como fechado, com movimentos infinitos, ou seja, desconsidera-se que a economia é um subsistema da biosfera e necessita também de capital natural para sustentar esse fluxo. Nessas abordagens se retrata o processo econômico como circular nas relações de produção e consumo, dentro do qual o papel dos processos ecológicos simplesmente são desconsiderados (GIAMPIETRO, 2019).

O problema fica ainda mais complexo pelo fato de a preocupação com a sustentabilidade estar embasada na lógica de valor monetário. À medida que se admite que a renda nacional pode continuar a crescer mesmo que alguns insumos sejam exauríveis, o crescimento passa a ser danoso às gerações futuras quando fica comprometida a qualidade de vida, semelhante à geração atual (CECHIN, 2010). Assim, entende-se que as instituições políticas podem afetar a extensão dos danos ambientais, à medida que direcionam políticas ambientais e de desenvolvimento econômico mais rígidas contra a degradação ambiental, por exemplo (CONGLETON, 1992). Com isso, percebe-se a relação direta entre a influência de políticas públicas e a mitigação de impactos da degradação ambiental.

Dessa forma, a problemática deste estudo reside no pressuposto fundamental de que tudo que entra no processo econômico tem um valor, mesmo que o sistema econômico não estabeleça um preço a todos os insumos, ou seja, há um *gap*, visto que, à medida que matéria e energia entram no processo produtivo e são processadas, a baixa entropia diminui e o valor monetário aumenta. De tal modo, o valor monetário menospreza parte do valor biofísico. Entretanto, o valor monetário, que é o valor final de um bem, tem na sua essência a dependência de insumos da natureza de baixa entropia.<sup>7</sup>

A partir do que foi construído até aqui, o que se percebe é que as análises que priorizam o valor monetário captam a lógica dos recursos naturais, energia e resíduos através das lentes dos fluxos monetários, ou seja, através dos gastos incorridos no processo produtivo. Ao contrário disso, os modelos que consideram o valor biofísico incluem ainda os fluxos físicos de recursos naturais, energia e resíduos gerados pela economia (SHERWOOD; CARBAJALES-DALE; HANEY, 2020).

---

<sup>7</sup> O ser humano se alimenta e sobrevive da transformação de recursos de baixa entropia (forma como os recursos são encontrados na natureza) em alta entropia (produção de bens e serviços). Em termos de entropia, as atividades do ser humano produzem um déficit ao sistema total, pois o custo é maior do que o produto. Isso pode ser aplicado a qualquer empreendimento biológico ou econômico (GEORGESCU-ROEGEN, 2012).

A partir disso, o objetivo deste estudo é propor um novo olhar sobre a discussão do desenvolvimento sustentável e suporte na aplicação de políticas públicas através de uma análise sistêmica macroeconômica, adentrando o paradigma dessa temática com a introdução da crítica do valor monetário puro a partir das leis da física embasada na ideia de valor bioeconômico.<sup>8</sup> Enfatiza-se a necessidade de valoração de todos os recursos utilizados pelo subsistema econômico, sejam eles recursos de capital natural, humano ou monetário. Dessarte, a principal contribuição deste estudo é a lógica emergética, que inclui o valor biofísico à análise do processo econômico e permite entender a valoração do processamento de bens pela relação com a baixa entropia: quanto maior for o uso de recursos no processo econômico, maior será o valor emergético e biofísico.

Com o intuito de propor uma nova perspectiva para a discussão já estabelecida na literatura, o artigo está estruturado em quatro seções, incluindo esta introdução. A seção seguinte destaca as principais diferenças e os avanços da literatura com relação às críticas à teoria econômica neoclássica. Posteriormente, são apresentadas as diferentes definições da teoria econômica para o desenvolvimento sustentável. A quarta e última seção formula a proposta teórica do Modelo de Insumo-Produto Emergético, que está estruturado em uma composição entre a Análise Emergética<sup>9</sup> e a Matriz Insumo-Produto.<sup>10</sup>

## 2.2 CRÍTICA À ABORDAGEM DA ECONOMIA NEOCLÁSSICA A PARTIR DAS LEIS DA TERMODINÂMICA

A partir dos anos de 1960, Georgescu-Roegen insere suas ideias no debate econômico e o aproxima da análise da física. Ele e Herman Daly são conhecidos como fundadores da ideia de biofísica na teoria econômica a partir da economia ecológica (SHERWOOD; CARBAJALES-DALE; HANEY, 2020). A perspectiva apresentada define uma quebra de paradigma, e começam a ficar mais evidentes as críticas aos

---

<sup>8</sup> Em resumo, é a composição entre o valor biofísico e o valor monetário.

<sup>9</sup> A metodologia emergética permite calcular índices e comparar as contribuições da natureza e da economia na composição do produto e medir a sustentabilidade, o impacto ambiental e a capacidade de carga do ecossistema, por exemplo (ORTEGA, 2003).

<sup>10</sup> Seus resultados proporcionam uma visão detalhada da estrutura produtiva brasileira e permitem avaliar o grau de interligação setorial da economia e também os impactos de variações na demanda final dos produtos, mediante a identificação dos diversos fluxos de produção de bens e serviços (IBGE, 2020).

pressupostos neoclássicos, voltadas ao mecanicismo do processo econômico por desconsiderar a participação da natureza (CECHIN; VEIGA, 2010). O autor ainda reforçou sua crença de que os processos históricos são únicos e impossíveis de serem descritos precisamente por uma fórmula matemática (CECHIN; VEIGA, 2010; GOWDY; MESNER, 1998).

Dentro da economia ecológica, as ideias de Georgescu-Roegen são rígidas, principalmente, nas descrições matemáticas, que devem sobressair às relações de preço de mercado e adentrar a realidade, por ele definida como um universo físico e social em que o sistema econômico está embutido (GOWDY; MESNER, 1998), ou seja, a economia é um subsistema de um todo maior (ANDRADE, 2018). Com isso a economia ambiental, a qual evoluiu da teoria neoclássica, passa a sofrer críticas, por exemplo, na falta de respostas para a medida do valor da utilidade e na incapacidade de fornecer um indicador de satisfação individual.

A teoria neoclássica pressupõe que os consumidores maximizam sua utilidade em suas escolhas, eles estariam o mais felizes possível com suas cestas de bens, e o valor de um bem estaria estabelecido na sua utilidade. Porém, o problema está sobre a utilidade individual perante o outro, a utilidade de cada indivíduo não tem diferença (VARIAN, 2014). Outra dificuldade é que a função de utilidade não leva em consideração a utilização de recursos da natureza, embora os recursos renováveis ou não renováveis forneçam uma utilidade indireta via consumo final de bens (NEUMAYER, 2013).

Na teoria da firma, definem-se alguns conceitos fundamentais, entre eles, a função de produção. Ela determina a maior quantidade de produto que pode ser obtida a partir de uma determinada quantidade de insumos e possui fatores de produção, como mão de obra e capital (VARIAN, 2015). Todavia, a função de produção neoclássica desconsidera que é a energia que faz o trabalho de produzir riqueza, independente se essa energia é derivada da terra, do trabalho ou dos combustíveis fósseis auxiliados pelo capital (HALL; KLITGAARD, 2006). Do mesmo modo, os recursos da natureza utilizados em todos os processos de produção de bens são subvalorados e o capital natural é desconsiderado como um fator de produção (DALY, 2017).<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup> A função de produção tradicional da economia neoclássica é dada por:  $Y = f(K, L)$ , em que  $Y$  é produto,  $K$  é capital e  $L$  é trabalho. A função quase sempre é multiplicativa, como no usual Cobb-Douglas.

Na sua forma tradicional, a função de produção não considera o fator intertemporal, ou seja, se ignoram os diferentes intervalos de tempo de que se utilizavam os fatores de produção. A partir dessa necessidade, é fundamental distinguir, na função de produção, o que são os fundos e os fluxos. Os fundos são os fatores de produção tradicionais da economia, que se mantêm em um curto espaço de tempo, são a estrutura do processo. Já os fluxos são a matéria e energia (fluxos de entrada) que vêm da natureza (insumos da natureza) ou de outro processo produtivo e se transformam através do processo produtivo em bens finais, resíduos e poluição (fluxos de saída) (CECHIN, 2010; GEORGESCU-ROEGEN, 1971).

Ao contrário disso, a proposição de análise econômica pelas leis da termodinâmica<sup>12</sup> vai de encontro ao *mainstream* da economia. Em resumo, a primeira lei da termodinâmica define que a energia do universo é constante, isso implica que a matéria e energia não são criadas ou destruídas, são apenas transformadas e se apresentam em forma de trabalho ou calor. A segunda lei define que, apesar de a energia permanecer constante, ao ser transformada, sua qualidade é alterada e uma parte dessa energia acaba por não gerar mais trabalho, ou seja, é dissipada, o que leva à formação de entropia (NIELSEN *et al.*, 2020)

A partir disso, percebe-se que os fundadores da economia ecológica se embasam em fortes críticas à economia neoclássica e definem um *gap* entre as análises econômicas que consideram somente o valor monetário do processo econômico. O *gap* é a parte que se desconsidera do valor biofísico de todas as entradas de recursos que são absorvidos da natureza. A atual formação do preço de mercado está ligada aos custos incorridos na produção de bens. Esses custos refletem em valores monetários, que se resumem em gastos com mão de obra e o capital de extração desse recurso/insumo da natureza (DALY, 2017), o famoso tripé: terra, capital e trabalho (HALL; KLITGAARD, 2006).

A proposta central da Economia Biofísica<sup>13</sup> está atrelada à ideia de valor biofísico, em que a análise do sistema econômico é embasada nos princípios ecológicos e nas leis da termodinâmica (CLEVELAND, 1987). Com isso, é inevitável que a atividade econômica global seja restringida pelas leis da termodinâmica. A

---

<sup>12</sup> Clausius formulou a primeira e a segunda lei da termodinâmica entre 1850 e 1865. Foi inspirado nos trabalhos de Carnot de 1824, que descobriu a conversão incompleta do calor em trabalho (NIELSEN *et al.*, 2020).

<sup>13</sup> Termo utilizado pela primeira vez por Lotka (1925). Na História, o pensamento biofísico é traçado e evolui desde os fisiocratas do século XVIII (CLEVELAND, 1987).



Economia Biofísica deriva da Economia Ecológica, mais rígida, a partir de seus autores fundadores Georgescu-Roegen (1971), Odum (1996) e Daly (1968) (MELGAR-MELGAR; HALL, 2020; CLEVELAND, 1987; SHERWOOD; CARBAJALES-DALE; HANEY, 2020).

Em resumo, a Economia Biofísica considera a forma como as sociedades humanas usam a energia e recursos biológicos e físicos, para produzir, consumir e distribuir bens e serviços, o que ocasiona resíduos e impactos ambientais. Ainda se dedica a entender as condições e estruturas de crescimento econômico, assim como seus limites, e defende uma crítica à lógica cartesiana da economia neoclássica (BIOPHYSECO, 2020; PALMER, 2018; SHERWOOD; CARBAJALES-DALE; HANEY, 2020).

Nessa perspectiva, de se salientar que alguns recursos desafiam a substituição econômica, a matéria e energia dissipadas não são recicláveis. Mesmo que a tecnologia atue para o aumento do rendimento de matéria e energia, ela nunca ultrapassará o limite finito de recursos (GEORGESCU-ROEGEN, 2012).

### **2.2.1 Uma nova ideia de valor no subsistema econômico: “o valor bioeconômico”**

A discussão sobre o valor possui na literatura inúmeros pensadores que buscam, através de teorias, analisar esses conceitos utilizando abordagens que são conflitantes e discutem o atual mecanismo de formação de preços e quebras de paradigmas. Dentre as primeiras ideias no pensamento econômico sobre a origem do valor, destacam-se os mercantilistas, que acreditavam que a riqueza de uma nação decorria da quantidade de metais preciosos que ela possuía. Ao contrário disso, os fisiocratas defendiam a terra como a única fonte de valor e riqueza e que as sociedades deveriam ser orientadas pela lei natural (HUNT; LAUTZENHEISER, 2013).

Os fisiocratas foram os primeiros a deixarem duas grandes contribuições na análise econômica, que, de certo modo, repercutem na discussão essencial deste estudo. De acordo com a primeira, frente ao conceito de valor, acreditava-se que a sua origem era a natureza. A segunda tem como destaque François Quesnay, que construiu a ideia de inter-relações entre os setores e a ideia de trocas econômicas interdependentes entre os setores da economia como um fluxo circular (CECHIN,

2010; HUNT; LAUTZENHEISER, 2013). Essas ideias iniciais são um marco, pois, posteriormente, evoluíram para se chegar às análises dos modelos de Insumo-Produto que são utilizados até hoje.

Nos clássicos como Adam Smith, o valor de cada bem ou a riqueza estaria no trabalho empregado para a transformação de insumos em bens. Assim, o crescimento econômico seria determinado e focado no aumento da produtividade por trabalhador, voltado para a divisão de trabalho e especialização (SMITH, 1924). David Ricardo segue evoluindo as ideias de Smith e deixa claro que, até certo ponto, a produtividade do trabalho seria crescente, mas, no longo prazo, o limite do crescimento estaria na disponibilidade de oferta de terras. Portanto, só admitia a ideia de retornos decrescentes da produção agrícola, pois, mesmo com a utilização de quantidades crescentes de trabalho na terra, no longo prazo o produto por trabalhador diminuiria (DOBB, 1973; HUNT; LAUTZENHEISER, 2013).

Depois disso, a revolução marginalista foi um marco na história do pensamento econômico, com destaque para três grandes pensadores: Jevons, Menger e Walras, que empregaram esforços para o grande impacto na análise da economia neoclássica, a teoria do valor da utilidade, que tem força na ortodoxia até os dias de hoje. Walras ainda define a teoria do equilíbrio geral e Marshall faz contribuições significativas na teoria da firma (DOBB, 1973; HUNT; LAUTZENHEISER, 2013). A partir do desenvolvimento da economia neoclássica e, com isso, da teoria do valor da utilidade, o conceito de valor passa a ser medido pelo nível de desejo ou satisfação de consumir bens e serviços, ou seja, pelo valor da utilidade (DOBB, 1973).

As críticas apresentadas pela economia ecológica fundamentam contestações ao valor da utilidade. Entende-se que cada indivíduo tem uma utilidade para cada bem e que, via de regra, haverá um valor semelhante entre os indivíduos. Todavia, o preço do mercado, valor monetário do bem, não depende de qualquer valor ou utilidade estabelecido por um indivíduo isoladamente, mas sim do que seja semelhante a um grupo de indivíduos, ou seja, o valor monetário não é uma relação puramente individual (LOTKA, 1914).

Para Georgescu-Roegen, o valor é derivado de dois componentes: um objetivo, que é a qualidade intrínseca ao objeto, relacionada com a baixa entropia (matéria e energia disponíveis), onde os insumos de baixa entropia são transformados pelo trabalho humano e o capital é transformado em bens; o segundo é subjetivo, que é a satisfação do ser humano, ou seja, a ciência não pode ignorar o homem e seus

objetivos e a qualidade dos recursos transformados em dissipativos (CECHIN, 2010; GEORGESCU-ROEGEN, 1971).

Ao contrário da teoria do valor da utilidade, Odum (1996, 1988) defende que a riqueza pode ser mensurada através do trabalho físico realizado, assim o valor seria a energia, e o valor monetário deveria refletir isso (CECHIN, 2010). Ou seja, o valor biofísico definido por Odum (1996, 1988) representa o trabalho incorporado da biosfera: quanto maior o trabalho incorporado na geração de recursos naturais e Serviços Ecossistêmicos, maior é o seu valor de energia incorporada no processo.

Em síntese, o conceito de valor na economia é a emergência de um novo valor: o bioeconômico. O conceito de valor biofísico é embasado na termodinâmica, na análise de sistemas naturais e sociais (MELGAR-MELGAR; HALL, 2020). Assim, a composição entre o valor biofísico e o valor monetário é o que se define como valor bioeconômico, que compreende mensurar os recursos da natureza, capital e humano, como também os recursos de saída, como emissões e perda de solo (externalidades), a serem contabilizados em uma unidade de medida energética única, utilizando as devidas transformidades. A energia total é mensurada em joule de energia solar equivalente (seJ).

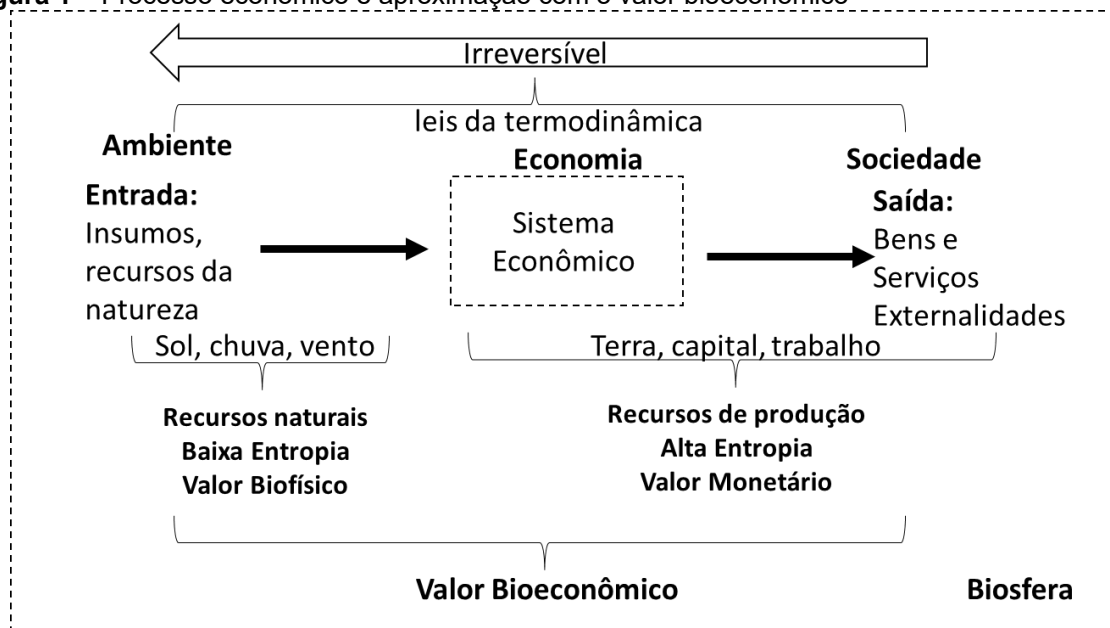
De certa forma, não é uma ideia tão nova assim, pois os fisiocratas já haviam defendido que a origem da riqueza e do valor estava na natureza, os demais setores só distribuem a riqueza, ou seja, o valor monetário tinha seu valor imbricado nos recursos da natureza. Da mesma forma, Lotka (1914) agregou a teoria da evolução de Darwin às leis da termodinâmica para analisar a economia como biofísica (JI; LUO, 2020).

Há uma diferença clara, que se entende como um *gap*, entre o que o sistema econômico valora frente ao valor monetário de um bem e o valor bioeconômico deste. Isso porque o processo econômico tem seu foco no valor monetário, porém o fluxo metabólico e entrópico se evidencia como a fonte de vida e riqueza, caracterizado pela dependência na baixa entropia (DALY, 2017) e pela irreversibilidade do processo (ARTUZO *et al.*, 2021; GEORGESCU-ROEGEN, 2012).

Em resumo, a irreversibilidade termodinâmica se define a partir de que a maioria dos processos físicos tende a evoluir para uma mudança de estado, e, por mais regeneradoras ou renovadoras que a tecnologia ou a evolução das práticas agrícolas possam se tornar, ainda assim os processos são entrópicos como um todo e nunca serão inteiramente negentrópicos (ARTUZO *et al.*, 2021).

O referido *gap* pode ser visualizado na Figura 1, onde os recursos de entrada são entendidos como valor biofísico e parte deles não são valorados pelo sistema monetário. Com isso, o funcionamento dos sistemas, como o econômico, é dependente da utilização de recursos da biosfera<sup>14</sup>, ficando sujeito a possíveis desequilíbrios ou colapsos, tanto do ecossistema como do sistema econômico, na falta de recursos ou catástrofes.

**Figura 1** – Processo econômico e aproximação com o valor bioeconômico



Fonte: A autora (2022), adaptada de Presotto e Talamini (2022).

A Figura 1 desenvolve a lógica da Economia Biofísica de forma gráfica, na medida em que as sociedades utilizam baixa entropia dos recursos da natureza e recursos de produção para produzir bens e serviços. Esses processos induzem a formação de resíduos e impactos ambientais, as externalidades. Acrescido a isso, o valor monetário é proporcionalmente desigual frente ao valor bioeconômico, se constrói uma relação inversa, isso porque à medida que um bem é processado maior é o valor monetário no sistema econômico, porém menor é a baixa entropia, ou seja, há perda de matéria e energia em cada processamento.

A partir da crítica à teoria neoclássica, entende-se que para se analisar a sustentabilidade do processo econômico é necessária uma visão sistêmica que conecte ao valor monetário o valor biofísico. Com isso, a seção que segue busca

<sup>14</sup> É o conjunto de todos os ecossistemas da Terra, mais detalhes em Odum *et al.* (1987).

mapear as diversas abordagens teóricas e aplicadas sobre o desenvolvimento sustentável na utilização de recursos no processo produtivo. Apresenta-se ainda um panorama geral de abordagens e análises que norteiam a discussão sobre sustentabilidade.

### 2.3 ABORDAGENS SOBRE O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: UMA APROXIMAÇÃO COM O VALOR BIOECONÔMICO

A partir de políticas públicas sólidas, um projeto de desenvolvimento depende de relações culturais complexas da sociedade humana e da evolução da biosfera. Por esse motivo, a sustentabilidade das civilizações humanas vai depender da capacidade de utilização dos recursos naturais, e isso se torna o foco do desenvolvimento sustentável (SACHS, 2004). Para se alcançar o desenvolvimento sustentável, deve se buscar o desenvolvimento economicamente sustentado ou eficiente, socialmente desejável ou incluyente e ecologicamente prudente ou equilibrado (ROMEIRO, 2012).

Tudo isso está em função da capacidade de carga<sup>15</sup> da natureza, que, de certa forma, depende das trocas entre o ambiente físico e biótico, da tecnologia e do estado da estrutura de produção e consumo das atividades humanas (ARROW *et al.*, 1996). Com isso, os estoques de recursos naturais são capazes de limitar o crescimento das nações, mesmo que o comércio internacional permita o comércio de recursos.

Todavia, a falta de acesso a necessidades básicas e a insegurança alimentar podem piorar com medidas tomadas por políticas públicas para mitigar a degradação ambiental do processo econômico produtivo. Estas, quando mal estruturadas, podem provocar a oscilação dos preços, piorando a situação dos mais pobres, que já enfrentam problemas de acesso (HASEGAWA *et al.*, 2018; MOZ-CHRISTOFOLETTI; PEREDA, 2021).

Estudos revelam que, entre 1990 e 2001, para cada US\$ 100 de aumento da renda *per capita* mundial, apenas US\$ 0,6 dólar (menos de 1%) contribuiu para reduzir a pobreza (WOODWARD; SIMMS, 2006). Assim, para que haja desenvolvimento sustentável, são necessários diagnósticos dos ecossistemas modificados pelo homem. Para tanto, se faz necessário abandonar a visão de que o sistema econômico é fechado e circular (CECHIN, 2010; DALY, 2017; MELGAR-MELGAR; HALL, 2020).

---

<sup>15</sup> Pode ser entendida como o limite que a natureza suportaria de atividade humana.

Isso se torna possível a partir da engenharia ecológica<sup>16</sup>, que se propõe a integrar a ecologia e a engenharia à teoria geral dos sistemas, podendo descrever o funcionamento dos ecossistemas e almejando prever o comportamento ao longo do tempo (ORTEGA, 2003).

Na literatura, a teoria econômica incorpora a preocupação com a sustentabilidade em suas análises; porém, as vertentes que emergiram são, de certa forma, divergentes, tendo como principal diferença a substitutibilidade dos recursos. A temática é dividida em três grandes vertentes de pensamento, definidas por Veiga (2010): a abordagem convencional, a ecológica e uma visão que o autor chama de terceira via, conhecida na literatura como *decoupling*.

A primeira abordagem, dita convencional, é a que permanece dominante. Fundamentada na teoria neoclássica, defende que, a partir de determinado nível de desenvolvimento econômico, conseguir-se-ia mais melhorias ambientais do que deteriorações. De certa forma, por essa abordagem crê-se que para conseguir a sustentabilidade é necessário maximizar o crescimento econômico (VEIGA, 2010). Chega, até certo ponto, a passar uma visão de solução simplista e prática de todo o problema histórico estrutural e de desigualdade social enfrentado por diversos países.

Os autores dessa abordagem (GROSSMAN; KRUEGER, 1995) ficaram conhecidos pela formulação da Curva Ambiental de Kuznets, devido à semelhança ao trabalho de Simon Kuznets publicado anos antes, em 1955. O trabalho desenvolvido por Kuznets foi notório para a época, porém com os dados precários. A sua teoria era de que existia uma relação entre o crescimento da renda e a desigualdade social. Apesar disso, acreditava que no início do crescimento a desigualdade seria maior; depois de um determinado nível de renda, defendia que essa desigualdade iria diminuir (KUZNETS, 1955). Contudo, depois da metade do século XX, foi possível descartar essa perspectiva (VEIGA, 2010).

Ao contrário desta primeira, a segunda abordagem, conhecida como a abordagem ecológica, se embasa no estado estacionário (no sentido de condição estável) para se chegar à sustentabilidade, em que a qualidade de vida da sociedade melhora, mas sem que essa condição exija expansão do subsistema econômico (VEIGA, 2010). O desenvolvimento sustentável faz sentido somente se “entendido como o desenvolvimento sem crescimento – a melhoria qualitativa de uma base

---

<sup>16</sup> É considerada a ciência que cuida do projeto de ecossistemas e organizações humanas para benefício mútuo. Mais detalhes em Ortega (2003).

econômica física que é mantida num estado estacionário” (DALY, 2004, p. 198). Ainda segundo Daly (2004), é mantida pelo processamento da matéria e energia que estão dentro das capacidades regenerativas e assimilativas do ecossistema.

A segunda abordagem teve nas discussões de Daly a ideia de “*steady state*”.<sup>17</sup> O conceito de “*steady state*” surge de economistas clássicos remodelado, em que a sustentabilidade seria atingida se a qualidade de vida de uma sociedade continuasse melhorando, sem que para isso esteja refém de uma expansão do subsistema econômico, ou seja, a base do conceito está em duas populações físicas, os seres humanos e os elementos de um sistema natural (DALY, 1991).

Em análise mais rígida sobre a sustentabilidade ainda na economia ecológica, anterior a Daly, Georgescu-Roegen defende a implantação de medidas para um programa bioeconômico mínimo como uma redução do consumo e que, assim, o decrescimento seria a solução. Dentre essas medidas pode-se destacar: a proibição da produção de artefatos bélicos e guerras; o que faz com que haja mais força de produção, por exemplo, para se alcançar em todas as nações um padrão de vida decente, sem luxo, e reduzir a população até que a agricultura orgânica seja suficiente para alimentar a todos devidamente; entre outras medidas pautadas em um decrescimento (GEORGESCU-ROEGEN, 2012).

A terceira abordagem, definida como o caminho do meio, parte do princípio de que a aplicabilidade da abordagem ecológica é impraticável e a convencional é inconsistente frente aos diversos problemas ambientais e à ruptura climática (VEIGA, 2010). Outros economistas a intitulam “ecodesenvolvimentista”, rejeitavam a ideia de crescimento zero e se preocupam com perdas ambientais, pobreza e concentração de renda, por exemplo (ROMEIRO, 2012).

A terceira via aposta na reconfiguração do processo produtivo, a partir de uma desmaterialização do processo econômico na produção de bens e serviços, ficando cada vez menos intensivo em energia, e com isso ganharia ecoeficiência. Esse raciocínio tem sido chamado na literatura de “*decoupling*”<sup>18</sup> para evitar o dilema do crescimento, porém há de se observar que os ganhos de eficiência ao longo da História não representam redução de escalas (VEIGA, 2010).

---

<sup>17</sup> Pode ser entendido como uma “condição estável” (VEIGA, 2010).

<sup>18</sup> O *decoupling* expressa uma trajetória de longo prazo com crescimento econômico e redução da pressão sobre o meio ambiente, com um menor consumo de recursos e poluição e aumento do bem-estar. O conceito foi utilizado pela Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), em 2001 (SOARES; ALMEIDA, 2018).

O *decoupling* pode ser entendido como uma estratégia de longo prazo para se reduzir as pressões ambientais com aumento de bem-estar por alcance de eficiência, menos quantidade de recurso por unidade de Produto Interno Bruto (PIB) (*decoupling* de recursos) ou aumento do PIB com redução de impacto ambiental (*decoupling* de impacto) (SOARES; ALMEIDA, 2018). Percebe-se uma carência de estudos que evidenciem, de forma mais clara, essa perspectiva. A dificuldade desses trabalhos está em função dos diversos tipos de impactos causados pela atividade econômica, como a poluição atmosférica, da água, da terra e da biodiversidade, por exemplo (SOARES; ALMEIDA, 2018).

Na prática, para o alcance do desenvolvimento sustentável há um ponto de convergência claro, relacionado à redução do consumismo, entre a terceira via e Georgescu-Roegen (2012) e Daly (2004): é necessário o rompimento com a lógica social do consumismo e uma macroeconomia que reconheça os limites naturais à expansão das atividades econômicas.

Frente à perspectiva teórica construída até aqui, se percebe uma carência de uma visão teórica sistêmica macroeconômica que tenha o valor bioeconômico em sua essência. Este estudo se propõe a sustentar uma visão alternativa, denominada “systemic decoupling”<sup>19</sup>, que busca analisar o processo econômico como parte de um todo, ou seja, como um subsistema na busca do desenvolvimento sustentável. O conceito surge como uma crítica ao distanciamento entre o que se define como valor bioeconômico e a lógica do valor puramente monetário do sistema econômico. Parte do princípio de que a análise de desenvolvimento sustentável deve levar em consideração a desmaterialização do processo produtivo e ainda considerar que a economia é parte de um sistema maior e por isso precisa de uma lógica de análise sistêmica para embasar as análises a partir da ótica do valor bioeconômico do processo econômico.

Por isso, o que se fundamenta no *systemic decoupling* é um conceito que evolui da ideia de *decoupling* da OCDE de desmaterialização do processo produtivo no longo prazo, somado a um olhar sistêmico, que deve ser fundamentado no valor bioeconômico e não somente na busca de estratégias de eficiência energética (*decoupling* de recursos) ou de redução de dados ambientais (*decoupling* de impacto). Ou seja, a visão analítica proposta por este estudo evolui de discussões da economia,

---

<sup>19</sup> Ou desacoplamento sistêmico.



entende-se que por si só o *decoupling*, seja ele de recursos ou de impacto, não é suficiente. Isso porque não resolve o problema do uso de recursos da natureza no processo produtivo que extrapola a capacidade de carga do ecossistema ou o EROI (*Energy Return on Investment*) mínimo sustentável (HALL; BALOGH; MURPHY, 2009).

Com isso, o conceito de *systemic decoupling* se apoia em análises que priorizam o valor bioeconômico, a fim de orientar estratégias que reduzam os impactos causados à natureza e prolonguem o uso de recursos no tempo. O conceito de *systemic decoupling* se assemelha à proposta teórica de Giampietro (2019), que define o conceito de bioeconomia circular<sup>20</sup>, porém a ideia de *systemic decoupling* vai além e define, teoricamente, a ideia do que seria um Modelo de Insumo-Produto Emergético (MIPEm). O MIPEm permite mensurar essa visão sistêmica embasada no valor bioeconômico do processo econômico, a partir de uma composição da Análise Emergética e do Modelo de Insumo-Produto Ecológico.

Em resumo, o MIPEm fornecerá resultados em unidades equivalentes que representam o investimento da biosfera, ajudando assim a preencher o *gap* entre o valor bioeconômico e o valor monetário, estruturando indicadores que podem servir como base para a formulação de políticas públicas aplicadas à sustentabilidade de cada país, como será descrito na seção que segue.

## 2.4 A EXPRESSÃO DO VALOR BIOECONÔMICO NA ECONOMIA: PROPOSIÇÃO DO MIPEM

A construção das ideias apresentadas até aqui permitiu um olhar diferente para as interações entre o processo econômico, o uso dos recursos naturais e a qualidade de vida da sociedade. A ideia apresentada se sustenta como forma de minimizar o *gap* definido anteriormente a partir da construção de valor bioeconômico e, com isso, definir uma nova abordagem de análise, que deriva da economia ecológica e se propõe a uma tentativa de solucionar a formulação de fluxos de fundos.

---

<sup>20</sup> Parte do princípio de que os sistemas metabólicos, incluindo as sociedades humanas, devem ser considerados abertos e dependem da existência de condições de contorno favoráveis determinadas por processos fora do controle humano.

O modelo original de Insumo-Produto de Leontief<sup>21</sup> representa a interdependência do fluxo anual de renda de bens e serviços finais que eram sustentados por um fluxo intermediário de mercadorias, os insumos (MILLER; BLAIR, 2009). Em análises clássicas, os prejuízos gerados pelo processo econômico não têm contrapartida na análise dos coeficientes técnicos medidos monetariamente (AYRES; KNEESE, 1969).

Todavia, a metodologia proposta por Odum (1996) permite identificar que o fluxo de energia de um bem é, por definição, a medida de trabalho de auto-organização do planeta para fazê-lo, onde a natureza fornece recursos por meio de padrões de interação. No processamento de energia de um bem, há uma memória<sup>22</sup> energética ou energia incorporada, que é o resultado da energia necessária e utilizada para a produção desse bem. Em resumo, o termo “energia” pode ser definido como sendo a energia disponível e necessária, de um tipo de energia anteriormente usado, direta ou indiretamente, para produzir um recurso (serviço ou produto) (ODUM, 2007). É o trabalho da natureza para gerar insumos de baixa entropia que serão utilizados para a manutenção e crescimento do sistema econômico.

A proposta do MIPEm é justamente uma composição dessas duas metodologias: a Análise Emergética e o Modelo de Insumo-Produto Ecológico.<sup>23</sup> Por meio de um vetor, o modelo permite a inclusão do uso de fatores primários, ou seja, a vantagem desse procedimento é que ele incorpora as unidades físicas “fora do modelo”. Assim, admite-se, de maneira convencional, calcular a inversa de Leontief e converter as unidades monetárias em unidades físicas (MONTROYA; FINAMORE, 2019).

O MIPEm possibilita mensurar, detalhadamente, o comportamento setorial do processo produtivo nacional a partir da interação circular do uso do recurso de capital, recurso humano e recurso da natureza, assim como distinguir o que são os fundos e

---

<sup>21</sup> O primeiro artigo de Leontief, com estimações empíricas, intitulado *Quantitative Input and Output Relations in the Economic Systems of the United States*, foi publicado em 1936, porém, em 1928, havia publicado parte de sua tese escrita em Berlim, num trabalho com o título *A economia como processo circular*. Leontief se apoiou em Quesnay e na representação formal de Walras, contudo, seu interesse e estudo sobre a economia compreendida através de um esquema fisiocrático são anteriores (BORGES; LOPES, 2015).

<sup>22</sup> Convencionou-se utilizar o termo “energia” com M, por estar ligado com o trabalho realizado pela natureza na geração de produtos e serviços. Também é utilizado como um sinônimo de “energia incorporada” ou de “memória energética” (do inglês *embodied energy*) (ODUM, 1996).

<sup>23</sup> Representa uma extensão da estrutura interindustrial para incluir setores “ecossistêmicos” adicionais, onde os fluxos serão registrados entre os setores econômicos e ecossistêmicos ao longo das linhas de um Modelo de Insumo-Produto. Mais detalhes em Miller e Blair (2009).

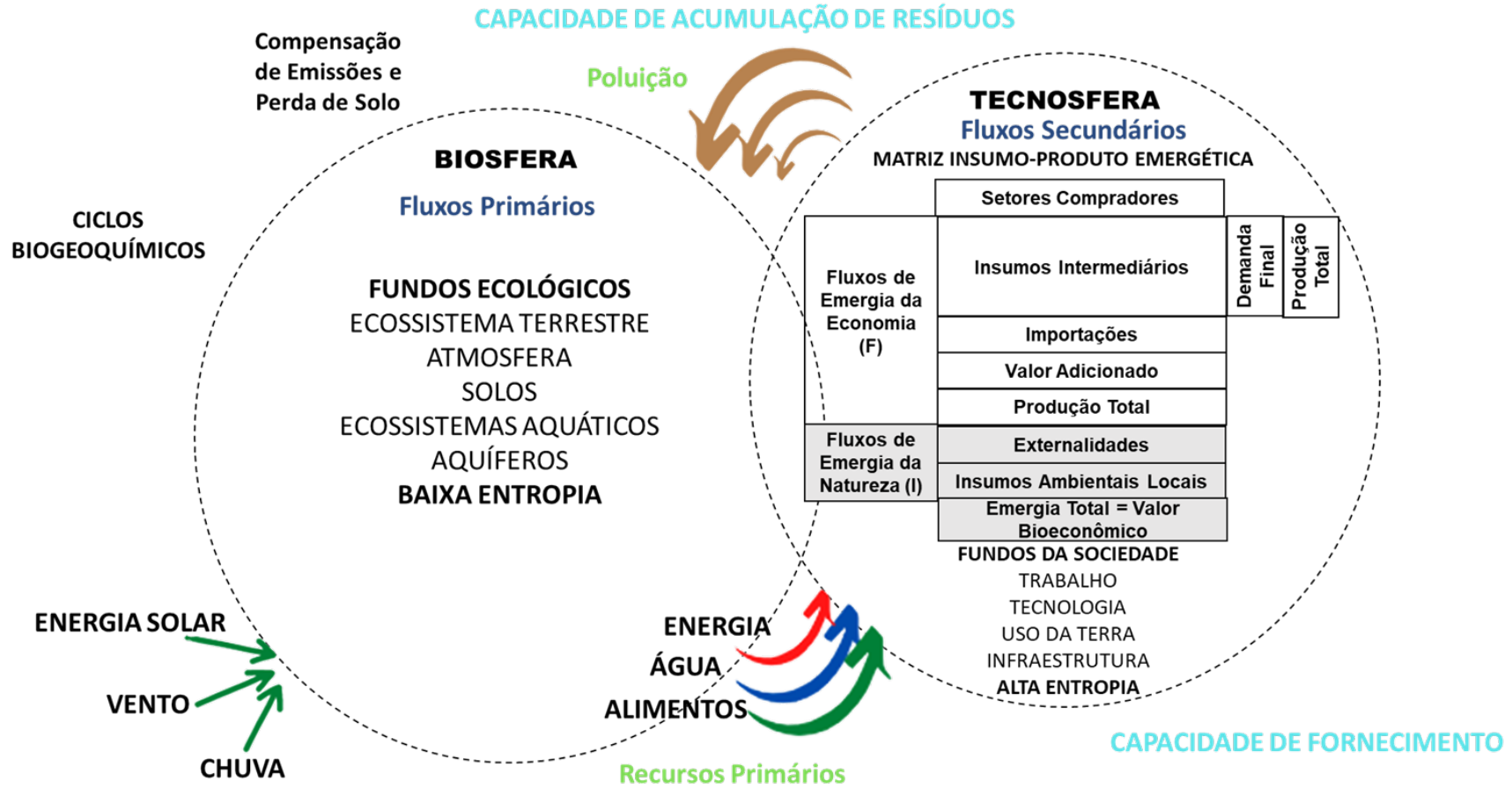
os fluxos. Nesse caso, os fundos são os fatores de produção tradicionais da economia (força de trabalho, uso da terra, solo), ou seja, são os agentes capazes de produzir e consumir fluxos. Já os fluxos são a matéria e energia que vêm da natureza (energia, água) ou de outro processo produtivo e que se transformam através do processo produtivo em bens finais, resíduos e poluição (fluxos de saída).

Assim, a partir da conjuntura estruturada até aqui, a Figura 2 retrata graficamente a ideia de que o processo econômico tecnosfera<sup>24</sup> não é fechado. A tecnosfera interage com fluxos circulares com a biosfera e depende de condições favoráveis determinadas por processos fora do controle humano, como a capacidade de acumulação de resíduos e a capacidade de fornecimento da biosfera. A ideia é reduzir os problemas de aproximação entre o *gap* da abordagem econômica de modelos em valores monetários e as leis da termodinâmica.

---

<sup>24</sup> Representa a leitura biofísica da economia circular na economia convencional (GIAMPIETRO, 2019).

Figura 2 – O subsistema econômico e a sua relação com o valor bioeconômico



Fonte: A autora (2022), adaptada de Presotto e Talamini (2022).

Como definido na Figura 2, defende-se uma alternativa de análise de setores e a viabilidade metodológica aplicada de indicadores como Taxa de Eficiência Emergética (*EYR*), Taxa de Carga Ambiental (*ELR\**), Índice de Sustentabilidade Emergética (*ESI*) e Taxa de Renovabilidade (*R\**), originalmente desenvolvidos em análises de sistemas por Odum (1996), Ortega, Anami e Diniz, (2002), Brown e Ulgiati (1997) e Ortega, Anami e Diniz (2002), respectivamente. Quando mensurados a partir do valor bioeconômico, fornecerão uma base de suporte para a avaliação de políticas aplicadas à análise de desempenho de setores mais ou menos sustentáveis, por exemplo.

A análise sistêmica do MIPEm proporciona um novo olhar que sobressai às dificuldades da economia ambiental e ecológica, pois incorpora minimamente o valor biofísico do processo de produção de bens (fluxos de entrada e saída), possibilitando dizer que é um avanço dentro da macroeconomia ecológica. Há de se salientar que o assunto não se esgota e que muito ainda se pode evoluir nessa temática. A proposta teórica do MIPEm contribui para lançar um novo olhar voltado para a possibilidade de cálculo de indicadores setoriais que agreguem de forma sistêmica na análise o uso de recursos renováveis da natureza (sol, chuva e vento) e de não renováveis (petróleo e gás, por exemplo). Tal proposta ainda permite que seja acrescentado ao processo produtivo as emissões de CO<sub>2</sub> e a perda de solo.

## 2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho proporcionou a estruturação de um panorama sobre a evolução das principais discussões que permeiam as relações de produção, crescimento, desenvolvimento econômico e a sustentabilidade. A discussão trouxe ineditismo, principalmente, sobre a interdependência do processo econômico dos recursos naturais, a partir do valor bioeconômico. Ainda empreendeu um esforço em entender como o sistema econômico é uma parte de um sistema maior e, por isso, depende da manutenção da biosfera para a sua continuidade.

A perspectiva neoclássica se mostrou falha, tanto em abordagens microeconômica como macroeconômica, para fundamentar a complexidade relacionada às variáveis que estão envolvidas com o conceito de desenvolvimento sustentável no que tange a discussões embasadas no valor biofísico. Além disso, os esforços empregados em alguns modelos, por vezes, estão escassos de uma

realidade condizente com as reais perspectivas sobre a dependência do processo econômico. Todavia, não há como negar a importância dos estudos da escola neoclássica, principalmente por conseguirem com um rigor matemático chegar a parâmetros matemáticos robustos para a realidade da época.

Com isso, a principal contribuição deste estudo está, justamente, na proposição de uma nova perspectiva para a análise do processo econômico de forma a integrar os recursos utilizados, sejam eles em valores monetários ou/e físicos. Além disso, a proposta tem o potencial de embasar políticas públicas, principalmente pelo fato de que se conseguirá, a partir de uma análise aplicada, mensurar o desempenho econômico e dos recursos naturais utilizados em cada setor econômico. Assim, as políticas públicas podem ser direcionadas a setores que precisam melhorar seu desempenho no alcance do desenvolvimento sustentável.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, D. C. Tendências do metabolismo da economia brasileira: uma análise preliminar à luz da economia ecológica. **Revibec: Revista Iberoamericana de Economía Ecológica**, Bellaterra, v. 28, p. 66-86, 2018. Disponível em: <https://redibec.org/ojs/index.php/revibec/article/view/66/19>. Acesso em: 20 jan. 2022.
- ARROW, K. *et al.* Economic growth, carrying capacity, and the environment. **Environment and Development Economics**, Cambridge, v. 1, n. 1, p. 104-110, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S1355770X00000413>. Acesso em: 20 jan. 2022.
- ARTUZO, F. D. *et al.* Science of the total environment emergy unsustainability index for agricultural systems assessment: a proposal based on the laws of thermodynamics. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 759, [art.] 143524, [p. 1-13], 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143524>. Acesso em: 20 jan. 2022.
- AYRES, R. U.; KNEESE, A. V. Production, consumption, and externalities. **The American Economic Review**, Nashville, v. 59, n. 3, p. 282-297, 1969.
- BARKIN, D.; CARRASCO, M. E. F. La significación de una economía ecológica radical. **Revibec: Revista Iberoamericana de Economía Ecológica**, Bellaterra, v. 19, p. 1-14, 2012. Disponível em: <https://raco.cat/index.php/Revibec/article/view/261786/349017>. Acesso em: 20 jan. 2022.

BIOPHYSECO – THE BIOPHYSICAL ECONOMICS POLICY CENTER. **What is biophysical economics?** [S. l.]: BiophysEco, 2020. Disponível em: <https://biophyseco.org/biophysical-economics/what-is-biophysical-economics/>. Acesso em: 19 jan. 2022.

BORGES, R. E. S.; LOPES, T. C. Breve histórico das tabelas de insumo-produto no Brasil. **Revista de Economia Política e História Econômica**, São Paulo, n. 33, p. 23, 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/308144394\\_Breve\\_historico\\_das\\_tabelas\\_de\\_insumo-produto\\_no\\_Brasil](https://www.researchgate.net/publication/308144394_Breve_historico_das_tabelas_de_insumo-produto_no_Brasil). Acesso em: 19 jan. 2022.

BRESSER-PEREIRA, L. C. **Da macroeconomia clássica à macroeconomia Keynesiana**. [S. l.], 1976. Versão revisada em maio de 1976 de apostila publicada originalmente em abril de 1968 abril, “Da microeconomia à macroeconomia keynesiana”. Disponível em: <https://bresserpereira.org.br/papers/1985/962a-Da-macroeconomia-classica-a-keynesiaa-1976.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2022.

BROWN, M. T.; ULGIATI, S. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 9, n. 1/2, p. 51-69, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(97\)00033-5](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(97)00033-5). Acesso em: 17 jan. 2022.

CAMPBELL, D. E. Emergy analysis of human carrying capacity and regional sustainability: an example using the State of Maine. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 51, p. 531-569, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1006043721115>. Acesso em: 16 jan. 2022.

CECHIN, A. D. **A natureza como limite da economia: a contribuição de Georgescu-Roegen**. São Paulo: EdUSP, 2010.

CECHIN, A. D.; VEIGA, J. E. A economia ecológica e evolucionária de Georgescu-Roegen. **Revista de Economia Política**, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 438-454, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0101-31572010000300005>. Acesso em: 17 jan. 2022.

CHEN, G. Q.; CHEN, Z. M. Carbon emissions and resources use by chinese economy 2007: a 135-sector inventory and input-output embodiment. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, Amsterdam, v. 15, n. 11, p. 3647-3732, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2009.12.024>. Acesso em: 18 jan. 2022.

CLEVELAND, C. J. Biophysical economics: historical perspective and current research trends. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 38, n. 1/2, p. 47-73, 1987. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(87\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0304-3800(87)90044-5). Acesso em: 19 jan. 2022.

CONGLETON, R. D. Political institutions and pollution control. **Review of Economics & Statistics**, Cambridge, v. 74, n. 3, p. 412-421, 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2109485>. Acesso em: 16 jan. 2022.

DALY, H. E. Trump's growthism: its roots in neoclassical economic theory. **Real-World Economics Review**, Boston, n. 78, p. 86-97, 2017. Disponível em: <http://www.paecon.net/PAERReview/issue78/Daly78.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2022.

DALY, H. E. Crescimento sustentável? Não, obrigado. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, v. 7, n. 2, p. 197-202, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2004000200012>. Acesso em: 16 jan. 2022.

DALY, H. E. **Steady-state economics**. Washington, DC: Island Press, 1991.

DALY, H. E. On economics as a life science. **Journal of Political Economy**, Chicago, v. 76, n. 3, p. 392-406, 1968. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/1829303>. Acesso em: 20 abr. 2022.

DOBB, M. **Theories of value and distribution since Adam Smith**. Cambridge: Cambridge University Press, 1973.

GEORGESCU-ROEGEN, N. **O decrescimento: entropia, ecologia, economia**. São Paulo: Senac São Paulo, 2012.

GEORGESCU-ROEGEN, N. **The entropy law and the economic process**. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1971.

GIAMPIETRO, M. On the circular bioeconomy and decoupling: implications for sustainable growth. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 162, p. 143-156, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.05.001>. Acesso em: 17 jan. 2022.

GOWDY, J.; MESNER, S. The evolution of Georgescu-Roegen's bioeconomics. **Review of Social Economy**, Routledge, v. 56, n. 2, p. 136-156, 1998.

GROSSMAN, G. M.; KRUEGER, A. B. Economic growth and the environment. **The Quarterly Journal of Economics**, Cambridge, v. 110, n. 2, p. 353-377, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2118443>. Acesso em: 19 jan. 2022.

HALL, C. A. S.; BALOGH, S.; MURPHY, D. J. R. What is the minimum EROI that a sustainable society must have? **Energies**, Torrance, v. 2, n. 1, p. 25-47, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en20100025>. Acesso em: 16 jan. 2022.

HALL, C.; KLITGAARD, K. The need for a new, biophysical-based paradigm in economics for the second half of the age of oil. **International Journal of Transdisciplinary Research**, Albany, v. 1, n. 1, p. 4-22, 2006.

HASEGAWA, T. *et al.* Risk of increased food insecurity under stringent global climate change mitigation policy. **Nature Climate Change**, London, v. 8, n. 8, p. 699-703, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0230-x>. Acesso em: 18 jan. 2022.

HUNT, E. K.; LAUTZENHEISER, M. **História do pensamento econômico: uma perspectiva crítica**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.



INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS (IBGE). **Matriz de insumo-produto**. Rio de Janeiro: IBGE, [2020?]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9085-matriz-de-insumo-produto.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 19 jan. 2022.

JI, X.; LUO, Z. Opening the black box of economic processes: ecological economics from its biophysical foundation to a sustainable economic institution. **Anthropocene Review**, London, v. 7, n. 3, p. 1-17, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/2053019620940753>. Acesso em: 18 jan. 2022.

KUZNETS, S. Economic growth and income inequality. **The American Economic Review**, Nashville, v. 45, p. 1-8, 1955. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/1811581>. Acesso em: 10 jan. 2022.

LOTKA, A. J. Elements of physical biology. **Nature**, London, v. 116, n. 2917, p. 461, 1925. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/116461b0>. Acesso em: 19 jan. 2022.

LOTKA, A. J. An objective standard of value derived from the principle of evolution. **Journal of the Washington Academy of Sciences**, Washington, DC, [s. l.], v. 4, n. 14, p. 409-418, 1914.

MELGAR-MELGAR, R. E.; HALL, C. A. S. Why ecological economics needs to return to its roots: the biophysical foundation of socio-economic systems. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 169, [art.] 106567, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106567>. Acesso em: 17 jan. 2022.

MILLER, R. E.; BLAIR, P. **Input-output analysis foundations and extensions**. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

MONTOYA, M. A.; FINAMORE, E. B. As relações intersetoriais dos recursos hídricos na economia brasileira. **Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos**, Curitiba, v. 13, n. 4, p. 513-536, 2019.

MOZ-CHRISTOFOLETTI, M. A.; PEREDA, P. C. Winners and losers: the distributional impacts of a carbon tax in Brazil. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 183, [art.] 106945, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.106945>. Acesso em: 15 jan. 2022.

MUELLER, C. Avaliação de duas correntes da economia ambiental: escola neoclássica e a economia da sobrevivência. **Brazilian Journal of Political Economy**, São Paulo, v. 18, n. 2, p. 66-89, 1998.

NEUMAYER, E. **Weak versus strong sustainability**. Cheltenham Glos: Edward Elgar, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4337/9781849805438>. Acesso em: 18 jan. 2022.

NIELSEN, S. N. *et al.* Thermodynamics in ecology - An introductory review. **Entropy**, Basel, v. 22, n. 8, [art.] 820, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/E22080820>. Acesso em: 17 jan. 2022.

ODUM, H. T. **Environment, power, and society for the twenty-first century: the hierarchy of energy**. New York: Columbia University Press, 2007.

ODUM, H. T. **Environmental accounting: emergy and environmental decision making**. New York: Wiley, 1996.

ODUM, H. T. Self-organization, transformity, and information. **Science**, New York, v. 242, p. 1132-1139, 1988.

ODUM, H. T. *et al.* **Sistemas ambientais e políticas públicas**. Tradução: Enrique Ortega Rodriguez *et al.* Campinas: Laboratório de Engenharia Ecológica e Informática/Unicamp, 16 ago. 2001. Título original: Environmental Systems and Public Policy. Gainesville, FL: University of Florida, 1988. Disponível em: <http://www.unicamp.br/fea/ortega/eco/index.htm>. Acesso em: 20.04.2021.

ORTEGA, E.; ANAMI, M. H.; DINIZ, G. Certification of food products using emergy analysis. *In: BIENNIAL INTERNATIONAL WORKSHOP: ADVANCES IN ENERGY STUDIES*, 3., 2002, Porto Venere, Italy. [**Proceedings of ...**]. Padova: SGE Ditoriali, 2002. p. 227-237. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/228417169\\_Certification\\_of\\_food\\_products\\_using\\_emergy\\_analysis](https://www.researchgate.net/publication/228417169_Certification_of_food_products_using_emergy_analysis). Acesso em: 15 jan. 2022.

ORTEGA, E.; BACIC, M. J. **Uso da metodologia emergética na análise dos sistemas de produção e consumo**. Campinas: Laboratório de Engenharia Ecológica e Informática Aplicada (LEIA), 2020. Disponível em: <https://www.unicamp.br/fea/ortega/Brasil/valor.htm>. Acesso em: 19 jan. 2022.

ORTEGA, H. Engenharia ecológica: conceitos básicos e importância do trabalho de H. T. Odum. *In: ORTEGA, H. (org.). Engenharia ecológica e agricultura sustentável: exemplos de uso da metodologia energética-ecossistêmica*. Campinas: Unicamp, 2003. Disponível em: <http://www.unicamp.br/fea/ortega/livro/c01-engecol.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2022.

PALMER, G. A Biophysical perspective of ipcc integrated energy modelling. **Energies**, Torrance, v. 11, n. 4, [art.] 839, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en11040839>. Acesso em: 15 jan. 2022.

PRESOTTO, E.; TALAMINI, E. A proposição do modelo de insumo-produto emergético como ferramenta de planejamento de políticas públicas sustentáveis. *In: FRANÇA, M. C. A.; PELEGRINI, T.; LAZARETTI, L. Políticas públicas no Brasil: ferramentas essenciais ao desenvolvimento*. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2022. No prelo.

PRESOTTO, E.; TALAMINI, E. A sustentabilidade do subsistema econômico e a aproximação com o valor biofísico. *In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA ECOLÓGICA*, 14., 2021. **Anais [...]**. Campinas: Sociedade Brasileira de Economia Ecológica, 2021.

ROMEIRO, A. R. Desenvolvimento sustentável: uma perspectiva econômicoecológica. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 26, n. 74, p. 65-92, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142012000100006>. Acesso em: 19 jan. 2022.

SACHS, I. Desenvolvimento sustentável: desafio do século XXI. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, v. 7, n. 2, p. 214-216, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1414-753x2004000200016>. Acesso em: 19 jan. 2022.

SAES, B. M. **Macroeconomia ecológica**: o desenvolvimento de abordagens e modelos a partir da economia ecológica. 2013. Dissertação (Mestrado em Economia) – Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

SHERWOOD, J.; CARBAJALES-DALE, M.; HANEY, B. R. Putting the biophysical (back) in economics: a taxonomic review of modeling the earth – bound economy. **Biophysical Economics and Sustainability**, Cham, v. 5, n. 4, p. 1-20, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41247-020-00069-0>. Acesso em: 17 jan. 2022.

SMITH, A.; CANNAN, E. An inquiry into the nature and causes of the wealth of nations. **The Economic Journal**, London, v. 14, n. 56, p. 599-603, 1904. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2221259>. Acesso em: 17 jan. 2022.

SOARES, L. R.; ALMEIDA, L. T. Desacoplamento de impactos ambientais no Brasil. **Revista Iberoamericana de Economía Ecológica**, Bellaterra, v. 28, n. 2, p. 21-42, 2018. Disponível em: <https://redibec.org/ojs/index.php/revibec/article/view/76/44>. Acesso em: 19 jan. 2022.

SPASH, C. L. A tale of three paradigms: realising the revolutionary potential of ecological economics. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 169, [art.] 106518, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106518>. Acesso em: 16 jan. 2022.

VARIAN, H. R. **Microeconomia**: uma abordagem moderna. 9. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

VARIAN, H. R. **Intermediate microeconomics modern approach**. 9th ed. New York: W. W. Norton, 2014.

VEIGA, J. E. **Sustentabilidade**: a legitimação de um novo valor. 2. ed. São Paulo: Editora Senac, 2010.

WOODWARD, D.; SIMMS, A. **Growth isn't working**: the unbalanced distribution of benefits and costs from economic growth. Brighton: New Economics Foundation (NEF), 2006. 32 p.

### 3 INCORPORANDO O VALOR BIOECONÔMICO: DESEMPENHO DOS SUBSISTEMAS DA MATRIZ INSUMO-PRODUTO EMERGÉTICA<sup>25</sup>

**Resumo:** O desempenho econômico de um país depende de sua estrutura produtiva. A economia neoclássica não é suficiente para explicar o valor biofísico dos bens e serviços produzidos em cada setor produtivo. A partir disso, o objetivo deste estudo é mensurar os setores da Matriz Insumo-Produto (MIP) que mais se apropriam do valor bioeconômico em relação ao seu potencial sustentável no uso de recursos. Para alcançar este objetivo, foi utilizada uma composição entre duas metodologias já difundidas na literatura: a Matriz Insumo-Produto e a Análise Emergética, que são base para a construção da Matriz Insumo-Produto Emergética setorial. A metodologia utilizada permitiu que se encontrem os indicadores emergéticos setoriais viabilizando uma comparação entre o uso de energia entre os diferentes setores estudados. O setor ligado à exportação de bens primários (Setor 1) é mais renovável entre os setores analisados.

**Palavras-chave:** Energia renovável. Energia não renovável. Emergia.

**Abstract:** The economic performance of a country depends on its production structure. The neoclassical economy is not sufficient to explain the biophysical value of goods and services produced in each productive sector. From this, the objective of this study is to measure the sectors of the Input-Output Matrix (IOM) that most appropriate the bioeconomic value in relation to their sustainable potential in the use of resources. To reach this objective, a composition between two methodologies already widespread in the literature was used: the Input-Output Matrix and the Emergy Analysis, which are the basis for the construction of the sectorial Emergy Input-Output Matrix. The methodology used allowed the emergy sectorial indicators to be found, making it possible to compare energy use among the different sectors studied. The sector linked to the export of primary goods (Sector 1) is more renewable among the sectors analyzed.

**Keywords:** Renewable Energy. Non-Renewable Energy. Emergy.

#### 3.1 INTRODUÇÃO

As estratégias nacionais voltadas para o crescimento econômico e o uso de recursos da natureza são debatidas desde os anos 70. Nessa época as crises energéticas frente à dependência econômica (ZHANG *et al.*, 2017) e a preocupação com a intensificação do uso de energia aumentaram, pois, mesmo com a tecnologia, pesquisas indicam que o colapso do ecossistema poderia ser retardado até o ano de 2100 (MEADOWS *et al.*, 1972). Assim, na medida em que se admite o crescimento

---

<sup>25</sup> Uma versão deste capítulo foi apresentada no XXIV Encontro de Economia da Região Sul, com o título: “O valor biofísico e o desempenho dos subsistemas da matriz insumo-produto” (PRESOTTO; TALAMINI, 2021b).

econômico como absorvedor de recursos naturais (insumos da natureza), é recomendável, para a condição sustentável, que a humanidade viva dentro da capacidade de carga da natureza (ZHAO; LI; LI, 2005) ou do EROI (*Energy Return on Investment*) mínimo sustentável (HALL; BALOGH; MURPHY, 2009).

Cabe salientar que desde a Revolução Industrial houve uma intensificação energética que continuou aumentando no processo produtivo (AUSUBEL, 1991); assim, à medida que a sociedade se desenvolve e cresce, maior é o uso de energia (DAHL, 2004). No Brasil, a intensificação energética também é observada com o aumento da produção de combustíveis fósseis, principalmente após 1990 (EPE, 2018). Todavia, o crescimento econômico é ecologicamente insustentável (DALY, 2004; HARDT; O'NEILL, 2017) e taxas negativas ou baixas podem acarretar fenômenos sociais adversos como o desemprego, ou seja, é necessário que se desenvolvam ferramentas macroeconômicas que possam ajudar a identificar alternativas ao crescimento socialmente sustentável e estabilizar o uso de material e energia dentro dos limites ecológicos (HALL; BALOGH; MURPHY, 2009; HARDT; O'NEILL, 2017).

Algumas ações e políticas públicas preocupadas com a redução dos efeitos da poluição são fundamentadas na economia ambiental, com o foco na compensação da poluição da natureza (MUELLER, 1998), no uso de recursos renováveis e emissões, internalizando os custos da poluição, por exemplo. Porém, essa abordagem, de certa forma, parece incentivar a produção, mesmo que esta cause degradação ambiental, e ainda traz um positivismo em demasia em investimentos verdes, que ainda estão sob forte instabilidade financeira (SVARTZMAN; DRON; ESPAGNE, 2019). Nesse sentido, entende-se que as instituições políticas podem afetar a extensão dos danos ambientais, à medida que direcionam políticas ambientais e de desenvolvimento econômico mais rígidas contra a degradação ambiental, por exemplo (CONGLETON, 1992; HASEGAWA *et al.*, 2018). Com isso, percebe-se a relação direta da influência de políticas públicas e a mitigação de impactos da degradação ambiental, a segurança alimentar e o uso dos recursos no tempo.

Assim, à medida que se assume a lógica sistêmica do processo econômico, é fundamental que se quantifique o uso de insumos da natureza processados, ou seja,

se mensure o valor bioeconômico.<sup>26</sup> Isso porque, se o subsistema econômico se sustenta de energia e matéria de baixa entropia (GEORGESCU-ROEGEN, 1971) e a partir das leis da termodinâmica, as transformações de energia geram calor, porém parte dessa energia se dissipa no processo, ou seja, o processo é irreversível (ARTUZO *et al.*, 2021). Com isso, tanto bens de capital como força de trabalho ou insumos da natureza não podem ser considerados constantes, pois há uma perda no processo produtivo inevitável (CECHIN; VEIGA, 2010).

Na literatura há evidências em alguns estudos que já sinalizam a importância de romper o paradigma sobre o conceito de valor em análises e incluir o valor biofísico (MELGAR-MELGAR; HALL, 2020). A essência da visão original da economia ecológica definida por Georgescu-Roegen<sup>27</sup> como “*bioeconomics*” – a junção dos termos “bio” e “economia” – implica unir a ecologia e a economia em busca do desenvolvimento sustentável. Deve haver um nível mínimo de produtividade líquida alcançável ao se explorar fontes alternativas de energia (VIVIEN *et al.*, 2019), como na também emergente economia biofísica (SHERWOOD *et al.*, 2020).

Como exemplos aplicados, citam-se os avanços em avaliar a dimensão biofísica da sustentabilidade urbana (STOSSEL; KISSINGER; MEIR, 2015); a mensuração da existência de limites biofísicos para a extração de minérios (VELA-ALMEIDA; BROOKS; KOSOY, 2015); o desenvolvimento de novas metodologias como o modelo de contabilidade ambiental biofísica e “*trophodynamic*”<sup>28</sup> (VASSALLO *et al.*, 2017); a discussão de modelos macroeconômicos (HARDT; O’NEILL, 2017); e a aproximação macroeconômica frente à compreensão do valor biofísico (SVARTZMAN; DRON; ESPAGNE, 2019). Configura-se como a principal contribuição metodológica deste estudo a evolução da análise realizada por Sun e An (2018) no sentido de utilizar os insumos da natureza: sol, vento e chuvas, incrementando a análise aplicada por Chen e Chen (2010), por meio da formulação de indicadores energéticos setoriais, incluindo as externalidades (AGOSTINHO; PEREIRA, 2013; ALLEGRETTI, 2017) por compensação de perda de solo e emissões de CO<sub>2</sub>.

---

<sup>26</sup> Entende-se que o valor bioeconômico computa os recursos humanos, da natureza e da economia e os recursos de saída, como emissões e perda de solo (externalidades), ou seja, é a soma entre o valor monetário e o valor biofísico.

<sup>27</sup> O termo já havia sido utilizado na década de 1920, pelo russo Baranoff (1918, 1925), para descrever a economia da pesca (VIVIEN *et al.*, 2019).

<sup>28</sup> Em inglês: *Biophysical and Trophodynamic Environmental Accounting Model*, que permite contabilizar o valor biofísico do capital natural: quanto maior for o investimento da natureza na geração do capital, maior será o seu valor biofísico.

A partir disso, a problemática deste estudo está em responder: quais setores econômicos apresentam maiores níveis de sustentabilidade considerando os indicadores derivados da Matriz Insumo-Produto Emergética? Para tanto, recorreu-se a duas metodologias aplicadas conjuntamente para absorver o melhor potencial de ambas: a Matriz Insumo-Produto, que permite entender a dinâmica entre os insumos e os bens finais que são processados nos diferentes setores nacionais; e a Análise Emergética, que tem a capacidade de mensurar todo o trabalho realizado pela natureza, capital humano e recursos da economia utilizados no processo econômico para a produção de bens (ODUM, 1996), o valor biofísico, sendo possível construir indicadores emergéticos de desempenho setorial.

Tendo isso em vista, o objetivo deste estudo é construir a Matriz Insumo-Produto Emergética brasileira e, a partir dela, identificar os setores econômicos que apresentam maiores níveis de sustentabilidade considerando os indicadores derivados da Matriz Insumo-Produto Emergética. A importância de se apresentar os indicadores emergéticos setoriais é em função de fornecer padrões de análise que considerem o valor biofísico para a gestão sustentável de recursos disponíveis à estrutura produtiva nacional.

Espera-se que os resultados mostrem as intensidades de recursos para os diferentes setores brasileiros em termos de consumo de recursos em relação à geração econômica de capital. Com isso, será possível identificar quais setores precisam melhorar seus indicadores para se chegar à sustentabilidade emergética, visto que o Brasil exerce uma função significativa no comércio mundial de *commodities*, por exemplo (FAO, 2019).

### 3.2 METODOLOGIA

Para a construção dos indicadores de energia setoriais a partir da lógica do valor bioeconômico, assumiu-se que o processo econômico não é fechado e interage com a biosfera, assim cada setor da Matriz Insumo-Produto é considerado como um subsistema. À medida que a economia produz em seus diferentes setores, recursos da natureza, humanos e de capital estão sendo utilizados. Por isso, a Análise Emergética é fundamental para que se mensure não somente o valor monetário convencional, mas também o valor bioeconômico do processo de produção.

### 3.2.1 Dados utilizados para a construção da Matriz Emergética Nacional

Os dados que embasam a construção do vetor de energia são de diversas fontes. Os dados econômicos são embasados na Matriz Insumo-Produto (MIP) (IBGE, 2020), e os de uso de recursos naturais por setores são das contas ambientais (GENTY; ARTO; NEUWAHL, 2012). A partir dos dados disponíveis nas duas bases e da compatibilização deles, optou-se por construir os indicadores para o ano de 2009, ano mais atual disponível para a análise setorial para as contas ambientais disponibilizadas na World Input-Output Database (WIOD). Foi utilizada a MIP efetiva do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020) para dados econômicos, a qual compreende um período quinquenal (cinco anos – de 01/01/2006 a 31/12/2010). Os recursos da natureza sol e vento foram calculados a partir de dados coletados no site oficial da National Aeronautics and Space Administration (NASA, 2020) e mensurados com base nas áreas utilizadas no Setor 1 (área arável, área de culturas permanentes, área de pastagens e área florestal).

Os dados econômicos da MIP, originalmente, são desagregados em 67 setores. Para a compatibilização de setores, os dados da MIP foram agregados em 34 setores para serem equiparados aos 34 setores das contas ambientais da WIOD. O Apêndice I, ao final deste capítulo, apresenta os 34 setores considerados.

Os dados de contas ambientais utilizados pelo presente estudo na WIOD incluem uso de energia (primária e secundária), emissões de CO<sub>2</sub> e uso da água (*green*, *blue* e *grey*<sup>29</sup>) referentes ao Brasil (GENTY; ARTO; NEUWAHL, 2012), que são base para o cálculo dos fluxos de energia utilizados nos 34 setores. De forma mais detalhada, para o cálculo dos indicadores de energia são necessários os fluxos de energia, por vezes fatores de conversão<sup>30</sup>, e as transformidades, para se chegar à unidade da Análise Emergética (seJ – joule de energia solar equivalente). Os dados das transformidades foram coletados em artigos e na base da *International Society for the Advancement of Energy Research* (ISAER), que disponibiliza em seu site dados

---

<sup>29</sup> O uso da água em três diferentes tipos: água azul: apesar de ser renovável, não significa que sua disponibilidade seja ilimitada; refere-se ao consumo de água superficial e subterrânea em um determinado período de tempo (HOEKSTRA *et al.*, 2011); água verde: é o volume de água da chuva consumido, principalmente na produção agrícola (HOEKSTRA *et al.*, 2011); por último, água cinza: é o volume de água doce necessário para assimilar a carga de poluentes com base nos padrões de qualidade da água existentes no ambiente (GENTY; ARTO; NEUWAHL, 2012).

<sup>30</sup> Os fatores de conversão são apresentados no Apêndice II, ao final deste capítulo, que detalha os cálculos realizados para a construção do vetor de energia.



compilados para a transformidade de inúmeros países e permite de uma forma mais ágil encontrar o dado necessário. A identificação da fonte utilizada como base para a transformidade de cada insumo e fatores de conversão, quando necessários, são apresentados no Apêndice II, ao final deste capítulo, com os detalhes de cálculos da pesquisa.

Os recursos renováveis da natureza são a energia do sol, o vento e a água considerada verde (água da chuva). Já o fluxo de energia da natureza não renovável utilizado nos processos produtivos deriva do uso de energia primária. Como exemplos, temos o carvão, o óleo bruto, o gás e a água cinza (UNITED NATIONS STATISTICS DIVISION, 2018).

Os recursos de energia secundária são considerados como serviços da economia e se dividem em energias renováveis e não renováveis, sendo eles: diesel, gasolina, produtos do petróleo, gás de coqueria, energia de uso renovável (biodiesel e outras, parcela de 30,7% renovável) (CAVALETT, 2008), eletricidade (em grande parte hidrelétrica e solar, parcela de 70% renovável) (CAVALETT, 2008) e outras energias renováveis (lenha e outras) (UNITED NATIONS STATISTICS DIVISION, 2018) e água azul (SHANG *et al.*, 2021).

Os recursos econômicos, ou seja, os valores monetários considerados setorialmente, são os valores de insumos intermediários, impostos e importações, que somados representam o valor bruto de produção e se dividem em materiais não renováveis e serviços como o salário (é a mão de obra humana, parcela de 70% renovável) (ORTEGA; ANAMI; DINIZ, 2002).

As externalidades podem ser entendidas como um fato externo ao mercado de preços na relação entre consumidores e produtores, ou seja, uma externalidade está presente no mercado quando uma atividade de produção ou consumo não reflete diretamente o preço de mercado (VARIAN, 2014). Do ponto de vista ambiental, a produção ou o consumo podem gerar impactos nos demais agentes do ecossistema sem que se tenha que pagar por isso (ALLEGRETTI, 2017; CVALETT, 2008).

Ao encontro da lógica de capacidade de suporte do sistema (AGOSTINHO; PEREIRA, 2013), a emergia foi calculada para incluir o valor das externalidades com a perda de solo e com as emissões, que é adicionado aos indicadores emergéticos a partir do cálculo da Área de Absorção de Impacto (AAI), conforme descrito em Allegretti (2017). O valor de AAI é a quantidade de mata nativa necessária para sequestrar as emissões do próprio processo produtivo, assim como a área de floresta

necessária para mitigar as perdas de solo (ALLEGRETTI, 2017; BULLER, 2016), calculados como Serviços Adicionais (SA).

A perda de solo foi calculada a partir dos dados do Setor 1, que inclui o cultivo agrícola, pecuário e florestal, e dos dados de áreas de tipos de produção em hectares: área arável (considerando dados da perda de solo da produção de milho (MERTEN; MINELLA, 2013)); área de culturas permanentes (considerando dados da perda de solo da produção de café (MERTEN; MINELLA, 2013)); área de pastagens (considerando dados da perda de solo em área de pasto (MERTEN; MINELLA, 2013)); e área florestal (considerando dados da perda de solo em área de floresta (MERTEN; MINELLA, 2013)). As emissões foram calculadas a partir dos valores de emissões de CO<sub>2</sub>, dados disponíveis na WIOD (GENTY; ARTO; NEUWAHL, 2012).

### **3.2.2 Aplicação da análise emergética para a construção do vetor de energia e indicadores setoriais**

Para Odum (1996), no processamento de energia há uma memória<sup>31</sup> energética ou energia incorporada, que é o resultado da energia necessária utilizada para a produção de um bem. O termo “energia” pode ser definido como a energia disponível e necessária usada, direta ou indiretamente, para produzir um recurso (serviço ou produto) (ODUM, 2007).

A Análise Emergética elaborada por Odum (1996) pode ser dividida em três etapas. A primeira etapa é a definição dos limites do sistema. Esse sistema é representado por diagramas, nos quais cada elemento, como recursos, entradas ou saídas, é representado de forma que se entenda perfeitamente o fluxo energético que o sistema está utilizando. A segunda etapa busca dados que resumem valores de energia e de fluxos do sistema. Por fim, na terceira etapa, os fluxos e estoques em unidades de energia ou massa são convertidos em unidades equivalentes de energia por meio do coeficiente da transformidade (ODUM, 1996).

Assim, a energia total ( $U_T$ ) de um processo ou produto é obtida a partir da soma dos fluxos de energia da natureza (I) e da economia (F), matematicamente:  $U_T = I + F$ . A unidade de medida utilizada para a energia total é o joule de energia solar

---

<sup>31</sup> Convencionou-se utilizar o termo “energia” com M, por estar ligado com o trabalho realizado pela natureza na geração de produtos e serviços; também é utilizado como um sinônimo de “energia incorporada” ou de “memória energética” (do inglês *embodied energy*) (ODUM, 1996).

equivalente (seJ). Quanto maior o fluxo emergético de um produto ou processo, mais etapas envolvidas e mais energia incorporada durante o processo, da mesma forma que na lógica de valor bioeconômico: quanto maior o uso de insumos (natureza, econômicos ou serviços) e externalidades, maior será o valor emergético do setor analisado.

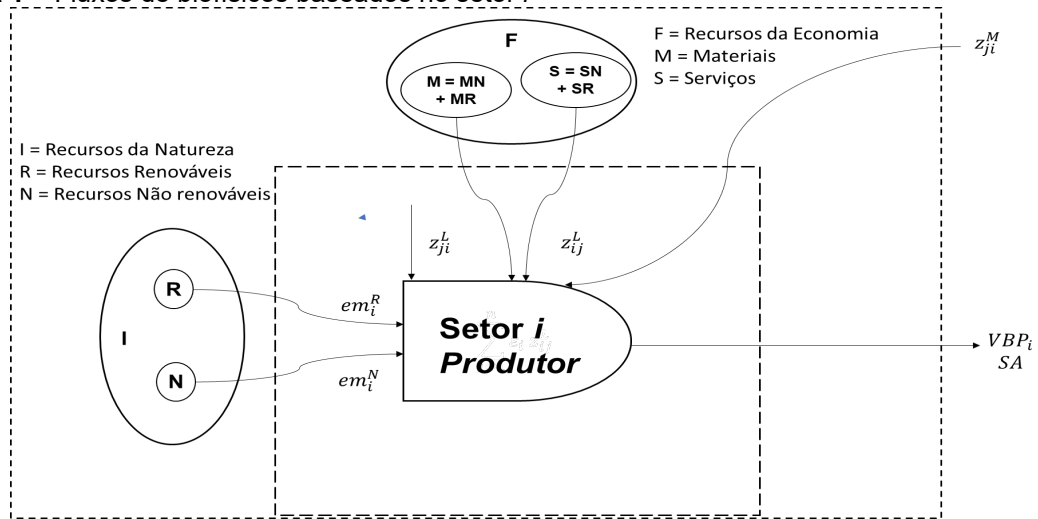
Os fluxos da natureza são desmembrados em duas partes: os fluxos renováveis (R) e não renováveis (N). Já os fluxos da economia são divididos em materiais renováveis (MR), materiais não renováveis (MN), serviços renováveis (SR), serviços não renováveis (SN) e serviços adicionais (SA). Matematicamente tem-se:  $I = N + R$  e  $F = MR + MN + SR + SN + SA$ .

Com o uso da MIP embasado na Análise Emergética, é possível então mensurar indicadores já consolidados na literatura, como a Taxa de Eficiência Emergética (EYR), Taxa de Carga Ambiental (ELR\*), Índice de Sustentabilidade Emergética (ESI), Taxa de Renovabilidade (R) e Índice de Investimento Emergético Considerando as Externalidades (EIRex), originalmente desenvolvidos em análises de sistemas por Odum (1996), Ortega, Anami e Diniz (2002), Brown e Ulgiati (1997), Ortega, Anami e Diniz (2002) e Allegretti (2017), respectivamente. Neste estudo, tais indicadores são calculados setorialmente.

### 3.3 FORMALIZAÇÃO DOS INDICADORES EMERGÉTICOS SETORIAIS

A Figura 1 foi elaborada para direcionar as definições de limites da análise frente aos fluxos de entrada e de saída de cada setor da economia brasileira a ser analisado, em função dos limites da análise que se concentram no processo econômico, ou seja, entende-se que o setor  $i$  tem relações com os demais setores da economia e não é isolado do resto do mundo, pois importa e exporta recursos. Em resumo, a Figura 1 retrata como o setor  $z_{ji}^L$  atende a demanda final ( $d_i^L$ ) e as exportações ( $e_i$ ) a partir do uso de recursos da natureza – recursos renováveis ( $em^R_i$ ), recursos não renováveis ( $em^N_i$ ) e recursos importados intermediários  $z_{ji}^M$  – e de recursos dos demais setores ( $z_{ij}^L$ ).

**Figura 1** – Fluxos de biofísicos baseados no setor  $i$



Fonte: A autora (2022).

A Figura 1 resume os fluxos biofísicos que são utilizados em cada setor da economia de um país, as setas indicam o fluxo de entrada e saída no setor  $i$ , a linha pontilhada resulta da ideia de que o setor recebe insumos e a economia é parte de um todo. As variáveis de entrada resumem-se em:  $em_i^R$ , que mensura a energia renovável de entrada do setor  $i$  (MR); e  $em_i^N$ , que mede a energia não renovável de entrada do setor  $i$  (MN). A entrada industrial importada do setor  $j$  para o setor  $i$  ( $z_{ji}^M$ ) e os bens intermediários locais do setor  $j$  para o setor  $i$  ( $z_{ij}^L$ ) são a quantidade de insumos intermediários que o setor  $i$  utiliza dos  $j$  setores. O resultado do processo econômico, frente à quantidade de insumos utilizados no setor  $i$  pela lógica da oferta, é o  $VBP_i$ , valor bruto de produção (que inclui as importações, as remunerações e os insumos intermediários).

O Quadro 1 abrange os fluxos biofísicos primários em termos de fluxos de uso de energia, saída de emissões e recursos utilizados dentro do sistema econômico. Em resumo, o Quadro 1 apresenta a estrutura para análise macroeconômica, em que a Análise Emergética é utilizada para construir o vetor emergético  $U_T$ , por fora da estrutura tradicional. Cabe salientar que a contabilidade emergética expressa, em uma visão holística, os custos ecológicos de insumos diretos e indiretos necessários para produzir os bens e serviços (ODUM, 1996). Porém, as abordagens macroeconômicas exigem uma vasta disponibilidade de dados e a falta das transformidades deles faz com que as pesquisas macroeconômicas sejam feitas em um ritmo mais lento (SUN; AN, 2018).

**Quadro 1 – Estrutura teórica da Matriz Insumo-Produto Emergética brasileira**

Tipos de recursos	Variáveis	Uso do recurso	Variável emergética	Vendas/Produto → Compras/Insumo ↓	Uso Intermediário				Demanda Final			Demanda total (Y)
					Setor 1	Setor 2	...	Setor n	Consumo	Investimento	Exportação	
Fluxos de energia da economia (F)	Entrada industrial local	Uso industrial local	$MN^L$	Setor 1	$z_{11}^L$	$z_{12}^L$	...	$z_{1n}^L$		$d_1^L$	$e_1$	$y_1$
				Setor 2	$z_{21}^L$	$z_{22}^L$	..	$z_{2n}^L$		$d_2^L$	$e_2$	$y_2$
				...	...	...	...	...		...	...	---
				Setor n	$z_{n1}^M$	$z_{n2}^L$	...	$z_{nn}^M$		$d_n^L$	$e_n$	$y_n$
	Entrada industrial importada	Entrada de importação industrial	$MN^M$	Setor 1	$z_{11}^M$	$z_{12}^L$	...	$z_{1n}^M$		$d_1^M$		
				Setor 2	$z_{21}^M$	$z_{22}^L$	..	$z_{2n}^M$		$d_2^M$		
				...	...	...	...		...			
	Entrada não industrial	Valor adicionado	$SR + SN$	Salários	$v_1^R$	$v_1^R$	...	$v_n^N$				
			$MN^L$	impostos, excedentes etc.	$v_1^N$	$v_2^N$	...	$v_n^N$				
	VBP	Valor Bruto de Produção	$MN = MN^L + MN^MSR - SN$	MN	...	...	...	...				
Fluxos de energia da natureza (I)	Compensação	Externalidades	SA	Perda de solo	$em_{1i}^{AS}$	...	...	...				
				Emissões	$em_{2i}^{AS}$	...	...	$em_n^{AS}$				
	Entrada local	Insumos ambientais locais	N	recursos não renováveis	$em_1^N$	$em_2^N$	..	$em_n^N$				
			R	recursos renováveis	$em_1^R$	$em_2^R$	...	$em_n^R$				
Total de energia ( $U_T$ )			$I + F$	Valor bioeconômico	$U_1$	$U_2$	...	$U_n$				

Legenda: (I) = contribuições da natureza; (R) = recursos renováveis; (N) = recursos não renováveis; (SA) = serviços adicionais; (F) = contribuições da economia; (MN) = material não renovável; (MR) = material renovável; (SR) = serviços econômicos renováveis; (SN) = serviços econômicos não renováveis.

Fonte: A autora (2022), com base em Presotto e Talamini (2021a).

Depois de construído o vetor de energia (última linha do Quadro 1), pode-se calcular os índices de energia para apresentar os diferentes aspectos da sustentabilidade dos diferentes setores da economia nacional. Os índices são definidos nas Equações 1, 2, 3, 4 e 5 descritas na sequência, sendo aplicados para setores, ou seja, no subsistema econômico o indicador é construído e adaptado para analisar cada um dos 34 setores.

A Equação 1, a seguir, define a Taxa de Eficiência Emergética (*Energy Yield Ratio – EYR*), que é obtida dividindo a energia total incorporada pelo setor pela energia dos insumos que provêm da economia. Neste estudo, considerando-se a parcela de SA em  $U_i$ , um EYR maior que 1 significa que mais recursos da natureza foram utilizados e menor a dependência de recursos da economia, ou seja, mais eficiente pela lógica emergética. Nesse caso, a diferença a mais do valor unitário mede a contribuição do meio ambiente (CAVALETT, 2004). O EYR próximo a 1 significa que do total de energia do processo produtivo foram utilizados basicamente recursos da economia. Quanto maior for o EYR, maior será a dependência da atividade produtiva de recursos da economia e sua capacidade de incorporar contribuições da natureza. Em outras palavras, indica a habilidade do setor em explorar os recursos da natureza e disponibilizá-los na forma de produtos, em resposta aos investimentos da economia.

$$EYR_i = \frac{U_i}{(F)} \quad (1)$$

A Taxa de Carga Ambiental (*Environmental Loading Ratio – ELR*), definida pela Equação 2, mensura a pressão ecológica da produção sobre o meio ambiente e indica a contribuição de recursos da natureza e da economia por unidade de carga ambiental. Representa a razão entre os recursos não renováveis (N) sobre os renováveis (R); quanto maior o valor do  $ELR^*$ , maior a pressão que o sistema econômico exerce sobre o ambiente natural. Esse indicador foi desenvolvido por Ortega, Anami e Diniz (2002) e se diferencia do tradicional indicador ELR. Brown e Ulgiati (1997) estabeleceram um padrão de análise a partir de estudos aplicados:  $ELR^*$  menor que 2 indica baixos impactos ambientais,  $ELR^*$  entre 3 e 10 aponta impactos moderados e  $ELR^*$  maior que 10 relaciona-se com altos impactos ambientais em função dos grandes fluxos de energia não renováveis.

$$ELR_i^* = \frac{(M_N + S_N + N)}{(M_R + S_R + R)} \quad (2)$$

O indicador EIRex é o Índice de Investimento Emergético Considerando as Externalidades e avalia a proporção de recursos não renováveis da economia incluindo o valor das externalidades frente aos recursos renováveis da natureza e da economia. Mede o investimento da sociedade para produzir certo bem, em relação à contribuição da natureza. Assim, quanto maior o fluxo, considerado atualmente “gratuito” ou derivado da natureza, menor a taxa de investimento emergético:

$$EIRex = \frac{(M_N + S_N + SA)}{(R + N + S_R + M_R)} \quad (3)$$

A Equação 4 define o índice de sustentabilidade emergética – *Energy Sustainability Index (ESI)* e indica a contribuição potencial de um recurso ou produção para a economia por unidade de carga ambiental.

$$ESI_i = \frac{EYR_i^*}{ELR_i^*} \quad (4)$$

A Taxa de Renovabilidade (*Renewability Ratio – R\**), definida pela Equação 5, representa a porcentagem de energia renovável na produção total de energia no setor *i*. Esse indicador mede a sustentabilidade de longo prazo de uma economia ou processo de produção, uma vez que a energia não renovável será esgotada a longo prazo e a energia renovável será a única fonte de apoio à economia.

$$R_i^* = \frac{100(R + M_R + S_R)}{U_T} \quad (5)$$

Assim, a partir da estrutura da MIP como base foi calculado o vetor de energia setorial. O Apêndice I detalha dados utilizados em cada uma das fontes de insumos utilizadas.

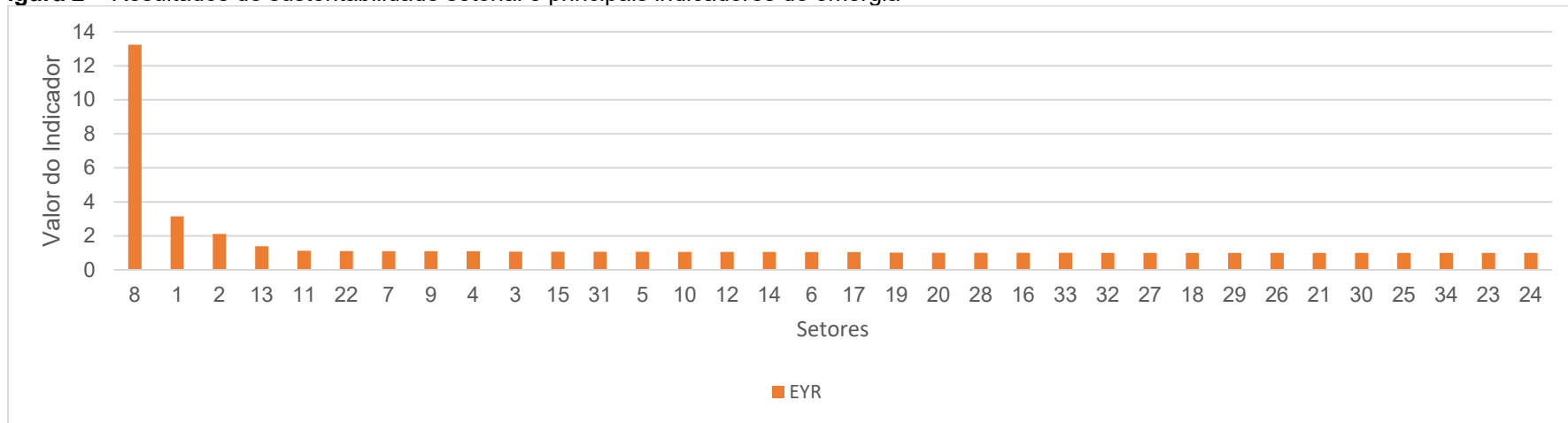
### 3.4 RESULTADOS

Os resultados dos indicadores energéticos referem-se aos 34 subsistemas das atividades produtivas setoriais e são apresentados em sequência na Figura 2. O primeiro indicador é o EYR (Figura 2a): se igual a ou menor que 1, significa que o subsistema é dependente da economia e menos eficiente; se o EYR é maior que 1 significa que mais recursos da natureza foram utilizados. Os resultados permitem entender que a Indústria de refino (Setor 8) tem o maior indicador de EYR (13,23), seguida pelos Setores 1 (Agricultura, caça, silvicultura e pesca), com 3,14, e 2 (Indústrias extrativas), com 2,11. Todos os setores possuem indicador maior que 1, com exceção dos setores 23 e 24.

A desproporcionalidade do indicador do Setor 8 pode ser explicada, visto que 92% dos recursos desse setor são recursos da natureza não renováveis, ou seja, com uma participação muito pequena dos demais recursos da economia e de serviços adicionais.



**Figura 2 – Resultados de sustentabilidade setorial e principais indicadores de energia**



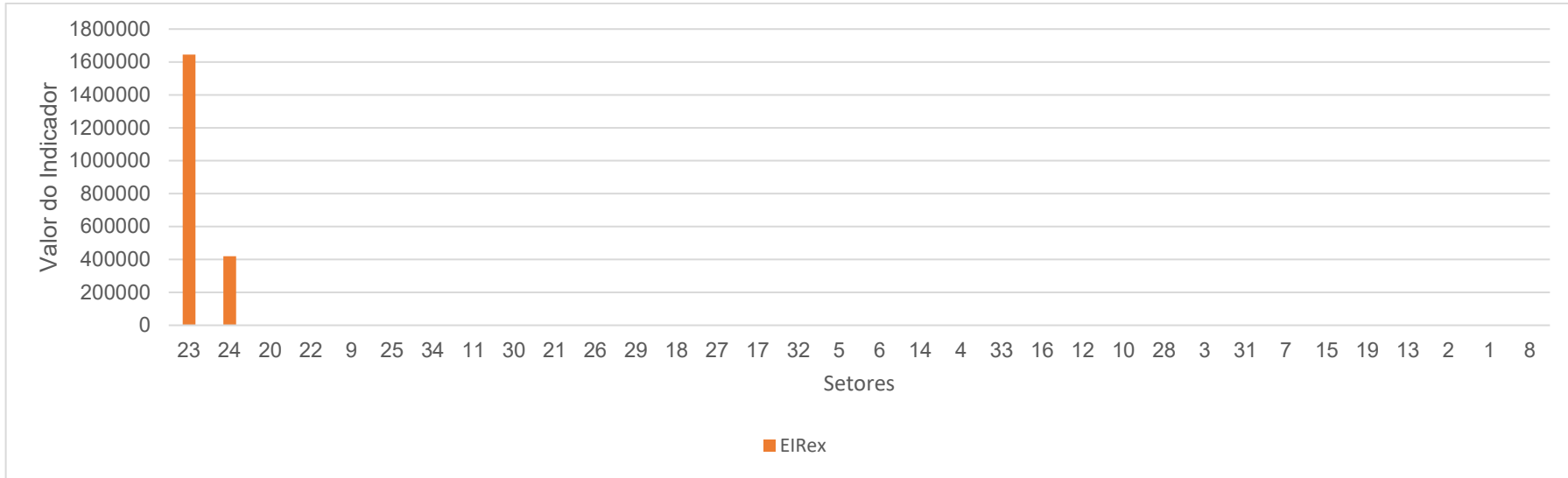
(a)

Legenda: Indústria de refino (Setor 8 = 13,23), Agricultura, caça, silvicultura e pesca (Setor 1 = 3,14), Indústrias extrativas (Setor 2 = 2,11), Transporte hidroviário (Setor 23 = 1), Transporte aéreo (Setor 24 = 1).



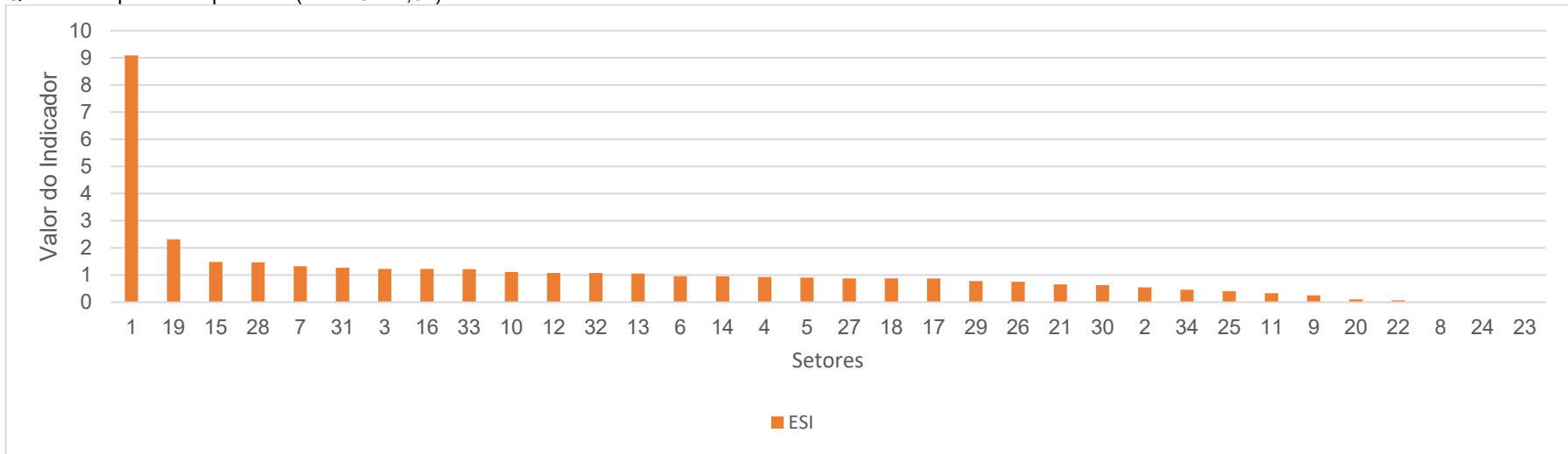
(b)

Legenda: Transporte hidroviário (Setor 23 = 1.626.314), Transporte aéreo (Setor 24 = 414.908), Indústria de refino (Setor 8 = 24.128), Transporte terrestre (Setor 22 = 15,94), Construção (Setor 20 = 9,47).



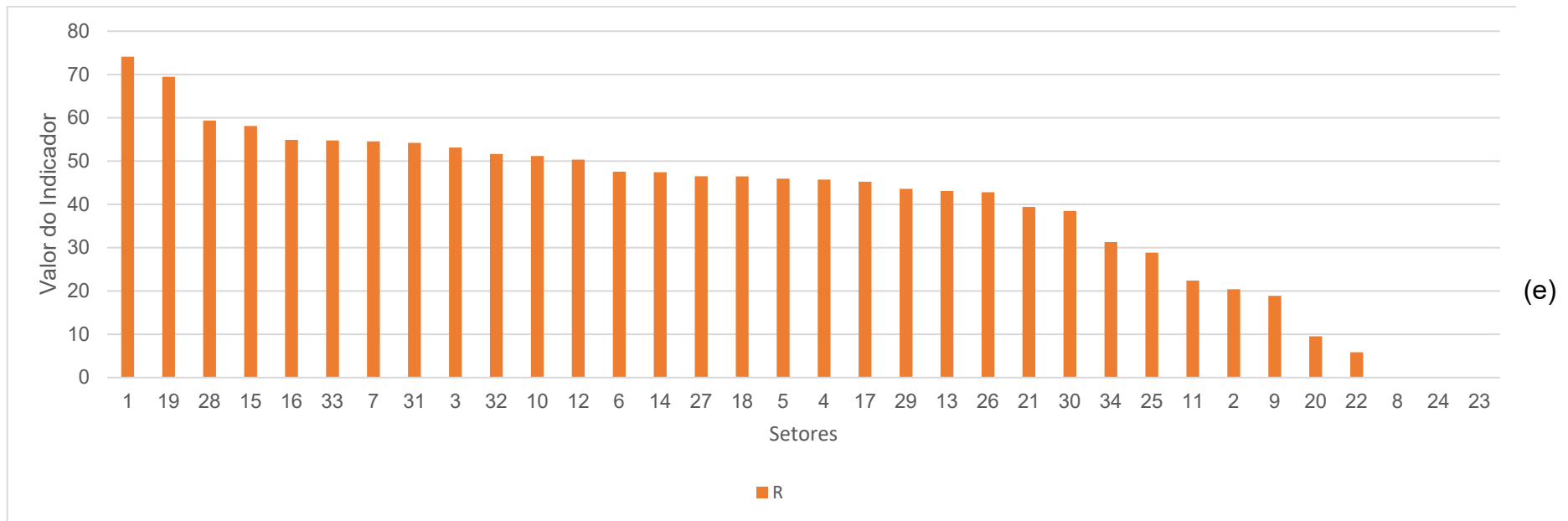
(c)

Legenda: Transporte hidroviário (Setor 23 = 1.644.990), Transporte aéreo (Setor 24 = 419.359), Construção (Setor 20 = 8,87), Transporte terrestre (Setor 22 = 5,48), Químicos e produtos químicos (Setor 9 = 2,61).



(d)

Legenda: Agricultura, caça, silvicultura e pesca (Setor 1 = 9,08), Fornecimento de eletricidade, gás e água (Setor 19 = 2,31), Equipamento de transporte (Setor 15 = 1,48), Intermediações financeiras (Setor 28 = 1,47), Celulose, papel, impressão e publicação em papel (Setor 7 = 1,32).



Legenda: Agricultura, caça, silvicultura e pesca (Setor 1 = 74,12), Fornecimento de eletricidade, gás e água (Setor 19 = 69,47), Intermediações financeiras (Setor 28 = 59,35), Equipamento de transporte (Setor 15 = 58,09), Comércio por atacado e comércio de comissões, exceto veículos automotores e motocicletas (Setor 16 = 54,87).  
 Fonte: A autora (2022).

O indicador ELR (Figura 2b) avalia a pressão causada no ecossistema pelo sistema produtivo em estudo: quanto maior o indicador, maior a pressão. Os índices maiores que 10 indicam altos impactos ambientais e são dos seguintes setores: Transporte hidroviário (Setor 23), Transporte aéreo (Setor 24), Indústria de refino (Setor 8) e Transporte terrestre (Setor 22).

O indicador EIRex (Figura 2c) mensura a proporção de recursos da economia (investimento monetário) frente aos recursos naturais incluindo as externalidades que por vezes não são valorados pela lógica de formação de preços do sistema monetário. Os maiores indicadores estão nestes setores: Transporte hidroviário (Setor 23), Transporte aéreo (Setor 24) e Construção (Setor 20), que se destacam por ter recursos utilizados da economia em maior número do que a proporção de energia que alimenta o setor econômico em relação às entradas de energia do ambiente.

Ao contrário dos resultados encontrados até aqui, quando se mensura a sustentabilidade dos subsistemas produtivos analisados, a posição dos setores se altera. O indicador ESI (Figura 2d) capta o rendimento (ou eficiência de renováveis) por unidade de carga ambiental (não renováveis). Para o ESI o menor valor possível tende a zero e o limite superior teórico tende ao infinito, isso porque é possível somente para ecossistemas maduros e intocados (BROWN; ULGIATI, 1997; CAVALETT, 2008). Quanto maior seu valor, mais sustentável é o sistema; assim, o setor da Agricultura, caça, silvicultura e pesca (Setor 1), Fornecimento de eletricidade, gás e água (Setor 19) e Equipamento de transporte (Setor 15) são os três subsistemas mais sustentáveis entre os analisados.

O Setor 1, que representa em parte o que é produzido pelo Agronegócio brasileiro, um setor considerado na literatura como primário (BATISTA, 2019; BATISTA; HEGELE, 2018), também possui o melhor indicador de renovabilidade (R), que mensura a autonomia ou sustentabilidade do processo. Os sistemas com maior indicador R (Figura 2e) são Agricultura, caça, silvicultura e pesca (Setor 1), Fornecimento de eletricidade, gás e água (Setor 19) e Intermediações Financeiras (Setor 28). Os piores indicadores são muito próximos de zero, como o de Transporte hidroviário (Setor 23), Transporte aéreo (Setor 24) e Indústria de refino (Setor 8).

### 3.5 DISCUSSÕES

Ao contrário de uma visão tradicional da economia, em que prevalece somente o valor monetário, as análises que consideram o valor biofísico permitem mensurar o processo produtivo de forma sistêmica incorporando à análise os insumos da natureza e as externalidades do processo produtivo (PRESOTTO; TALAMINI, 2022; 2021a). Isso permite aproximar minimamente o processo produtivo das leis da termodinâmica, em que energia e matéria se transformam, nada se cria em função da irreversibilidade do processo.

Se por um lado o setor relacionado com transportes (geração de combustíveis) pode ser estratégico para o crescimento econômico em sua perspectiva tradicional (LIU, 2018; ZAIDI; GMIDEN; SAIDI, 2018), por outro lado tem um dos piores indicadores de sustentabilidade emergética. Cabe salientar que o Setor 8 (Indústria de refino) tem alta dependência de recursos da natureza não renováveis, 92% do total de valor bioeconômico utilizado pelo setor, ou seja, sistemas com piores índices de renovabilidade têm menores chances de sobreviver.

Ao contrário disso, quando se está analisando as atividades produtivas ligadas ao Agronegócio como a produção de grãos (Setor 1), são mais sustentáveis e com maior indicador de renovabilidade e níveis significativamente muito maiores que as dos setores citados anteriormente. Tal resultado é corroborado por Montoya *et al.* (2021), que evidenciam que 14 dos 40 setores, com ênfase no agregado do Agronegócio, são exportadores líquidos de emissões virtuais de energia renovável.

Os resultados encontrados sugerem que a relação entre crescimento econômico e sustentabilidade deve ser analisada de forma sistêmica. Isso porque o uso de energia e a dependência do crescimento econômico por setores menos sustentáveis podem afetar o uso de recursos disponíveis (ou quantidade de valor bioeconômico) e, com isso, toda a estrutura produtiva no longo prazo.

Cabe ainda evidenciar e incentivar, via políticas públicas, que esses subsistemas produtivos – neste estudo, os 34 setores – façam uso de menores quantidades de recursos externos (como combustíveis e outros) com uma baixa fração renovável ou os substituam por recursos com uma maior fração renovável. Essa é uma alternativa para aumentar a sustentabilidade dos subsistemas. Isso porque tenderá a aumentar a renovabilidade em função da redução da quantidade de insumos não renováveis utilizados, canalizando esforços para o alcance do

desenvolvimento sustentável. Entretanto, na literatura não há um consenso sobre a produção que seria a que tenderia a alcançar a economia socialmente igualitária e ecologicamente sustentável, pois a macroeconomia ecológica é uma abordagem emergente (SAES, 2013; SAES; ROMEIRO, 2019).

### 3.6 CONCLUSÕES

Neste estudo integrou-se a análise setorial da Matriz Insumo-Produto à Análise Emergética, como um esforço de aproximar o valor bioeconômico e a macroeconomia. Os indicadores são eficientes para alcançar o objetivo que o trabalho se propõe: apresentar o desempenho das atividades produtivas e, com isso, entender a participação de cada setor frente à utilização do valor bioeconômico tanto pela ótica da eficiência como da sustentabilidade emergética.

Cabe salientar que foram consideradas a perda de solo e as emissões como externalidades por compensação em todos os setores. Mesmo sendo acrescidas essas externalidades, o Setor 1, ligado ao Agronegócio, é o setor mais sustentável entre as demais atividades produtivas em análise. É responsável pela segurança alimentar, por ser um destaque mundial na comercialização de grãos e carnes. É provável que algumas atividades menos sustentáveis, em função do predomínio de uso de recursos não renováveis, possam estar ajudando substancialmente na desproporcionalidade nos indicadores de sustentabilidade e de carga ambiental dos setores ligados aos transportes e refino, por exemplo.

Os resultados são expressivos, em primeiro lugar, pela diferença significativa entre as intensidades dos indicadores de energia encontrada nos setores analisados, isso implica empregar esforços para desenvolver tecnologias para que setores mais insustentáveis tornem-se mais eficientes. Em segundo lugar, pelo desenvolvimento de um banco de dados que represente a incorporação setorial de recursos naturais e externalidades, discussão essencial no contexto de sistemas produtivos e na economia ecológica. A análise pode apontar fortes ligações entre algumas atividades produtivas e a degradação do ecossistema; o contrário também é verdadeiro.

Todavia, para trabalhos futuros, são necessários estudos a fim de analisar os custos ecológicos das atividades de produção ao longo de toda a cadeia produtiva e auxiliar de forma complementar os indicadores mensurados por este trabalho, além de entender a dinâmica do uso do valor bioeconômico entre os setores. Assim, será

possível, de forma mais robusta, identificar os setores que precisam melhorar a sua intensidade emergética via aumento de sustentabilidade e também em quais atividades produtivas isso terá um impacto mais significativo. Outra limitação a ser salientada é a defasagem dos dados utilizados em função da indisponibilidade de dados no formato em que seja aplicável a análise emergética.

## REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, F.; PEREIRA, L. Support area as an indicator of environmental load: comparison between embodied energy, ecological footprint, and emergy accounting methods. **Ecological Indicators**, New York, v. 24, p. 494-503, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.08.006>. Acesso em: 18 jan. 2022.

ALLEGRETTI, G. **Insect as feed**: uma análise bioeconômica do uso de insetos como fonte proteica alternativa à avicultura de corte brasileira. 2017. Tese (Doutorado em Agronegócios) – Programa de Pós-Graduação em Agronegócios, Programa de Pós-Graduação em Agronegócios, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ARTUZO, F. D. *et al.* Science of the total environment emergy unsustainability index for agricultural systems assessment: a proposal based on the laws of thermodynamics. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 759, [art.] 143524, [p. 1-13], 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143524>. Acesso em: 20 jan. 2022.

AUSUBEL, J. H. Energy and environment: the light path. **Energy Systems and Policy**, Washington, DC, v. 15, p. 181-188, 1991. Disponível em: [https://phe.rockefeller.edu/light\\_path/](https://phe.rockefeller.edu/light_path/). Acesso em: 23 dez. 2021.

BATISTA, A. R. A. **Estrutura produtiva brasileira na era dos serviços**: uma análise baseada na Matriz de Insumo-Produto. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Econômicas) – Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.

BATISTA, A. R. A.; HEGELE, F. A importância do setor de serviços na economia brasileira: uma análise baseada em setores-chave para 2013. *In*: KON, A.; BORELLI, E. **Economia brasileira em debate**: subsídios ao desenvolvimento. São Paulo: Blucher, 2018. p. 187-206.

BROWN, M. T.; ULGIATI, S. Emery-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 9, n. 1/2, p. 51-69, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(97\)00033-5](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(97)00033-5). Acesso em: 17 jan. 2022.

BROWN, M.; BARDI, E. **Handbook of emergy evaluation**: a compendium of data for emergy computation issued in a series of folios. Gainesville: University of Florida, 2001. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5078810/mod\\_resource/content/1/Folio\\_3.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5078810/mod_resource/content/1/Folio_3.pdf). Acesso em: 18 jan. 2022.

BULLER, L. S. **Diagnóstico emergético das mudanças de uso da terra e proposta de recuperação de uma área do cerrado**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

CAVALETT, O. **Análise do ciclo de vida da soja**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Departamento de Engenharia de Alimentos, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

CAVALETT, O. **Análise emergética da piscicultura integrada à criação de suínos e de pesque-pagues**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Departamento de Engenharia de Alimentos, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

CECHIN, A. D.; VEIGA, J. E. A economia ecológica e evolucionária de Georgescu-Roegen. **Revista de Economia Política**, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 438-454, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0101-31572010000300005>. Acesso em: 17 jan. 2022.

CHEN, G. Q.; CHEN, Z. M. Carbon emissions and resources use by chinese economy 2007: a 135-sector inventory and input-output embodiment. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, Amsterdam, v. 15, n. 11, p. 3647-3732, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2009.12.024>. Acesso em: 18 jan. 2022.

CONGLETON, R. D. Political institutions and pollution control. **Review of Economics & Statistics**, Cambridge, v. 74, n. 3, p. 412-421, 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2109485>. Acesso em: 16 jan. 2022.

DAHL, C. A. **International energy markets**: understanding pricing, policies and profits. Tulsa, Oklahoma: PenWell, 2004.

DALY, H. E. Crescimento sustentável? Não, obrigado. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, v. 7, n. 2, p. 197-202, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2004000200012>. Acesso em: 16 jan. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco energético nacional 2018**. Rio de Janeiro: EPE, 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>. Acesso em: 18 jan. 2022.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **[Base de Dados FAOSTAT]**. Rome: FAO, 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data>. Acesso em: 18 jan. 2022.



GENTY, A.; ARTO, I.; NEUWAHL, F. **Final database of environmental satellite accounts**: technical report on their compilation. [Luxembourg]: European Union, 2012. WIOD–World Input-Output Database. Deliverable 4.6, Documentation.

HALL, C. A. S.; BALOGH, S.; MURPHY, D. J. R. What is the minimum EROI that a sustainable Society Must Have? **Energies**, Torrance, v. 2, n. 1, p. 25-47, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en20100025>. Acesso em: 16 jan. 2022.

HARDT, L.; O'NEILL, D. W. Ecological macroeconomic models: assessing current developments. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 134, p. 198-211, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.12.027>. Acesso em: 19 jan. 2022.

HASEGAWA, T. *et al.* Risk of increased food insecurity under stringent global climate change mitigation policy. **Nature Climate Change**, London, v. 8, n. 8, p. 699-703, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0230-x>. Acesso em: 18 jan. 2022.

HOEKSTRA, A. Y. *et al.* **Manual de avaliação da pegada hídrica**: estabelecendo o padrão global. [Enschede]: Water Footprint Network, 2011. Disponível em: <https://waterfootprint.org/media/downloads/ManualDeAvaliacaoDaPegadaHidrica.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS (IBGE). **Matriz de Insumo-Produto**. Rio de Janeiro: IBGE, [2020?]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9085-matriz-de-insumo-produto.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 19 jan. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS (IBGE). **Censo Agro 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: [https://censoagro2017.ibge.gov.br/templates/censo\\_agro/resultadosagro/index.html](https://censoagro2017.ibge.gov.br/templates/censo_agro/resultadosagro/index.html). Acesso em: 19 jan. 2022.

LIU, X. Aggregate and disaggregate analysis on energy consumption and economic growth nexus in China. **Environmental Science and Pollution Research**, Berlin, v. 25, n. 26, p. 26512-26526, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2699-2>. Acesso em: 19 jan. 2022.

MEADOWS, D. H. *et al.* **The limits to growth**: a report to the club of Rome (1972). [New York : Universe Books], 1972. Disponível em: <http://www.ask-force.org/web/Global-Warming/Meadows-Limits-to-Growth-Short-1972.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2022.

MELGAR-MELGAR, R. E.; HALL, C. A. S. Why ecological economics needs to return to its roots: the biophysical foundation of socio-economic systems. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 169, [art.] 106567, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106567>. Acesso em: 17 jan. 2022.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G. The expansion of brazilian agriculture: soil erosion scenarios. **International Soil and Water Conservation Research**, Beijing, v. 1, n. 3, p. 37-48, 2013. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30029-0](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30029-0). Acesso em: 19 jan. 2022.

MONTOYA, M. A. *et al.* Renewable and non-renewable in the energy-emissions-climate nexus: brazilian contributions to climate change via international trade. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 312, [art.] 127700, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127700>. Acesso em: 19 jan. 2022.

MUELLER, C. Avaliação de duas correntes da economia ambiental: escola neoclássica e a economia da sobrevivência. **Brazilian Journal of Political Economy**, São Paulo, v. 18, n. 2, p. 66-89, 1998.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **The Power project**. Hampton, [2020?]. Disponível em: <https://power.larc.nasa.gov/>. Acesso em: 19 jan. 2022.

ODUM, H. T. **Environment, power, and society for the twenty-first century: the hierarchy of energy**. New York: Columbia University Press, 2007.

ODUM, H. T. Folio #2 emergy of global processes. *In*: ODUM, H. T. **Handbook of emergy evaluation**. Gainesville: University of Florida, 2000. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5078809/mod\\_resource/content/1/Folio\\_2.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5078809/mod_resource/content/1/Folio_2.pdf). Acesso em: 19 jan. 2022.

ODUM, H. T. **Environmental accounting: emergy and environmental decision making**. New York: Wiley, 1996.

ORTEGA, E. *et al.* Brazilian soybean production: emergy analysis with an expanded scope. **Bulletin of Science, Technology and Society**, Oxford, v. 25, n. 4, p. 323-334, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0270467605278367>. Acesso em: 19 jan. 2022.

ORTEGA, E.; ANAMI, M. H.; DINIZ, G. Certification of food products using emergy analysis. *In*: BIENNIAL INTERNATIONAL WORKSHOP: ADVANCES IN ENERGY STUDIES, 3., 2002, Porto Venere, Italy. [**Proceedings of ...**]. Padova: SGE Ditoriali, 2002. p. 227-237. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/228417169\\_Certification\\_of\\_food\\_products\\_using\\_emergy\\_analysis](https://www.researchgate.net/publication/228417169_Certification_of_food_products_using_emergy_analysis). Acesso em: 15 jan. 2022.

PESSOA, S. G.; MARTINS, M. A. Sequestro de carbono em região de cerrado em Mato Grosso: contribuição para o equilíbrio do clima. **Connection Line**, Várzea Grande, n. 12, p. 2-17, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.18312/1980-7341.n12.2015.213>. Acesso em: 19 jan. 2022.

PRESOTTO, E.; TALAMINI, E. A proposição do modelo de insumo-produto emergético como ferramenta de planejamento de políticas públicas sustentáveis. *In: FRANÇA, M. C. A.; PELEGRINI, T.; LAZARETTI, L. Políticas públicas no Brasil: ferramentas essenciais ao desenvolvimento*. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2022. No prelo.

PRESOTTO, E.; TALAMINI, E. A sustentabilidade do subsistema econômico e a aproximação com o valor biofísico. *In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA ECOLÓGICA*, 14., 2021. **Anais [...]**. Campinas: Sociedade Brasileira de Economia Ecológica, 2021a.

PRESOTTO, E.; TALAMINI, E. O valor biofísico e o desempenho dos subsistemas da matriz insumo-produto. *In: ENCONTRO DE ECONOMIA DA REGIÃO SUL*, 24., Florianópolis, 2021. **Anais [...]**. Florianópolis: ANPEC SUL, 2021b. Disponível em: [https://www.anpec.org.br/sul/2021/submissao/files\\_l/i4-72c7e62ce0deab59cf5ede0047ac33b4.pdf](https://www.anpec.org.br/sul/2021/submissao/files_l/i4-72c7e62ce0deab59cf5ede0047ac33b4.pdf). Acesso em: 19 jan. 2022.

RUGANI, B. *et al.* Ecological deficit and use of natural capital in Luxembourg from 1995 to 2009. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 468/469, p. 292-301, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.122>. Acesso em: 19 jan. 2022.

SAES, B. M. **Macroeconomia ecológica: o desenvolvimento de abordagens e modelos a partir da economia ecológica**. 2013. Dissertação (Mestrado em Economia) – Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

SAES, B. M.; ROMEIRO, A. R. Ecological macroeconomics: a methodological review. **Economia e Sociedade**, Campinas, v. 28, n. 2, p. 365-392, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1982-3533.2019v28n2art04>. Acesso em: 17 jan. 2022.

SHANG, K. *et al.* Emergy analysis of the blue and green water resources in crop production systems. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 319, [art.] 128666, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128666>. Acesso em: 19 jan. 2022.

SHERWOOD, J.; CARBAJALES-DALE, M.; HANEY, B. R. Putting the biophysical (back) in economics: a taxonomic review of modeling the earth – bound economy. **Biophysical Economics and Sustainability**, Cham, v. 5, n. 4, p. 1-20, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41247-020-00069-0>. Acesso em: 17 jan. 2022.

SILVEIRA, P. Estimativa da biomassa e carbono acima do solo em um fragmento de floresta ombrófila densa utilizando o método da derivação do volume comercial. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 4, p. 789-800, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/rev.v40i4.20330>. Acesso em: 19 jan. 2022.

STOSSEL, Z.; KISSINGER, M.; MEIR, A. Measuring the biophysical dimension of urban sustainability. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 120, p. 153-163, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.10.010>. Acesso em: 19 jan. 2022.

SUN, X.; AN, H. Emery network analysis of chinese sectoral ecological sustainability. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 174, p. 548-559, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.228>. Acesso em: 17 jan. 2022.

SVARTZMAN, R.; DRON, D.; ESPAGNE, E. From ecological macroeconomics to a theory of endogenous money for a finite planet. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 162, p. 108-120, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.04.018>. Acesso em: 19 jan. 2022.

UNITED NATIONS STATISTICS DIVISION (UNSD). **International Recommendations for Energy Statistics (IRES)**. New York: UNPub., 2018. Disponível em: <https://unstats.un.org/unsd/energystats/methodology/documents/IRES-web.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2022.

VARIAN, H. R. **Intermediate microeconomics modern approach**. 9th ed. New York: W. W. Norton, 2014.

VASSALLO, P. *et al.* Assessing the value of natural capital in marine protected areas: a biophysical and trophodynamic environmental accounting model. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 355, p. 12-17, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.03.013>. Acesso em: 19 jan. 2022.

VELA-ALMEIDA, D.; BROOKS, G.; KOSOY, N. Setting the limits to extraction: a biophysical approach to mining activities. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 119, p. 189-196, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.09.001>. Acesso em: 19 jan. 2022.

VIVIEN, F. D. *et al.* The Hijacking of the bioeconomy. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 159, p. 189-197, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.01.027>. Acesso em: 19 jan. 2022.

ZAIDI, S.; GMIDEN, S.; SAIDI, K. How energy consumption affects economic development in select African countries. **Quality & Quantity**, Amsterdam, v. 52, n. 1, p. 501-513, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11135-017-0480-0>. Acesso em: 19 jan. 2022.

ZHANG, L. X. *et al.* Emery based resource intensities of industry sectors in China. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 142, pt 2, p. 829-836, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.063>. Acesso em: 19 jan. 2022.

ZHAO, S.; LI, Z.; LI, W. A modified method of ecological footprint calculation and its application. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 185, n. 1, p. 65-75, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.11.016>. Acesso em: 19 jan. 2022.

ZHOU, S. Y.; ZHANG, B.; CAI, Z. F. Emergy analysis of a farm biogas project in China: a biophysical perspective of agricultural ecological engineering. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, Amsterdam, v. 15, n. 5, p. 1408-1418, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2009.06.001>. Acesso em: 19 jan. 2022.

### APÊNDICE I – Estrutura que define a compatibilização de setores entre os dados da WIOD e MIP2010

Id	Denominação utilizada	Cód. WIOD	Setores WIOD	Cód. MIP	SETORES MIP 2010
s1	Agricultura, caça, silvicultura e pesca	AtB	Agriculture, Hunting, Forestry and Fishing	1	0191 Agricultura, inclusive o apoio à agricultura e a pós-colheita
				2	0192 Pecuária, inclusive o apoio à pecuária
				3	0280 Produção florestal; pesca e aquicultura
s2	Indústrias extrativas	C	Mining and Quarrying	4	0580 Extração de carvão mineral e de minerais não metálicos
				5	0680 Extração de petróleo e gás, inclusive as atividades de apoio
				6	0791 Extração de minério de ferro, inclusive beneficiamentos e a aglomeração
				7	0792 Extração de minerais metálicos não ferrosos, inclusive beneficiamentos
s3	Alimentos, bebidas e tabaco	15t16	Food, Beverages and Tobacco	8	1091 Abate e produtos de carne, inclusive os produtos do laticínio e da pesca
				9	1092 Fabricação e refino de açúcar
				10	1093 Outros produtos alimentares
				11	1100 Fabricação de bebidas
				12	1200 Fabricação de produtos do fumo
s4	Têxteis e produtos têxteis	17t18	Textiles and Textile Products	13	1300 Fabricação de produtos têxteis
				14	1400 Confecção de artefatos do vestuário e acessórios
S5	Couro, couro e calçado	19	Leather, Leather and Footwear	15	1500 Fabricação de calçados e de artefatos de couro
S6	Madeira e produtos de madeira e cortiça	20	Wood and Products of Wood and Cork	16	1600 Fabricação de produtos da madeira
S7	Celulose, papel, impressão e publicação em papel	21t22	Pulp, Paper, Paper, Printing and Publishing	17	1700 Fabricação de celulose, papel e produtos de papel
				18	1800 Impressão e reprodução de gravações
S8	Indústria de refino	23	Coke, Refined Petroleum and Nuclear Fuel	19	1991 Refino de petróleo e coquerias

<b>Id</b>	<b>Denominação utilizada</b>	<b>Cód. WIOD</b>	<b>Setores WIOD</b>	<b>Cód. MIP</b>	<b>SETORES MIP 2010</b>
				20	1992 Fabricação de biocombustíveis
S9	Químicos e produtos químicos	24	Chemicals and Chemical Products	21	2091 Fabricação de químicos orgânicos e inorgânicos, resinas e elastômeros
				22	2092 Fabricação de defensivos, desinfetantes, tintas e químicos diversos
				23	2093 Fabricação de produtos de limpeza, cosméticos/perfumaria e higiene pessoal
				24	2100 Fabricação de produtos farmoquímicos e farmacêuticos
s10	Borracha e plásticos	25	Rubber and Plastics	25	2200 Fabricação de produtos de borracha e de material plástico
s11	Outro mineral não metálico	26	Other Non-Metallic Mineral	26	2300 Fabricação de produtos de minerais não metálicos
s12	Produção de ferro e metalurgia	29	Machinery, Nec	27	2491 Produção de ferro-gusa/ferroliga, siderurgia e tubos de aço sem costura
				28	2492 Metalurgia de metais não ferrosos e a fundição de metais
s13	Fabricação de produtos com metais básicos	27t28	Basic Metals and Fabricated Metal	29	2500 Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos
s14	Equipamentos eletrônicos e óticos	30t33	Electrical and Optical Equipment	30	2600 Fabricação de equipamentos de informática, produtos eletrônicos e óticos
				31	2700 Fabricação de máquinas e equipamentos elétricos
s15	Equipamento de transporte	34t35	Transport Equipment	32	2800 Fabricação de máquinas e equipamentos mecânicos
				33	2991 Fabricação de automóveis, caminhões e ônibus, exceto peças
				34	2992 Fabricação de peças e acessórios para veículos automotores
s16	Comércio por atacado e comércio de comissões, exceto veículos automotores e motocicletas	51	Wholesale Trade and Commission Trade, Except of Motor Vehicles and Motorcycles	35	3000 Fabricação de outros equipamentos de transporte, exceto veículos automotores

Id	Denominação utilizada	Cód. WIOD	Setores WIOD	Cód. MIP	SETORES MIP 2010
s17	Fabricação de móveis	36t37	Manufacturing, Nec; Recycling	36	3180 Fabricação de móveis e de produtos de indústrias diversas
s18	Manutenção e reparação de veículos	50	Sale, Maintenance and Repair of Motor Vehicles and Motorcycles; Retail Sale of Fuel	37	3300 Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos
s19	Fornecimento de eletricidade, gás e água	E	Electricity, Gas and Water Supply	38	3500 Energia elétrica, gás natural e outras utilidades
				39	3680 Água, esgoto e gestão de resíduos
s20	Construção	F	Construction	40	4180 Construção
s21	Comércio por atacado e varejo	52	Retail Trade, Except of Motor Vehicles and Motorcycles; Repair of Household Goods	41	4580 Comércio por atacado e varejo
s22	Transporte terrestre	60	Inland Transport	42	4900 Transporte terrestre
s23	Transporte hidroviário	61	Water Transport	43	5000 Transporte aquaviário
s24	Transporte aéreo	62	Air Transport	44	5100 Transporte aéreo
s25	Outras atividades de apoio e transporte auxiliar	63	Other Supporting and Auxiliary Transport Activities; Activities of Travel Agencies	45	5280 Armazenamento, atividades auxiliares dos transportes e correio
s26	Hotéis e restaurantes	H	Hotels and Restaurants	46	5500 Alojamento
				47	5600 Alimentação
s27	Correios e telecomunicações	64	Post and Telecommunications	48	5800 Edição e edição integrada à impressão
				49	5980 Atividades de televisão, rádio, cinema e gravação/edição de som e imagem
				50	6100 Telecomunicações
				51	6280 Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação
s28	Intermediações financeiras	J	Financial Intermediation	52	6480 Intermediação financeira, seguros e previdência complementar
s29	Aluguel e outras atividades comerciais	71t74	Real Estate Activities	53	6800 Atividades imobiliárias
				54	6980 Atividades jurídicas, contábeis, consultoria e sedes de empresas



Id	Denominação utilizada	Cód. WIOD	Setores WIOD	Cód. MIP	SETORES MIP 2010
				55	7180 Serviços de arquitetura, engenharia, testes/análises técnicas e P&D
s30	Outras atividades comerciais	70	Renting of M&Eq and Other Business Activities	56	7380 Outras atividades profissionais, científicas e técnicas
				57	7700 Aluguéis não imobiliários e gestão de ativos de propriedade intelectual
				58	7880 Outras atividades administrativas e serviços complementares
				59	8000 Atividades de vigilância, segurança e investigação
s31	Administração pública e defesa; Segurança Social Obrigatória	L	Public Admin and Defence; Compulsory Social Security	60	8400 Administração pública, defesa e seguridade social
s32	Educação	M	Education	61	8591 Educação pública
				62	8592 Educação privada
s33	Saúde pública e privada	N	Health and Social Work	63	8691 Saúde pública
				64	8692 Saúde privada
s34	Outras atividades comunitárias, sociais e pessoais	O	Other Community, Social and Personal Services	65	9080 Atividades artísticas, criativas e de espetáculos
		P	Private Households with Employed Persons	67	9700 Serviços domésticos
		Q	Extra-territorial organizations and bodies		

Fonte: A autora (2022), com base em IBGE (2020) e Genty, Arto e Neuwahl (2012).

## APÊNDICE II – Detalhes dos cálculos na construção da análise emergética de fluxos anual para o Brasil

Localização: latitude -15.5809 longitude -56.0661.

Insumos da natureza renováveis (R) – área é baseada na área cultivada no Setor 1

### Energia solar

Variável	Valor	Fonte
Insolação média	1924,17 kWh/m <sup>2</sup> /yr	Nasa (2020)
Área de incidência	5,09E+12 m <sup>2</sup>	Genty, Arto e Neuwahl (2012)
Albedo	0,14	Nasa (2020)
<i>Energy = area * insolação * (1 – albedo)</i>	8,42E+15 kWh/yr	Calculada por este estudo
Fator de conversão	3600000 J/kWh	Allegretti (2017)
Transformidade	1 seJ/J	Odum (1996)
Atualização da transformidade	1,68 seJ/J	Odum (1996)
Energia	5,09E+22 seJ/J	Calculada por este estudo

### Energia do vento

Variável	Valor	Fonte
Velocidade	2,75 m/s	Nasa (2020)
Área de incidência	5,09E+12 m <sup>2</sup>	Genty, Arto e Neuwahl (2012)
Densidade do ar	1,23 kg/m <sup>3</sup>	Odum (1996)
Velocidade geotrópica (60%)	1,65 m/s	Nasa (2020)
Coefficiente de drag	0,001	Zhou, Zhang e Cai (2010)
Fator de conversão	3,15E+07 s/yr	Allegretti (2017); Rugani <i>et al.</i> (2014)
<i>Energy = área * densidade do ar * coef. drag * (velocidade geotrópica)<sup>3</sup></i>	2,81E+10 J	Calculada por este estudo
Transformidade	4,22E+03 seJ/J	Odum (1996)
Energia	3,74E+21 seJ/J	Calculada por este estudo

### Água da chuva

Variável	Valor	Fonte
Precipitação anual	5,88E+14 l/ano/m <sup>2</sup>	Genty, Arto e Neuwahl (2012)
Densidade da água	1 kg/l	
Área	5,09E+12 m <sup>2</sup>	Genty, Arto e Neuwahl (2012)
Energia Livre de Gibbs (ELG)	5,00E+03 J/kg	Allegretti (2017)
<i>Energy = área * precipitação * densidade da água * ELG</i>	2,94E+18 J/ano	Calculada por este estudo
Transformidade	1,82E+04 seJ/J	Odum (1996)
Atualização da transformidade	3,06E+04 seJ/J	Allegretti (2017)
Energia	8,99E+22 seJ/J	Calculada por este estudo

### Insumos da natureza não renováveis (N)

#### Água cinza

Variável	Valor	Fonte
Água cinza utilizada	1,13E+14 l/ano	Odum (1996)
Energia Livre de Gibbs (ELG)	5,00E+03 J/kg	Allegretti (2017)
Densidade da água	1 kg/l	
<i>Energy = densidade da água * ELG * água utilizada</i>	Cinza = 1,57E+17	Calculada por este estudo
Transformidade	8,06E+04	Odum (1996)
Energia	Cinza = 1,26E+22	Calculada por este estudo

**Energias primárias industriais (soma de todos os setores)**

Variável	Fluxo de Energia (J)*	Transformidade (seJ/J)	Fonte
Coal (N)	4,50E+17	6,72E+04	Odum (1996)
Crude Oil (N)	4,11E+18	9,07E+04	Odum (1996)
Gas (N)	8,02E+17	8,06E+04	Odum (2000)

\*soma de todos os setores.

Fonte de dados do fluxo de energia: Genty, Arto e Neuwahl (2012).

**Insumos da Economia (M) e Serviços da Economia (S)**

Os dados setoriais da economia foram embasados no valor bruto de produção da matriz insumo-produto do IBGE (2020), que inclui insumos intermediários domésticos, importação e insumos primários (terra, capital e trabalho). Assim, a variável salário foi considerada como trabalho humano com uma parcela de 70% do valor sendo renovável (Sr), e o restante 30% como Sn (ORTEGA; ANAMI; DINIZ, 2002).

**Água azul (Sr)**

Variável	Valor	Fonte
Água azul	5,63E+17 l/ano	Odum (1996)
Energia Livre de Gibbs (ELG)	5,00E+03 J/kg	Allegretti (2017)
Densidade da água	1 kg/l	
$Energy = densidade\ da\ água * ELG * água\ utilizada$	Azul = 5,63E+17	Calculada por este estudo
Transformidade	8,06E+04	Odum (1996)
Energia	Azul = 4,54E+22	Calculada por este estudo

**Energia secundária industrial (soma de todos os setores)**

Variável	Fluxo de Energia (J)	Transformidade (seJ/J)	Fonte
Coke (N)	6,37E+15	6,72E+04	Odum (1996)
Diesel (Sn)	9,72E+17	1,11E+05	Odum (1996)
Gasolina (Sn)	8,48E+16	1,11E+05	Odum (1996)
Produtos do petróleo (Sn)	1,99E+18	1,11E+05	Odum (1996)
Renováveis-biodiesel (Sr)	3,54E+16	3,90E+05	Cavalett (2008)
Renováveis-biodiesel (Sn)	8,00E+16	3,90E+05	Cavalett (2008)
Outros renováveis (carvão de lenha) (Sr)	2,45E+18	1,80E+05	Odum (1996)
Eletricidade (Sr)	1,92E+18	3,36E+05	Odum (1996)
Eletricidade (Sn)	8,23E+17	3,36E+05	Odum (1996)

Fonte de dados do fluxo de energia: Genty, Arto e Neuwahl (2012).

**Serviços Adicionais (SA) – externalidades**

As externalidades são incorporadas a partir da medição da área de absorção de impacto (AAI) de mata nativa, que é necessária para sequestrar as emissões do próprio processo produtivo, assim como a área de floresta necessária para mitigar as perdas de solo. O cálculo da AAI foi desenvolvido segundo Allegretti (2017).

Matematicamente, a  $AAI = \frac{IE}{CC}$ , onde o AAI é a divisão entre o Impacto da Emissões (IE) – toneladas de CO<sub>2</sub> – pela Capacidade de Compensação (CC) – capacidade da biomassa de mata nativa de sequestrar o carbono emitido (ton ha/ano). Depois de calculado o AAI em ha/ano, calcula-se a energia de externalidade das emissões: multiplica-se o valor encontrado pela produtividade média anual de biomassa de mata nativa (ton ha/ano), com o fator de conversão chega-se ao valor de J/ano. Foram considerados 7 anos de tempo necessário para que a floresta atinja seu estágio adulto e cumpra os serviços ecossistêmicos, assim a produtividade (ton ha/ano) é dividida por 7, para calcular a energia anual. Depois disso, a partir da transformidade da floresta, chega-se ao valor emergético da externalidade, que pode então ser incorporado aos fluxos emergéticos de cada subsistema analisado.

**Área de absorção de impacto: compensação das emissões**

Variável considerada	Valor	Unidades de medida	Fonte
Total de emissões (IE)	251288447,3	ton /ano	Genty, Arto e Neuwahl (2012)
Sequestro de Carbono (CC)	277,8	ton/ha ano	Pessoa e Martins (2015)
Área de sequestro (AAI)	904566,0451	ha	Calculado por este estudo
Produção de biomassa	157,41/7= 22,43	ton/ha ano	Silveira (2010)
<i>Total de biomassa</i> = AAI * <i>Produção de biomassa</i>	20289416,39	ton/ano	
Fator de conversão 1	1,00E+03	kg/ton	
Fator de conversão 2	4600	kcal/kg	
Fator de conversão 3	4186	J/kcal	
<i>Energia = Total de biomassa * FC1 * FC2</i> * <i>FC3</i>	3,91E+17	J/ano	
Transformidade	1,07E+04	seJ/J	Brown e Bardi (2001)
Energia	4,82E+21	seJ/yr	

Para a compensação da perda de solo, matematicamente a  $AAI = \frac{\beta \text{ perda de solo}}{\beta \text{ recuperação do solo}}$ , onde  $\beta$  perda de solo = quantidade de solo perdido \* valor energético do solo \* transformidade. Para o cálculo do valor energético do solo, utiliza-se o teor de matéria orgânica no solo da região multiplicado pelo valor energético do quilograma de matéria orgânica de solo. Assim como foi feito com as emissões, a área de absorção de impacto (AAI) encontrada é multiplicada pela sua produção de biomassa média anual e sua respectiva transformidade, para identificação do fluxo emergético por compensação de perda de solo.

### Área de absorção de impacto: compensação de perda de solo

#### Perda de solo

Perda de solo	Aráveis	Permanente	Pastagens	Floresta
Área (ha) (Genty, Arto e Neuwahl, 2012)	6,12E+07	7,30E+06	1,96E+08	2,44E+08
Perda média de solo por tipo de cultivo	5,30E+04	1,00E+04	5,50E+04	8,00E+03
Impacto	20	20	20	20
Perda de solo total	1,62E+11	3,65E+09	5,39E+11	9,76E+10
Teor de matéria orgânica	0,03883	0,24937	0,2336	0,03645
Fator de conversão	5400	5400	5400	5400
Fator de conversão	4186	4186	4186	4186
Transformidade (Ortega <i>et al.</i> , 2005)	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07
Energia de perda de solo	1,49E+24	2,16E+23	2,99E+25	8,45E+23

#### Recuperação de solo

Recuperação do solo	Aráveis	Permanente	Pastagens	Floresta
Área (ha) (Genty, Arto e Neuwahl, 2012)	6,12E+07	7,30E+06	1,96E+08	2,44E+08
Produção vegetal	22,43	22,43	22,43	22,43
Fator de conversão	1000	1000	1000	1000
Fator de conversão	4600	4600	4600	4600
Fator de conversão	4186	4186	4186	4186
Transformidade (Brown; Bardi, 2001)	1,07E+06	1,07E+06	1,07E+06	1,07E+06
Energia de recuperação de solo	2,83E+25	3,37E+24	9,06E+25	1,13E+26

Fonte: A autora (2022).

## 4 A DINÂMICA DO VALOR BIOECONÔMICO A PARTIR DO MODELO DE INSUMO-PRODUTO EMERGÉTICO

**Resumo:** A sustentabilidade das atividades produtivas de um país é importante fonte de discussão na literatura e nas análises de eficiência de políticas públicas. Assim, a quantidade de valor bioeconômico, neste artigo representada pela Pegada Emergética Nacional (PEmN), é ferramenta estratégica para o direcionamento de esforços de eficiência de uso de recursos no tempo. A partir disso, o objetivo deste estudo foi construir o Modelo de Insumo-Produto Emergético e avaliar a Pegada Emergética setorial. Metodologicamente utilizou-se a Análise Emergética conjuntamente com o Modelo de Insumo-Produto Ecológico para a construção do Modelo de Insumo-Produto Emergético. Os resultados encontrados permitem entender que os setores com a maior Pegada Emergética Nacional também são os setores-chave para o crescimento bioeconômico. Porém, para que se alcance o desenvolvimento sustentável, é necessário que se observe o uso de recursos no processo produtivo, se estes são renováveis ou não. Portanto, o Setor 1, que tem características de agricultura e extrativismo, é um setor-chave, que utiliza 65,3% dos recursos da fração renovável.

**Palavras-chave:** Bioeconomia. Modelo de Insumo-Produto Emergético. Valor Biofísico. Pegada Emergética.

**Abstract:** The sustainability of a country's productive activities is an important source of discussion in the literature and in efficiency analyses of public policies. Thus, the amount of bioeconomic value, in this article represented by the national Energy Footprint (PEmN), is a strategic tool for directing efforts of efficiency in the use of resources over time. Based on this, the objective of this study was to construct the Energy Input-Output Model and to evaluate the sectoral Energy Footprint. Methodologically, we used the Energy Analysis and the Ecological Input-Output Model to build the Energy Input-Output Model. The results found allow us to understand that the sectors with the largest National Energy Footprint are also the key sectors for bioeconomic growth. However, to achieve sustainable development it is necessary to observe the use of resources in the production process, whether they are renewable or not. Therefore, Sector 1, which has characteristics of agriculture and extractivism, is a key sector that uses 65.3% of the renewable fraction resources.

**Keywords:** Bioeconomics. Energy Input-Output Model. Biophysical Value. Energy Footprint.

### 4.1 INTRODUÇÃO

O esgotamento dos recursos, a poluição ambiental e a degradação dos ecossistemas caracterizam-se como as três pressões que são induzidas pela atividade econômica (PANG *et al.*, 2019; YANG; SUH, 2011). O Brasil tem uma matriz energética três vezes mais limpa do que a média mundial (MONTROYA *et al.*, 2021);

todavia, ainda é preciso evoluir em questões relacionadas aos recursos físicos da natureza que são utilizados no sistema econômico e que são finitos, ou seja, na eficiência energética (HALL, 1972) ou no mínimo *Energy Return on Investment* (EROI) sustentável (HALL; BALOGH; MURPHY, 2009). Na literatura, ainda restam controvérsias quanto a como mensurar a participação do valor biofísico<sup>32</sup> nas diferentes áreas da teoria econômica, como na economia ecológica ou na economia ambiental, por exemplo.

O problema a ser enfrentado pelos formadores de políticas públicas está em encontrar quais são os caminhos e trajetórias para se alcançar o progresso econômico e da sociedade a partir do uso dos recursos da natureza, humanos e da economia de forma eficiente e sem que se esgotem esses recursos. As abordagens clássicas presentes na literatura possuem algumas fragilidades. A economia ambiental, por exemplo, em sua essência, se preocupa mais em mensurar o valor econômico dos recursos naturais a partir das externalidades derivadas dos seus usos, não há uma preocupação de mensuração dos “bens livres”.<sup>33</sup> Ainda, analisa o processo econômico como fechado (DALY, 2017; GIAMPIETRO, 2019).

Ao contrário disso, quando se assume que o processo produtivo é sistêmico e que a economia é um subsistema de um sistema maior, a biosfera (GIAMPIETRO, 2019), é possível sustentar a crítica à economia neoclássica em que o capital natural é desconsiderado como um fator de produção (DALY, 2017). Análises estruturadas no valor monetário, por definição, desconsideram em parte o valor biofísico.

A Análise Emergética elaborada por Odum (1996) vai de encontro às análises clássicas. Ela se baseia nas leis da termodinâmica para entender os fluxos de energia e matéria, convertendo-as em energia solar equivalente como uma base comum para possibilitar análises comparáveis, embasadas na Análise Emergética. Em um conceito simples, a energia pode ser definida como a quantidade de energia necessária para fazer algum bem ou serviço (BROWN; BRANDT-WILLIAMS, 2000).

Modelos de Insumo-Produto são amplamente utilizados para analisar sistemas econômicos. Variações desse modelo, como o Modelo de Insumo-Produto Ecológico, têm sido utilizadas como recurso metodológico para acoplar variáveis ambientais ao

---

<sup>32</sup> Embasado nas leis da termodinâmica, refere-se ao valor de matéria e energia contidas em cada bem.

<sup>33</sup> A energia livre no esforço de Daly (1968) foi definida como bens livres, que são os fluxos do setor ecológico que possuem preço zero para o setor econômico, o inverso é definido como externalidades (ABDALLAH; MONTOYA, 1998).

sistema econômico. Dentre as possibilidades de aplicações, destacam-se: analisar a incorporação para emissões de carbono e uso de recursos pela economia (CHEN; CHEN, 2010), investigar as emissões de gases de efeito estufa e o uso de recursos naturais (CHEN; CHEN, 2011), explorar a sustentabilidade ecológica setorial (SUN; AN, 2018), avaliar as relações intersetoriais que se estabelecem entre os fluxos da água e os setores da economia (MONTROYA; FINAMORE, 2019), descobrir as ligações entre as atividades econômicas e as perdas do ecossistema conjuntamente com a Análise Emergética (PANG *et al.*, 2019), mensurar a evolução do consumo de água frente aos requerimentos de água virtual e à pegada hídrica (MONTROYA; TALAMINI, 2021), analisar a contribuição setorial do uso de energia renovável e não renovável para as mudanças climáticas globais via comércio internacional (MONTROYA *et al.*, 2021).

Já os modelos híbridos de Insumo-Produto têm se ocupado de análises parciais, envolvendo recursos naturais específicos ou externalidades decorrentes de seus usos. Embora haja avanços metodológicos, pouco se tem avançado na proposição de modelos que analisem a relação entre o valor biofísico e sua integração com os setores do sistema econômico (valor econômico). Na perspectiva das leis da termodinâmica, a análise do processo econômico (GEORGESCU-ROEGEN, 2012) é fundamental para discutir as bases sobre as quais se apoia a sustentabilidade do sistema econômico e, com isso, o valor bioeconômico.<sup>34</sup>

Nesse sentido, a Análise Emergética possibilita contabilizar os fluxos e uso de recursos naturais, permitindo integrar a dimensão física (seJ) com a econômica (\$). Por analogia ao funcionamento do Modelo de Insumo-Produto tradicional, o fluxo de bens econômicos (finais e intermediários) também é sustentado por um fluxo biofísico, que, embora não receba um preço no sistema monetário, é indispensável aos fluxos monetários de bens e serviços (DALY, 1968). Assim, a composição dessas duas metodologias permite mensurar a Pegada Emergética. Esta pode ser entendida como um indicador do valor total de energia consumida ou incorporada no processo de produção de bens e serviços finais de um país, ou seja, o valor bioeconômico.

---

<sup>34</sup> Entende-se que o valor bioeconômico computa os recursos da natureza e da economia utilizados no processo produtivo, assim como os resíduos desse processamento, como emissões e perda de solo (externalidades). Dessa forma, o valor bioeconômico é a soma entre o valor monetário e o valor biofísico.



Desta forma, a problemática deste estudo está em responder: quais setores econômicos apresentam maior Pegada Emergética? Para tanto, os objetivos deste estudo são construir e testar o Modelo de Insumo-Produto Emergético (MIPEm) e avaliar a Pegada Emergética setorial a partir do valor bioeconômico.

A proposição de um MIPEm é adequada para integrar recursos biofísicos à dinâmica do sistema econômico. Para tanto, se utiliza conjuntamente a análise da Matriz Insumo-Produto e a Análise Emergética, estruturadas via Modelo de Insumo-Produto Ecológico a partir do valor bioeconômico de cada setor da economia nacional. Na literatura foram encontradas evidências do uso da Análise Emergética para calcular o desempenho biofísico dos setores da Matriz Insumo-Produto (PANG *et al.*, 2019; SUN; AN, 2018). O Brasil é um país com extensa área territorial, ampla área de incidência de radiação solar, disponibilidade de recursos hídricos e setores primários com relevância econômica. Isso torna o país um bom caso a ser estudado na perspectiva do MIPEm.

Cabe salientar que a análise deste estudo é embasada no valor bioeconômico dos subsistemas econômicos setoriais. Os indicadores calculados permitem dizer que, no processamento de bens na economia, o uso de recursos da natureza (de baixa entropia) e as externalidades (por compensação) que resultam do processo tendem a aumentar o valor bioeconômico e reduzir o estoque biofísico, ao contrário do que acontece com as análises clássicas de valor puramente monetário, em que o uso de recursos da natureza ou as externalidades do processo produtivo não influenciam no valor dos bens no mercado (valor monetário).

#### 4.2 O MODELO DE INSUMO-PRODUTO E SUAS EXTENSÕES

O modelo original de Insumo-Produto de Leontief revelou-se uma ferramenta muito útil, que é utilizada com maestria por muitos estudos para se incorporar à análise econômica a interdependência entre os setores da economia. O modelo de Leontief representa a interdependência do fluxo anual de renda de bens e serviços finais que são sustentados por um fluxo intermediário de mercadorias, os insumos. Ou seja, a informação fundamental que se utiliza na análise do Insumo-Produto é simples: há fluxos de produtos de cada setor industrial como produtor para cada um dos setores, do setor para ele próprio e um segundo fluxo dos setores como consumidores (MILLER; BLAIR, 2009).

As relações fundamentais do Modelo de Insumo-Produto convencional mostram como as vendas dos setores podem ser utilizadas dentro do processo produtivo pelos diversos setores compradores ou pelos componentes da demanda final (famílias, governo, investimento, exportações). Por outro lado, para se produzir são necessários insumos, impostos são pagos, importam-se bens e gera-se valor adicionado (pagamento de salários, remuneração de capital e da terra agrícola), além de gerar emprego (GUILHOTO, 2011).

De forma resumida, as linhas da MIP definem a oferta de cada setor para todos os demais setores da economia, já suas colunas contêm os valores demandados por cada setor junto aos demais setores da economia (MILLER; BLAIR, 2009). Conforme representado na Equação 1, a soma da demanda intermediária e da demanda final é igual à demanda total do produtor do setor  $i$ , matematicamente:

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} + \sum_{s=1}^n Y_{is} = X_i \quad (1)$$

Ou seja, Demanda intermediária + Demanda final = Demanda total.

A Equação 2 mostra que o consumo intermediário mais as contribuições dos fatores de produção (Valor Adicionado) é igual à produção bruta do setor  $j$ . Assim, tem-se que o Consumo Intermediário + Fatores Primários (Valor Adicionado) = Oferta Total:

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} + \sum_{r=1}^n V_{rj} = X_j \quad (2)$$

Por último, a Equação 3 define a condição de equilíbrio, entre a oferta e a demanda (Demanda Total = Oferta Total), para cada um dos setores produtivos da economia:

$$X_i = X_j \quad (3)$$

Entre as características do Modelo de Insumo-Produto, tem-se a suposição de que os coeficientes de produção são fixos, ou seja, os requerimentos de insumos

intermediários têm uma participação fixa em relação à produção bruta dos setores. Os coeficientes técnicos ( $a_{ij}$ ) representam a quantidade do produto do setor  $i$  requerida para produzir uma unidade do produto do setor  $j$ . Matematicamente:

$$a_{ij} = \frac{X_{ij}}{X_j} \quad (4)$$

Isolando  $X_{ij}$ , substituindo (4) em (1) e fazendo  $\sum_{S=1}^n Y_{iS} = Y_i$ , obtém-se o sistema de equações a seguir:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j + Y_i = X_i \quad (5)$$

Assim, o Modelo de Insumo-Produto clássico para estudar as interdependências dos setores de uma economia pode ser expresso matricialmente pela Equação 6, cuja solução é dada pela Equação 7:

$$AX + Y = X \text{ ou } X - AX = Y \quad (6)$$

$$X = (I - A)^{-1}Y \quad (7)$$

Os coeficientes da matriz inversa de Leontief  $(I - A)^{-1}$  determinam os requerimentos totais de produção, ou seja, os requerimentos diretos e indiretos de produção. Baseados em unidades monetárias, os coeficientes indicam as mudanças na produção setorial necessárias para atender a uma determinada variação da demanda final. Cabe salientar que a demanda final do modelo é exógena, o que permite que se analise de forma sistêmica o perfil da estrutura de transações, os efeitos multiplicadores decorrentes da demanda final, como, por exemplo, um aumento de consumo ou investimento (MILLER; BLAIR, 2009).

#### 4.2.1 As extensões do Modelo de Insumo-Produto em unidades físicas

A evolução metodológica permitiu que se formalizassem várias extensões para se tentar incorporar ao modelo tradicional unidades físicas e com isso avaliar a

dimensão ambiental. Dentre estas destaca-se a discussão trazida por Montoya (2020) sobre as extensões feitas por fora ou por dentro do modelo. Este trabalho se vale do Modelo de Insumo-Produto Ecológico, que incorpora as unidades físicas por fora do modelo.

Com mais detalhes, no modelo conhecido como *Modelo de Insumo-Produto Híbrido*, os fluxos monetários (vetor linha) de um setor são substituídos na matriz de transações interindustriais por unidades físicas. A vantagem de utilizar essa versão, que *incorpora as unidades físicas “dentro do modelo”*, pressupõe que os fatores de conversão e os preços sejam diferentes entre os setores, o que torna o modelo consistente (MONTTOYA, 2020; MONTTOYA; FINAMORE, 2019). No Brasil, há estudos que se dedicam a analisar o fluxo hídrico por dentro do modelo, embasados na *National Accounting Matrix including Environmental Accounts* (NAMEA) e no Sistema Integrado de Contas Econômico-Ambientais (SICEA) (ALMEIDA, 2017; BARCELLOS; CARVALHO; CARLO, 2010).

Ao contrário disso, o modelo conhecido como *Insumo-Produto Ecológico* se vale das unidades físicas inseridas, por meio de um vetor linha, como parte dos fatores primários. A vantagem desse procedimento *que incorpora as unidades físicas “fora do modelo”* é permitir, de maneira convencional, calcular a matriz inversa de Leontief, converter as unidades monetárias em unidades físicas (MONTTOYA, 2020; MONTTOYA; FINAMORE, 2019).

Neste estudo, a utilização do Modelo de Insumo-Produto Ecológico e da Análise Emergética conjuntamente está no uso do melhor potencial de ambos (PATTERSON; MCDONALD; HARDY, 2017). A análise de Insumo-Produto permite entender a dinâmica entre os insumos e os bens finais que são processados nos diferentes setores nacionais. Em contraponto, o ponto forte da Análise Emergética é a capacidade de mensurar todo o trabalho realizado pela natureza e pelo processo econômico na produção de bens utilizados pela economia (SICHE *et al.*, 2010).

#### **4.2.2 O Modelo de Insumo-Produto Emergético (MIPEm)**

O MIPEm utiliza a estrutura de uma análise clássica setorial da Matriz Insumo-Produto conjuntamente com a Análise Emergética. Essa técnica é conhecida na literatura como Modelo de Insumo-Produto Ecológico (MONTTOYA, 2020; MONTTOYA; FINAMORE, 2019), onde por fora do modelo calcula-se o vetor de energia total “U”,

que é mensurado pela soma da quantidade de energia requerida da natureza por cada setor, através de um vetor linha de energia requerida da natureza ( $I$ ) mais o vetor dos fluxos dos recursos da economia ( $F$ ), conforme pode ser observado no Quadro 1, a seguir.

Cabe salientar que, embora utilizem-se duas metodologias, não se exige a possibilidade de que estas possam ser melhoradas e ainda persistam limitações. Apesar disso, acredita-se que as vantagens na sua utilização superem essas limitações e permitam, minimamente, visualizar um panorama nacional frente à utilização de recursos ambientais e econômicos e à sustentabilidade desse processo. Para tanto, para aplicar o MIPEm, entender como funciona a dinâmica do Modelo de Insumo-Produto tradicional e a contabilidade emergética é essencial. Ambas são apresentadas na sequência.

Alguns pressupostos são necessários para que se prossiga com os cálculos. Em primeiro lugar, a intensidade dos recursos incorporados é igual para todas as mercadorias do mesmo setor. O segundo pressuposto é assumir que os armazenamentos têm as mesmas intensidades de recursos incorporados que as mercadorias produzidas no ano atual (CHEN, Z. *et al.*, 2010). Por último, as mercadorias importadas têm a mesma intensidade incorporada que as domésticas (SUN; AN, 2018). O vetor de energia " $U$ " foi obtido a partir da elaboração de Presotto e Talamini (2021b). Para este estudo é utilizada a definição de valor bioeconômico, em que o vetor " $U$ " representa o fluxo de energia da natureza somado ao fluxo de energia da economia, que representam a Pegada Emergética Nacional (PEmN).

Em termos de uso de recursos, o Modelo de Insumo-Produto pode incorporar dois conceitos fundamentais: o de *consumo virtual* e o de *pegada total*. O primeiro deles é o consumo de "energia virtual", que corresponde ao consumo total de energia na produção de bens. Inclui aquele consumo "invisível", ou seja, é aquele consumo que está relacionado com a produção de bens, e não com o bem em si. O segundo conceito de Pegada Emergética está diretamente ligado com o primeiro de "energia virtual". Isso porque a apropriação pelas atividades econômicas de recursos da natureza incorporados ou consumidos no processo de produção de bens e serviços finais de um país ficou conhecida como pegada hídrica, ou seja, é um indicador do volume total adicionando a "água virtual", introduzido por Allan (1998) e Hoekstra e Hung (2005). Com essa mesma lógica, este estudo mensura a Pegada Emergética Nacional Total.

**Quadro 1 – Estrutura genérica da Matriz Insumo-Produto Emergética brasileira**

Tipos de recursos	Variáveis	Uso do recurso	Variável Emergética	Vendas/Produto → Compras/Insumo↓	Uso Intermediário				Demanda Final			Demanda total (Y)
					Setor 1	Setor 2	...	Setor n	Consumo	Investimento	Exportação	
Fluxos de energia da economia (F)	Entrada industrial local	Uso industrial local	MN <sup>L</sup>	Setor 1	$z_{11}^L$	$z_{12}^L$	...	$z_{1n}^L$		$d_1^L$	$e_1$	$y_1$
				Setor 2	$z_{21}^L$	$z_{22}^L$	..	$z_{2n}^L$		$d_2^L$	$e_2$	$y_2$
				...	...	...	...	...	...	---	---	---
	Entrada industrial importada	Entrada de importação industrial	MN <sup>M</sup>	Setor 1	$z_{11}^M$	$z_{12}^L$	...	$z_{1n}^M$		$d_1^M$		
				Setor 2	$z_{21}^M$	$z_{22}^L$	..	$z_{2n}^M$		$d_2^M$		
				...	...	...	...	...	...			
	Entrada não industrial	Valor Adicionado	SR + SN	Salários	$v_1^R$	$v_1^R$	...	$v_n^N$				
			MN <sup>L</sup>	impostos, excedentes etc.	$v_1^N$	$v_2^N$	...	$v_n^N$				
	VBP	Valor Bruto de Produção	MN = MN <sup>L</sup> + MN <sup>M</sup> – SR – SN	MN	...	...	...	...				
	Fluxo de energia da natureza (I)	Compensação	Externalidades	SA	Perda de solo	$em_{1i}^{AS}$	...	...	...			
Emissões					$em_{2i}^{AS}$	...	...	$em_n^{AS}$				
Entrada local		Insumos ambientais locais	N	recursos não renováveis	$em_1^N$	$em_2^N$	..	$em_n^N$				
			R	recursos renováveis	$em_1^R$	$em_2^R$	...	$em_n^R$				
Total de Energia (U <sub>T</sub> )			I + F	Valor bioeconômico	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	...	U <sub>n</sub>				

Legenda: (I) = contribuições da natureza; (R) = recursos renováveis; (N) = recursos não renováveis; (SA) = serviços adicionais; (F) = contribuições da economia; (MN) = material não renovável; (MR) = material renovável; (SR) = serviços econômicos renováveis; (SN) = serviços econômicos não renováveis.

Fonte: A autora (2022), com base em Presotto e Talamini (2021b).

Como já mencionado, seguindo a lógica de solução do Modelo de Insumo-Produto tradicional na Equação 7, os coeficientes da matriz inversa de Leontief  $(I - A)^{-1}$  são chamados de requerimentos totais de produção, ou seja, os requerimentos diretos e indiretos de produção. Eles indicam, em unidades monetárias, a produção no setor  $i$  que é necessária para atender uma unidade monetária da demanda final. Nesse caso, a demanda final do modelo é exógena e a ligação com a produção total é via matriz inversa.

Para se mensurar o valor bioeconômico virtual (emergia virtual), utilizou-se da Análise Emergética como suporte, e por isso é necessário detalhar essa relação. A decomposição do consumo total de emergia ( $U_j$ ), a emergia consumida de origem nacional ( $MN^L + SR + SN$ ), de origem importada ( $MN^M$ )<sup>35</sup> e a emergia consumida que é exportada ( $e$ ) para outros países. Com essa decomposição é possível rastrear no processo econômico o consumo de emergia virtual nacional e importada, ou seja, é possível incorporar à análise tradicional o valor biofísico.

Cabe salientar que de forma convencional a emergia é calculada em seJ (joule de energia solar equivalente) e sofre uma modificação, sendo que nesse modelo passa a ser mensurada em seJ/R\$, ou seja, mede a quantidade de emergia incorporada para cada unidade monetária produzida para a demanda final em seJ por reais. No MIPEm ainda se assume que cada setor produz um único produto e todo produto utiliza os mesmos processos e tecnologia, o que significa que cada setor representa apenas um único produto na estrutura do modelo.

Com a inserção do vetor “ $U$ ”, o consumo de emergia setorial é estendido para que se consiga calcular a emergia virtual. Assim, a matriz de coeficientes diretos de emergia virtual pode ser expressa como:

$$\omega_j = \frac{U_j}{X_j} \quad (8)$$

Nessa equação,  $U_j$  é o insumo de emergia do setor  $j$ ,  $X_j$  é o produto bruto do setor  $i$ , e  $\omega_j$  é a quantidade de emergia consumida pelo setor  $i$  para aumentar uma unidade monetária de produção no setor  $j$ .

---

<sup>35</sup> Por entender que uma parcela muito pequena de importação pode ser renovável (3%) (MONTROYA *et al.*, 2021), foi considerado o fluxo monetário de importação como 100% não renovável.

### 4.2.3 Pegada Emergética no MIPEm

O coeficiente de *Energia Virtual Direta* ( $\Omega_j$ ) é mensurado pela multiplicação do vetor dos coeficientes de energia “diagonalizado” ( $\hat{\omega}_j$ ) pela matriz de coeficientes técnicos ( $A$ ), conforme a Equação 9.

$$\Omega_j = \sum_i \hat{\omega}_i A \quad (9)$$

Na equação,  $\Omega_j$  é a quantidade de energia direta consumida pelo setor  $i$  para produzir uma unidade monetária da demanda final do setor  $j$ .

Já o coeficiente ( $\lambda$ ), o total de energia virtual, é calculado multiplicando ( $\hat{\omega}_j$ ) pela matriz inversa de Leontief,  $(I - A)^{-1}$ , matematicamente:

$$\lambda_j = \sum_i \hat{\omega}_i (I - A)^{-1} \quad (10)$$

Na equação,  $\lambda_j$ , conhecido como energia virtual total, representa a energia total consumida pelo setor  $i$  para gerar uma unidade monetária da demanda final no setor  $j$ . Na medida em que a demanda final de um produto está vinculada ao consumo direto e indireto de energia, o coeficiente de energia virtual indireto ( $\rho_j$ ) é obtido pela subtração da energia virtual total ( $\lambda_j$ ) menos a energia virtual direta ( $\Omega_j$ ), ou seja, a energia virtual indireta é a energia utilizada indiretamente do setor  $i$  para produzir uma unidade monetária no setor  $j$  que será destinada para a demanda final.

Sabendo que o Brasil é um grande produtor e exportador de *commodities*, nem toda a energia que é utilizada na produção de bens e serviços permanece em território nacional; ao contrário, com as importações, também é verdadeiro. Se faz necessário então distinguir e decompor o consumo total de energia nacional  $\hat{\omega}_j$ , a energia consumida de origem nacional  $L_j$  e a energia consumida de origem importada  $F_j$ . Conforme já definido por Montoya (2020)<sup>36</sup>, a *Pegada Emergética Interna* pode ser mensurada assim:

<sup>36</sup> Mais detalhes metodológicos da pegada hídrica podem ser visualizados em Montoya *et al.* (2021), Montoya e Finamore (2019) e Montoya e Talamini (2021).



$$L_j = \hat{\omega}_j (I - A)^{-1} f_j \quad (11)$$

De acordo com a equação,  $L_j$  mensura a energia utilizada para o consumo interno da demanda final, produzida no mercado interno no setor  $j$ ,  $f_j$  é o consumo interno do setor  $j$  frente à demanda final, assim não considera as exportações. A *Pegada Emergética Externa*, que representa a energia virtual importada de cada setor da demanda intermediária e cada componente da demanda final, é definida na Equação 12.

$$F_j = S^f + S^{in} \quad (12)$$

Nela  $S^{in}$  representa a energia virtual importada diretamente para a demanda final doméstica, e  $S^f$  é a energia virtual importada para o consumo intermediário induzido pela demanda final doméstica. Assim, a *Pegada Emergética Nacional* é dada pela soma da Pegada Emergética Interna mais a Externa:

$$PEmN = S^f + S^{in} + L_j \quad (13)$$

Para avaliar a distribuição do consumo de energia da demanda final doméstica entre os setores estudados, o índice de intensidade da Pegada Emergética ( $\rho_i$ ) é calculado. Mensura a participação da PEmN do setor  $j$  no total da PEmN dividido pela participação da demanda final doméstica do setor  $j$  na demanda final doméstica total. Assim:

$$\rho_i = \frac{PEmN_j / \sum PEmN_j}{f_j / \sum f_j} \quad (14)$$

#### 4.2.4 Índices de encadeamento

Para encontrar os índices de Rasmussen-Hirschman (HIRSCHMAN, 1958; RASMUSSEN, 1956), o primeiro passo foi obter os coeficientes da matriz inversa de

Leontief como já salientado, nesse caso utilizando o Modelo de Insumo-Produto Ecológico. Depois disso, empregaram-se as Equações 15 e 16:

$$\text{Índice de ligação para trás } (U_j): = \frac{B_{*j}/n}{B^*} \quad (15)$$

$$\text{em que: } B_{*j} = \sum_{i=1}^n b_{ij} \text{ e } B^* = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^j b_{ij}}{n^2}$$

$$\text{Índice de ligação para frente } (U_i): = \frac{B_{*i}/n}{B^*} \quad (16)$$

$$\text{em que: } B_{*i} = \sum_{i=1}^n b_{ij} \text{ e } B^* = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^j b_{ij}}{n^2}$$

O índice de ligação para trás ( $U_j$ ) indica que quanto maior for o valor calculado, maior a quantidade de insumos que uma atividade demanda de outros segmentos. O índice de ligação para frente ( $U_i$ ) significa que quanto maior o valor calculado, maior a quantidade de insumos de uma atividade demandada por outros segmentos. O índice de ligação para frente acima de 1 em determinado setor indica que uma unidade de demanda final faz com que esse setor esteja acima da média no que diz respeito ao provimento de oferta de produtos ( $U_i > 1$ ). Caso isso ocorra com o índice de ligação para trás, implica que a atividade econômica está acima da média em termos de demanda no consumo intermediário ( $U_j > 1$ ). Se o setor possui valores acima de 1 em ambos os indicadores, é considerado chave na economia ( $U_j > 1$  e  $U_i > 1$ ) (GUILHOTO, 2011; GUILHOTO; SESSO FILHO, 2005, 2010).

#### 4.2.5 Fonte de dados da construção da Matriz Insumo-Produto Emergética

Os dados que embasam a construção do vetor de energia foram obtidos de diversas fontes em função da aplicação da Análise Emergética, que necessita de detalhes em relação ao fluxo de energia utilizado e da transformação dos dados em seJ. Podem ser divididos em três grandes bases descritas a seguir. Os dados econômicos são embasados na Matriz Insumo-Produto (IBGE, 2020) e os de uso de recursos naturais por setores são das contas ambientais (GENTY; ARTO; NEUWAHL, 2012). Os recursos renováveis sol e vento foram calculados a partir de dados coletados no site oficial da National Aeronautics and Space Administration (NASA, 2020) e mensurados com base na área utilizada no setor 1 (Área arável, Área de culturas permanentes, Área de pastagens e Área florestal).

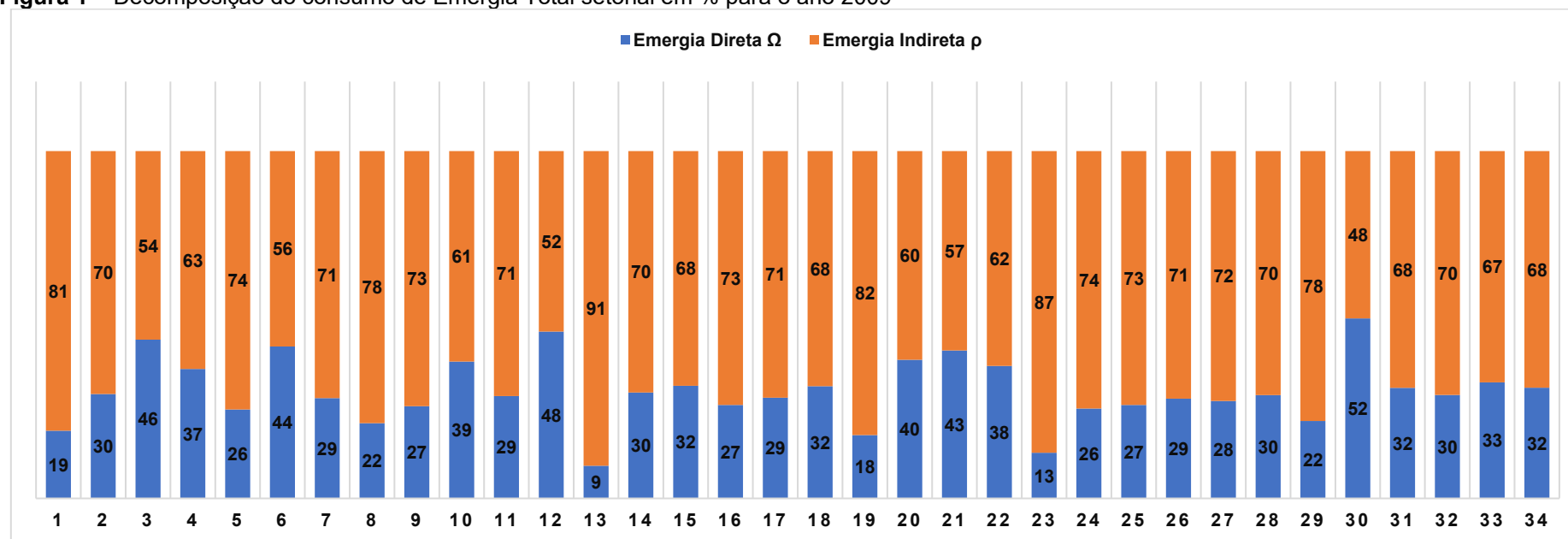
Os dados econômicos da MIP de 2010 são originalmente desagregados em 67 setores. Para a compatibilização de setores, os dados da MIP foram agregados em 34 setores e equiparados aos 34 setores das contas ambientais da World Input-Output Database (WIOD). O Apêndice I, ao final deste capítulo, apresenta os 34 setores considerados. Mais detalhes metodológicos em Presotto e Talamini (2021b).

### 4.3 RESULTADOS

Os resultados da Figura 1 indicam que alguns setores são mais intensivos em incorporação de energia do que outros. Isso pode ser evidenciado pela análise da relação direta *versus* indireta na composição de energia total ( $\lambda$ ). Se o efeito direto ( $\Omega$ ) (representa o consumo inicial de energia por unidade de produção) for pequeno em relação ao efeito indireto ( $\rho$ ) (reflete o consumo de energia decorrente dos fluxos de compras e vendas dos setores para atender à demanda final), a intensidade que este setor exerce pelo consumo de energia é grande. A média setorial é de 31% de consumo direto, menor que os 69% de consumo indireto, ou seja, na sua maioria, os setores possuem um poder maior de pressão por uso de energia e consequentemente sobre a natureza.

Com isso, políticas públicas que induzem o crescimento econômico por si só, sem se preocupar com os estoques de recursos, a sustentabilidade do processo econômico e o desempenho setorial biofísico, podem influenciar o aumento da degradação da natureza em função do consumo indireto e o aumento de emissões não renováveis, que são a maioria do processo econômico nacional, 73% do total da pegada de carbono nacional (MONTROYA *et al.*, 2021), por exemplo.

**Figura 1 – Decomposição do consumo de Energia Total setorial em % para o ano 2009**



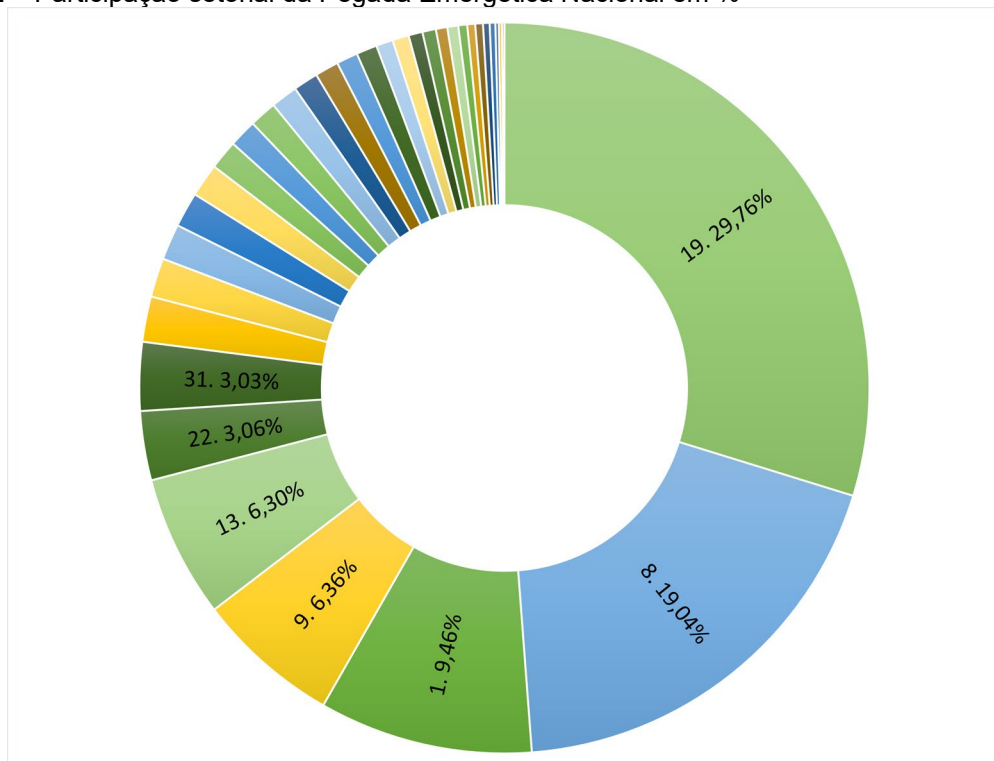
Legenda: Agricultura, caça, silvicultura e pesca (Setor 1), Indústrias extrativas (Setor 2), Alimentos, bebidas e tabaco (Setor 3), Têxteis e produtos têxteis (Setor 4), Couro, couro e calçado (Setor 5), Madeira e produtos de madeira e cortiça (Setor 6), Celulose, papel, impressão e publicação em papel (Setor 7), Indústria de refino (Setor 8), Químicos e produtos químicos (Setor 9), Borracha e plásticos (Setor 10), Outro mineral não metálico (Setor 11), Produção de ferro e metalurgia (Setor 12), Fabricação de produtos com metais básicos (Setor 13), Equipamento elétrico e ótico (Setor 14), Equipamento de transporte (Setor 15), Comércio por atacado e comércio de comissões, exceto veículos automotores e motocicletas (Setor 16), Fabricação de móveis (Setor 17), Manutenção e Reparação de Veículos (Setor 18), Fornecimento de eletricidade, gás e água (Setor 19), Construção (Setor 20), Comércio por atacado e varejo (Setor 21), Transporte terrestre (Setor 22), Transporte hidroviário (Setor 23), Transporte aéreo (Setor 24), Outras atividades de apoio e transporte auxiliar (Setor 25), Hotéis e Restaurantes (Setor 26), Correios e telecomunicações (Setor 27), Intermediações financeiras (Setor 28), Aluguel e outras atividades comerciais (Setor 29), Outras atividades comerciais (Setor 30), Administração pública e defesa, Segurança Social Obrigatória (Setor 31), Educação (Setor 32), Saúde pública e privada (Setor 33), Outras atividades comunitárias, sociais e pessoais (Setor 34).

Fonte: A autora (2022). Mais detalhes no Apêndice I.

A participação setorial da Pegada Emergética Nacional (PEmN) é apresentada na Figura 2. Os cinco setores com a maior participação na PEmN representam conjuntamente 70% do total do uso de recursos bioeconômicos. Esses setores são ligados à indústria em destaque: o Setor 19 – Fornecimento de eletricidade, gás e água tem a maior participação da PEmN, com 29,7% do total, destes, 69% do uso dos recursos são renováveis da economia; o Setor 8 – Indústria de refino, 19% da PEmN, em que 92% do uso dos recursos é de fonte não renovável da natureza; o Setor 9 – Químicos e produtos químicos (6,3% da PEmN); e o Setor 13 – Fabricação de produtos com metais básicos (6,3% da PEmN).

Em paralelo aos demais setores com a maior PEmN, o Setor 1 – Agricultura, caça, silvicultura e pesca, que tem como características a agropecuária e o extrativismo e 9,46% de participação na PEmN, possui 65,3% do total de recursos utilizados oriundos da natureza e são renováveis (R). Dentro dos setores analisados, o Setor 1 é o que possui uma maior participação na PEmN com maior uso de recursos renováveis do que não renováveis.

**Figura 2** – Participação setorial da Pegada Emergética Nacional em %



Legenda: Fornecimento de eletricidade, gás e água (Setor 19), Indústria de refino (Setor 8), Agricultura, caça, silvicultura e pesca (Setor 1), Químicos e produtos químicos (Setor 9), Fabricação de produtos com metais básicos (Setor 13), Transporte terrestre (Setor 22) e Administração pública e defesa; Segurança Social Obrigatória (Setor 31).

Fonte: A autora (2022). Mais detalhes no Apêndice II.

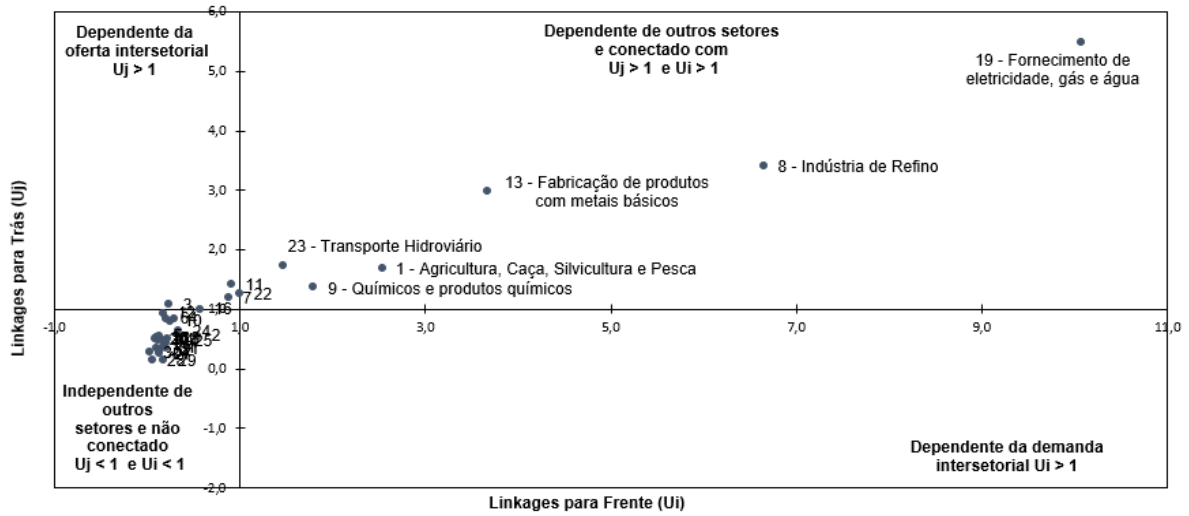
É possível ainda perceber que em alguns setores há uma dependência da importação de valor bioeconômico, como no Setor 8 – Indústria de refino e 9 – Químicos e produtos químicos (15,8% e 16,4% de participação do total nacional importado, respectivamente), Setor 19 – Fornecimento de eletricidade, gás e água (10,5%) e Setor 15 – Equipamento de transporte (6,4%), ou seja, esses setores possuem as maiores participações entre os setores analisados, totalizando 49,1% do total de importação de valor bioeconômico.

Já outros setores se destacam pela exportação de recursos. O Brasil é um exportador líquido de energia virtual com um saldo na balança comercial em exportação de  $3,67E+22$  seJ/R\$, este valor representa cerca de 1,9% da PEmN. As participações mais significativas na exportação total de valor bioeconômico são: Setor 8 – Indústria de refino (23,7%), Setor 1 – Agricultura, caça, silvicultura e pesca (19,4%), Setor 19 – Fornecimento de eletricidade, gás e água (17,3%) e Setor 9 – Químicos e produtos químicos (7,5%); estes setores se destacam com 67,9% do total de valor bioeconômico exportado (Apêndice III).

#### **4.3.1 Índices de encadeamento**

Dentro dos setores em destaque na Figura 3 (no quadrante superior à direita), encontram-se os setores que possuem índice de ligação para frente e para trás maior que 1, que são setores-chave na economia (GUILHOTO, 2011; MONTOYA; FINAMORE, 2019), setores acima da média. Os setores-chave encontrados são o Setor 1, 8, 9, 13, 19, 23, ou seja, esses setores podem ser considerados como setores estratégicos para o crescimento da economia na sua lógica bioeconômica, pois estão acima da média e, por intermédio de suas compras e vendas, estimulam o consumo de energia no processo de crescimento da produção.

**Figura 3 – Índices de Ligações de Rasmussen-Hirschman de consumo de energia**

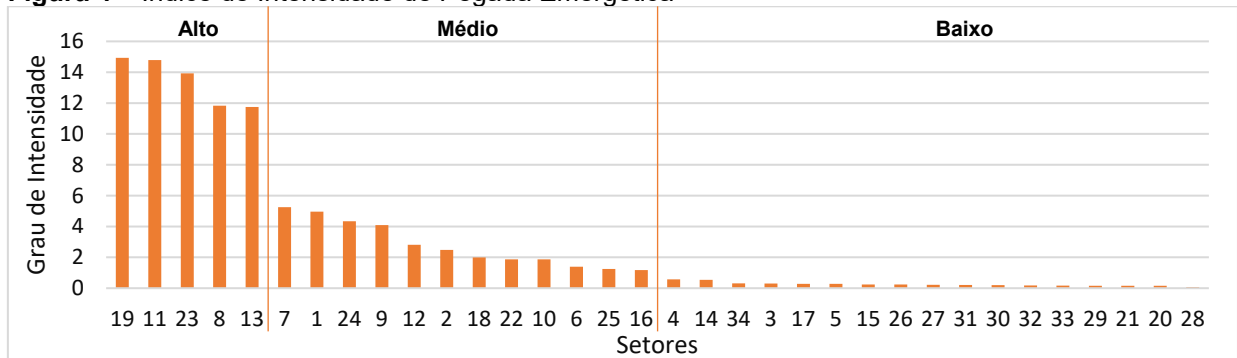


Fonte: A autora (2022).

Todavia, o uso de recursos da natureza, externalidades compensadas e uso dos recursos da economia aumentam o valor bioeconômico, um olhar sistêmico é necessário para superar a lógica exclusiva do crescimento em função dos estoques de recursos físicos, como define a macroeconomia ecológica. Isso porque os setores estratégicos também são responsáveis por serem os setores com maior participação na PEmN, com exceção do Setor 23 – Transporte hidroviário.

A Figura 4 traz o Índice de Intensidade de Pegada Emergética, permite identificar os setores que consomem uma maior quantidade de Energia Virtual (valor bioeconômico) por unidade monetária da demanda final doméstica. Os setores foram divididos em três graus de intensidade: alto (índice acima de 10), médio (índice acima de 1) e baixo (índice menor que 1).

**Figura 4 – Índice de Intensidade de Pegada Emergética**



Legenda: Fornecimento de eletricidade, gás e água (Setor 19), Outro mineral não metálico (Setor 11), Indústria de refino (Setor 8), Transporte hidroviário (Setor 23), Fabricação de produtos com metais básicos (Setor 13), Celulose, papel, impressão e publicação em papel (Setor 7) e Agricultura, caça, silvicultura e pesca (Setor 1).

Fonte: A autora (2022).

Os resultados permitem entender que os maiores índices são relacionados a atividades industriais: Setor 19 – Fornecimento de eletricidade, gás e água (14,93), Setor 11 – Outro mineral não metálico (14,78), Setor 8 – Indústria de refino (11,83), Setor 13 – Fabricação de produtos com metais básicos (11,14), e um é relacionado a características de serviços: Setor 23 – Transporte hidroviário (13,92).

Assim, esses setores se caracterizam com alto grau de intensidade de consumo de valor bioeconômico, pois consomem em média uma parcela 13 vezes maior de Energia Virtual por unidade monetária da demanda final doméstica, ou seja, são os setores que menos remuneram o valor biofísico, pois utilizam uma parcela maior de valor bioeconômico (mensurado em seJ) por unidade de demanda final (valor monetário em R\$). Logo, fica evidente a apropriação e os detalhes dos fluxos de valor bioeconômico entre a economia e a natureza.

Ao contrário disso, os setores menos intensivos no consumo de energia virtual por unidade produzida de demanda final ou mais racionais no consumo de valor bioeconômico são os que possuem menor Índice de Intensidade de Pegada Emergética, com destaque para os setores com atividades ligadas aos serviços, como: Setor 28 – Intermediações financeiras (0,07), Setor 20 – Comércio varejista, exceto veículos automotores e motocicletas; Reparação de bens domésticos (0,15), Setor 29 – Aluguel e outras atividades comerciais (0,15), Setor 33 – Saúde e Serviço Social (0,17), com exceção do Setor 20 – Construção (0,15), com características industriais. Esses setores se caracterizam por remunerar uma parcela maior do valor biofísico, pois são os setores menos intensivos no consumo de valor bioeconômico por unidade produzida para a demanda final.

O Setor 1 – Agricultura, caça, silvicultura e pesca (4,96) e o Setor 2 – Indústrias extrativas (2,48), ligados a atividades agropecuárias e extrativistas, são setores que se caracterizam por serem de médio grau de intensidade de Pegada Emergética e consomem um grau médio de quantidade de Energia Virtual por unidade monetária da demanda final doméstica.



## 4.4 DISCUSSÕES

### 4.4.1 A sustentabilidade e a Pegada Emergética

No que tange ao uso dos recursos e seus estoques embasado na incapacidade de expansão de produção infinita (MAYUMI, 2022), o uso de recursos como indutor do crescimento deve ser feito com um olhar sistêmico. Isso porque os setores tidos como estratégicos para o crescimento do valor bioeconômico são os que possuem também as maiores participações na PEmN. Conjuntamente, esses setores representam 70% do total da PEmN, ou seja, para o alcance da sustentabilidade e do desenvolvimento sustentável, são necessárias estratégias ligadas ao mínimo EROI sustentável (HALL; BALOGH; MURPHY, 2009), para que assim se reduza o uso de recursos através da eficiência energética e se prolonguem os estoques no tempo.

Em contraponto, os setores com menor Pegada Emergética são setores ligados a atividades industriais e de serviços, juntos não chegam a 1% da Pegada Emergética Nacional: Setor 6 – Madeira e produtos de madeira (0,1%), Setor 30 – Atividades Imobiliárias (0,14%), Setor 5 – Couro, couro e calçado (0,14%), Setor 23 – Transporte hidroviário (0,28%) e Setor 17 – Fabricação de móveis (0,29%).

Assim, fica evidente que o Setor 1 contribui como setor-chave sendo exportador de valor bioeconômico renovável. Ao contrário disso, sabe-se que, em inúmeros estudos clássicos que analisam somente o valor monetário, o Setor 1 é classificado como um setor primário que não teria potencial para induzir o crescimento e tem reduzida participação na composição do PIB nacional (BATISTA, 2019). Entre esses estudos clássicos, o Setor 1 não é uma evidência de um setor-chave nos dados de 2013 (BATISTA; HEGELE, 2018), o mesmo ocorre para dados de 2005 (GUILHOTO; SESSO FILHO, 2010), de 1994 e 1996 (GUILHOTO; SESSO FILHO, 2005).

As divergências dos resultados encontrados em análises clássicas e na análise deste estudo são relevantes, pois comprovam que análises puramente embasadas no valor monetário têm resultados diferentes nos setores vistos como estratégicos para a indução do crescimento bioeconômico *versus* econômico. É importante salientar que, neste estudo, ainda é preciso vincular alguns setores, apesar de serem estratégicos para o crescimento bioeconômico, à análise sistêmica, como *systemic decoupling*, com o olhar voltado à sustentabilidade e ao desenvolvimento sustentável.

Isso porque alguns setores possuem alta PEmN e são dependentes da apropriação de energia não renovável, como os resultados evidenciaram no Setor 8 – Indústria de refino. Ou seja, setores tidos como estratégicos são os que mais consomem valor bioeconômico e, com isso, valor biofísico. Assim, deve haver uma preocupação com a eficiência desses recursos para que se prolongue o uso dos recursos no tempo e se incentive o uso de recursos renováveis, para minimamente colocar a macroeconomia ecológica em prática.

Outra questão importante a ser explorada em função de desafios enfrentados de regulação em cada país (GILLENWATER *et al.*, 2007) está relacionada à capacidade do Brasil de exportar bens primários, vinculados ao agronegócio, que são em sua maioria produzidos com o uso de recursos renováveis (MONTROYA *et al.*, 2021). Em função do *gap* entre o valor monetário e bioeconômico, é provável que o Brasil esteja deixando de mensurar e contabilizar parte do valor monetário quando não se considera uma “*commodity* ambiental”<sup>37</sup> ou “capital verde”, como o sequestro de carbono, por exemplo.

Essas evidências são corroboradas pelos resultados encontrados no Índice de Intensidade de Pegada Emergética, em que, por exemplo, o Setor 19 – Fornecimento de eletricidade, gás e água, o Setor 23 – Transporte Hidroviário, o Setor 11 – Outro mineral não metálico, o Setor 8 – Indústria de refino são mais intensivos em valor bioeconômico, indicando que utilizam uma maior quantidade de valor bioeconômico por unidade de demanda final (mensurado em R\$), ou seja, não se remunera parte do valor biofísico (seJ). Tais evidências corroboram a existência de um *gap*, uma vez que se utiliza uma parcela maior de valor bioeconômico para cada unidade de demanda final (valor monetário) nos setores com índices de alta e média intensidade de energia virtual.

#### **4.4.2 Os avanços e as potencialidades metodológicas**

A estruturação do MIPEm permitiu uma evolução e contribuição metodológica significativa no que se refere ao conceito de *systemic decoupling*<sup>38</sup> aplicado. Ainda estendeu a análise realizada por Sun e An (2018), no sentido de agregar insumos da natureza (sol, vento e chuvas) ao processo, avançou o que já foi aplicado por Chen e

---

<sup>37</sup> Pode ser considerada como mercadoria originada de recursos naturais (ROCHA, 2003).

<sup>38</sup> Mais detalhes em Presotto e Talamini (2021a).

Chen (2010), formulando indicadores emergéticos setoriais em Presotto e Talamini (2021b) e incluiu as externalidades (AGOSTINHO; PEREIRA, 2013; ALLEGRETTI, 2017) por compensação de perda de solo e emissões de CO<sub>2</sub>. Outro aspecto é que cada vez mais fica claro que somente uma metodologia ou uma área não são suficientes para analisar um problema tão complexo como o alcance do desenvolvimento sustentável.

A metodologia utilizada minimiza os problemas em relação à utilização de recursos da natureza não mensurados na visão clássica de Leontief, fortemente criticado por Georgescu-Roegen (MAYUMI, 2022). Há ainda espaço para avanços no que se refere ao uso dos estoques e com isso a incapacidade de expansão de produção infinita (MAYUMI, 2022). Apesar de se entender que políticas públicas podem induzir o uso de recursos renováveis, e se prolongue o uso dos recursos no tempo, não fica garantida a sua não finitude em função da expansão de consumo.

Embora o modelo não consiga expandir a análise até o estoque de recursos, há um avanço por se utilizar conjuntamente uma condição da análise sistêmica como suporte, que vai além das análises tradicionais frente aos resultados encontrados. Assim, os setores-chave para o desenvolvimento sustentável neste estudo são aqueles que, além de impulsionar o crescimento da produção de valor bioeconômico e, com isso, do emprego e da renda, precisam ainda sustentar uma segunda condição: a de utilizar predominantemente o uso de recursos renováveis em relação aos não renováveis e, com isso, minimamente o uso de recursos no tempo.

A questão intertemporal do modelo de Leontief (MAYUMI, 2022) está relacionada com a irreversibilidade do processo (ARTUZO *et al.*, 2021), vale lembrar que cada período deve ser analisado como um recorte. Nessa mesma perspectiva, outro desafio são os preços relativos entre países no que se refere às importações e exportações ou as análises entre países, pois, apesar de o padrão ser o dólar americano, um dólar tem diferente poder de compra entre países analisados (GUILHOTO *et al.*, 2021).

Cabe salientar que a defasagem dos dados pode ser definida como uma limitação a este estudo, porém a Análise Emergética necessita de dados primários, os quais precisam estar vinculados a setores, tornando-se um desafio para novas bases de dados. Assim cada setor pode ser considerado um subsistema em análise.

## 4.5 CONCLUSÕES

O desafio de mensurar a PEmN frente à utilização de recursos pelo subsistema econômico, sejam eles da natureza ou da economia, foi atendido, a partir da lógica do valor bioeconômico. Da mesma forma, a estruturação metodológica se mostrou robusta na construção do MIPEm para avaliar a problemática do desempenho setorial via Pegada Emergética.

Um ponto importante é que na elaboração de políticas públicas para o desenvolvimento sustentável deve-se preocupar não somente com o consumo de energia direto, mas sim com a total, visto que em todos os setores a participação da energia indireta é maior que a direta. Assim, economizar recursos no Setor 1, por exemplo, deriva de um esforço e coordenação de toda a cadeia produtiva; a maior demanda de energia está “fora” da porteira. Outro ponto fundamental é que, se o olhar não for sistêmico na busca do desenvolvimento sustentável, com o foco na eficiência energética e em quais recursos estão sendo utilizados no processo produtivo (renováveis ou não), muito pouco se estará avançando no sentido das leis da termodinâmica, visto que há uma perda irreversível no processo produtivo, já que a matéria e a energia existentes são inevitavelmente transformadas, limitando os recursos de baixa entropia.

Os resultados encontrados comprovam a tese de que há um *gap* entre o valor monetário e o valor biofísico. Isso porque na análise embasada no valor bioeconômico há resultados diferentes dos que são encontrados nas análises que consideram somente o valor monetário. Assim, é como se existisse um desacoplamento, no sentido de que os preços mensurados pelo valor monetário estão desacoplados dos recursos utilizados. De tal modo, é possível afirmar que o desenvolvimento sustentável deve ser alcançado a partir do acoplamento do valor biofísico ao valor monetário, por meio do valor bioeconômico.

Fica evidente que as atividades econômicas influenciam o consumo de energia e valor bioeconômico. Destaca-se que a interação entre economia e natureza deve ser analisada de forma sistêmica, os esforços em políticas públicas para o desenvolvimento sustentável devem estar focados em incentivar os setores-chave e estes devem estar comprometidos em transformar suas produções cada vez mais sustentáveis e eficientes, para que se prolongue ao máximo o uso dos recursos no tempo.

As limitações do estudo estão em mensurar a Análise Emergética da forma mais adequada possível. Apesar de terem sido necessárias algumas generalizações para que se chegasse a um valor de uso de recursos, elas são consideradas um avanço, pois permitiram que a Análise Emergética fosse viável e aplicada no nível macroeconômico. Em análises futuras há um espaço para análises com mais de um período, proporcionando uma ótica de lógica de evolução tecnológica e apropriação de PEmN ao longo do tempo.

## REFERÊNCIAS

ABDALLAH, P. R.; MONTOYA, M. A. Perspectivas da utilização de modelos insumo-produto na administração do meio ambiente. *In*: MONTOYA, M. A. (org.). **Relações intersetoriais do Mercosul e da economia brasileira**: uma abordagem de equilíbrio geral do tipo insumo-produto. Passo Fundo: EDIUPF, 1998.

AGOSTINHO, F.; PEREIRA, L. Support area as an indicator of environmental load: comparison between embodied energy, ecological footprint, and emergy accounting methods. **Ecological Indicators**, New York, v. 24, p. 494-503, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.08.006>. Acesso em: 18 jan. 2022.

ALLAN, J. A. Virtual water: a strategic resource. **Groundwater**, Richmond, v. 36, n. 4, p. 545-546, 1998.

ALLEGRETTI, G. **Insect as feed**: uma análise bioeconômica do uso de insetos como fonte proteica alternativa à avicultura de corte brasileira. 2017. Tese (Doutorado em Agronegócios) – Programa de Pós-Graduação em Agronegócios, Programa de Pós-Graduação em Agronegócios, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ALMEIDA, V. P. **A contabilidade hídrica do Brasil**: um ajuste das contas nacionais ambientais. 2017. Dissertação (Mestrado em Economia e Desenvolvimento) – Programa de Pós-Graduação em Economia e Desenvolvimento, Centro de Ciências Sociais e Humanas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

ARTUZO, F. D. *et al.* Science of the total environment emergy unsustainability index for agricultural systems assessment: a proposal based on the laws of thermodynamics. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 759, [art.] 143524, [p. 1-13], 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143524>. Acesso em: 20 jan. 2022.

BARCELLOS, F. C.; CARVALHO, P. G.; CARLO, A. **Contabilizando a sustentabilidade**: principais abordagens. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

BATISTA, A. R. A. **Estrutura produtiva brasileira na era dos serviços: uma análise baseada na Matriz de Insumo-Produto**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Econômicas) – Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.

BATISTA, A. R. A.; HEGELE, F. A importância do setor de serviços na economia brasileira: uma análise baseada em setores-chave para 2013. *In*: KON, A.; BORELLI, E. **Economia brasileira em debate: subsídios ao desenvolvimento**. São Paulo: Blucher, 2018. p. 187-206.

BORGES, R. E. S.; LOPES, T. C. Breve histórico das tabelas de insumo-produto no Brasil. **Revista de Economia Política e História Econômica**, São Paulo, n. 33, p. 23, 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/308144394\\_Breve\\_historico\\_das\\_tabelas\\_de\\_insumo-produto\\_no\\_Brasil](https://www.researchgate.net/publication/308144394_Breve_historico_das_tabelas_de_insumo-produto_no_Brasil). Acesso em: 19 jan. 2022.

BROWN, M. T.; BRANDT-WILLIAMS, S. (ed.). **Emergy synthesis**. Gainesville, FL: University of Florida, 2000.

CHEN, G. Q.; CHEN, Z. M. Greenhouse gas emissions and natural resources use by the world economy: ecological input-output modeling. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 222, n. 14, p. 2362-2376, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.11.024>. Acesso em: 19 jan. 2022.

CHEN, G. Q.; CHEN, Z. M. Carbon emissions and resources use by chinese economy 2007: a 135-sector inventory and input-output embodiment. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, Amsterdam, v. 15, n. 11, p. 3647-3732, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2009.12.024>. Acesso em: 18 jan. 2022.

CHEN, Z. M. *et al.* Ecological input-output modeling for embodied resources and emissions in chinese economy 2005. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, Amsterdam, v. 15, n. 7, p. 1942-1965, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2009.08.001>. Acesso em: 18 jan. 2022.

DALY, H. E. Trump's growthism: its roots in neoclassical economic theory. **Real-World Economics Review**, Boston, n. 78, p. 86-97, 2017. Disponível em: <http://www.paecon.net/PAERReview/issue78/Daly78.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2022.

DALY, H. E. On economics as a life science. **Journal of Political Economy**, Chicago, v. 76, n. 3, p. 392-406, 1968. Disponível em: [http://www.uvm.edu/~jfarley/EEseminar/readings/Economics as life science.pdf](http://www.uvm.edu/~jfarley/EEseminar/readings/Economics%20as%20life%20science.pdf). Acesso em: 19 jan. 2022.

GENTY, A.; ARTO, I.; NEUWAHL, F. **Final database of environmental satellite accounts: technical report on their compilation**. [Luxembourg]: European Union, 2012. WIOD–World Input-Output Database. Deliverable 4.6, Documentation.

GEORGESCU-ROEGEN, N. **O decrescimento: entropia, ecologia, economia**. São Paulo: Senac São Paulo, 2012.

GIAMPIETRO, M. On the circular bioeconomy and decoupling: implications for sustainable growth. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 162, p. 143-156, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.05.001>. Acesso em: 17 jan. 2022.

GILLENWATER, M. *et al.* Policing the voluntary carbon market. **Nature Climate Change**, London, v. 1, n. 711, p. 85-87, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/climate.2007.58>. Acesso em: 19 jan. 2022.

GUILHOTO, J. J. M. **Análise de insumo-produto: teoria e fundamentos**. [S. l.]: 2011. Disponível em: [https://mpira.ub.uni-muenchen.de/32566/2/MPRA\\_paper\\_32566.pdf](https://mpira.ub.uni-muenchen.de/32566/2/MPRA_paper_32566.pdf). Acesso em: 19 jan. 2022.

GUILHOTO, J. J. M. *et al.* **Methodology for estimation of energy physical supply and use tables based on IEA's world energy balances**. Paris: OECD Publishing, 2021. (OECD Science, Technology and Industry Working Papers, n. 13). Disponível em: <https://doi.org/10.1787/d3058f43-en>. Acesso em: 19 jan. 2022.

GUILHOTO, J. J. M.; SESSO FILHO, U. A. Estimação da Matriz Insumo-Produto utilizando dados preliminares das contas nacionais: aplicação e análise de indicadores econômicos para o Brasil em 2005. **Revista Economia & Tecnologia**, Curitiba, v. 6, n. 4, p. 53-62, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/ret.v6i4.26912>. Acesso em: 19 jan. 2022.

GUILHOTO, J. J. M.; SESSO FILHO, U. A. Estimação da Matriz Insumo-Produto a partir de dados preliminares das contas nacionais. **Economia Aplicada**, São Paulo, v. 9, n. 2, p. 277-299, 2005.

HALL, C. A. S. Migration and metabolism in a temperate stream ecosystem. **Ecology**, Brooklyn, v. 53, n. 4, p. 585-604, 1972. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/1934773>. Acesso em: 19 jan. 2022.

HALL, C. A. S.; BALOGH, S.; MURPHY, D. J. R. What is the minimum EROI that a sustainable society must have? **Energies**, Torrance, v. 2, n. 1, p. 25-47, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en20100025>. Acesso em: 16 jan. 2022.

HIRSCHMAN, A. O. **The strategy of economic development**. New Haven: Yale University Press, 1958.

HOEKSTRA, A. Y.; HUNG, P. Q. Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade. **Global Environmental Change**, Oxford, v. 15, n. 1, p. 45-56, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.06.004>. Acesso em: 19 jan. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS (IBGE). **Matriz de insumo-produto**. Rio de Janeiro: IBGE, [2020?]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9085-matriz-de-insumo-produto.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 19 jan. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS (IBGE). **Censo Agro 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: [https://censoagro2017.ibge.gov.br/templates/censo\\_agro/resultadosagro/index.html](https://censoagro2017.ibge.gov.br/templates/censo_agro/resultadosagro/index.html). Acesso em: 19 jan. 2022.

MAYUMI, K. T. Georgescu-Roegen's bioeconomics. In: RAMOS-MARTIN, J.; ROSA, E. P. (ed.). **Encyclopedia of ecological economics**. [Cheltenham: Edward Elgar Publishing], 2022. The following article is included as an entry in Encyclopedia of Ecological Economics, (Edward Elgar in 2022). Disponível em: [https://www.academia.edu/59850626/Georgescu\\_Roegens\\_Bioeconomics](https://www.academia.edu/59850626/Georgescu_Roegens_Bioeconomics). Acesso em: 18 jan. 2022.

MILLER, R. E.; BLAIR, P. **Input-output analysis foundations and extensions**. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

MONTOYA, M. A. **A pegada hídrica da economia brasileira e a balança comercial de água virtual: uma análise insumo-produto**. Passo Fundo: UPF, 2020. (Texto para discussão, n. 01/2020). Disponível em: [https://www.upf.br/\\_uploads/Conteudo/cepeac/textos-discussao/01-2020.pdf](https://www.upf.br/_uploads/Conteudo/cepeac/textos-discussao/01-2020.pdf). Acesso em: 17 jan. 2022.

MONTOYA, M. A. *et al.* Renewable and non-renewable in the energy-emissions-climate nexus: brazilian contributions to climate change via international trade. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 312, [art.] 127700, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127700>. Acesso em: 19 jan. 2022.

MONTOYA, M. A.; FINAMORE, E. B. As relações intersetoriais dos recursos hídricos na economia brasileira. **Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos**, Curitiba, v. 13, n. 4, p. 513-536, 2019.

MONTOYA, M. A.; TALAMINI, E. **Mudança tecnológica no consumo de “água virtual” e a pegada hídrica na economia brasileira: uma análise insumo-produto ecológico**. Passo Fundo: UPF, 2021.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **The Power project**. Hampton, [2020?]. Disponível em: <https://power.larc.nasa.gov/>. Acesso em: 19 jan. 2022.

ODUM, H. T. **Environmental accounting: energy and environmental decision making**. New York: Wiley, 1996.

PANG, M. *et al.* Understanding the linkages between production activities and ecosystem degradation in China: an ecological input-output model of 2012. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 218, p. 975-984, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.299>. Acesso em: 19 jan. 2022.



PATTERSON, M.; MCDONALD, G.; HARDY, D. Is there more in common than we think? Convergence of ecological footprinting, emergy analysis, life cycle assessment and other methods of environmental accounting. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 362, p. 19-36, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.07.022>. Acesso em: 19 jan. 2022.

PRESOTTO, E.; TALAMINI, E. A sustentabilidade do subsistema econômico e a aproximação com o valor biofísico. *In*: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA ECOLÓGICA, 14., 2021. **Anais [...]**. Campinas: Sociedade Brasileira de Economia Ecológica, 2021a.

PRESOTTO, E.; TALAMINI, E. O valor biofísico e o desempenho dos subsistemas da matriz insumo-produto. *In*: ENCONTRO DE ECONOMIA DA REGIÃO SUL, 24, Florianópolis, 2021. **Anais [...]**. Florianópolis: ANPEC SUL, 2021b. Disponível em: [https://www.anpec.org.br/sul/2021/submissao/files\\_l/i4-72c7e62ce0deab59cf5ede0047ac33b4.pdf](https://www.anpec.org.br/sul/2021/submissao/files_l/i4-72c7e62ce0deab59cf5ede0047ac33b4.pdf). Acesso em: 19 jan. 2022.

RASMUSSEN, P. N. **Studies in inter-sectorial relations**. Amsterdam: København, 1956.

ROCHA, M. T. **Aquecimento global e o mercado de carbono: uma aplicação do modelo CERT**. 2003. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

SICHE, R. *et al.* Convergence of ecological footprint and emergy analysis as a sustainability indicator of countries: Peru as case study. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, Amsterdam, v. 15, n. 10, p. 3182-3192, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cnsns.2009.10.027>. Acesso em: 18 jan. 2022.

SUN, X.; AN, H. Emergy network analysis of chinese sectoral ecological sustainability. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 174, p. 548-559, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.228>. Acesso em: 17 jan. 2022.

WIELAND, H. *et al.* The PIOLab: Building global physical input-output tables in a virtual laboratory. **Journal of Industrial Ecology**, Cambridge, p. 1-21, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jiec.13215>. Acesso em: 19 jan. 2022.

YANG, Y.; SUH, S. Environmental impacts of products in China. **Environmental Science & Technology**, Washington, DC, v. 45, n. 9, p. 4.102-4.109, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es103206g>. Acesso em: 19 jan. 2022.

### APÊNDICE I – Decomposição do consumo de energia total setorial, Brasil, em (seJ/R\$) e % para o ano 2009

nº	Setores	Energia	Energia	Energia	Energia	Energia	Energia
		direta	indireta	total	direta	indireta	total
		$\Omega$	$\rho$	$\lambda$	$\Omega$	$\rho$	$\lambda$
1	Agricultura, caça, silvicultura e pesca	2,47E+17	1,02E+18	1,27E+18	19%	81%	100%
2	Indústrias extrativas	1,27E+17	2,95E+17	4,22E+17	30%	70%	100%
3	Alimentos, bebidas e tabaco	3,71E+17	4,41E+17	8,12E+17	46%	54%	100%
4	Têxteis e produtos têxteis	2,37E+17	3,99E+17	6,36E+17	37%	63%	100%
5	Couro, couro e calçado	1,07E+17	3,11E+17	4,18E+17	26%	74%	100%
6	Madeira e produtos de madeira e cortiça	2,78E+17	3,57E+17	6,35E+17	44%	56%	100%
7	Celulose, papel, impressão e publicação em papel	2,60E+17	6,42E+17	9,02E+17	29%	71%	100%
8	Indústria de refino	5,52E+17	2,00E+18	2,55E+18	22%	78%	100%
9	Químicos e produtos químicos	2,73E+17	7,56E+17	1,03E+18	27%	73%	100%
10	Borracha e plásticos	2,39E+17	3,67E+17	6,06E+17	39%	61%	100%
11	Outro mineral não metálico	3,15E+17	7,54E+17	1,07E+18	29%	71%	100%
12	Produção de ferro e metalurgia	3,39E+17	3,66E+17	7,05E+17	48%	52%	100%
13	Fabricação de produtos com metais básicos	2,11E+17	2,03E+18	2,24E+18	9%	91%	100%
14	Equipamentos eletrônicos e óticos	1,12E+17	2,55E+17	3,67E+17	30%	70%	100%
15	Equipamento de transporte	1,28E+17	2,66E+17	3,93E+17	32%	68%	100%
16	Comércio por atacado e comércio de comissões, exceto veículos automotores e motocicletas	2,04E+17	5,53E+17	7,57E+17	27%	73%	100%
17	Fabricação de móveis	1,06E+17	2,60E+17	3,67E+17	29%	71%	100%
18	Manutenção e reparação de veículos;	1,25E+17	2,61E+17	3,86E+17	32%	68%	100%
19	Fornecimento de eletricidade, gás e água	7,51E+17	3,37E+18	4,12E+18	18%	82%	100%
20	Construção	1,52E+17	2,28E+17	3,80E+17	40%	60%	100%
21	Comércio por atacado e varejo	1,09E+17	1,47E+17	2,57E+17	43%	57%	100%

n°	Setores	Energia	Energia	Energia	Energia	Energia	Energia
		direta	indireta	total	direta	indireta	total
		$\Omega$	$\rho$	$\lambda$	$\Omega$	$\rho$	$\lambda$
22	Transporte terrestre	3,61E+17	5,86E+17	9,47E+17	38%	62%	100%
23	Transporte hidroviário	1,72E+17	1,14E+18	1,31E+18	13%	87%	100%
24	Transporte aéreo	1,25E+17	3,58E+17	4,83E+17	26%	74%	100%
25	Outras atividades de apoio e transporte auxiliar	9,74E+16	2,65E+17	3,62E+17	27%	73%	100%
26	Hotéis e restaurantes	1,14E+17	2,83E+17	3,97E+17	29%	71%	100%
27	Correios e telecomunicações	5,28E+16	1,35E+17	1,88E+17	28%	72%	100%
28	Intermediações financeiras	3,10E+16	7,31E+16	1,04E+17	30%	70%	100%
29	Aluguel e outras atividades comerciais	2,31E+16	8,05E+16	1,04E+17	22%	78%	100%
30	Outras atividades comerciais	1,08E+17	1,00E+17	2,08E+17	52%	48%	100%
31	Administração pública e defesa; Segurança Social Obrigatória	8,96E+16	1,92E+17	2,81E+17	32%	68%	100%
32	Educação	6,90E+16	1,63E+17	2,32E+17	30%	70%	100%
33	Saúde pública e privada	8,64E+16	1,72E+17	2,59E+17	33%	67%	100%
34	Outras atividades comunitárias, sociais e pessoais	1,06E+17	2,28E+17	3,34E+17	32%	68%	100%
<b>Média setorial</b>		<b>1,96E+17</b>	<b>5,54E+17</b>	<b>7,51E+17</b>	<b>31%</b>	<b>69%</b>	<b>100%</b>

Fonte: A autora (2022).

**APÊNDICE II – Composição pegada emergética setorial (S), Brasil, em (seJ/R\$) e % para o ano 2009**

nº	Setores	Importação de energia virtual					Participação setorial PEmN (%)
		Pegada emergética interna L (%)	Demanda final importação Sf (%)	Consumo intermediário importação Sin (%)	Total de pegada emergética externa F (%)= Sin+Sf	Pegada emergética nacional PEmN (seJ/R\$)	
1	Agricultura, caça, silvicultura e pesca	93,2%	4,0%	2,8%	6,8%	8,75E+22	9,46%
2	Indústrias extrativas	90,2%	4,0%	5,8%	9,8%	5,55E+22	0,95%
3	Alimentos, bebidas e tabaco	75,9%	3,5%	20,6%	24,1%	4,08E+22	2,01%
4	Têxteis e produtos têxteis	66,5%	6,3%	27,3%	33,5%	1,45E+22	0,92%
5	Couro, couro e calçado	63,8%	4,9%	31,3%	36,2%	2,51E+21	0,15%
6	Madeira e produtos de madeira e cortiça	83,4%	4,5%	12,2%	16,6%	2,03E+21	0,11%
7	Celulose, papel, impressão e publicação em papel	89,5%	4,0%	6,5%	10,5%	1,00E+22	1,21%
8	Indústria de refino	88,5%	4,1%	7,4%	11,5%	2,00E+23	19,04%
9	Químicos e produtos químicos	64,1%	9,8%	26,2%	35,9%	9,60E+22	6,36%
10	Borracha e plásticos	51,2%	5,1%	43,7%	48,8%	1,15E+22	0,60%
11	Outro mineral não metálico	89,9%	2,2%	7,8%	10,1%	1,02E+22	1,55%
12	Produção de ferro e metalurgia	70,3%	8,6%	21,2%	29,7%	1,68E+22	0,35%
13	Fabricação de produtos com metais básicos	89,4%	7,6%	3,0%	10,6%	3,84E+22	6,30%
14	Equipamentos eletrônicos e óticos	39,6%	10,4%	50,0%	60,4%	1,90E+22	1,19%
15	Equipamento de transporte	39,3%	8,0%	52,7%	60,7%	2,32E+22	1,48%
16	Comércio por atacado e comércio de comissões, exceto veículos automotores e motocicletas	58,4%	18,1%	23,6%	41,6%	9,59E+21	0,62%
17	Fabricação de móveis	58,5%	5,8%	35,6%	41,5%	4,85E+21	0,29%
18	Manutenção e reparação de veículos	53,2%	3,3%	43,5%	46,8%	8,87E+21	0,34%
19	Fornecimento de eletricidade, gás e água	95,1%	2,5%	2,5%	4,9%	2,31E+23	29,76%
20	Construção	66,9%	0,1%	33,0%	33,1%	3,40E+22	1,59%
21	Comércio por atacado e varejo	75,0%	1,9%	23,0%	25,0%	5,90E+22	1,72%

		Importação de energia virtual					
nº	Setores	Pegada energética interna L (%)	Demanda final importação Sf (%)	Consumo intermediário importação Sin (%)	Total de pegada energética externa F (%)= Sin+Sf	Pegada energética nacional PEmN (seJ/R\$)	Participação setorial PEmN (%)
22	Transporte terrestre	91,0%	4,2%	4,8%	9,0%	4,42E+22	3,06%
23	Transporte hidroviário	90,4%	5,3%	4,3%	9,6%	2,18E+21	0,25%
24	Transporte aéreo	45,5%	3,6%	50,9%	54,5%	1,02E+22	0,51%
25	Outras atividades de apoio e transporte auxiliar	91,1%	4,0%	4,9%	8,9%	9,38E+21	0,48%
26	Hotéis e restaurantes	63,4%	2,8%	33,8%	36,6%	1,33E+22	0,74%
27	Correios e telecomunicações	77,6%	2,6%	19,8%	22,4%	1,99E+22	0,73%
28	Intermediações financeiras	79,9%	1,4%	18,7%	20,1%	2,91E+22	0,39%
29	Aluguel e outras atividades comerciais	92,9%	1,6%	5,5%	7,1%	3,90E+22	1,23%
30	Outras atividades comerciais	48,4%	1,6%	50,0%	51,6%	2,51E+22	0,14%
31	Administração pública e defesa; Segurança Social Obrigatória	96,2%	0,1%	3,7%	3,8%	4,97E+22	3,03%
32	Educação	94,7%	0,2%	5,1%	5,3%	1,82E+22	1,10%
33	Saúde pública e privada	73,0%	0,0%	27,0%	27,0%	1,70E+22	1,05%
34	Outras atividades comunitárias, sociais e pessoais	85,4%	1,4%	13,2%	14,6%	2,16E+22	1,29%
	<b>Total</b>	<b>86%</b>	<b>4%</b>	<b>10%</b>	<b>14%</b>	<b>1,91E+24</b>	<b>100,00%</b>
	<b>Média setorial</b>	<b>74,5%</b>	<b>4,3%</b>	<b>21,2%</b>	<b>25,5%</b>	<b>3,75E+22</b>	<b>2,94%</b>

Fonte: A autora (2022).

### APÊNDICE III – Balança comercial de energia virtual, Brasil, em (seJ/R\$) e % para o ano de 2009

nº	Setores	Importação de energia virtual (Sf + Sin)		Exportação de energia virtual (exp)		Saldo da balança comercial da energia virtual	
		seJ/R\$	(%)	seJ/R\$	(%)	seJ/R\$	(%)
1	Agricultura, caça, silvicultura e pesca	1,24E+22	4,6%	5,89E+22	19,4%	4,65E+22	127%
2	Indústrias extrativas	1,78E+21	0,7%	1,76E+22	5,8%	1,58E+22	43%
3	Alimentos, bebidas e tabaco	9,22E+21	3,5%	8,20E+21	2,7%	-1,03E+21	-3%
4	Têxteis e produtos têxteis	5,90E+21	2,2%	8,62E+20	0,3%	-5,04E+21	-14%
5	Couro, couro e calçado	1,04E+21	0,4%	5,81E+20	0,2%	-4,56E+20	-1%
6	Madeira e produtos de madeira e cortiça	3,34E+20	0,1%	5,78E+20	0,2%	2,44E+20	1%
7	Celulose, papel, impressão e publicação em papel	2,42E+21	0,9%	7,78E+21	2,6%	5,35E+21	15%
8	Indústria de refino	4,20E+22	15,8%	7,18E+22	23,7%	2,98E+22	81%
9	Químicos e produtos químicos	4,37E+22	16,4%	2,29E+22	7,5%	-2,08E+22	-57%
10	Borracha e plásticos	5,57E+21	2,1%	1,52E+21	0,5%	-4,06E+21	-11%
11	Outro mineral não metálico	2,98E+21	1,1%	3,56E+21	1,2%	5,83E+20	2%
12	Produção de ferro e metalurgia	2,00E+21	0,7%	2,72E+21	0,9%	7,20E+20	2%
13	Fabricação de produtos com metais básicos	1,28E+22	4,8%	2,10E+22	6,9%	8,21E+21	22%
14	Equipamentos eletrônicos e óticos	1,37E+22	5,1%	1,24E+21	0,4%	-1,25E+22	-34%
15	Equipamento de transporte	1,71E+22	6,4%	2,38E+21	0,8%	-1,48E+22	-40%
16	Comércio por atacado e comércio de comissões, exceto veículos automotores e motocicletas	4,92E+21	1,8%	4,02E+21	1,3%	-9,02E+20	-2%
17	Fabricação de móveis	2,32E+21	0,9%	2,73E+20	0,1%	-2,05E+21	-6%
18	Manutenção e reparação de veículos	3,04E+21	1,1%	9,38E+20	0,3%	-2,11E+21	-6%
19	Fornecimento de eletricidade, gás e água	2,81E+22	10,5%	5,25E+22	17,3%	2,45E+22	67%
20	Construção	1,00E+22	3,8%	2,84E+20	0,1%	-9,77E+21	-27%
21	Comércio por atacado e varejo	8,22E+21	3,1%	2,14E+21	0,7%	-6,09E+21	-17%
22	Transporte terrestre	5,28E+21	2,0%	7,78E+21	2,6%	2,50E+21	7%
23	Transporte hidroviário	4,63E+20	0,2%	6,13E+21	2,0%	5,67E+21	15%

nº	Setores	Importação de energia virtual (Sf + Sin)		Exportação de energia virtual (exp)		Saldo da balança comercial da energia virtual	
		seJ/R\$	(%)	seJ/R\$	(%)	seJ/R\$	(%)
24	Transporte aéreo	5,28E+21	2,0%	1,09E+21	0,4%	-4,19E+21	-11%
25	Outras atividades de apoio e transporte auxiliar	8,20E+20	0,3%	2,17E+21	0,7%	1,35E+21	4%
26	Hotéis e restaurantes	5,21E+21	2,0%	4,07E+20	0,1%	-4,80E+21	-13%
27	Correios e telecomunicações	3,12E+21	1,2%	6,02E+20	0,2%	-2,52E+21	-7%
28	Intermediações financeiras	1,51E+21	0,6%	4,54E+20	0,1%	-1,05E+21	-3%
29	Aluguel e outras atividades comerciais	1,68E+21	0,6%	2,09E+21	0,7%	4,09E+20	1%
30	Outras atividades comerciais	1,39E+21	0,5%	1,57E+20	0,1%	-1,23E+21	-3%
31	Administração pública e defesa; Segurança Social Obrigatória	2,22E+21	0,8%	3,29E+20	0,1%	-1,89E+21	-5%
32	Educação	1,11E+21	0,4%	8,19E+19	0,0%	-1,03E+21	-3%
33	Saúde pública e privada	5,42E+21	2,0%	7,81E+18	0,0%	-5,42E+21	-15%
34	Outras atividades comunitárias, sociais e pessoais	3,59E+21	1,3%	3,49E+20	0,1%	-3,24E+21	-9%
<b>Total</b>		<b>2,46E+23</b>	<b>100,0%</b>	<b>2,82E+23</b>	<b>100,0%</b>	<b>3,65E+22</b>	<b>100%</b>

Fonte: A autora (2022).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A preocupação com o desenvolvimento sustentável ainda é uma discussão em pauta na literatura, como mostram os recentes Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, o Acordo de Paris e a própria macroeconomia ecológica. Ao mesmo tempo que há esforços para alcançar vários objetivos, como mitigar as mudanças climáticas, a degradação da natureza e a perda de biodiversidade, busca-se também alcançar objetivos sociais, como a segurança alimentar e a redução da pobreza, por exemplo.

Em algumas nações ainda há uma parcela da população que não tem suas necessidades básicas atendidas (como alimentação, saúde etc.). Somado a isso, há evidências de que o processo econômico é absorvedor de recursos da natureza (biofísicos) e da economia, se revelando a clara dependência e a expansão condicionada à disponibilidade de recursos biofísicos finitos. Assim, o crescente uso de recursos, intensificado desde a Revolução Industrial, impulsiona um esforço conjunto de mudança global para o alcance do desenvolvimento sustentável.

Apesar do aumento da preocupação com a evolução de algumas vertentes da teoria econômica, como descrito no Capítulo II, ainda há fragilidades na corrente neoclássica que impera perante a lógica de mercado. Este trabalho, portanto, conseguiu atingir o objetivo que se propôs, de identificar o paradigma do valor biofísico a partir da crítica à teoria neoclássica embasada nas leis termodinâmicas e propor uma nova ótica de análise baseada no conceito de valor bioeconômico.

Diante dos resultados encontrados neste estudo, se faz necessária uma análise conjunta do desempenho bioeconômico e da sustentabilidade para determinar os setores estratégicos na busca do desenvolvimento sustentável, mais próximo da macroeconomia ecológica. Como se sabe, tudo que entra no processo econômico tem um valor, mas nem tudo terá um preço (valor de mercado/monetário). Alguns fatores da função de produção são tidos como dados, são exógenos, o que permite que se entenda teoricamente que há um *gap* entre os valores monetário e bioeconômico.

No Capítulo III, a abordagem trazida consegue minimamente “endogeneizar” uma parte desse *gap* de valor, pois mensura e incorpora a lógica do valor biofísico e o valor monetário no valor bioeconômico, apesar de serem utilizadas algumas generalizações já mencionadas na construção da Matriz Insumo-Produto Emergética. A proposta cumpre com o objetivo de mensurar e mapear os setores da MIP mais



sustentáveis, com base na Análise Emergética, que permite identificar os tipos de insumos (natureza, econômicos e serviços) utilizados nos processos produtivos em relação ao seu potencial de renovabilidade.

Isso porque os indicadores calculados permitem dizer que, no processamento de bens na economia, o uso de recursos da natureza (de baixa entropia) e as externalidades (por compensação) que resultam do processo tendem a aumentar o valor bioeconômico e reduzir o estoque biofísico. Desse modo, portanto, contrariamente ao que acontece com as análises clássicas de valor puramente monetário, em que o uso de recursos da natureza, ou as externalidades do processo produtivo, não influencia no valor dos bens no mercado (valor monetário). Isso sugere que a relação entre crescimento e desenvolvimento econômico e sustentabilidade deve ser analisada de forma sistêmica, ou seja, precisa de uma aproximação entre as análises para o alcance do desenvolvimento sustentável.

O Capítulo IV se mostrou eficiente em construir o Modelo de Insumo-Produto Emergético e avaliar a Pegada Emergética setorial. Dos resultados encontrados, os setores-chave na economia que ainda possuem maior renovabilidade são os Setores 1 e 19. Ao contrário disso, os Setores 8 e 23 são os menos sustentáveis. Isso indica que alguns processos produtivos precisam ser mais eficientes no que se refere a sua produção de bens na ótica biofísica, com destaque para os Setores 8 e 23, o que permite entender que é necessário que haja um “acoplamento” entre os insumos utilizados no processo produtivo e o preço de mercado ou valor de mercado. Há ainda uma contribuição do Setor 1 no crescimento econômico, caracterizado como um setor-chave na sua lógica bioeconômica, como também no desenvolvimento sustentável, pois possui o maior indicador de sustentabilidade e um dos melhores de renovabilidade.

Assim, fica evidente a diferença entre o valor monetário e o valor bioeconômico, comprovando a tese deste estudo com base na metodologia do MIPEm aqui desenvolvida. Os resultados encontrados em análises clássicas são diferentes dos encontrados neste estudo, que considera o valor bioeconômico. Em análises tradicionais, o valor dos bens fica em função do mercado e suas oscilações pela oferta e demanda, e não em função da sustentabilidade e da eficiência produtiva, por exemplo.

## 5.1 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Deve-se destacar que algumas limitações quanto à indisponibilidade de dados foi enfrentada. O estudo utilizou dados do ano de 2009 de *environmental accounts*, pois são os dados encontrados mais recentes para a aplicação da metodologia utilizada. Em função da necessidade de informações ambientais desagregadas em setores, foi necessário “combinar” em duas bases diferentes os dados setoriais econômicos do ano de 2010 e os dados ambientais de 2009 e demais dados utilizados. Deve-se salientar a grande dificuldade de dados ambientais que sejam compatíveis com as atividades setoriais econômicas e que ainda compartilhem da mesma organização de setores, visto que dados muito agregados inviabilizam a Análise Emergética.

Cabe salientar que, por se entender que cada setor é um subsistema, algumas generalizações foram necessárias, pois o Brasil é um país com dimensões continentais e não há dados, como perda de solo e radiação solar, disponíveis em médias, ou a produção em quilograma classificada por tipos de cultivo, localização da produção e tipos de solo, por exemplo.

Os indicadores analisados são convencionais na análise de Insumo-Produto, mas dados mais atuais são necessários para, por exemplo, realizar estudos de avanços tecnológicos da Pegada Emergética, ou ainda análises inter-regionais, apesar de avanços observados em Cho (2013) utilizando a Análise Emergética. Cabe salientar que pode ser evidenciada uma limitação quanto à discussão dos indicadores de energia na sua relação com o processo econômico e o custo biofísico, isto é, o valor da apropriação do valor biofísico diante de sua utilização no processo produtivo.

## 5.2 SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS

Por fim, a estrutura de recursos biofísicos utilizados no processo produtivo e a remuneração ou preços de mercado valorados pelo valor de mercado puramente monetário não refletem o valor bioeconômico. Esta relação de valoração do valor biofísico (seJ) incorporado ao sistema econômico via valor monetário (\$) pode ser um avanço para pesquisas futuras, assim como a valoração da apropriação do valor biofísico em unidades monetárias frente a sua utilização no processo produtivo.

Outro ponto importante é uma necessidade de padronização de dados perante a quantidade de setores e o “encaixe” entre as informações ambientais e econômicas, assim como os seus respectivos setores. Essa questão é relevante, pois para embasar políticas públicas e estudos que mensuram essa relação são necessários dados mais atuais que sejam aplicáveis para esse tipo de construção de indicadores, tal como formular estratégias de políticas públicas mais ou menos sustentáveis – por exemplo: quantificar se a instalação de uma nova unidade produtora em uma determinada região trará um aumento na Pegada Emergética mais sustentável a essa região ou setor.

## REFERÊNCIAS

- ALIZADEH, S.; AVAMI, A. Development of a framework for the sustainability evaluation of renewable and fossil fuel power plants using integrated LCA-emergy analysis: a case study in Iran. **Renewable Energy**, Oxford, v. 179, p. 1548-1564, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.140>. Acesso em: 19 jan. 2022.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em: 18 jan. 2022.
- ARTUZO, F. D. *et al.* Science of the total environment emergy unsustainability index for agricultural systems assessment: a proposal based on the laws of thermodynamics. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 759, [art.] 143524, [p. 1-13], 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143524>. Acesso em: 20 jan. 2022.
- BRADFORD, J. *et al.* **The future is rural**: food system adaptations to the great simplification. Corvallis, Oregon: Post Carbon Institute, 2019. Disponível em: <https://www.postcarbon.org/publications/the-future-is-rural/>. Acesso em: 19 jan. 2022.
- CAMPBELL, D. E. Emergy analysis of human carrying capacity and regional sustainability: an example using the State of Maine. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 51, p. 531-569, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1006043721115>. Acesso em: 16 jan. 2022.
- CHEN, G. Q.; CHEN, Z. M. Carbon emissions and resources use by chinese economy 2007: a 135-sector inventory and input-output embodiment. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, Amsterdam, v. 15, n. 11, p. 3647-3732, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2009.12.024>. Acesso em: 18 jan. 2022.
- CHEN, Z. M. *et al.* Ecological input-output modeling for embodied resources and emissions in chinese economy 2005. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, Amsterdam, v. 15, n. 7, p. 1942-1965, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2009.08.001>. Acesso em: 18 jan. 2022.
- CHO, C. J. An exploration of reliable methods of estimating emergy requirements at the regional scale: traditional emergy analysis, regional thermodynamic input-output analysis, or the conservation rule-implicit method. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 251, p. 288-296, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.12.025>. Acesso em: 17 jan. 2022.
- DU, Y.-W.; WANG, Y.-C.; LI, W.-S. Emergy ecological footprint method considering uncertainty and its application in evaluating marine ranching resources and environmental carrying capacity. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 336, [art.] 130363, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130363>. Acesso em: 18 jan. 2022.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 15-28, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i1.25215>. Acesso em: 17 jan. 2022.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). [Base de Dados FAOSTAT]. Rome: FAO, 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data>. Acesso em: 18 jan. 2022.

GEORGESCU-ROEGEN, N. **O decrescimento**: entropia, ecologia, economia. São Paulo: Senac São Paulo, 2012.

GEORGESCU-ROEGEN, N. **The entropy law and the economic process**. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1971.

GUILHOTO, J. J. M. **Input-output models applied to environmental analysis**. Oxford: Oxford University Press, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.573>. Acesso em: 17 jan. 2022.

HALL, C. A. S.; BALOGH, S.; MURPHY, D. J. R. What is the minimum EROI that a sustainable society must have? **Energies**, Torrance, v. 2, n. 1, p. 25-47, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en20100025>. Acesso em: 16 jan. 2022.

HASEGAWA, T. *et al.* Risk of increased food insecurity under stringent global climate change mitigation policy. **Nature Climate Change**, London, v. 8, n. 8, p. 699-703, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0230-x>. Acesso em: 18 jan. 2022.

LEIVA, B. Why are prices proportional to embodied energies? **BioPhysical Economics and Resource Quality**, Cham, v. 4, [art.] 14, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41247-019-0062-y>. Acesso em: 19 jan. 2022.

LOISEAU, E. *et al.* Environmental assessment of a territory: an overview of existing tools and methods. **Journal of Environmental Management**, London, v. 112, p. 213-225, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.07.024>. Acesso em: 19 jan. 2022.

MAYUMI, K. T. Georgescu-Roegen's bioeconomics. *In*: RAMOS-MARTIN, J.; ROSA, E. P. (ed.). **Encyclopedia of ecological economics**. [Cheltenham: Edward Elgar Publishing], 2022. The following article is included as an entry in Encyclopedia of Ecological Economics, (Edward Elgar in 2022). Disponível em: [https://www.academia.edu/59850626/Georgescu\\_Roegens\\_Bioeconomics](https://www.academia.edu/59850626/Georgescu_Roegens_Bioeconomics). Acesso em: 18 jan. 2022.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G. The expansion of brazilian agriculture: soil erosion scenarios. **International Soil and Water Conservation Research**, Beijing, v. 1, n. 3, p. 37-48, 2013. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30029-0](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30029-0). Acesso em: 19 jan. 2022.

MONTOYA, M. A. **A pegada hídrica da economia brasileira e a balança comercial de água virtual**: uma análise insumo-produto. Passo Fundo: UPF, 2020. (Texto para discussão, n. 01/2020). Disponível em: [https://www.upf.br/\\_uploads/Conteudo/cepeac/textos-discussao/01-2020.pdf](https://www.upf.br/_uploads/Conteudo/cepeac/textos-discussao/01-2020.pdf). Acesso em: 17 jan. 2022.

MONTOYA, M. A. *et al.* Renewable and non-renewable in the energy-emissions-climate nexus: brazilian contributions to climate change via international trade. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 312, [art.] 127700, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127700>. Acesso em: 19 jan. 2022.

MONTOYA, M. A.; TALAMINI, E. **Mudança tecnológica no consumo de “água virtual” e a pegada hídrica na economia brasileira**: uma análise insumo-produto ecológico. Passo Fundo: UPF, 2021.

MOZ-CHRISTOFOLETTI, M. A.; PEREDA, P. C. Winners and losers: the distributional impacts of a carbon tax in Brazil. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 183, [art.] 106945, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.106945>. Acesso em: 15 jan. 2022.

ODUM, H. T. **Environmental accounting**: emergy and environmental decision making. New York: Wiley, 1996.

OVERBURY, R. E. Features of a closed-system economy. **Nature**, London, v. 242, p. 561-565, 1973.

PANG, M. *et al.* Understanding the linkages between production activities and ecosystem degradation in China: an ecological input-output model of 2012. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 218, p. 975-984, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.299>. Acesso em: 19 jan. 2022.

SAES, B. M. **Macroeconomia ecológica**: o desenvolvimento de abordagens e modelos a partir da economia ecológica. 2013. Dissertação (Mestrado em Economia) – Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

SAES, B. M.; ROMEIRO, A. R. Ecological macroeconomics: a methodological review. **Economia e Sociedade**, Campinas, v. 28, n. 2, p. 365-392, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1982-3533.2019v28n2art04>. Acesso em: 17 jan. 2022.

SUN, X.; AN, H. Emergy network analysis of chinese sectoral ecological sustainability. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 174, p. 548-559, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.228>. Acesso em: 17 jan. 2022.

VEIGA, J. E. **Sustentabilidade**: a legitimação de um novo valor. 2. ed. São Paulo: Editora Senac, 2010.