



---

## PROPOSIÇÃO TEÓRICA DO MODELO INSUMO-PRODUTO EMERGÉTICO (MIPEm) PARA MENSURAR O GAP ENTRE O VALOR BIOECONÔMICO E O VALOR MONETÁRIO

**Elen Presotto**

Universidade de Brasília - UnB

[elen.presotto@unb.br](mailto:elen.presotto@unb.br)

**Edson Talamini**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

[talamini.ufrgs@gmail.com](mailto:talamini.ufrgs@gmail.com)

### Resumo

O subsistema econômico se utiliza de recursos de capital natural, humano ou monetário e por vezes, se desconsidera que há a irreversibilidade no processamento desses recursos que são fonte de matéria e energia. As atividades econômicas tiram vantagem do uso dos recursos biofísicos finitos. A falha em não medir ou desconsiderar a contribuição dos recursos biofísicos ao processo produtivo do subsistema econômico implica em um *gap* entre o valor monetário e o valor bioeconômico. O objetivo deste estudo é propor uma nova ótica teórica de análise a partir do valor bioeconômico, via Modelo de Insumo-Produto Emergético. Trata-se, então, não somente de uma comparação teórico-descritiva dos pensamentos dos autores, mas também de apresentar e propor ideias alternativas à teoria neoclássica no que tange a contribuição dos recursos naturais ao subsistema econômico embasada na visão do *systemic decoupling*. O estudo ancora uma contribuição no campo da Macroeconomia Ecológica, via análise emergética setorial embasada no 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 nesse estudo, expressa uma tentativa de aproximação entre as visões da valoração de bens puramente monetária (ou preço do mercado) e o valor biofísico, este último embasado no valor energético que está imbricado nos recursos da natureza e utilizados pelas atividades econômicas.

**Palavras-chave:** bioeconomia, macroeconomia ecológica, emergia macroeconômica, economia biofísica, tecnosfera, biosfera.

**Abstract:** The economic subsystem uses natural, human, or monetary capital resources and sometimes needs to be more mindful of the irreversibility of processing these resources, which are a source of matter and energy. Economic activities take advantage of the use of finite biophysical resources. The failure to measure or disregard the contribution of biophysical resources to the production process of the economic subsystem implies a gap between monetary value and bioeconomic value. The objective of this study is to propose a new theoretical view of analysis based on the bioeconomic value via the Energy Input-Output Model. Thus, it is not only a theoretical and descriptive comparison of the authors' thoughts but also presents and proposes alternative ideas to the neoclassical theory regarding the contribution of natural resources to the economic subsystem based on the systemic decoupling view. The study contributes to the Ecological Macroeconomics field via a sectoral Energy analysis based on bioeconomic value, which evaluates the sustainability



of sectoral economic activities. The proposal in question is developed as an alternative to providing 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 approximate the views of the valuation of purely monetary goods (or market price) and the biophysical value, the latter based on the energy value imbricated in nature's resources used by economic activity.

**Keywords:** bioeconomics, ecological macroeconomics, macroeconomic energy, biophysical economics.

**JEL Codes:** Q01; Q43, Q57



## 1. Introdução

Na teoria econômica, desde a fisiocracia, há uma preocupação concernente a origem do valor e a riqueza, para os fisiocratas a origem do valor está na terra (Hunt & Lautzenheiser, 2013). 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, em escolher o melhor para si mesmo (princípio da otimização) a partir do valor da utilidade, conduzem a um equilíbrio de mercado, ou seja, na formação do preço dos bens, um preço em equilíbrio é determinado pelo ponto onde a oferta e a demanda se igualam (Varian, 2014).

Ao contrário do que defende a teoria econômica tradicional, os 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 da economia neoclássica, economia ambiental<sup>1</sup> e economia ecológica<sup>2</sup> percebe-se que há diferenças significativas quanto a considerar ou não o valor biofísico<sup>3</sup> nas análises.

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 do crescimento marginal são iguais aos custos marginais da redução da função do ecossistema que o crescimento impõe (Spash, 2020). A macroeconomia expressa esse comportamento agregado por meio da renda, crescimento econômico e nível geral de preços, por exemplo (Bresser-pereira, 1976).

Assim, a macroeconomia tradicional define o fluxo circular da renda como um sistema fechado com movimentos infinitos. Ou seja, desconsidera-se que o sistema econômico é um subsistema da biosfera de onde obtém o capital natural do qual necessita para sustentar o fluxo contínuo. Essa abordagem retrata o processo econômico como circular e autossustentável nas relações de produção e consumo, dentro da qual o papel dos processos ecológicos simplesmente são desconsiderados (Giampietro, 2019).

O cenário fica ainda mais complexo quando a sustentabilidade estiver 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, pois fica comprometida a qualidade de vida que não será semelhante a geração atual (Cechin, 2010). Assim, entende-se que as instituições políticas podem afetar a extensão dos danos ambientais de bem estar à medida que direcionam políticas ambientais e de desenvolvimento econômico mais rígidas

<sup>1</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>2</sup>Seus autores fundadores como Georgescu-Roegen (1971), Daly (1968) e Odum (1996), 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, que acredita, por exemplo, que não existe crescimento sustentável em função da finitude dos recursos (Daly, 2004).

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



contra a degradação ambiental, por exemplo (Congleton, 1992). Com isso, percebe-se a relação direta da influência de políticas públicas e a mitigação de impactos na degradação ambiental.

A problemática deste estudo reside na hipótese de que tudo que entra no processo econômico tem um valor, mesmo que os mecanismos de precificação do sistema econômico não estabeleçam um preço a todos os recursos ou insumos biofísicos. Ou seja, há um *gap*, à medida que matéria e energia entram no processo produtivo e são processadas, os recursos de baixa entropia diminuem e o valor monetário aumenta. De tal modo, o valor monetário dos preços menospreza parte do valor biofísico, pois o valor monetário (riqueza) aumenta com o aumento da entropia. Entretanto, o valor monetário que expressa o valor final de um bem, tem na sua essência a dependência de insumos da natureza de baixa entropia<sup>4</sup>.

A perspectiva da análise neoclássica e da economia ambiental prioriza o valor monetário e capta a lógica dos recursos naturais, energia e resíduos através das lentes dos fluxos monetários 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 et al., 2020).

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 macroeconômica sistêmica, adentrando no paradigma dessa temática com a introdução da crítica do valor monetário puro a partir das leis da física que embasam a ideia de valor bioeconômico<sup>5</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 incluir a lógica emergética, que admite aproximar o valor biofísico à análise do processo econômico ou valor monetário em uma unidade única. Isso permite entender a valoração do processamento de bens pelas leis da termodinâmica com relação a baixa entropia: quanto maior for o uso de recursos no processo econômico, maior será o valor emergético ou bioeconômico.

Com o intuito de propor uma nova perspectiva para a discussão já estabelecida na literatura, o artigo está estruturado em cinco seções, incluindo essa introdução. A seção seguinte destaca as principais diferenças e os avanços da literatura sobre a origem do valor. Posteriormente, são apresentadas as diferentes definições da teoria econômica para o desenvolvimento sustentável. A quarta seção, formula a proposta teórica e formalização matemática do Modelo de Insumo-Produto Emergético, o qual está estruturado em uma composição entre a análise emergética<sup>6</sup> e a Matriz Insumo-

<sup>4</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 produz um *déficit* ao sistema total, pois o custo é maior do que o produto, isso pode ser aplicado para qualquer empreendimento biológico ou econômico (Georgescu-Roegen, 2012).

<sup>5</sup> Em resumo é a composição ou soma entre o valor biofísico e o valor monetário.

<sup>6</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 (H. Ortega, 2003).



Produto<sup>7</sup>. Na última seção, apresenta-se as principais conclusões do estudo.

## 2. Crítica à abordagem da Economia Neoclássica a partir das leis da termodinâmica

### 2.1 A expressão de valor: da Economia Neoclássica para a Biofísica

A partir dos anos de 1960, Georgescu-Roegen insere suas ideias no debate econômico e aproxima a ciência econômica da física. Junto com Herman Daly, são conhecidos como fundadores da lógica biofísica na teoria econômica. Lógica essa que, mais tarde, ficou incorporada aos domínios da economia ecológica (Sherwood et al., 2020). A perspectiva apresentada define uma quebra de paradigma e começa a deixar evidentes as críticas aos pressupostos neoclássicos fundamentados no mecanicismo do processo econômico sem considerar a participação da natureza (Cechin & da Veiga, 2010). O autor ainda reforçou sua crença de que os processos históricos são únicos e impossíveis de ser descritos precisamente por uma fórmula matemática (Cechin & da 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, no qual 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, derivada da teoria neoclássica, passa a sofrer

críticas pela falta de respostas para a medida do valor da utilidade e a incapacidade de oferecer um indicador de satisfação individual, por exemplo.

A teoria neoclássica pressupõe que o consumidor maximiza a utilidade por meio das suas escolhas, ficando o mais satisfeito possível com suas cestas de bens. Nessa perspectiva, o valor de um bem está relacionado à sua utilidade. Porém, o problema reside na função de utilidade que, além de ignorar a utilização de recursos da natureza, apresenta um viés utilitarista dos mesmos, por mais que os recursos renováveis ou não-renováveis forneçam uma utilidade indireta via consumo final de bens (Neumayer, 2013).

Na teoria da firma, por exemplo, define-se alguns conceitos fundamentais, como a função de produção, a qual determina a maior quantidade de produto que pode ser obtida a partir de uma determinada quantidade de insumos ou fatores de produção, como mão de obra e capital (Varian, 2015). Todavia, a função de produção neoclássica desconsidera que é a energia que move a produção de riqueza, independente se essa energia 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<sup>8</sup> (Daly, 2017). Dito de outra forma, os recursos biofísicos assumem o papel de fatores de produção ocultos.

<sup>7</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).

<sup>8</sup>A função de produção tradicional da economia neoclássica é dada por:  $Y = f(K, L)$ , onde  $Y$  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, ignorando os diferentes intervalos de tempo em que os fatores de produção são utilizados e a diferença qualitativa decorrente do uso. Em resumo, o processo econômico deveria se chamar transformação, pois elementos da natureza são transformados em bens (Cechin, 2010; Cechin & da Veiga, 2010). A partir dessa necessidade, é fundamental distinguir 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. Os fundos são a estrutura do processo de transformação. Já os fluxos são a matéria e energia (fluxos de entrada) que vem da natureza (insumos da natureza) ou de outro processo produtivo, e que se transformam através do processo produtivo em bens finais, resíduos e poluição (fluxos de saída) (Georgescu-Roegen, 1971).

Assim, a proposição de análise econômica pelas leis da termodinâmica<sup>9</sup> vai de encontro ao *mainstream* da ciência econômica. 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, mas apenas transformadas em trabalho ou calor. A segunda lei define que apesar da energia permanecer constante, ao ser transformada, sua qualidade é alterada e uma parte dessa energia acaba por não gerar mais trabalho uma vez que é dissipada, gerando entropia (Nielsen et al., 2020).

A partir disso, percebe-se que os fundadores da economia ecológica se embasam em fortes críticas a economia neoclássica e que define um *gap* entre as análises econômicas que consideram somente o valor monetário do

processo econômico. O *gap* é a parte desconsiderada do valor biofísico de todas as entradas de recursos que são absorvidos da natureza. Os custos incorridos na produção de bens têm papel relevante na determinação dos preços de mercado. Estes custos refletem os gastos com mão de obra e o capital com extração de recursos ou insumos da natureza e são expressos em valores monetários (Daly, 2017). O famoso tripé: terra, capital e trabalho (Hall & Klitgaard, 2006).

A Economia Biofísica deriva da vertente mais rígida da Economia Ecológica e está fundamentada nas obras de seus autores fundadores Georgescu-Roegen (1971), Daly (1968) e Odum (1996) (Cleveland, 1987; Melgar-Melgar & Hall, 2020; Sherwood et al., 2020). A proposta central da Economia Biofísica<sup>10</sup> está atrelada a ideia de valor biofísico, onde a análise do sistema econômico é embasada nos princípios ecológicos e das leis da termodinâmica (Cleveland, 1987). Portanto, é inevitável que a atividade econômica global seja restringida pelas leis da termodinâmica.

Em resumo, a Economia Biofísica considera a forma como as sociedades humanas usam energia e recursos físicos e biológicos, 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 a lógica cartesiana da economia neoclássica (Biophyseco, 2020; Palmer, 2018; Sherwood et al., 2020).

Nessa perspectiva, é importante salientar que alguns recursos desafiam a substituição econômica. A matéria utilizada é apenas

<sup>9</sup> Clausius formulou a primeira e a segunda lei da termodinâmica entre 1850 a 1865. Foi inspirado nos trabalhos de Cournot de 1824, que descobriu a conversão incompleta do calor em trabalho (Nielsen et al., 2020).

<sup>10</sup> Termo foi utilizado pela primeira vez por Lotka (1925). Na história o pensamento biofísico é traçado e evolui desde os fisiocratas do século XVIII (Cleveland, 1987).



parcialmente reciclada e a energia dissipada na forma de calor é irre recuperável. Por mais que a tecnologia atue para o aumento do rendimento de matéria e energia, ela enfrenta o limite da finitude dos estoques de recursos naturais (Georgescu-Roegen, 2012).

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

A discussão sobre o valor possui inúmeros pensadores na literatura 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, destaca-se os mercantilistas, os quais 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. Primeiro, consideravam que o valor tinha sua origem na natureza. Segundo, sistematizaram as interrelações entre os setores e construíram a ideia de trocas econômicas interdependentes entre os setores da economia como um fluxo circular, com destaque para a obra de François Quesnay (Cechin, 2010; Hunt & Lautzenheiser, 2013). Essas ideias iniciais são um marco, pois, posteriormente, evoluíram para se chegar as análises dos modelos de Insumo-produto que são utilizados atualmente.

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, 1925). David Ricardo seguiu evoluindo as ideias de Smith e deixou 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 o uso 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, a qual tem força na ortodoxia até os dias atuais. 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 a 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 específica para cada bem e que, via de regra, terá um valor semelhante entre os indivíduos. Todavia, o preço do mercado que expressa o valor do bem em termos monetários, não depende de qualquer valor ou utilidade estabelecido por um indivíduo isoladamente, mas sim o que seja semelhante a um grupo de indivíduos. Logo, o valor monetário não é uma relação puramente individual (Lotka, 1914).

Georgescu-Roegen considera que o valor é derivado de dois componentes: um objetivo, inerente à qualidade intrínseca do objeto e que



está relacionada com a baixa entropia (matéria e energia disponível) onde os insumos de baixa entropia são transformados pelo trabalho humano e capital em bens; e, outro subjetivo, que diz respeito a satisfação do ser humano. Portanto, 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 por meio do trabalho físico realizado. Assim, o real valor seria aquele incorporado pela emergia e o valor monetário expresso pelo sistema de preços deveria refletir isso (Cechin, 2010). Ou seja, o valor biofísico definido por Odum (1996;1988) representa o trabalho da biosfera incorporado ao sistema econômico. Quanto maior o trabalho incorporado via recursos naturais e serviços ecossistêmicos, maior é o seu valor de emergia incorporada no processo econômico.

O conceito de valor biofísico é embasado na termodinâmica, na análise de sistemas naturais e sociais (Melgar-Melgar & Hall, 2020). A perspectiva do valor bioeconômico é diferente do valor monetário, isso porque o valor monetário omite ou desconsidera os recursos biofísicos como fatores de produção (Ortega & Bacic, 2020). Em síntese, observa-se a emergência de uma nova concepção de valor até então negligenciada pelo *mainstream* das teorias clássicas e neoclássicas: o valor bioeconômico. A composição entre o valor biofísico e o valor econômico-monetário é o que se define como valor bioeconômico, compreendendo a mensuração dos recursos da natureza, capital e humano, como também os recursos de saída como as emissões e perda de solo (externalidades). Esses fluxos de entrada, transformação e saída devem ser contabilizados em uma unidade de medida energética única, como aquela utilizada pela análise emergética. A emergia total é mensurada em Joule de energia solar

equivalente (seJ) considerando as devidas transformidades.

Até certo ponto, essa não é uma ideia tão nova assim. Os fisiocratas já haviam defendido que a origem da riqueza e do valor estava na natureza, sendo que os demais setores só distribuem a riqueza. Ou seja, o valor monetário tinha seu valor imbricado nos recursos da natureza. De forma similar, Lotka (1914) integrou a teoria da evolução das espécies de Darwin às leis da termodinâmica para analisar a economia como biofísica (Ji & Luo, 2020).

Nesse contexto, há um *gap* que se entende como a diferença clara entre o que o sistema econômico valora e expressa no valor monetário ou preço de um bem e seu respectivo valor bioeconômico. Isso porque o processo econômico tem seu foco no valor monetário definido a partir dos pressupostos clássicos e neoclássicos. Contudo, o fluxo metabólico e entrópico que se evidencia como a fonte de vida e riqueza, caracterizado pela dependência de baixa entropia (Daly, 2017) e da irreversibilidade do processo (Artuzo et al., 2021; Georgescu-Roegen, 2012), é subvalorado pelos mecanismos de preços (valor monetário) da economia convencional.

Em resumo, a irreversibilidade termodinâmica indica 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 produtivas possam se tornar, ainda assim os processos são entrópicos como um todo e nunca serão inteiramente negentrópicos (Artuzo et al., 2021). A irreversibilidade dos processos econômicos implica, portanto, em um nível que tende a máxima entropia. Apenas a importação de baixa entropia presente nos estoques e fluxos de energia biofísica podem sustentar o funcionamento do sistema econômico no tempo. Contudo, a elevada importância termodinâmica dos recursos biofísicos se apresenta desacoplado do valor



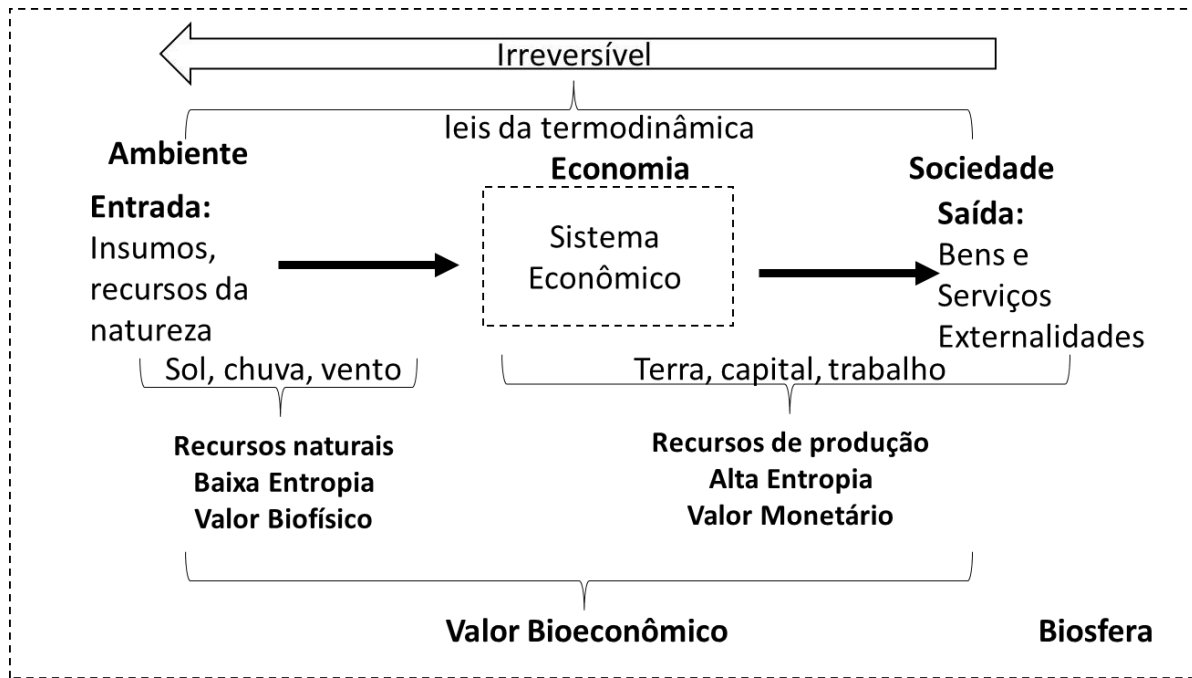


atribuído ao bem econômico de uso, caracterizando um *gap*.

O referido *gap* pode ser visualizado na Figura 1, onde os recursos de entrada são entendidos como valor biofísico, e que parte deles não são valorados pelo sistema monetário. Com isso o

funcionamento dos sistemas, como o econômico são dependentes da utilização de recursos da biosfera<sup>11</sup>, ficando sujeito a possíveis desequilíbrios ou colapsos, tanto do ecossistema como o sistema econômico na falta de recursos ou catástrofes.

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



Fonte: (Presotto, 2022).

A Figura 1 esquematiza a lógica da economia biofísica considerando que as sociedades utilizam baixa entropia dos recursos da natureza e recursos de produção, para produzir bens e serviços. Esses processos induzem à produção de resíduos e impactos ambientais ou externalidades. Acrescido a isso, o valor monetário é proporcionalmente desigual frente ao valor bioeconômico, apresentando uma relação inversa. A relação inversa decorre do fato de que quando um bem é processado maior é o valor monetário desse bem no sistema econômico; porém, menor é a baixa entropia ou estoque de baixa entropia no ambiente biofísico, haja vista que há perda de

matéria e energia a cada processamento e tais perdas são irreversíveis.

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

<sup>11</sup> É o conjunto de todos os ecossistemas da Terra, mais detalhes em (Odum et al., 1987).



### 3. Abordagens sobre o desenvolvimento sustentável: uma aproximação com o valor bioeconômico

A partir de políticas públicas sólidas, um projeto de desenvolvimento sustentável depende de relações culturais complexas da sociedade humana e da evolução da biosfera. Por estes motivos, a sustentabilidade das civilizações humanas vai depender da capacidade de utilização dos recursos naturais, tornando-se o foco para o 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>12</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 de uma nação.

Todavia, a falta de acesso a necessidades básicas e a insegurança alimentar podem piorar em decorrência de políticas públicas voltadas à mitigação da degradação ambiental provocada pelo processo econômico produtivo. Portanto, quando mal estruturadas, as políticas públicas podem provocar a oscilação dos preços, piorando a situação dos mais pobres que já enfrentam problemas de acesso aos mercados (Hasegawa et al., 2018; Moz-Christofolletti & Pereda, 2021).

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). Isso torna-se possível a partir da engenharia ecológica<sup>13</sup>, a qual se propõe a integrar a ecologia e a engenharia a teoria geral dos sistemas, podendo descrever o funcionamento dos ecossistemas e almejando prever o comportamento ao longo do tempo (Ortega, 2003).

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

A abordagem convencional permanece dominante. Fundamentada na teoria neoclássica, defende que, a partir de determinado nível de desenvolvimento econômico, as melhorias ambientais superariam as deteriorações. De certa forma, esta abordagem crê que para conseguir a sustentabilidade é necessário maximizar o crescimento econômico (Veiga, 2010). Até certo ponto, chaga 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 a semelhança ao trabalho de Simon Kuznets publicado anos antes, em 1954. O trabalho desenvolvido por Kuznets foi notório para a época, porém, com dados precários. A

<sup>12</sup> Pode ser entendida como o limite que a natureza suportaria de atividade humana.

<sup>13</sup> É considerada a ciência que cuida do projeto de ecossistemas e organizações humanas, para benefício mútuo, mais detalhes em (Ortega, 2003).



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, 1954). Porém, depois da metade do século XX, foi possível descartar essa perspectiva (Veiga, 2010).

Ao contrário da convencional, a segunda abordagem, conhecida como a abordagem ecológica, se embasa no estado estacionário (no sentido de condição estável) para se chegar à sustentabilidade. Numa condição estável, 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 econômica física que é mantida num estado estacionário<sup>14</sup> (Daly, 2004, p.198).” Ainda segundo o autor, é mantida uma base econômica física pelo processamento da matéria e energia que estão dentro das capacidades regenerativas e assimilativas do ecossistema (Daly, 2004).

A abordagem ecológica teve nas discussões de Daly a ideia de *steady state*<sup>15</sup>. O conceito de *steady state* surge de ideias remodeladas de economistas clássicos, em que a sustentabilidade seria atingida se a qualidade de vida de uma sociedade continuasse melhorando, sem que para isso estivesse refém de uma expansão do subsistema econômico. Ou seja, a base do conceito de *steady state* 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 que a implantação de medidas para um programa bioeconômico mínimo como uma redução do consumo e que assim, o decrescimento seria a solução. Dentre estas 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 é definida como o caminho do meio e parte do princípio de que a aplicabilidade da abordagem ecológica é impraticável e a convencional é inconsistente frente aos diversos problemas ambientais e ruptura climática (Veiga, 2010). Alguns outros economistas a intitulam como “ecodesenvolvimentista” e rejeitavam a ideia de crescimento zero, se preocupando 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>16</sup> para evitar o dilema do crescimento. Porém, há de se observar que os ganhos de eficiência ao longo da história não representem redução de escalas (Veiga, 2010).

<sup>14</sup> Mais detalhes em DALY, H. Epílogo: “*Algunos malentendidos comunes y otros problemas relacionados con una economía en estado estacionario*”, p. 371-72

<sup>15</sup> Pode ser entendido como uma “condição estável” (Veiga, 2010).

<sup>16</sup>O desacoplamento, 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, este conceito foi utilizado pela OCDE, em 2001 (Soares & Almeida, 2019).



O desacoplamento pode ser entendido como uma estratégia de longo prazo para se reduzir as pressões ambientais com aumento de bem-estar, seja por alcance de eficiência, menos quantidade de recurso por unidade de PIB (desacoplamento de recursos), ou um aumento do PIB com redução de impacto ambiental (desacoplamento de impacto) (Soares & Almeida, 2019). Percebe-se uma carência de estudos que evidenciem de forma mais clara na perspectiva econômica (Veiga, 2010). Um dos indicativos para poucos trabalhos na literatura está em função dos diversos tipos de impactos causados pela atividade econômica, como a poluição da atmosfera, da água, da terra e perda da biodiversidade, por exemplo.

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

Frente a retrospectiva teórica revisitada até aqui, percebe-se certa carência de uma visão teórica sistêmica da macroeconomia e que tenha o valor bioeconômico em sua essência. Este estudo se propõe a sustentar uma visão alternativa, que busca analisar o processo econômico como parte de um todo, ou seja, é um subsistema na busca do desenvolvimento sustentável, denominada por nós como “*systemic decoupling*”<sup>17</sup>. O conceito surge como uma crítica ao distanciamento entre o que se define como valor bioeconômico e a lógica do valor puramente monetário derivado do sistema econômico de preços. Parte-se do princípio de que a análise do 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 define no *systemic decoupling* é um conceito que evolui da ideia de *decoupling* da OCDE de desmaterialização do processo produtivo no longo prazo, somado ao um olhar sistêmico, que deve ser embasado no conceito de valor bioeconômico e não somente na busca de estratégias de eficiência energética (desacoplamento de recursos) ou de redução de dados ambientais (desacoplamento de impacto). Ou seja, a visão analítica proposta nesse estudo evolui de discussões da economia entendendo que, por si só, o desacoplamento, seja ele de recursos ou de impacto, não é suficiente. Isso porque não resolve o problema do uso recursos da natureza no processo produtivo que extrapolam a capacidade de carga do ecossistema ou o *Energy Return on Investment-EROI* mínimo sustentável (Hall et al., 2009).

Logo, o conceito de *systemic decoupling* se apoia em análises que priorizam o valor bioeconômico, a fim de orientar estratégias que reduzam os impactos causados a natureza e prolongue o uso de recursos no tempo. O conceito de *systemic decoupling* se assemelha a proposta teórica de Giampietro (2019) que define o conceito de bioeconomia circular<sup>18</sup>. Porém, a ideia de *systemic decoupling* vai além, e define teoricamente e formaliza o Modelo de Insumo-Produto Emergético (MIPem). O MIPem permite mensurar a visão sistêmica embasada no valor bioeconômico do processo econômico, a partir

<sup>17</sup> ou desacoplamento sistêmico.

<sup>18</sup> Parte do princípio 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.



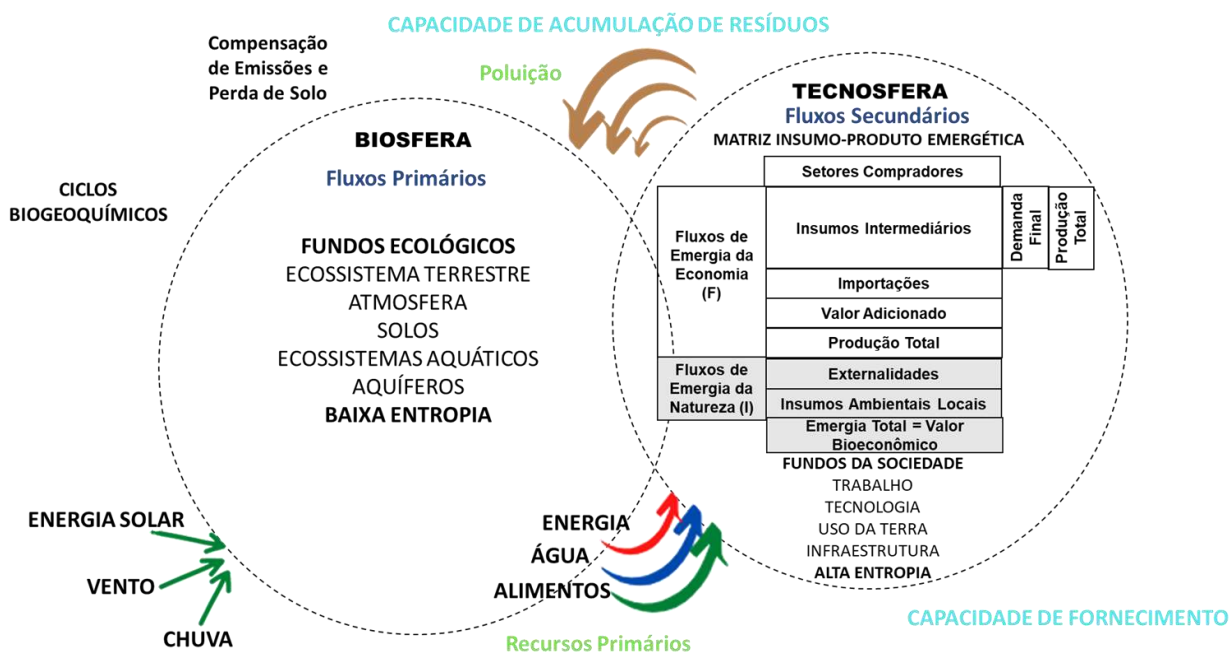
de uma composição da análise emergética e do Modelo de insumo-produto ecológico.

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

#### 4. A expressão do valor bioeconômico na Economia: proposição do Modelo Insumo-Produto Emergético (MIPEm)

A partir da conjuntura estruturada até aqui, a Figura 2, retrata graficamente que o processo econômico-tecnosfera<sup>19</sup> não é fechado e a importância de visões analíticas embasadas no “*systemic decoupling*”. 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.

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



Fonte: (Presotto, 2022).

A interação entre a biosfera e a tecnosfera representada na Figura 2, deixa clara a necessidade de distinção entre o que são os fundos e os fluxos. A partir de Georgescu-Roegen (1971), o estoque passa a ser definido como um fluxo acumulado que muda de

tamanho com o tempo e não pode ser considerado como um elemento do sistema. Assim, conforme discutido na Seção 2 os fatores de produção tidos na economia neoclássica como estoques, para a lógica de Georgescu-Roegen (1971) e evidenciados na

<sup>19</sup> Representa a leitura biofísica da economia circular na economia convencional (Giampietro, 2019).



Figura 2, são considerados fundos. Portanto, políticas públicas devem incentivar a reprodução de elementos dos fundos associados a relação fluxos-fundos renováveis para se alcançar o desenvolvimento sustentável.

#### 4.1 Formalização do Modelo de Insumo-Produto Emergético (MIPEm)

A ideia apresentada se sustenta como forma de minimizar o *gap* definido anteriormente a partir da construção de valor bioeconômico. Para tanto, define uma nova abordagem analítica de análise derivada da economia ecológica e que resulta na proposição do Modelo de Insumo-Produto Emergético (MIPEm).

A proposta do Modelo de Insumo-Produto Emergético (MIPEm) é justamente uma composição de duas metodologias: a análise emergética e o modelo de insumo-produto ecológico<sup>20</sup>. Metodologicamente, cada setor da matriz insumo-produto é classificado como um subsistema dentro da lógica da análise emergética, mensurada a partir do valor bioeconômico mensurado em seJ (joule de energia solar equivalente). Assim, ajustando dados macroeconômicos é possível calcular a matriz inversa de Leontief e converter as unidades monetárias em unidades biofísicas por meio da construção convencional de um vetor de energia setorial<sup>21</sup> (Montoya, 2020; Montoya & Finamore, 2019).

De forma resumida, as linhas da matriz definem a oferta de cada setor para todos os demais setores da economia. Já as colunas contêm os valores demandados por cada setor junto aos demais setores da economia (Miller & Blair, 2009). Conforme definido pela Equação (1), a soma da demanda

intermediária e da demanda final é igual a demanda total do produtor do setor  $i$ .

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

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 a produção bruta do setor  $j$ . Logo, 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.

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

Dentre 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  $j$ .

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

<sup>20</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 & Blair, 2009; Montoya, 2020; Montoya & Finamore, 2019).

<sup>21</sup> Mais detalhes em Presotto (2022).



Isolando  $X_{ij}$ , substituindo (4) em (1) e fazendo  $\sum_{S=1}^n Y_{iS} = Y_i$ , obtém-se o sistema de equações (5).

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

Assim, o Modelo 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):

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

$$X - AX = Y$$

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

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 analisem 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).

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. A proposição do MIPEm se vale do Modelo de Insumo-Produto Ecológico que incorpora as unidades físicas por fora do modelo.

Com mais detalhes, o modelo conhecido como o **Modelo de Insumo-Produto Híbrido**, utiliza

os fluxos monetários (vetor linha) de um setor são substituídos na matriz de transações interindustriais por unidades físicas. A vantagem de utilizar a versão que **incorpora as unidades físicas “dentro do modelo”** reside no fato de ela pressupõe que os fatores de conversão e os preços sejam diferentes entre os setores, tornando o modelo consistente (Montoya, 2020; Montoya & 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 et al., 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”** permite, de maneira convencional calcular a inversa de Leontief, converter as unidades monetárias em unidades físicas (Montoya, 2020; Montoya & Finamore, 2019).

Neste estudo, a composição do Modelo Insumo-Produto Ecológico e da Análise Emergética visa o uso do melhor potencial de ambas (Patterson et al., 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).

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 denominados 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. Cabe salientar que, de forma convencional, a emergia é calculada em seJ (Joule de energia solar equivalente) e sofre uma modificação, passando a ser mensurada em seJ/R\$. A relação seJ/R\$ mede a quantidade de emergia incorporada para cada unidade monetária produzida para a demanda final em seJ por reais, por exemplo.

Por meio do MIPeM, é possível mensurar detalhadamente o comportamento setorial do processo produtivo nacional a partir da interação do uso dos recursos de capital, humano, da natureza com análises clássicas já utilizadas em mensuração de dados de insumo-produto. Indicadores como os efeitos diretos, indiretos, os setores que mais consomem a Emergia/valor bioeconômico e a fração sustentável desse consumo são alguns exemplos de saídas possíveis do MIPeM.

Deste modo, configura-se como a principal contribuição teórica deste estudo a definição do conceito de valor bioeconômico e de “*systemic decoupling*”. Além disso, aponta uma oportunidade metodológica que possibilita mensurar a relação entre o sistema econômico e o sistema biofísico, se caracterizando como uma evolução da análise realizada por Sun; An (2018) no sentido de utilizar os insumos da natureza: sol, vento e chuvas. Adicionalmente, é um incremento à análise aplicada por Chen; Chen (2010), por tratar da formulação de indicadores emergéticos setoriais, incluindo as externalidades (Agostinho & Pereira, 2013; Allegretti, 2017) por compensação de perda de solo e emissões de CO<sub>2</sub> em nível macroeconômico.

A análise sistêmica do MIPeM proporciona um avanço que se sobressai às dificuldades da macroeconomia ambiental e ecológica, pois incorpora minimamente ou endogeneiza o valor biofísico do processo de produção de bens

(fluxos de entrada e saída), conforme retratado na Figura 2. Há de se salientar que o assunto não se esgota e que muito ainda se pode evoluir nessa temática.

## 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 mensurado a nível macroeconômico setorial. Ainda, despreendeu um esforço em entender como o sistema econômico é uma parte de um sistema maior, razão pela qual depende da manutenção da biosfera para a sua continuidade, e propôs o Modelo de Insumo-Produto Emergético como alternativa de análise aplicada.

A perspectiva neoclássica se mostrou falha, para abordar a complexidade relacionada às variáveis que estão envolvidas com o conceito de desenvolvimento sustentável, no que tange 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, biofísicos e ou serviços adicionais. Além disso, a proposta tem o potencial principalmente pelo fato de que se conseguirá, a partir de uma





análise aplicada macroeconômica mensurar o desempenho bioeconômico setorial, a partir dos recursos naturais, humanos e econômicos utilizados em cada setor. Os indicadores gerados pelo MIPEm podem beneficiar o planejamento de políticas públicas setoriais, priorizando aqueles setores que precisam melhorar seu desempenho no alcance do desenvolvimento sustentável.

### Agradecimentos

Os autores agradecem a contribuição do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq para o apoio financeiro (Processo nº 303956 / 2019-4) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) para bolsa de doutorado (número do processo) 88882.439350/2019-01). Agradecemos aos membros do Grupo de Pesquisa em Bioeconomia Aplicada ao Agronegócio (NEB-Agro) pelas discussões.

### Referências

Agostinho, F., & Pereira, L. (2013). Support area as an indicator of environmental load: Comparison between Embodied Energy, Ecological Footprint, and Emery Accounting methods. *Ecological Indicators*, 24, 494–503. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.08.006>

ALLEGRETTI, G. (2017). *INSECT AS FEED: UMA ANÁLISE BIOECONÔMICA DO USO DE INSETOS COMO FONTE PROTEICA ALTERNATIVA À AVICULTURA DE CORTE BRASILEIRA* PORTO. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL CENTRO.

Almeida, V. P. De. (2017). *A CONTABILIDADE HÍDRICA DO BRASIL: UM AJUSTE DAS CONTAS NACIONAIS AMBIENTAIS*. Universidade Federal de Santa Maria.

Andrade, D. C. (2018). Tendências do metabolismo da economia brasileira: uma análise preliminar à luz da Economia Ecológica. *Revibec: Revista Iberoamericana*

*de Economía Ecológica*, 28, 66.

Arrow, K., Bolin, B., Costanza, R., Dasgupta, P., Folke, C., & Holling, C. S. (1996).

Economic growth, carrying capacity, and the environment. *Environment and Development Economics*, 1(1), 104–110.

<https://doi.org/10.1017/S1355770X00000413>

Artuzo, F. D., Allegretti, G., Santos, O. I. B., da Silva, L. X., & Talamini, E. (2021). Science of the Total Environment Emery unsustainability index for agricultural systems assessment: A proposal based on the laws of thermodynamics. *Science of the Total Environment*, 759, 1–13.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143524>

Barcellos, F. C., Carvalho, P. G. de, & Carlo, A. De. (2010). *Contabilizando a Sustentabilidade: principais abordagens*.

Barkin, D., & Carrasco, M. E. F. (2012). La significación de una Economía Ecológica radical. *Revibec: Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 19(0), 1–14.

BiophysEco, (The biophysical economics Policy Center). (2020). *What Is Biophysical Economics?*

<https://biophyseco.org/biophysical-economics/what-is-biophysical-economics/>

Bresser-pereira, L. C. (1976). *Da macroeconomia clássica à keynesiana*. <http://www.bresserpereira.org.br/view.asp?cod=649>

Cechin, A. D. (2010). *A natureza como limite da economia: a contribuição de Georgescu-Roegen* (E. S. S. Paulo (ed.)).

Cechin, A. D., & da Veiga, J. E. (2010). A economia ecológica e evolucionária de Georgescu-Roegen. *Revista de Economia Política*, 30(3), 438–454.

<https://doi.org/10.1590/S0101-31572010000300005>

Chen, G. Q., & Chen, Z. M. (2010). Carbon emissions and resources use by Chinese economy 2007: A 135-sector inventory and input-output embodiment. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 15(11), 3647–3732.

<https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2009.12.024>

Cleveland, C. J. (1987). Biophysical economics: Historical perspective and current



- research trends. *Ecological Modelling*, 38(1–2), 47–73. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(87\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0304-3800(87)90044-5)
- Congleton, R. D. (1992). Political institutions and pollution control. *Review of Economics & Statistics*, 74(3), 412–421. <https://doi.org/10.2307/2109485>
- Daly, H. E. (1968). On economics as a life science. *Journal of Political Economy*, 76(3), 392–406. [http://www.uvm.edu/~jfarley/EEseminar/readings/Economics as life science.pdf](http://www.uvm.edu/~jfarley/EEseminar/readings/Economics%20as%20life%20science.pdf)
- Daly, H. E. (1991). *Steady-State Economics* (p. 320). 2nd ed.
- Daly, H. E. (2004). Crescimento sustentável? Não, obrigado. *Ambiente & Sociedade*, 7(2), 197–202. <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2004000200012>
- Daly, H. E. (2017). Trump's growthism: its roots in neoclassical economic theory. *Real-World Economics Review*, 78, 86–97.
- Dobb, M. (1973). Theories of Value and Distribution Since Adam Smith. *Labour History*, 28, 57. <https://doi.org/10.2307/27508172>
- Georgescu-Roegen, N. (1971). *The Entropy Law and the Economic Process* (H. U. Press (ed.)).
- Georgescu-Roegen, N. (2012). *O decrescimento. Entropia. Ecologia. Economia*. Editora Senac São Paulo.
- Giampietro, M. (2019). On the Circular Bioeconomy and Decoupling: Implications for Sustainable Growth. *Ecological Economics*, 162(November 2018), 143–156. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.05.001>
- Gowdy, J., & Mesner, S. (1998). The Evolution of Georgescu-Roegen's Bioeconomics. *Review of Social Economy*, LVI(2), 22.
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic Growth and the Environment. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353–377. <https://doi.org/10.2307/2118443>
- Hall, C. S., Balogh, S., & Murphy, D. J. R. (2009). What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have? *Energies*, 2, 25–47. <https://doi.org/10.3390/en20100025>
- Hall, C., & Klitgaard, K. (2006). The need for a new, biophysical-based paradigm in economics for the second half of the age of oil. *International Journal of Transdisciplinary Research*, 1(1), 4–22.
- Hasegawa, T., Fujimori, S., Havlík, P., Valin, H., Bodirsky, B. L., Doelman, J. C., Fellmann, T., Kyle, P., Koopman, J. F. L., Lotze-Campen, H., Mason-D'Croz, D., Ochi, Y., Pérez Domínguez, I., Stehfest, E., Sulser, T. B., Tabeau, A., Takahashi, K., Takakura, J., van Meijl, H., ... Witzke, P. (2018). Risk of increased food insecurity under stringent global climate change mitigation policy. *Nature Climate Change*, 8(8), 699–703. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0230-x>
- Hunt, E. K., & Lautzenheiser, M. (2013). História do Pensamento Econômico Uma Perspectiva crítica. In *Iberian Journal of the History of Economic Thought* (Vol. 3, Issue 1). <https://doi.org/10.5209/ijhe.53115>
- IBGE. (2020). *Dados. Estatísticas*. <https://www.ibge.gov.br/>
- Ji, X., & Luo, Z. (2020). Opening the black box of economic processes: Ecological Economics from its biophysical foundation to a sustainable economic institution. *Anthropocene Review*, 1–17. <https://doi.org/10.1177/2053019620940753>
- Kuznets, S. (1954). Economic Growth and Income Inequality. *The American Economic Review*, 45, 1–28. <https://doi.org/10.2307/1811581>
- Lotka, A. J. (1914). An objective standard of value derived from the principle of evolution. *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 4(14), 409–418.
- Lotka, Alfred J. (1925). Elements of Physical Biology. *Nature*, 116(2917), 461. <https://doi.org/10.1038/116461b0>
- Melgar-Melgar, R. E., & Hall, C. A. S. (2020). Why ecological economics needs to return to its roots: The biophysical foundation of socio-economic systems. *Ecological Economics*, 169(November 2019), 106567. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106567>
- Miller, R. E., & Blair, P. D. (2009). *Input-Output Analysis Foundations and Extensions* (2nd Edition). Cambridge University Press.



- Montoya, M. A. (2020). *A Pegada Hídrica Da Economia Brasileira E a Balança Comercial De Água Virtual : Uma Análise Insumo-Produto*. 28.  
[https://www.upf.br/\\_uploads/Conteudo/cepeac/textos-discussao/01-2020.pdf](https://www.upf.br/_uploads/Conteudo/cepeac/textos-discussao/01-2020.pdf)
- Montoya, M. A., & Finamore, E. B. (2019). AS *RELAÇÕES INTERSETORIAIS DOS RECURSOS HÍDRICOS NA ECONOMIA BRASILEIRA*.
- Moz-Christofoletti, M. A., & Pereda, P. C. (2021). Winners and losers: the distributional impacts of a carbon tax in Brazil. *Ecological Economics*, 183(February), 106945.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.106945>
- Mueller, C. (1998). Avaliação de duas correntes da economia ambiental: escola neoclássica e a economia da sobrevivência. In *Brazilian Journal of Political Economy* (Vol. 18, Issue 2).
- Neumayer, E. (2013). Weak versus Strong Sustainability. *Weak versus Strong Sustainability*.  
<https://doi.org/10.4337/9781849805438>
- Nielsen, S. N., Müller, F., Marques, J. C., Bastianoni, S., & Jørgensen, S. E. (2020). Thermodynamics in ecology-An introductory review. *Entropy*, 22(8).  
<https://doi.org/10.3390/E22080820>
- Odum, H. (1996). *Environmental Accounting: Energy and Environmental Decision Making* (Wiley (ed.)).
- Odum, H. T., Odum, E. C., Brown, M. T., LaHart, D., Bersok, C., & Sendzimir, J. (1987). *SISTEMAS AMBIENTAIS E POLÍTICAS PÚBLICAS* (L. Laboratório de Engenharia Ecológica e Informática Aplicada (ed.)). University of Florida.  
<http://www.unicamp.br/fea/ortega/eco/index.htm>
- Odum, T. H. (1988). Self-Organization, Transformity, and Information. *Science*, 242, 1132–1139.
- Ortega, E., & Bacic, M. J. (2020). *USO DA METODOLOGIA EMERGETICA NA ANALISE DOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO E CONSUMO* (p. 19). Laboratório de Engenharia Ecológica e Informática Aplicada - LEIA.  
<https://www.unicamp.br/fea/ortega/Brasil/valor.htm>
- Ortega, H. (2003). Engenharia ecológica: conceitos básicos e importância do trabalho de H. T. Odum. *Engenharia Ecológica e Agricultura Sustentável: Uma Introdução à Metodologia Emergética*, 1–16.
- Palmer, G. (2018). Energy Modelling. *Energies*, 1, 1–17.  
<https://doi.org/10.3390/en11040839>
- Patterson, M., McDonald, G., & Hardy, D. (2017). Is there more in common than we think? Convergence of ecological footprinting, energy analysis, life cycle assessment and other methods of environmental accounting. *Ecological Modelling*, 362, 19–36.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.07.022>
- Presotto, E. (2022). 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). In *Programa de Pós-Graduação em Agronegócios*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Romeiro, A. R. (2012). Desenvolvimento sustentável: Uma perspectiva econômicoecológica. *Estudos Avancados*, 26(74), 65–92. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142012000100006>
- Sachs, I. (2004). Desenvolvimento sustentável: desafio do século XXI. *Ambiente & Sociedade*, 7(2), 214–216.  
<https://doi.org/10.1590/s1414-753x2004000200016>
- Saes, B. M. (2013). *Macroeconomia Ecológica: O Desenvolvimento De Abordagens E Modelos a Partir Da Economia Ecológica*.
- Sherwood, J., Carbajales, M., Becky, D., Haney, R., & Sherwood, J. (2020). Putting the Biophysical ( Back ) in Economics : A Taxonomic Review of Modeling the Earth - Bound Economy. *Biophysical Economics and Sustainability*, 5(1), 1–20.  
<https://doi.org/10.1007/s41247-020-00069-0>
- Siche, R., Pereira, L., Agostinho, F., & Ortega, E. (2010). Convergence of ecological footprint

