



CRESCIMENTO ECONÔMICO E FLUXOS DE MATERIAIS NO BRASIL: ESTIMANDO A CURVA DE KUZNETS AMBIENTAL

Anderson Henrique dos Santos Araújo

Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

anderson.henrique@arapiraca.ufal.br

<https://orcid.org/0000-0002-1461-4105>

Resumo

A análise de fluxo de materiais consiste em uma série de indicadores sustentáveis, com o objetivo de avaliar o consumo e a utilização de materiais em um determinado segmento. Este estudo analisa a relação entre crescimento econômico e meio ambiente para o Brasil, através da curva de Kuznets ambiental (CKA) nos formatos clássico (“U” invertido) e expandido (“N”), entre os anos de 1970 e 2016. Utilizou-se como variáveis, indicadores sociometabólicos de fluxo de materiais e o PIB per capita. Os resultados demonstram que o fluxo de materiais utilizados mantém sua intensidade em períodos de (de)crescimento do PIB, o que caracteriza o formato da CKA. No entanto, a pressão ambiental (através dos níveis de intensidade nos materiais utilizados) não segue ciclos de decrescimento, seguidos de abundância econômica, nem um novo período recessivo, o que caracteriza o formato “N” da CKA. Portanto, é necessário priorizar iniciativas que incentivem a eficiência dos recursos, não modulando a relação entre o crescimento econômico e a pressão ambiental. Espera-se que as descobertas deste estudo inspirem políticas mais eficazes e pesquisas futuras na busca por uma economia mais sustentável.

Palavras-chave: pressão ambiental, metabolismo socioeconômico, transição material.

Abstract

Material flow analysis consists of a series of sustainable indicators, with the aim of evaluating the consumption and use of materials in each segment. This study analyzes the relationship between economic growth and the environment for Brazil, using the environmental Kuznets curve (CKA) in the classic (“inverted U”) and expanded (“N”) formats, between 1970 and 2016. Socio-metabolic indicators of material flow and GDP per capita were used as variables. The results show that the flow of materials used maintains its intensity in periods of GDP (de)growth, which characterizes the CKA format. However, environmental pressure (through the levels of intensity in the materials used) does not follow cycles of decline, followed by economic abundance, or a new recessionary period, which characterizes the “N” format of the CKA. It is therefore necessary to prioritize initiatives that encourage resource efficiency, not modulating the relationship between economic growth and environmental pressure. It is hoped that the findings of this study will inspire more effective policies and future research in the search for a more sustainable economy.

Keywords: environmental pressure, socioeconomic metabolism, material transition.

JEL Codes: C87, Q56, Q57



1. Introdução

A interconexão entre o desenvolvimento econômico e a sustentabilidade ambiental tem sido cada vez mais destacada na literatura acadêmica brasileira (Silva et al., 2024). No entanto, observa-se uma lacuna significativa em pesquisas que investigam os mecanismos de avaliação econômico-ecológicos empregando abordagens estatísticas. Contudo, a formulação de duas abordagens alternativas à visão da economia do meio ambiente neoclássica vem crescendo desde a década de 1990, tais como: a economia ecológica (EE) e o metabolismo socioeconômico (MSE) (Spash, 2011; Farley, 2021).

A primeira reconhece a necessidade de alocar eficientemente os recursos econômicos. No entanto, ela entende que a eficiência alocativa deve ser alcançada somente após a consideração e determinação da distribuição justa e da escala sustentável de utilização dos recursos naturais. Os pressupostos da EE partem da compreensão de que o sistema econômico é um subsistema de algo mais amplo e complexo, a ecosfera terrestre (Daly, 1996; Daly, 2007; Alier, 2001).

A segunda abordagem, o MSE, é considerado um dos instrumentos mais robustos para compreender as relações entre sociedade e natureza. Ele entende a economia como um sistema de fluxos de energia e materiais, que é parte de um sistema maior, a ecosfera. Esse arcabouço é definido pelo metabolismo social, uma categoria analítica que utiliza os pressupostos da economia ecológica". Sua importância para a análise econômica do meio ambiente reside em dois pontos: i) cumpre o papel de analisar as relações estabelecidas entre sistema econômico e meio ambiente do ponto de vista quantitativo e qualitativo; e ii) os indicadores que emergem da análise de MSE podem ser utilizados como parâmetros para a

mensuração da escala econômica e ecológica (Gabriel et al., 2020).

Krausmann et al. (2017) entendem o MSE como um mecanismo para investigar os padrões biofísicos, a dinâmica socioeconômica e os fluxos de energia. As relações entre sociedade e ambiente exigem um intenso fluxo de materiais e energia, essenciais para a provisão de bens e serviços. Carpintero e Naredo (2005) consideram o MSE um importante instrumento para qualificar os fluxos de materiais e energia que atravessam a economia ao longo do tempo.

O MSE detém uma relevância significativa em economias caracterizadas por atividades extrativistas, como é o caso do Brasil. Esta relevância é fundamentada no perfil exportador de commodities da economia brasileira, que enfatiza a produção de produtos primários e não renováveis, como minérios de ferro e combustíveis fósseis (Araújo, 2022). As atividades econômicas associadas a este perfil geram, concomitantemente aos ganhos econômicos, externalidades negativas. Estas incluem poluição, redução de terras agricultáveis e intensificação para os efeitos estufa (Bebbington, 2011; Lazaro; Soares, 2024).

Portanto, é essencial uma transição material sustentável. Segundo Araújo, Andrade e Souza (2019), o MSE permite quantificar e qualificar os impactos biofísicos decorrentes da apropriação de recursos energéticos e materiais, da liberação de resíduos e rejeitos, e dos efeitos sinérgicos dessas atividades resultantes da ação humana. Esse arcabouço favorece a minimização dos impactos ambientais e o planejamento de transições para sistemas mais sustentáveis, que podem incluir a adoção de fontes de energia renováveis, a redução do consumo de recursos e a reciclagem de materiais, entre outras estratégias.



O objetivo deste artigo é aplicar métodos econométricos para analisar o Metabolismo Socioeconômico (MSE) brasileiro por meio de indicadores específicos, contribuindo para um campo ainda pouco explorado na literatura acadêmica. Como abordagem metodológica, propõe-se o uso da Curva de Kuznets Ambiental (CKA) para avaliar a relação entre variáveis ambientais – em particular, o fluxo metabólico – e o crescimento econômico (medido pelo PIB per capita), verificando se a expansão econômica resulta em maior ou menor consumo de materiais. Embora existam diversos estudos sobre a CKA no Brasil, há uma escassez de pesquisas que incorporem indicadores sociometabólicos, como a Análise de Fluxos Materiais, o que justifica a relevância desta investigação.

Estruturalmente, a análise divide-se em cinco itens, além desta introdução: no item 2 é realizada uma revisão de literatura acerca da análise de fluxo material e o sociometabolismo brasileiro, seguido da Curva de Kuznets Ambiental (CKA); o item 3 apresenta os procedimentos metodológicos utilizados e; o item 4 discute os principais resultados, seguido das considerações finais.

2. Fundamentação teórica

2.1 Análise de Fluxo Material

Dentro do contexto de avaliação de padrões sociometabólicos, diversas metodologias emergiram na segunda metade do século XX. Essas abordagens foram concebidas com o objetivo de conduzir uma análise sistemática dos fluxos e estoques de materiais dentro de um espaço e período específicos. Infante-Amate et al. (2017) destacam metodologias que tratam de análises energéticas, de substâncias, território e de materiais. Nesse último grupo, destaca-se a análise de fluxo materiais, ou Material Flows Analysis (MFA, o termo comumente utilizado em língua inglesa), mecanismo aperfeiçoado

na década de 1990 por grupos de pesquisas austríacos, alemães e japoneses.

A MFA pode ser definida como o estudo amplo e multidisciplinar dos fluxos de materiais em escala global, nacional ou regional. Seu objetivo é, a partir de indicadores, compreender o fluxo material das ações humanas no meio ambiente, fundamentais para o planejamento, previsão e avaliação das atividades econômicas (Schandl et al., 2018). A metodologia proposta oferece indicadores de extração, consumo e comércio de materiais, e são úteis em várias áreas, como aquelas ligadas a sociologia ambiental (Fischer-Kowalski; Weisz, 2016), desenvolvimento sustentável (Huang et al., 2012), economia ecológica (Araújo et al., 2019) e justiça ambiental (Alier; Walter, 2016).

O método aplica o balanço de massa (conforme a 2ª Lei da termodinâmica): entrada de material no sistema deve sempre igualar a saída, considerando também as mudanças de estoque material (Krausmann et al., 2017). A relevância do método está na capacidade de aferir o MSE, visto que fornece bancos de dados e abrangentes, inclusive consistente com as tradicionais contas nacionais. Assim é possível construir análises que permitam um maior aproveitamento dos recursos naturais de maneira sustentável (Kovanda; Weinzettel, 2013).

Os indicadores de fluxo de material são definidos como medidas quantitativas, que apontam, informam sobre, descrevem as características dos fluxos de materiais e do uso de recursos materiais e que têm um significado, ou significado que vai além do que está diretamente associado às estatísticas subjacentes. Em síntese, descrevem o uso de materiais em uma determinada economia em toda cadeia de fluxo: desde a extração de matéria prima, até a geração de resíduos.



Um de suas vantagens é a simplificação do processo de comunicação, permitindo análises e construção de indicadores, que são formulados a partir de dados básicos (econômicos, ambientais e comerciais convertidos em índices (OECD, 2008).

Os indicadores mais utilizados são a entrada doméstica (ED), a entrada direta de material (DMI) e o consumo de material doméstico (DMC), que podem ser calculadas para diferentes especializações, incluindo países, estados e municípios. A descrição de cada indicador encontra-se no Quadro 1 (abaixo).

Quadro 1- Indicadores econômicos advindos da análise de fluxo material

Sigla	Nome e identificação	Descrição
DE	Extração doméstica	Uso socioeconômico de materiais extraídos domesticamente
DMI	Entrada Direta de Material (DE+ material importado)	Materiais que entram na produção nacional e no processo produtivo
TMR	Exigência total de Material (DMI + ED + material indireto)	Total de materiais consumidos no processo produtivo (incluindo os armazenados)

Fonte: Krausmann et al. (2017).

Nota: * Produto Interno Bruto.

Os itens apresentados no quadro anterior utilizam o somatório das seguintes variáveis para sua construção: biomassa, que corresponde a produção para a produção humana, pastagens, silvicultura e pesca; combustíveis fósseis, derivados do petróleo, gás natural e carvão; minerais metálicos, como ferro, alumínio e cobre; e minerais não metálicos, como areia e cimento¹.

Vale salientar que o Brasil se enquadra como uma nação uma nação rica em recursos naturais, e fortemente baseada no extrativismo, que inclui a agropecuária (Luz; Fochezatto, 2022), mineração (Freitas, 2012) e a exploração de petróleo e gás (Moreira; Tavares, 2016). Portanto, a aplicação desses indicadores no Brasil pode oferecer insights significativos sobre o impacto dessas atividades na economia e no meio ambiente.

¹Os minerais metálicos são aqueles que possuem em sua composição elementos com propriedades metálicas, como brilho característico, boa condutividade elétrica e térmica, além de serem geralmente maleáveis e dúcteis. Estes minerais são a base para a obtenção de metais puros através de processos metalúrgicos. Já os minerais não metálicos se caracterizam pela ausência de elementos metálicos em sua composição,

Essas ações resultam em fluxos significativos de materiais e energia, que são capturados pelo conceito de sociometabolismo. Esse é um dos fatores motivadores para estudos descritivos (Bringezu et al., 2003; González Martínez et al., 2010; Kovanda, 2018; Zhang et al., 2018) e análises estatísticas (Auci; Vignani, 2013; Florés, 2018; Fischer-Kowalski; Amann 2001; Vehmas et al., 2006). Em linhas gerais, esses trabalhos ressaltam a relevância do Brasil como agroexportador de recursos primários, uma expansão nos níveis de extração material para consumo interno.

A descrição desagregada da MFA permite confirmar o perfil sociometabólico agroexportador. Os dados de ED no Brasil (Gráfico 1) demonstram uma tendência de crescimento entre 1970 e 2016, com destaque para a biomassa². Ademais, após

apresentando propriedades físicas distintas como falta de brilho metálico e baixa condutividade. Estes materiais são normalmente utilizados em seu estado natural ou após processos simples de beneficiamento (Klein e Dutrow, 2007).

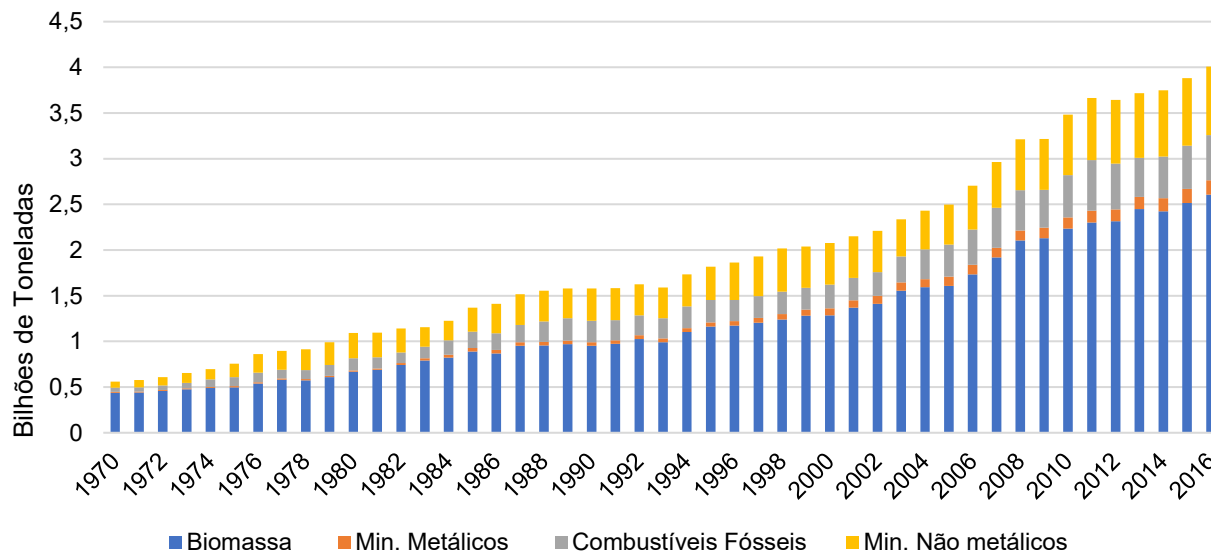
² Materiais orgânicos de origem vegetal ou animal utilizados para energia, insumos industriais ou outras aplicações: Cana de açúcar, soja, milho, lenha, carvão vegetal, carne bovina, dentre outros.



estabilização econômica, ocorrida na segunda metade da década 1990, houve uma

expansão extrativista, saindo de 2,0 (dois) para 4,0 (quatro) bilhões de toneladas.

Gráfico 1. Extração doméstica (ED) no Brasil (1970-2016)



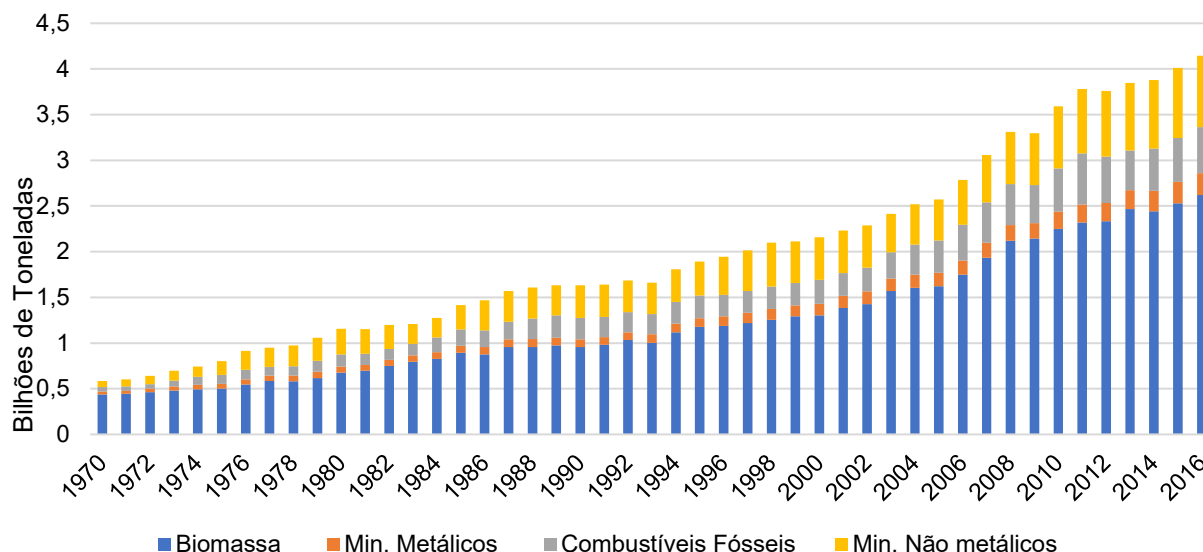
Fonte: Dados organizados pelo autor, a partir de pesquisas do IBGE, Anuário Mineral Brasileiro e o portal “*International Energy Agency*”.

No que se refere aos materiais que efetivamente entram em solo brasileiro e são utilizados na produção (Gráfico 2), se observa uma tendência semelhante a extração doméstica, tanto a expansão durante o período analisado, quanto na participação dos elementos que a compõe. O consumo de biomassa apresentou um crescimento

constante ao longo do período, atingindo seu pico em 2016. Os minerais metálicos tiveram um aumento significativo, especialmente a partir dos anos 2000, com o maior consumo registrado em 2016. Os combustíveis fósseis também cresceram, com um aumento mais acentuado nas décadas de 1980 e 1990, apesar das preocupações ambientais.



Gráfico 2. Entrada Direta de Material (DMI) no Brasil (1970-2016)



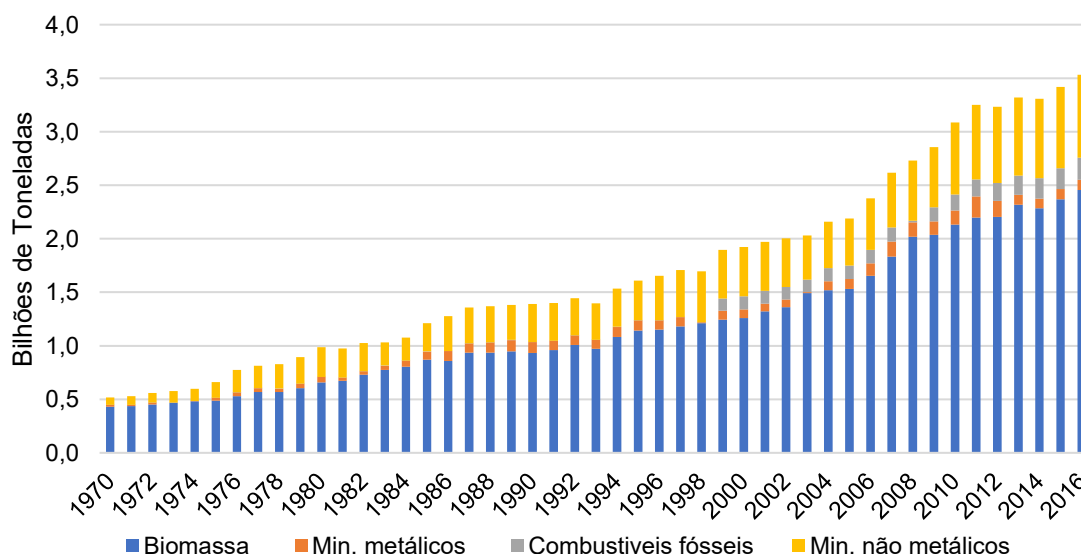
Fonte: Dados organizados pelo autor, a partir de pesquisas do IBGE, Anuário Mineral Brasileiro e o portal “*International Energy Agency*”.

O consumo de minerais não metálicos mostrou um crescimento contínuo, com uma aceleração notável a partir dos anos 2000. É importante destacar que há uma dependência considerável de minerais não metálicos, corroborando com o anuário estatístico do setor de transformação de não metálicos (MME, 2016). Segundo esse boletim, o consumo de cimento e cerâmicas de

revestimento mostrou uma tendência de crescimento até 2014, seguida por uma queda devido à desaceleração econômica brasileira desde então. Em 2016, esses produtos tiveram uma participação significativa nas importações, totalizando 6,6 bilhões de dólares.

Já o DMC brasileiro também apresenta um ciclo crescente, como verificado no Gráfico 3.

Gráfico 3. Consumo de material doméstico (DMC) no Brasil (1970-2016)



Fonte: Dados organizados pelo autor, a partir de pesquisas do IBGE, Anuário Mineral Brasileiro e o portal “*International Energy Agency*”.



Entre 1970 e 2016, o consumo de biomassa no Brasil triplicou, passando de 4,3 milhões de toneladas para 2,43 bilhões de toneladas em 2016. O consumo de materiais não metálicos também cresceu significativamente, especialmente a partir dos últimos anos da década de 1970, aumentando de 0,7 milhões para 7,7 bilhões de toneladas.

Combustíveis fósseis e minerais metálicos apresentaram crescimento contínuo ao longo do período, embora tenham sido afetados pela desaceleração econômica brasileira. Segundo Viglio et. al (2019), a importância dos combustíveis fósseis na matriz energética e na economia brasileira é evidente, especialmente devido ao modal de transporte predominantemente rodoviário. O investimento em tecnologia, como a descoberta do pré-sal em 2006, aumentou significativamente as reservas de petróleo do país, consolidando sua posição no cenário energético global. No entanto, a desaceleração econômica brasileira após 2015 impactou negativamente o setor, reduzindo a demanda e o consumo de combustíveis fósseis (Carvalho, 2008).

Em relação aos minerais metálicos, a exploração e consumo desses materiais também cresceram, impulsionados pela expansão das indústrias que dependem deles. Contudo, a desaceleração econômica brasileira afetou a produção e o consumo, refletindo nas flutuações do mercado (Machado e Carrara, 2020).

2.2 A Curva de Kuznets Ambiental (CKA)

A Curva de Kuznets Ambiental (CKA) foi originalmente apresentada por Simon Kuznets em 1955, que relacionou renda e desigualdades econômicas, chegando a uma fundação quadrática com relação invertida (U). Posteriormente, os trabalhos seminais de Grossman e Krueger (1991; 1995) utilizaram

a proposta de Kuznets para relacionar o crescimento econômico ao meio ambiente, empregando a degradação do ar como variável dependente.

A CKA sugere que, à medida que uma economia se desenvolve, a degradação ambiental aumenta inicialmente, mas após um certo ponto de inflexão, começa a diminuir. Assim, os resultados propostos indicaram um aumento na degradação em um primeiro estágio, seguido de uma tendência declinante em um segundo momento, gerando uma curva em formato de “U” invertido ($\cap$). Essas relações podem ser motivadas por diversos fatores, tais como: mudança na composição da produção e do consumo com o desenvolvimento econômico, melhoria na eficiência do uso dos recursos, implementação de políticas ambientais e mudança nas preferências dos consumidores em relação à qualidade ambiental, entre outros.

O formato clássico da CKA foi modificado por De Bruyn (1997) e De Bruyn et al. (1998), que indicaram que o formato em “U” invertido poderia ser ampliado para um terceiro estágio (tornando a função cúbica), onde as emissões retornariam à tendência crescente. Assim, a curva teria um formato de “N”. Ao analisar trabalhos mais recentes, observa-se que esta tem sido a tendência, como demonstram Ávila e Diniz (2015), Sousa et al. (2016) e Lau et al. (2018).

Apesar de sua relevância e quantitativo de paródicos que a estimam, a CKA também é alvo de críticas, sobretudo na metodologia empírica usada para estimar a curva e na validade da suposição de que a degradação ambiental diminuirá automaticamente com o desenvolvimento econômico (Moraes, 2019). No entanto, a viabilidade (ou a falta dela) da estimação da CKA é instrumental na formulação de políticas ambientais. A



verificação da curva serve como um indicativo de que o crescimento econômico pode ser um meio eficaz para resolver problemas de degradação ambiental (Arrow et al., 1995; Dasgupta et al., 2002). Isso ocorre porque, segundo a hipótese da CKA, à medida que uma economia cresce e atinge um certo nível de renda per capita, a qualidade ambiental tende a melhorar, como apontam Kaika & Zervas (2013) e Al-Mulali et al. (2015).

Inicialmente, o crescimento econômico pode levar a um aumento na degradação ambiental devido à intensificação da industrialização e ao uso de tecnologias menos eficientes. No entanto, após atingir um ponto de inflexão, o

aumento da renda permite investimentos em tecnologias mais limpas e eficientes, além de uma maior conscientização e demanda por políticas ambientais rigorosas (Zilio, 2012). Por outro lado, a inviabilidade dos resultados obtidos ressalta a necessidade de políticas ambientais mais proativas, com o objetivo de mitigar a degradação ambiental

Quanto às evidências da CKA no Brasil (Tabela 1), diversas abordagens e metodologias são identificadas, bem como a dimensão regional utilizada. Observa-se que a ocorrência da curva é distinta, sobretudo pelas variáveis dependentes utilizadas.

Tabela 1 – CKA – Evidências para o Brasil

Autores	Dimensão regional	Período de análise	Variável dependente	Tipo de análise	CKA
Fonseca e Ribeiro (2004)	Brasil	1985-1990-2005-2000	% de áreas preservadas	Painel de dados	Sim*
Lucena (2005)	Brasil	1970-2005	Dióxido de carbono (CO ₂)	Séries de tempo	Não
Cunha (2008)	Brasil	1980-2004	Dióxido de carbono (CO ₂)	Séries de tempo	Não
Gomes e Braga (2008)	Amazônia Legal	1990-2004	Taxa de desmatamento	Painel de dados	Sim
Sousa (2008)	Municípios brasileiros	1991-2000	Proxy de variáveis	Painel de dados	Não
Andrade (2009)	Brasil	1970-2005	Dióxido de carbono (CO ₂)	Séries de tempo	Sim
De Brito (2012)	Amazônia Legal	2011	Variação do desmatamento	Painel de dados**	Não
Saiani <i>et al.</i> (2013)	Municípios brasileiros	1991-2010	Déficits de acesso a serviços de saneamento	Painel de dados	Formato "N"
Teixera <i>et al.</i> (2012)	Municípios de Mato Grosso	2006	Desmatamento <i>per capita</i>	Painel de dados	Sim*
Serrano et. al (2015)	Brasil	1980-2010	Dióxido de carbono (CO ₂)	Séries de tempo	Formato "U"
Pires (2017)	Brasil	1970-2011	Dióxido de carbono (CO ₂)	Séries de tempo	Formato "U"
Avelino (2018)	Municípios brasileiros	1999-2012	Degradação e morbidade	Painel de dados	Sim*

Fonte: Resultados da pesquisa.

Notas:*) assume resultados distintos, a depender das variáveis. **) utiliza variáveis instrumentais.

Quanto aos estudos que analisam a CKA com indicadores sociometabólicos, De Bruyn e Opschoor (1997) discutem a relação entre a renda e a pressão ambiental associada em 19

economias entre 1966-1990. Utilizando dados de consumo material e energético (cimento, aço e energia) e PIB, aponta possíveis relações no formato "N" (médio e longo prazos), ou seja, a pressão ambiental reduz



em determinado momento, retomando no período seguinte.

Fischer-Kowalski e Amann (2001) analisam o impacto ambiental do metabolismo socioeconômico e estimam a CKA, usando dados do PIB, de emissão de CO₂ e indicadores da MFA para países industrializados de maior renda e em economias em desenvolvimento, entre 1975-1996. Os resultados apontam a influência de trocas materiais no desempenho de economias industriais, criando uma falsa imagem otimista de desmaterialização nessas economias, uma vez que o impacto ambiental é subestimado quando confrontando apenas com PIB. Ademais, o aumento da riqueza não resultou necessariamente em um aumento ou diminuição correspondente no impacto ambiental e não foram encontrados padrões consistentes de declínio (países ricos exercendo menor pressão ambiental), embora os resultados apontem que países em processo de enriquecimento possuem um ambiente mais favorável para promover mudanças mais efetivas.

Por último, Flores (2017) utiliza o indicador de extração fluxo de materiais (DMC) para a construção da CKA nos países do BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul), demonstrando uma relação entre essa variável, o PIB per capita, abertura comercial e a adoção de legislações governamentais (protocolos, leis, ou acordos adotados em cada país). Os resultados apontam que a expansão econômica aumenta a pressão ambiental em todos os países selecionados, ou seja, não foram encontrados padrões da curva em “U invertido”.

³ A *Global Material Flows Database* (GMFD) é uma das principais bases de dados abertos internacionais sobre extração, consumo e comércio de materiais, desenvolvida pelo *International Resource Panel* (IRP) da ONU e por instituições como o Programa das Nações

3. Elementos metodológicos da pesquisa

Os dados foram extraídos da base de fluxo de material disponíveis no portal Global Material Flows Database (www.materialflows.net)³. Já os dados de crescimento econômico (PIB per capita em R\$) foram sistematizados das bases do IBGE/WDI. Em ambas, as séries compreendem o período de 1970 a 2016.

As estimativas da CKA seguem o modelo clássico e o modelo expandido propostos por Grossman e Krueger (1991) em (1), sendo expandida por De Bruyn (1997) e De Bruyn et al. (1998), em (2):

$$\text{Variável de fluxo de material} = \alpha + \beta_1 Y + \beta_2 Y^2 + \varepsilon_t \quad (1)$$

$$\text{Variável de fluxo de material} = \alpha + \beta_1 Y + \beta_2 Y^2 + \beta_3 Y^3 + \varepsilon_t \quad (2)$$

Onde:

Variável de fluxo de material: Consumo de material doméstico/entrada indireta de material/extração doméstica (respectivamente) em bilhões de toneladas métricas;

Y: produto interno bruto per capita;

β_1 , β_2 , β_3 : são os coeficientes a serem estimados e medem as elasticidades da variável dependente em relação às respectivas variáveis independentes;

ε_t - Erro aleatório

Para que a hipótese da CKA seja validada, é necessário que, além da significância dos estimadores β_1 e β_2 , os seguintes sinais

Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). Ela fornece dados abrangentes e padronizados sobre fluxos de materiais em escala global, nacional e regional, sendo essencial para estudos de metabolismo socioeconômico, sustentabilidade e economia circular.



devem ser respeitados: $\beta_1 > 0$, $\beta_2 < 0$ e $\beta_3 > 0$. Outro ponto a se considerar é a opção pela função logarítmica, procedimento padrão nos casos de estimação da CKA pesquisados.

Um problema comum em séries de tempo é a presença de estacionariedade, ou seja, quando o modelo apresenta média constante, variância limitada e covariância dependente do intervalo de tempo entre as observações. Com o objetivo de identificar sua ocorrência, foram realizados quatro testes: Teste Dickey Fuller aumentado (ADF), Teste Phillips-Perron (PP), Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin

(KPSS) e ADF-GLS test. Vale ressaltar que os testes indicam presença de raiz unitária (não estacionariedade utilizando a estatística t) como hipótese nula, à exceção do teste KPSS, cuja hipótese nula é a existência de estacionariedade (utiliza a estatística LM).

4. Apresentação e discussão dos resultados

A tabela 3 descreve a descrição dos dados sociometabólicos e econômicos selecionados: ED, DMI, DMC e PIB per capita, compreendendo o período de 1970 a 2016.

Tabela 3. Estatística descritiva das variáveis utilizadas (1970-2016)

Variável	Obs.	Média	Desvio	Mínimo	Máximo
ED (bilhões de toneladas)	47	1,92	1,02	5,61	4,01
DMI (bilhões de toneladas)	47	5,61	2,12	2,94	1,01
DMC (bilhões de toneladas)	47	1,71	8,9	5,17	3,56
PIB <i>per capita</i> (R\$ de 2016)	47	6.649,21	1.319,46	3.642,00	9.199,00

Fonte: Resultados da pesquisa.

Sequencialmente, os testes de estacionariedade para as variáveis dependentes e independentes indicaram que todas as séries são não estacionárias em nível. Isso significa que os dados não possuem uma média constante ao longo do tempo, o que pode afetar a precisão das estimativas. Para lidar com essa questão, as variáveis serão utilizadas em primeira diferença, ou seja, será analisada a variação entre os períodos, em vez dos valores absolutos. Esse procedimento é comum em econometria para transformar séries não estacionárias em estacionárias, permitindo uma análise mais robusta. Dessa forma, a CKA será modificada para refletir essas

diferenças, proporcionando resultados mais confiáveis:

$$D(\text{LOGED}) = \alpha + D(\beta_1 \text{LOGY}) + D(\beta_2 \text{LOGY}^2) + D(\beta_3 \text{LOGY}^3) + \varepsilon_t \quad (3)$$

$$D(\text{LOGDMI}) = \alpha + D(\beta_1 \text{LOGY}) + D(\beta_2 \text{LOGY}^2) + D(\beta_3 \text{LOGY}^3) + \varepsilon_t \quad (4)$$

$$D(\text{LOGDMC}) = \alpha + D(\beta_1 \text{LOGY}) + D(\beta_2 \text{LOGY}^2) + D(\beta_3 \text{LOGY}^3) + \varepsilon_t \quad (5)$$

Para as estimações, utilizou-se o pacote Stata 14.0. Tabela 4 apresenta os testes de estacionariedade em primeira diferença, corroborando com a correção dos problemas presentes em nível.

Tabela 4. Testes de Estacionariedade – ADF, PP, KPSS e DF-GLS – (1970-2016)

Variáveis	ADF	PP	KPSS	DF-GLS
DifLOGDE	-5,576	-5,579	0,103	-2,491
DifLOGDMI	-5,588	-5,588	0,106	-2,526
DifLogDMC	-6,163	-6,165	0,764	-4,358
DifLOGY	-4,253	-4,143	0,134	-2,387
DifLOGY ²	-4,291	-4,193	0,130	-2,430
DifLOGY ³	-4,328	-4,328	0,126	-2,469

Fonte: Resultados da pesquisa.



As estimações do método mínimo quadrado ordinário (MQO) são apresentadas nas tabelas 5 e 6 para cada variável dependente selecionada. Os coeficientes R^2 , o t-stat e a

probabilidade (ou p-value) também são apresentadas. Visando tratar problemas de heterocedasticidade e autocorrelação, utilizou-se o método Newey-West, a fim de gerar erros mais robustos.

Tabela 5. MQO: DE em função da renda per capita defasados em 1 período (1970-2016)

Variável	Coefficientes	Std. error	T-statistic	Prob.
DIFY	-4,052522	2,929713	-1,08	0,174
DIFY ²	0,2639354	0,1700153	1,55	0,128
α	0,0336498	0,0038125	8,83	0,000
R^2	0,3641			
R^2 ajustado	0,3345			
F-static.	15,05			
Prob. F-static.	0,0000			
Teste White	0,1375			
Durbin-Watson	1,90			
Teste BG – Prob.	0,8701			

Variável	Coefficientes	Std. error	T-statistic	Prob.
DIFLOGY	-240,5452	91,97108	-2,62	0,012
DIFLOGY ²	67,62104	10,72053	2,58	0,014
DIFLOGY ³	-1,054029	0,4161577	-2,53	0,015
α	0,033539	0,0037914	8,85	0,000
R^2	0,4290			
R^2 ajustado	0,3882			
F-static.	13,37			
Prob. F-static.	0,0000			
Teste White	0,4805			
Durbin-Watson	2,20			
Teste BG – Prob.	0,4691			

Fonte: Resultados da pesquisa.

Notas: Teste BG para autocorrelação – Hipótese Nula: Ausência de autocorrelação. Teste Arch de heterocedasticidade – Hipótese Nula: ausência de heterocedasticidade.

Os coeficientes t-Statistic, R^2 , R^2 ajustado, estatística F e a probabilidade F também são apresentadas. Com o objetivo de verificar problemas de heterocedasticidade, foi realizado o White. A presença de autocorrelação foi verificada através dos testes Durbin-Watson e Breusch-Pagan (BG). Os resultados para o modelo clássico não apresentaram prob. Significativo e resultados razoáveis para heterocedasticidade e

autocorrelação. Já para a versão expandida foi significativa, mas sem o formato “N” tradicional.

A análise de Kuznets ambiental para entrada indireta de materiais (tabela 6) também apresenta resultados significativos para o modelo De Bruyn (1997) e De Bruyn et al. (1998). O modelo também não apresenta formato “N”, como proposto.

Tabela 6. MQO: DMI em função da renda per capita defasados em 1 período (1970-2016)

Variável	Coefficientes	Std. error	T-statistic	Prob.
DIFLOGY	-3,347555	2,953588	-1,13	0,263
DIFLOGY ²	0,2256301	0,1712836	1,32	0,195
α	0,0326415	0,0036774	8,88	0,000
R^2	0,4224			
R^2 ajustado	0,3956			
F-static.	18,69			



<i>Prob. F-static.</i>	0,0000			
<i>Teste White</i>	0,1995			
<i>Durbin-Watson</i>	1,97			
<i>Teste BG – Prob.</i>	0,9035			
Variável	Coefficientes	Std. error	T-statistic	Prob.
DIFLOGY	-216,6051	94, 74928	-2,29	0,027
DIFLOGY²	24, 89545	11,0539	2,25	0,030
DIFLOGY³	-0,9504921	0,4295027	-2,21	0,032
α	0, 0325416	0, 00343	9,49	0,000
<i>R²</i>	0,4761			
<i>R² ajustado</i>	0,4383			
<i>F-static.</i>	16,83			
<i>Prob. F-static.</i>	0,0000			
<i>Teste White</i>	0,5713			
<i>Durbin-Watson</i>	2,28			
<i>Teste BG – Prob.</i>	0,3079			

Fonte: Resultados da pesquisa.

Notas: Teste BG para autocorrelação – Hipótese Nula: Ausência de autocorrelação. Teste Arch de heterocedasticidade – Hipótese Nula: ausência de heterocedasticidade.

No tocante ao consumo de material doméstico (DMC), os resultados (tabela 7) apontam que entre os anos de 1970 e 2016, não houve relação da CKA para a economia brasileira, sendo que o modelo só apresentou resultados significativos para a versão expandida, bem como ausência de autocorrelação e heterocedasticidade.

Tabela 7. MQO: DMC em função da renda per capita defasados em 1 período (1970-2016)

Variável	Coefficientes	Std. error	T-statistic	Prob.
DIFY	-5,4641	3,320765	-1,65	0,107
DIFY²	0,3433	0,1913032	1,79	0,080
α	0,03346	0,0044661	7,49	0,000
<i>R²</i>	0,2477			
<i>R² ajustado</i>	0,2177			
<i>F-static.</i>	8,79			
<i>Prob. F-static.</i>	0,0006			
<i>Teste White</i>	0,1956			
<i>Durbin-Watson</i>	2,11			
<i>Teste BG – Prob.</i>	0,6228			
Variável	Coefficientes	Std. error	T-statistic	Prob.
DIFLOGY	-290,2025	103,6785	-2,80	0,008
DIFLOGY²	33,28213	12,01402	2,77	0,008
DIFLOGY³	-1,269083	0,4634891	-2,74	0,009
α	0,333295	0,0038045	8,76	0,000
<i>R²</i>	0,3177			
<i>R² ajustado</i>	0,2690			
<i>F-static.</i>	11,85			
<i>Prob. F-static.</i>	0,000			
<i>Teste White</i>	0,5051			
<i>Durbin-Watson</i>	2,30			
<i>Teste BG – Prob.</i>	0,2862			

Fonte: Resultados da pesquisa.

Notas: Teste BG para autocorrelação – Hipótese Nula: Ausência de autocorrelação. Teste Arch de heterocedasticidade – Hipótese Nula: ausência de heterocedasticidade.



Assim, os testes econométricos para as variáveis selecionadas indicam a inexistência da CKA em formato “U” invertido ou “N” para a relação entre consumo de fluxos de materiais e PIB per capita para os períodos de 1970 a 2016.

5. Considerações finais

Abordagens como sociometabolismo ganham relevância entre economistas pela possibilidade de usar um indicador físico que estime o consumo de materiais e energia, algo totalmente inerente ao conceito de sistema aberto e que fundamenta a economia ecológica. Assim, o MSE ajuda a identificar oportunidades para melhorar a eficiência do uso de recursos e reduzir os impactos ambientais, buscando uma economia mais sustentável.

A interação entre variáveis sociometabólicas, como a emissão de CO₂, e indicadores macroeconômicos, como o Produto Interno Bruto (PIB), ilustra a complexidade inerente a essas relações. O crescimento econômico em países emergentes como o Brasil apresenta uma relação complexa com a degradação ambiental. Embora estudos apontem uma correlação entre desenvolvimento e aumento da poluição no longo prazo, essa conexão não é inevitável, variando conforme o modelo de desenvolvimento adotado e as políticas públicas implementadas.

A análise sugere que o impacto ambiental depende menos do crescimento em si e mais de como ele ocorre. Economias baseadas em atividades extrativistas e intensivas em recursos naturais tendem a apresentar padrões mais preocupantes de degradação. Por outro lado, quando acompanhado por inovação tecnológica, eficiência energética e políticas ambientais eficazes, o desenvolvimento econômico pode alcançar

melhores resultados tanto na esfera econômica quanto ecológica.

O desafio central reside, portanto, não em impedir o crescimento, mas em promover um modelo que combine dinamismo econômico com sustentabilidade ambiental. Isso requer uma transição para sistemas produtivos baseados em energias renováveis, processos industriais limpos e princípios de economia circular, demonstrando que desenvolvimento e preservação podem ser objetivos complementares quando mediados por escolhas estratégicas adequadas.

Dada as limitações no uso de outros métodos, caso da valoração econômica dos recursos naturais, iniciativas como a estimação da CKA é comumente usada, embora os resultados sejam distintos, como foi demonstrado neste artigo. Os resultados encontrados demonstram que a pressão ambiental (através dos níveis de intensidade nos materiais utilizados) não seguem ciclos de decrescimento, seguidos de abundância econômica, nem um novo período recessivo, o que caracteriza o formato “N” da CKA.

Vale ressaltar que o modelo tradicional (“U” invertido) não apresentou resultados significativos para o modelo proposto, além da ausência de outras variáveis, que podem comprometer a eficácia da análise. Assim sendo, este estudo pretende contribuir para o debate sobre a transição material na economia. A transição para um uso mais eficiente e sustentável de materiais e energia é crucial para alcançar uma economia mais sustentável. Isso implica uma mudança fundamental na forma como é a produção e o consumo, exigindo inovações tecnológicas, mudanças comportamentais e políticas públicas mais eficazes.

Há lacunas que podem ser exploradas em pesquisas futuras a partir dos resultados apresentados, como a inclusão de outras



variáveis sociometabólicas e socioeconômicas na análise representam a continuidade deste estudo, já que se apresentam como lacunas científicas. São exemplos: o nível de poluição gerado (ou a quantidade de material não aproveitada) no processo de extração/consumo, a

desigualdade de renda e a estrutura industrial. Além disso, estudos futuros podem explorar a aplicabilidade do MSE e da curva de Kuznets ambiental em diferentes contextos geográficos e institucionais.

Referencias

Adu, D. T., & Denkyirah, E. K. (2019). Economic growth and environmental pollution in West Africa: Testing the Environmental Kuznets Curve hypothesis. *Kasetsart Journal of Social Sciences*, 40(2), 281-288. <https://doi.org/10.1016/j.kjss.2017.12.008>.

Alier, J. M. (2001). Environmental conflicts, environmental justice and valuation. Universitat Autònoma de Barcelona. Unitat d'Història Econòmica.

Alier, J. M., & Walter, M. (2016). Social metabolism and conflicts over extractivism. In *Environmental Governance in Latin America* (pp. 58-85).

Al-Mulali, U., Ozturk, I., & Lean, H. H. (2015). Investigating the Environmental Kuznets Curve hypothesis in Vietnam. *Energy Policy*, 76, 123-131. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.11.019>.

Andrade, A. L. (2009). CO2 e crescimento econômico: uma análise para as emissões dos combustíveis líquidos de origem fóssil no Brasil. Disponível em: <https://shre.ink/8nkG>

Araújo, A. H. S. (2022). Avaliando a dimensão biofísica da economia brasileira: uma análise sociometabólica no período 1970-2019.

Araújo, A. H. S., Andrade, D. C., & de Souza, H. F. (2019). Metabolismo socioeconômico (mse): construção conceitual e convergência com a economia ecológica (ee). *REVIBEC-Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 31(1), 127-143.

Arrow, K., Bolin, B., Costanza, R., Dasgupta, P., Folke, C., Holling, C. S., ... & Pimentel, D. (1995). Economic growth, carrying capacity, and the environment. *Science*, 268*(5210), 520-521

Auci, S., & Vignani, D. (2013). Environmental Kuznets curve and domestic material consumption indicator: an European analysis. MPRA Paper 52882. University Library of Munich, Germany.

Avelino, B. A. (2018). Saúde ambiental e crescimento econômico nos municípios brasileiros: teste das hipóteses da curva de Kuznets ambiental e da transição epidemiológica - Uberlândia (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia). <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.501>

Bebbington, A. (2011). Extractive industries, socio-environmental conflicts and political economic transformations in Andean America. In *Social conflict, economic development and the extractive industry* (pp. 3-26). Routledge.

Bringezu, S., Schütz, H., & Moll, S. (2003). Rationale for and interpretation of economy-wide materials flow analysis and derived indicators. *Journal of Industrial Ecology*, 7(2), 43-64. <https://doi.org/10.1162/108819803322564343>

Bueno, R. D. L. D. S. (2018). *Econometria de séries temporais*. São Paulo: Cengage Learning.



Carpintero, Ó. (2005). El metabolismo de la economía española. Fundación César Manrique, colección Economía vs Naturaleza.

Carvalho, J. F. D. (2008). Combustíveis fósseis e insustentabilidade. *Ciência e cultura*, 60(3), 30-33.

Cechin, A. D. (2008). Georgescu-Roegen e o desenvolvimento sustentável: diálogo ou anátema? (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

Cunha, C. A. D. (2008). Curva De Kuznets Ambiental Estimativa Econométrica Usando Co2 E Pib Per Capita. In 46º Congresso, 20 a 23 de julho de 2008, Rio Branco, Acre, Brasil 133284. Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.133284>

Daly, H. E. (2014). *Beyond growth: the economics of sustainable development*. Beacon Press.

Daly, H. E. (2007). *Ecological economics and sustainable development*. Edward Elgar Publishing.

De Brito, R. A., de Azevedo Melo, A. S. S., & Sampaio, Y. D. S. B. (2014). Curva De Kuznets Ambiental: Falta De evidências Para O Desmatamento Da Amazônia Legal Brasileira. ANPEC-Associação Nacional dos Centros de Pós-graduação em Economia [Brazilian Association of Graduate Programs in Economics].

De Bruyn, S. M. (1997). Explaining the environmental Kuznets curve: structural change and international agreements in reducing sulphur emissions. *Environment and Development Economics*, 2(4), 485-503. <https://doi.org/10.1017/S1355770X97000260>

De Bruyn, S. M., van den Bergh, J. C., & Opschoor, J. B. (1998). Economic growth and emissions: reconsidering the empirical basis of environmental Kuznets curves. *Ecological Economics*, 25(2), 161-175. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(97\)00178-X](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(97)00178-X).

Dasgupta, S., Laplante, B., Wang, H., & Wheeler, D. (2002). Confronting the Environmental Kuznets Curve. *Journal of Economic Perspectives*, 16(1), 147-168. <https://doi.org/10.1257/0895330027157>.

Dias, R. (2014). *Eco-inovação: caminho para o crescimento sustentável*. São Paulo: Atlas.

Estatístico, A. (2017). Setor de transformação de não metálicos. Secretaria de Geologia.

Farley, J., & Kish, K. (2021). Ecological economics: The next 30 years. *Ecological Economics*, 190, 107211.

Fernandes, C. I. P. (2021). Crescimento econômico versus emissões de CO2: uma análise sob a ótica da curva ambiental de Kuznets (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri).

Fischer-Kowalski, M., & Amann, C. (2001). Beyond IPAT and Kuznets curves: globalization as a vital factor in analysing the environmental impact of socio-economic metabolism. *Population and Environment*, 23, 7-47. <https://doi.org/10.1023/A:1017560208742>

Fischer-Kowalski, M., & Weisz, H. (2016). The archipelago of social ecology and the island of the Vienna school. In *Social ecology: society-nature relations across time and Space* (pp. 3-28). https://doi.org/10.1007/978-3-319-33326-7_1

Flores, R. J. G. (2017). Teste da hipótese da curva de Kuznets ambiental para os países do BRICS (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia). <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2017.260>

Flórez, G. A. M. (2018). La Curva de Kuznets Ambiental (CKA) basada en el Indicador de Consumo Material Doméstico (CDM): Perú, 1970-2015.

Fonseca, L. N., & Ribeiro, E. P. (2004). Preservação ambiental e crescimento econômico no Brasil. In *Anais do XXXII Encontro Nacional de Economia*. ANPEC-



Associação Nacional dos Centros de Pós-graduação em Economia.

Freitas, G. S. B. (2012). A demanda por minério de ferro no contexto das relações entre Brasil e China (Monografia de Especialização, Universidade de Brasília).

Gabriel, A. W., Madelrieux, S., & Lescoat, P. (2020). A review of socio-economic metabolism representations and their links to action: Cases in agri-food studies. *Ecological Economics*, 178, 106765.

Ganzala, G. G. (2018). A industrialização, impactos ambientais e a necessidade de desenvolvimento de políticas ambientais sustentáveis no século XXI. In Melo, L. M. C. O. (Ed.), *Relações Internacionais*. Centro Universitário Internacional Uninter - Escola de Gestão Pública, Política, Jurídica e Segurança. Disponível em: <https://repositorio.uninter.com/handle/1/295>

Georgescu-Roegen, N. (1975). Energía y mitos económicos. *El trimestre económico*, 42(168), 779-836.

Gomes, S. C., & Braga, M. J. (2008). Desenvolvimento econômico e desmatamento na Amazônia Legal: uma análise econométrica. In 46º Congresso, 20 a 23 de julho de 2008, Rio Branco, Acre, Brasil. Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural (SOBER).

Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991). Environmental impacts of a North American free trade agreement. <https://doi.org/10.3386/w3914>

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>

Huang, C. L., et al. (2012). Using material/substance flow analysis to support sustainable development assessment: A literature review and outlook. *Resources, Conservation and Recycling*, 68, 104-116.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.08.012>

Infante-Amate, J., de Molina, M. G., & Toledo, V. M. (2017). El metabolismo social. Historia, métodos y principales aportaciones. *REVIBEC: Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 27, 130-152.

Kaika, D., & Zervas, E. (2013). The Environmental Kuznets Curve (EKC) theory. *Journal of Cleaner Production*, 40, 16-22. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.09.014>.

Klein, C., & Dutrow, B. (2007). *Manual of mineral science*. John Wiley & Sons.

Kovanda, J. (2019). Use of physical supply and use tables for calculation of economy-wide material flow indicators. *Journal of Industrial Ecology*, 23(4), 893-905. <https://doi.org/10.1111/jiec.12828>

Kovanda, J., & Weinzettel, J. (2013). The importance of raw material equivalents in economy-wide material flow accounting and its policy dimension. *Environmental Science & Policy*, 29, 71-80. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.01.005>

Krausmann, F., et al. (2017). Material flow accounting: measuring global material use for sustainable development. *Annual Review of Environment and Resources*, 42, 647-675. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102016-060726>

Lau, L. S., Choong, C. K., & Ng, C. F. (2018). Role of institutional quality on environmental Kuznets curve: a comparative study in developed and developing countries. In *Advances in Pacific Basin Business, Economics and Finance* (Vol. 6, pp. 223-247). Emerald Publishing Limited. <https://doi.org/10.1108/S2514-465020180000006007>

Lazaro, L. L. B., & Soares, R. S. (2024). The energy quadrilemma challenges-Insights from the decentralized energy transition in Brazil. *Energy Research & Social Science*, 113, 103533.



Lucena, A. F. P. D. (2005). Estimativa de uma Curva de Kuznets Ambiental aplicada ao uso de energia e suas implicações para as emissões de carbono no Brasil (Unpublished Master Thesis). Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Luz, A. D., & Fochezatto, A. (2022). O transbordamento do PIB do Agronegócio do Brasil: uma análise da importância setorial via Matrizes de Insumo-Produto. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 61, e253226.

Machado, L. N., & Carrara, A. F. (2020). Exportação de commodities minerais e crescimento econômico: uma análise da hipótese Export-Led Growth para o Brasil. *Revista de Desenvolvimento e Políticas Públicas*, 4(1), 55-76.

Martínez, A. C. G., et al. (2010). El flujo de materiales y el desarrollo económico en España: un análisis sobre desmaterialización (1980-2004). *REVIBEC-Revista Iberoamericana De Economía Ecológica*, 33-51.

Ministério de Minas e Energia (MME). (2008). Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Não-Metálicos.

Morais, A. E. A. D. (2019). A Curva Ambiental de Kuznets para emissão de CO₂ no Brasil: uma análise com cointegração em painel (Dissertação de Mestrado). Instituto de Ciências Sociais e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto.

Moreira, T. de M., & Tavares, F. B. (2016). Análise metodológica e empírica acerca da importância do 'setor petróleo & gás na economia brasileira. Rio Oil & Gás Expo and Conference. Disponível em: <https://shre.ink/8nkN>

OECD (Organization for Economic Cooperation and Development). (2008). Measuring material flows and resource productivity.

Romeiro, A. R. (2012). Desenvolvimento sustentável: uma perspectiva econômico-

ecológica. *Estudos Avançados*, 26, 65-92. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142012000100006>

Saiani, C. C. S., Toneto Junior, R., & Dourado, J. A. (2013). Déficit de acesso a serviços de saneamento ambiental: evidências de uma Curva Ambiental de Kuznets para o caso dos municípios brasileiros?. *Economia e Sociedade*, 22, 791-824. <https://doi.org/10.1590/S0104-06182013000300008>

Schandl, H., et al. (2018). Global material flows and resource productivity: forty years of evidence. *Journal of Industrial Ecology*, 22(4), 827-838. <https://doi.org/10.1111/jiec.12626>

Spash, C. L. (2011). Social ecological economics: Understanding the past to see the future. *American Journal of Economics and Sociology*, 70(2), 340-375.

Serrano, A. L., Loureiro, P. R., & Nogueira, J. M. (2014). Evidência da Curva de Kuznets Ambiental no Brasil: uma análise do crescimento econômico e poluição. *Revista Economia e Desenvolvimento*, 13(2), 304-314.

Silva, L. H. V., da Silva Filho, C. F., de Melo Conti, D., & de Benedicto, S. C. (2024). Interconexões entre a Economia Ecológica, as agendas globais de desenvolvimento e as políticas públicas para o desenvolvimento local sustentável. *REUNIR Revista de Administração Contabilidade e Sustentabilidade*, 14(1), 62-76.

Sousa, A. G., et al. (2008). Sustentabilidade e meio ambiente no Brasil: uma análise a partir da Curva de Kuznets. In 46º Congresso, 20 a 23 de julho de 2008, Rio Branco, Acre, Brasil 103103. *Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural*. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.103103>

Sousa, L. C. R., Sousa, D. S. P., & Santos, R. B. N. (2016). Curva Ambiental De Kuznets: uma análise macroeconômica entre crescimento econômico e impacto ambiental de 2005 a 2010. *Revista Gestão &*



Sustentabilidade Ambiental, 5(2), 227-246.
<https://doi.org/10.19177/rgsa.v5e22016227-246>

Stern, D. I. (2002). Explaining changes in global sulfur emissions: an econometric decomposition approach. *Ecological Economics*, 42(1-2), 201-220.
[https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00050-2](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00050-2)

Teixeira, R. F. A. P., Bertella, M. A., & de Almeida, L. T. (2012). Curva de Kuznets ambiental para o estado de Mato Grosso. *Análise Econômica*, 30(57).
<https://doi.org/10.22456/2176-5456.17405>

Vehmas, J., Luukkanen, J., & Kaivo-Oja, J. (2007). Linking analyses and environmental Kuznets curves for aggregated material flows in the EU. *Journal of Cleaner Production*, 15(17), 1662-1673.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.08.010>

Viglio, J. E., Giulio, G. M. D., Barbi, F., & Ferreira, L. D. C. (2019). Narrativas científicas sobre petróleo e mudanças do clima e suas reverberações na política climática brasileira. *Sociologias*, 21(51), 124-158.

Zilio, M. I. (2012). Curva de Kuznets ambiental: la validez de sus fundamentos en países en desarrollo. *Cuadernos de Economía*, 35(97), 43-54.

Zhang, C., Chen, W. Q., & Ruth, M. (2018). Measuring material efficiency: A review of the historical evolution of indicators, methodologies and findings. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, 79-92.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.028>