

Universidade Federal do Paraná
Setor de Ciências Exatas
Departamento de Estatística e Departamento de Informática
Programa de Especialização em *Data Science* e *Big Data*

José Carlos Martinez Onate

Padrão estrutural das emissões de CO₂ nos setores econômicos do Brasil: uma
abordagem com análise Insumo-Produto

Curitiba
2025

José Carlos Martinez Onate

Padrão estrutural das emissões de CO2 nos setores econômicos do Brasil: uma
abordagem com análise Insumo-Produto

Artigo apresentado ao Programa de
Especialização em *Data Science* e *Big Data* da
Universidade Federal do Paraná como requisito
parcial para a obtenção do grau de especialista.

Orientador: Prof. Dr Paulo Justiniano Ribeiro

Curitiba

2025

Padrão estrutural das emissões de CO₂ nos setores econômicos do Brasil: uma abordagem com análise Insumo-Produto

Pattern of CO₂ Emissions in Brazilian Economic Sectors: An Input-Output Approach

José Carlos Martinez Onate¹, Paulo Justiniano Ribeiro²

¹ Programa de Pós-Graduação em Ciência de Dados e Big Data, Universidade Federal do Paraná (UFPR),
Curitiba, Brasil

² Departamento de Informática (DInf), Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Resumo

As mudanças climáticas e a necessidade de reduzir emissões de gases de efeito estufa têm impulsionado a busca por instrumentos capazes de mensurar a contribuição setorial para o aquecimento global. Este estudo analisa o padrão estrutural das emissões de CO₂ no Brasil por meio da abordagem insumo-produto ambientalmente estendida, utilizando dados da Matriz Insumo-Produto nacional e da seção de emissões de Energia do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) para o ano de 2019. Foram estimados coeficientes de emissão e calculados multiplicadores ambientais de produção, permitindo mensurar o total de emissões diretas e indiretas associadas a cada setor econômico. Os resultados indicam que o Transporte Terrestre é o principal emissor total e indireto, seguido pelos setores de Produção de Minerais não Metálicos, Produção de Biocombustíveis, Transporte Aéreo, Transporte Aquaviário, Armazenagem e Correios, bem como pelas atividades de extração de petróleo e carvão. A análise evidencia a relevância dos impactos indiretos e reforça a utilidade da metodologia insumo-produto como ferramenta para subsidiar políticas públicas voltadas à descarbonização setorial e a transição energética na estrutura produtiva nacional.

Palavras-chave: emissões de CO₂, multiplicadores ambientais, matriz insumo-produto, SEEG, Brasil.

Abstract

Climate change and the need to reduce greenhouse gas emissions have driven the search for instruments capable of measuring the sectoral contribution to global warming. This study analyzes the structural pattern of CO₂ emissions in Brazil through the environmentally extended input-output approach, using data from the national Input-Output Matrix and the Energy emissions section of the Greenhouse Gas Emissions and Removals Estimation System (SEEG) for the year 2019. Emission coefficients were estimated, and environmental production multipliers were calculated, allowing for the measurement of the total direct and indirect emissions associated with each economic sector. The results indicate that Land Transport is the main total and indirect emitter, followed by the sectors of Non-Metallic Mineral Production, Biofuel Production, Air Transport, Water Transport, Storage and Postal Services, as well as petroleum and coal extraction activities. The analysis highlights the relevance of indirect impacts and reinforces the usefulness of the input-output methodology as a tool to support public policies aimed at sectoral decarbonization and the energy transition in the national productive structure.

Keywords: CO₂ emissions, environmental multipliers, input-output matrix, SEEG, Brazil.

1 Introdução

As mudanças climáticas vêm se consolidando como um dos principais desafios contemporâneos, exigindo respostas coordenadas por parte de governos, instituições de pesquisa e da sociedade civil. Nesse cenário, o monitoramento e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) tornaram-se centrais

nas agendas de planejamento público, sobretudo diante da necessidade de equilibrar desenvolvimento econômico com sustentabilidade ambiental.

O Brasil com a sua economia diversificada e um setor agropecuário forte apresenta um panorama complexo de emissões de CO₂. Compreender como estas emissões estão inter-relacionadas com a sua estrutura produtiva é fundamental para orientar políticas públicas

voltadas à descarbonização setorial, à modernização produtiva e ao cumprimento das metas ambientais internacionais.

Para este fim, o Modelo Insumo-Produto ambientalmente estendido apresenta-se como uma poderosa ferramenta ao permitir identificar quais setores e componentes da demanda final são mais intensivos em carbono e como estes se comportam em termos de propagação de emissões ao longo das cadeias produtivas. Essa abordagem possibilita compreender não apenas os setores que mais emitem diretamente, mas também aqueles cuja atividade econômica induz emissões em outros segmentos da economia por meio de sua demanda, revelando assim, a interdependência entre as emissões de CO₂ e a estrutura produtiva estadual. Para a análise, foram utilizadas a Matriz Insumo – Produto do Brasil para o ano de 2019 e os dados de emissões de CO₂ do mesmo ano obtidos a partir do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG)

A Matriz Insumo - Produto utilizada neste trabalho possui um total de 68 setores produtivos os quais seguem a Classificação Nacional de Atividades Econômicas CNAE. Sobre as emissões entretanto, a utilização da MIP com esse fim exige antes um processo de compatibilização entre os dados físicos de emissões do (SEEG) e os dados monetários da MIP estadual. Além de um alinhamento “rateio” entre as classificações setoriais do IPCC e da CNAE, garantindo coerência entre os sistemas de referência utilizados. Para isso, propõe-se uma metodologia de compatibilização inspirada nos trabalhos de Montoya, Lopes e Guilhoto (2014), que permitiu distribuir proporcionalmente as emissões entre os setores econômicos por meio da estrutura de consumo intermediário da MIP.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo discutir os aspectos metodológicos envolvidos nesse processo, incluindo a apresentação das bases de dados utilizadas e das estratégias adotadas para sua compatibilização e rateio. Ao final, pretende-se fornecer uma base técnica sobre a origem setorial das emissões, de modo a identificar quem emite e por qual tipo de demanda essas emissões são geradas.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Modelo Insumo-Produto e Extensões Ambientais

O modelo insumo-produto constitui uma das principais ferramentas analíticas para a avaliação da estrutura produtiva de uma economia e de seus efeitos sistêmicos. Sua utilidade vai além da mensuração das interações intersetoriais, permitindo também a

incorporação de aspectos ambientais à análise econômica.

Conforme apresentado por Miller e Blair (2009) e Guilhoto (2011), o modelo insumo-produto descreve uma economia composta por n setores produtivos, onde cada setor consome insumos provenientes de outros setores para produzir seus bens ou serviços e atender à demanda final. Essa estrutura é representada por meio de uma matriz de transações intersetoriais, que registra de forma sistemática todas as relações de compra e venda entre os setores.

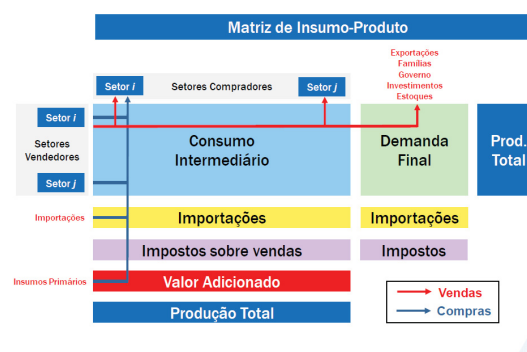


Figura 1: Relações fundamentais de Insumo - produto

A formulação matemática básica pode ser representada pelo sistema:

$$X = AX + Y \quad (01)$$

onde:

- X é o vetor de produção total,
- A é a matriz dos coeficientes técnicos diretos
 $a_{ij} = x_{ij} / x_{ja}$
- Y é o vetor da demanda final.

Os componentes da matriz A representam as quantidades dos diferentes insumos que cada atividade econômica utiliza para produzir uma unidade de produto. Um aumento unitário na produção de determinado setor desencadeia uma série de interações ao longo da cadeia produtiva, uma vez que os insumos demandados por esse setor precisam ser produzidos por outros setores, que, por sua vez, também requerem insumos adicionais. Essa estrutura permite estimar os efeitos diretos e indiretos da produção de bens e serviços em toda a economia, servindo de base para diversas análises, como o cálculo de multiplicadores, a identificação de encadeamentos produtivos e, mais recentemente, o

mapeamento das emissões associadas à atividade econômica.

A equação pode ser rearranjada, tal que:

$$X - AX = Y \quad (02)$$

$$(I - A)X = Y \quad (03)$$

em que I é uma matriz identidade de dimensão $n \times n$, uma vez que $(I - A)$ é quadrada e não-singular (Miller & Blair, 2009), é possível obter a sua inversa e encontrar uma solução única para o sistema, dada por:

$$X = (I - A)^{-1}Y \quad (04)$$

sendo $(I - A)^{-1}$ conhecida como matriz inversa de Leontief, que capta os efeitos diretos e indiretos da produção ao longo das cadeias intersetoriais.

Esta estrutura pode ser estendida para incorporar aspectos ambientais, dando origem à Matriz Insumo-Produto Ambientalmente Estendida (MIPE). Nessa abordagem, associa-se a cada setor produtivo uma intensidade de emissão f , geralmente expressa em tCO_2 , toneladas de CO_2 equivalente por unidade monetária produzida.

A equação fundamental da análise ambiental assume a forma:

$$E = f \cdot (I - A)^{-1} \cdot Y \quad (05)$$

onde:

- f é uma matriz (ou vetor) diagonal contendo as intensidades setoriais de emissão,
- $(I - A)^{-1}$ é a matriz inversa de Leontief, que capta os efeitos diretos e indiretos ao longo da cadeia produtiva
- Y representa a demanda final.

Essa formulação permite quantificar as emissões diretas e indiretas geradas pelas atividades econômicas, bem como analisar a contribuição de diferentes componentes da demanda (famílias, governo, exportações) para a emissão de gases de efeito estufa. Trata-se de uma abordagem robusta para subsidiar políticas públicas de descarbonização, planejamento ambiental, e a transição energética, conforme evidenciado em estudos como Wiedmann et al. (2009) e Lenzen et al. (2013).

3 Materiais e Métodos

3.1 Conjunto de Dados e Integração Metodológica das Emissões

Para a realização desta pesquisa, foram utilizados dois conjuntos de dados principais: a Matriz Insumo-Produto (MIP) do Brasil referente ao ano de 2019, disponibilizada pelo Núcleo de Economia Regional e Urbana da Universidade de São Paulo (NEREUS), e os dados de emissões de dióxido de carbono CO_2e (t) GWP-AR5 fornecidos pelo Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), da organização Observatório do Clima.

A MIP utilizada apresenta uma desagregação setorial em 68 setores econômicos, cobrindo as transações intersetoriais de bens e serviços na economia Brasileira. Os valores estão expressos em unidades monetárias correntes do ano de referência (R\$ de 2019).

Já os dados de emissões referem-se à seção de energia do SEEG e abrangem as emissões diretas associadas ao consumo de combustíveis nos diversos setores da economia. Os dados estão expressos em unidades físicas (toneladas de CO_2 por tipo de combustível). Foram excluídas as seções Agricultura, Mudança de Uso da Terra e Resíduos, por apresentarem emissões derivadas de processos não diretamente relacionados à estrutura econômica da MIP (ex: fermentação entérica, solos remanejados, manejo de resíduos sólidos etc.). A seção de Energia, por outro lado, foi mantida por apresentar correspondência direta com o consumo intermediário setorial de energia na MIP. Essa associação permitiu a construção de vetores de intensidade de emissão por atividade econômica.

Para viabilizar a integração dos dados físicos de emissões com a estrutura monetária da MIP, foi realizado um processo de harmonização setorial. Isso envolveu o agrupamento e compatibilização dos setores conforme a classificação utilizada na matriz insumo-produto, mantendo a coerência com os critérios metodológicos do SEEG.

3.1.2 Metodologia de compatibilização: Base BEN

Como apontado por Miller e Blair (2009), embora o modelo Insumo-Produto tenha sido originalmente concebido com base em fluxos físicos de produtos, a representação da matriz em unidades físicas apresenta diversas limitações metodológicas. Por esse motivo, as Matrizes Insumo-Produto estimadas para os países são, em sua maioria, expressas em valores monetários.

No entanto, em análises relacionadas a emissões de gases de efeito estufa, água e outros recursos, é

necessário recorrer a abordagens desenvolvidas na literatura que possibilitam a integração de tabelas de fluxos físicos como aquelas disponibilizadas pelo SEEG com as tabelas monetárias da MIP. Esse processo requer um esforço significativo de compatibilização entre os diferentes sistemas de informação, a fim de garantir a consistência interna do modelo e a coerência entre as bases de dados utilizadas. Ademais, não é incomum que os dados disponíveis sejam insuficientes para a construção direta da matriz ambientalmente estendida, tornando necessário o uso de estimativas e o apoio em outras fontes complementares de informação.

Dessa forma, a seguir são descritos os procedimentos metodológicos adotados para estimar as emissões de CO₂ por atividade econômica no Brasil. A desagregação das emissões foi realizada com base na estrutura do consumo de energia, medida em toneladas equivalentes de petróleo (tep), conforme a proposta metodológica de Montoya, Lopes e Guilhoto (2014). Os dados sobre consumo energético foram obtidos no Balanço Energético Nacional (BEN), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Na sequência, identificou-se o consumo de energia, expresso em (tep), e foi distribuído entre as 68 atividades econômicas da MIP brasileira com base na participação de cada setor no consumo intermediário de energia, assumindo conforme os autores, a hipótese de proporcionalidade entre o consumo energético e os fluxos monetários do consumo intermediário registrados na MIP. Essa abordagem permitiu compatibilizar os dados físicos nacionais expressos em toneladas equivalentes de petróleo (tep) com a estrutura setorial da MIP estadual. Assim, as emissões foram desagregadas com base na seguinte lógica:

- Distribuição do consumo energético por atividade:

O consumo energético em (tep) por atividade é obtido utilizando-se a proporção entre o consumo monetário do produto na atividade e o total do consumo intermediário monetário daquele produto em toda a economia.

$$Ce_i^P = ce_i^T \frac{ci_i^A}{\sum ci_i^A} \quad (06)$$

Onde:

Ce_i^P é o consumo energético em tep do produto na atividade;

ce_i^T é o consumo total energético do produto;

ci_i^A é o consumo intermediário monetário do produto na atividade.;

$\sum ci_i^A$ é o total do consumo intermediário monetário do produto.

O total do consumo energético em tep (CE_{ij}^{Br}) por cada atividade no Brasil, é determinado conforme a equação:

$$CE_{ij}^{Br} = \sum_{A=1} Ce_i^P \quad \forall s = 1, \dots, 68 \text{ e } p = 1, \dots, 6; \quad (07)$$

Onde:

CE_{ij}^{Br} é o consumo energético total em tep do por atividade

Ce_i^P é o consumo energético em tep do produto.

* Cálculo das emissões por atividade no Brasil:

A partir do consumo energético estimado, as emissões totais de CO₂ por atividade foram calculadas:

$$Co_{ij}^{Br} = co_i^{TBr} \frac{ce_i^A}{\sum ce_i^A} \quad (08)$$

Onde:

Co_{ij}^{Br} é a emissão de CO₂ por atividade no Brasil,

co_i^{TBr} é a emissão de CO₂ total por atividade no Brasil,

ce_i^A é consumo energético em tep por atividade,

$\sum ci_i^A$ é consumo energético em tep total na atividade.

Este processo permitiu compatibilizar os dados agregados do SEEG com a estrutura detalhada da MIP nacional, adotando como critério de rateio o consumo

energético em toneladas equivalentes de petróleo (tep), conforme metodologia validada na literatura. A partir dessas etapas, foi possível estruturar uma matriz energética nacional desagregada, utilizando os princípios da metodologia “Base BEN” proposta por Montoya, Lopes e Guilhoto (2014).

Posteriormente, esses coeficientes foram agregados por setor econômico, compondo o vetor (f) de coeficientes de emissão por unidade de produção monetária (tCO₂/R\$ milhão). Esse vetor foi utilizado para calcular os multiplicadores ambientais de produção, os quais expressam a quantidade total de emissões de CO₂ (diretas e indiretas) modelo aberto geradas na economia em resposta a um aumento unitário da demanda final por bens ou serviços de determinado setor econômico.

A abordagem parte do pressuposto de que o atendimento à demanda por um produto não gera emissões apenas no setor que o produz diretamente, mas também em todos os setores envolvidos ao longo de sua cadeia produtiva, em função do encadeamento intersetorial de insumos e serviços. Esse efeito é representado pela seguinte equação:

$$E = f \cdot (I - A)^{-1} \cdot Y \quad (09)$$

Além disso, com base no modelo de Leontief, e utilizando os chamados índices de ligação de Rasmussen (1956) e Hirschman (1958), foi possível determinar quais setores possuem maior poder de encadeamento dentro da economia. Esses índices demonstram as relações de encadeamento das atividades econômicas, considerando sua atuação como fornecedoras ou demandantes de insumos em determinada região.

A capacidade de uma atividade de demandar insumos é demonstrada pelo índice de ligação para trás (BL), que mede quanto tal setor demanda dos demais setores econômicos. Por sua vez, o índice de ligação para frente (FL) avalia a participação do setor nas cadeias produtivas, mensurando o quanto ele é demandado pelos outros setores da economia. Quando o coeficiente encontrado é superior a 1, identifica-se um encadeamento forte; caso seja inferior a 1, o encadeamento é considerado fraco. Quando tanto o poder de dispersão (BL) quanto a sensibilidade de dispersão (FL) superam a unidade, o setor é classificado como “setor-chave” (Guilhoto, 2014; Vale e Perobelli, 2020).

Os índices FL e BL são dados, respectivamente, pelas expressões:

$$FL = \frac{b_{i*}}{B^*}$$

$$BL = \frac{\frac{b_{*j}}{n}}{B^*} \quad (10)$$

Onde:

b_{i*} são os elementos da matriz inversa de Leontief;

n o número de atividades econômicas, ou setores;

$b_{*j} = \sum_{i=1}^n b_{ij}$ é a soma dos elementos da coluna j da matriz B ;

$b_{i*} = \sum_{j=1}^n b_{ij}$ é a soma dos elementos da linha i da matriz B ;

$b_{**} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij}$ é a soma total de todos os elementos da matriz B ;

$B^* = \frac{b_{**}}{n^2}$ é a média dos elementos da matriz B .

Ressalta-se que os dados de emissões utilizados dizem respeito apenas à seção de energia, devido à maior confiabilidade e disponibilidade de informações compatíveis com a MIP setorial. Assim, os resultados obtidos representam uma proxy parcial das emissões totais da economia, com foco nas emissões por consumo intermediário de energéticas de cada um dos 68 setores econômicos.

3.2 Infraestrutura Computacional

A implementação dos procedimentos metodológicos deste estudo foi realizada integralmente na linguagem R, utilizando o ambiente de desenvolvimento integrado RStudio, executado em um computador com sistema operacional Windows 11 e processador Intel Core i5, com 8 GB de memória RAM.

O desenvolvimento do código foi orientado pelo manual de Vale & Perobelli (2020) *Análise de Insumo-Produto: teoria e aplicações no R*, que serviu como referência para a estruturação dos scripts e a aplicação das rotinas de cálculo, incluindo a obtenção da matriz inversa de Leontief, dos multiplicadores ambientais e dos índices de encadeamento.

Foram empregados os seguintes pacotes do R:

- *openxlsx* – leitura e gravação de arquivos Excel;
- *dplyr* e *tibble* – manipulação e transformação de dados;

- *ggplot2*, *ggrepel* e *scales* – construção e personalização de gráficos;
- *flextable*, *knitr* e *kableExtra* – formatação e exportação de tabelas;
- *gridExtra* – organização de múltiplos gráficos em painéis.

Os scripts foram organizados em diretórios separados para dados, códigos e resultados, visando manter a reprodutibilidade e a rastreabilidade da pesquisa. Sempre que possível, adotou-se o uso de funções vetorizadas e operações matriciais para otimizar o desempenho computacional.

A escolha do R como ferramenta principal justifica-se por sua ampla adoção em análises econômicas e ambientais, pela disponibilidade de bibliotecas especializadas para modelagem insumo-produto e pela facilidade de integração com diferentes formatos de dados.

4 Resultados

4.1 Multiplicadores Ambientais de CO₂

Os cálculos iniciais desta pesquisa permitiram estimar os coeficientes de emissão de CO₂ para os 68 setores econômicos considerados, expressos em toneladas de CO₂ por unidade monetária de produção. Esses coeficientes representam a intensidade direta de emissões em cada setor e serviram como base para o cálculo dos multiplicadores ambientais apresentados a seguir. A tabela completa com os índices de todos os 68 setores pode ser consultada no Anexo 1.

A partir da multiplicação da matriz diagonal contendo o vetor de coeficientes técnicos de emissão (f) pela matriz inversa de Leontief $(I - A)^{-1}$, foi possível construir a matriz $F\text{CO}_2$, que representa as emissões diretas e indiretas de CO₂ geradas por cada setor em função da demanda final da economia. Essa matriz ambientalmente estendida permitiu identificar como as emissões se propagam ao longo das cadeias produtivas, revelando interdependências entre setores emissores e demandantes. Com base nesta matriz resultante, foram derivados os efeitos multiplicadores.

A análise dos multiplicadores ambientais de CO₂ evidenciou que o setor de Transporte Terrestre apresenta o maior impacto, com 468,10 tCO₂ por R\$1 milhão demandado (Figura 1). Esse resultado indica que um aumento unitário na demanda final por produtos desse setor induz, direta e indiretamente, um volume substancial de emissões ao longo de toda a cadeia produtiva.

Na sequência, destacam-se os setores de Produção de Minerais não Metálicos (263,84 tCO₂/R\$ 1 milhão) e Geração de Biocombustíveis (244,38 tCO₂/R\$ 1 milhão), ambos fortemente intensivos em energia e com cadeias de suprimento associadas a processos emissores.

No modelo insumo-produto utilizado neste trabalho, as emissões são atribuídas conforme os fluxos intersetoriais. Dessa forma, mesmo que o biocombustível emita menos na fase de uso, ele herda as emissões dos setores agropecuário, químico, energético e logístico que compõem sua cadeia de produção (MONTTOYA; LOPES; GUILHOTO, 2014).

Entretanto, é importante ponderar que a avaliação em equilíbrio geral das emissões de CO₂ associadas aos biocombustíveis deve considerar também o potencial de sequestro de carbono durante o cultivo das biomassas. Cultivos como a cana-de-açúcar absorvem CO₂ da atmosfera via fotossíntese, o que pode compensar parcialmente as emissões geradas ao longo da cadeia produtiva, especialmente em sistemas sustentáveis e integrados (GOLDEMBERG et al., 2008). Nesse sentido, embora os indicadores de intensidade monetária apontem elevados coeficientes setoriais, a sustentabilidade dos biocombustíveis no longo prazo segue superior à de fontes fósseis, sobretudo quando combinada a boas práticas agrícolas, uso de resíduos e melhorias tecnológicas na produção.

Outros setores, como Transporte Aéreo, Transporte Aquaviário, Madeira, Armazenagem e Correio, Indústrias Extrativas e Siderurgia, também figuram entre os maiores emissores. Esse resultado reflete tanto a interdependência entre atividades logísticas e o uso de insumos fósseis, quanto às características intrínsecas de seus processos industriais, altamente dependentes de fontes de energia poluentes.

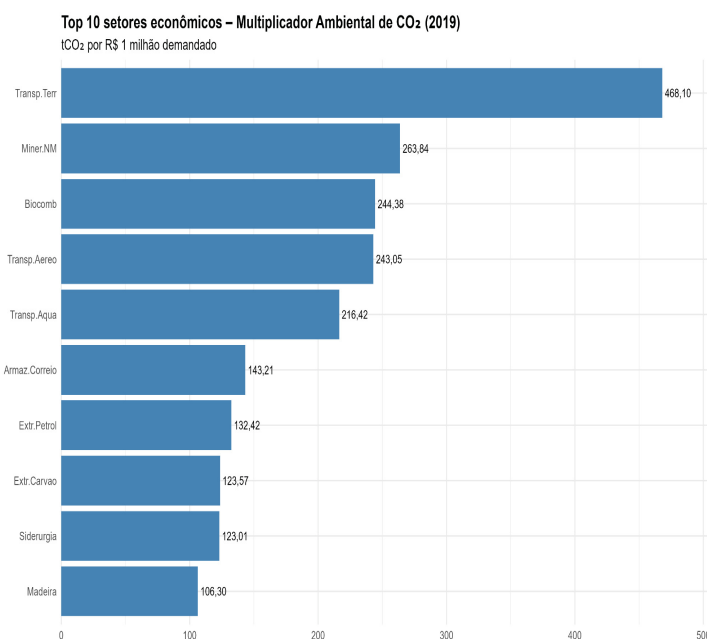


Figura 2: Top 10 setores com maiores Multiplicadores totais de emissão de CO₂

4.2 Efeitos Diretos e Indiretos

A decomposição dos efeitos totais indica predomínio do componente direto na maior parte dos setores com maiores impactos (Figura 2). Em Transporte Terrestre, Minerais não Metálicos, Biocombustíveis, Transporte Aéreo e Transporte Aquaviário, o efeito direto responde por 73% – 85% do total, refletindo processos produtivos e uso de combustíveis intensivos em carbono no próprio setor.

Armazenagem e Correio, Extração de Petróleo e Extração de Carvão também apresentam maior participação do direto, ainda que com parcelas indiretas não desprezíveis, associadas a energia, logística de transporte e insumos intermediários. Em contraste, Siderurgia e Madeira exibem efeitos indiretos superiores aos diretos, sinalizando cadeias a montante particularmente emissoras (energia térmica, coque/carvão e insumos intermediários). Esses padrões reforçam que, além de medidas setoriais, intervenções nos elos fornecedores podem ampliar a eficácia das políticas de mitigação.

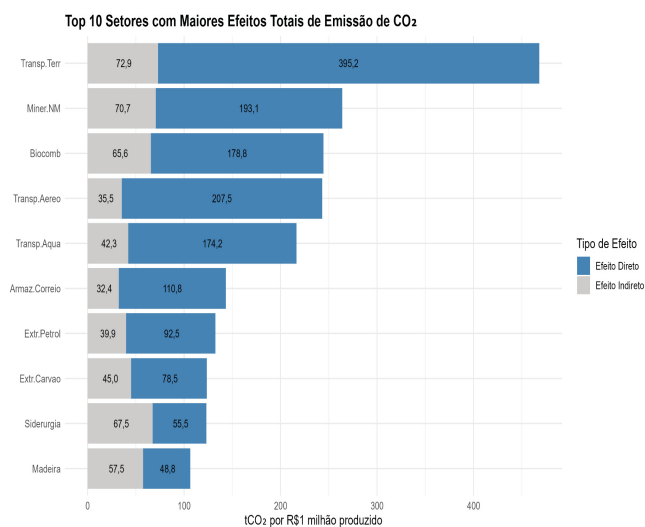


Figura 3: Top 10 setores com maiores multiplicadores efeitos diretos e indiretos de emissão de CO₂

4.3 Classificação Ambiental dos Setores (BL x FL)

A classificação setorial com base nos índices de Encadeamento para Trás (BL_CO₂) e Encadeamento para Frente (FL_CO₂) adaptados para emissões (Figura 3) permitiu identificar padrões de propagação ambiental na economia.

O setor de Transporte Terrestre se posiciona no quadrante de setor-chave ambiental, combinando alto encadeamento para trás (demanda intensiva de insumos emissores) e alto encadeamento para frente (uso como insumo em cadeias emissores). Os setores de Minerais não Metálicos, Biocombustíveis e Transporte Aéreo apresentaram valores relevantes de encadeamento para trás, mas menor importância no

encadeamento para frente, enquanto setores como Armazenagem e Correio e Extração de Petróleo tiveram destaque no efeito para frente, mas com menor intensidade para trás.

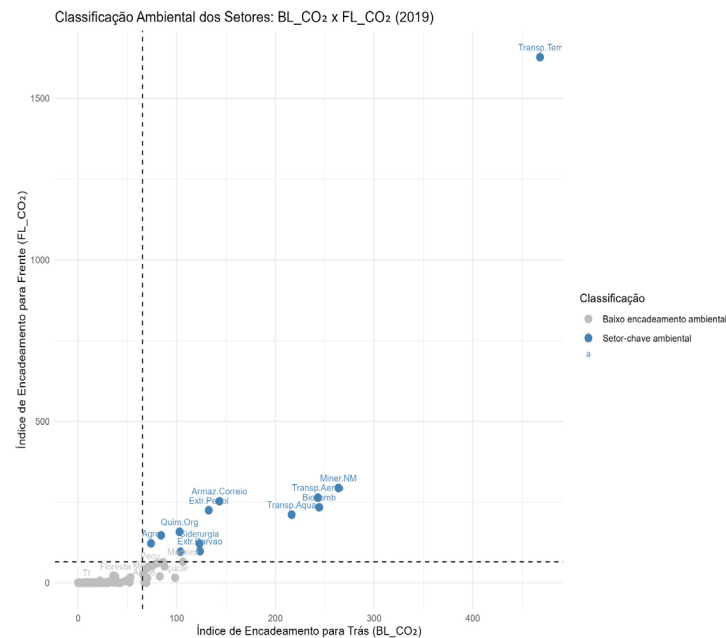


Figura 4: Classificação dos setores segundo os efeitos de ligação para trás (BL) e para frente (FL)

Embora o Transporte Terrestre se destaque como o setor mais crítico, outros setores como Mineração não metálica, Transportes aquaviário e aéreo, Armazenagem e Correio e Extração de petróleo apresentam relevância e não devem ser desconsiderados na formulação de estratégias de mitigação, especialmente por sua capacidade de induzir emissões ao longo das cadeias produtivas.

5 Discussão

Os resultados evidenciam que a estrutura produtiva brasileira apresenta elevada concentração das emissões de CO₂ em setores ligados ao transporte e à matriz energética fóssil. O setor de Transporte Terrestre, em particular, se destaca como principal emissor total e indireto, refletindo a forte dependência de combustíveis fósseis no escoamento de mercadorias e mobilidade de passageiros. Essa predominância indica que qualquer política nacional de mitigação que busque ganhos expressivos de redução de emissões deve considerar medidas específicas para esse segmento, como a transição para frotas eletrificadas, o uso de Biocombustíveis e a melhoria da eficiência logística.

Setores como Mineração de Minerais não Metálicos, Produção de Biocombustíveis e Transporte Aéreo também apresentaram multiplicadores ambientais significativos, revelando que, embora alguns possuam imagem de menor impacto como os biocombustíveis, a

sua cadeia produtiva incorpora etapas intensivas em emissões. Isso sugere que políticas ambientais precisam olhar para além das emissões diretas, considerando também os impactos indiretos difusos na cadeia de suprimentos.

O conjunto de resultados reforça o potencial da abordagem insumo-produto ambientalmente estendida como ferramenta para subsidiar decisões estratégicas. Ao explicitar as interdependências setoriais e a propagação das emissões, é possível identificar pontos críticos onde intervenções setoriais podem ter maior efeito sistêmico, contribuindo para alinhar o desenvolvimento econômico com metas de descarbonização.

6 Conclusão

Este estudo aplicou a metodologia insumo-produto ambientalmente estendida para estimar e analisar os multiplicadores de produção associados às emissões de CO₂ no Brasil, considerando dados da Matriz Insumo-Produto nacional e da seção de emissões de Energia do SEEG para o ano de 2019.

Os resultados evidenciaram que o Transporte Terrestre é o principal emissor total e indireto, seguido pelos setores de Produção de Minerais não Metálicos, Produção de Biocombustíveis, Transporte Aéreo, Transporte Aquaviário, Armazenagem e Correios, bem como pelas atividades de extração de petróleo e carvão. Revelando a relevância de cadeias produtivas intensivas em energia fóssil e processos emissores.

A análise destacou ainda a importância dos impactos indiretos, que representam parcela significativa das emissões totais, reforçando a necessidade de políticas que considerem toda a cadeia de suprimentos e não apenas as emissões diretas dos setores. Nesse sentido, a abordagem insumo-produto demonstrou-se uma ferramenta robusta para identificar setores-chave e subsidiar estratégias de mitigação alinhadas às metas de descarbonização da economia brasileira.

Como limitação, ressalta-se que o estudo considerou exclusivamente a seção de emissões de Energia do SEEG, restringindo a análise a uma parte do inventário nacional. Pesquisas futuras podem expandir a abordagem para incluir outras categorias de emissão, bem como análises temporais que permitam avaliar a evolução dos padrões estruturais ao longo do tempo.

7 Referências

DA SILVA, Leonardo França et al. Balanço de carbono: uma análise comparativa entre cultivos de eucalipto e cana-de-açúcar. *Revista de Biotecnologia & Ciência*, v. 14, p. e16335-e16335, 2025. ISSN 2238-6629.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanço Energético Nacional 2023: ano base 2022*. Rio de Janeiro: EPE, 2023.

GOLDEMBERG, José; **COELHO**, Sérgio T.; **GUARDABASSI**, Patricia M. The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy*, v. 36, p. 2086–2097, 2008.

MILLER, Ronald E.; **BLAIR**, Peter D. *Input-output analysis: foundations and extensions*. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

MONTOYA, Marco Antonio; **LOPES**, Ricardo Luis; **GUILHOTO**, Joaquim José Martins. Desagregação setorial do balanço energético nacional a partir dos dados da matriz insumo-produto: uma avaliação metodológica. *Economia Aplicada*, v. 18, p. 379-419, 2014.

MONTOYA, Marco Antonio et al. Consumo de energia, emissões de CO₂ e a geração de renda e emprego no agronegócio brasileiro: uma análise insumo-produto. *Economia Aplicada*, v. 20, n. 4, p. 383, 2016.

NEREUS – Núcleo de Economia Regional e Urbana da Universidade de São Paulo. *Matriz insumo-produto do Brasil – 2019*. São Paulo: NEREUS, 2022. Disponível em: <https://www.usp.br/nereus/?dados=sistema-de-matrizes-de-insumo-produto-brasil-2010-2017>. Acesso em: 14 abr. 2025.

O'CONNOR, Robert et al. *Análise input-output e suas aplicações*. 1982.

SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. *Plataforma SEEG – Emissões no Brasil*. Observatório do Clima, 2023. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br>. Acesso em: 21 jul. 2025.

VALE, Vinícius A.; **PEROBELLI**, Fernando S. *Análise de insumo-produto: teoria e aplicações no R*. Curitiba: Edição Independente, 2020.

WIEDENHOFER, Dominik; **LENZEN**, Manfred; **STEINBERGER**, Julia K. Energy requirements of consumption: Urban form, climatic and socio-economic factors, rebounds and their policy implications. *Energy Policy*, v. 63, p. 696-707, 2013.

WIEDMANN, Thomas. A review of recent multi-region input-output models used for consumption-based emission and resource accounting. *Ecological Economics*, v. 69, n. 2, p. 211-222, 2009.

MATERIAL SUPLEMENTARTABELA N 1: Coeficiente de emissões de CO₂ por setor econômico (tCO₂ / R\$1 unidade monetária de produção setorial)

Setores	Abreviatura	Coeficiente de emissão CO2
Transporte terrestre	Transp.Terr	395,15
Transporte aéreo	Transp.Aéreo	207,52
Fabricação de produtos de minerais não-metálicos	Miner.NM	193,13
Fabricação de biocombustíveis	Biocomb	178,81
Transporte aquaviário	Transp.Aqua	174,16
Armazenamento, atividades auxiliares dos transportes e correio	Armaz.Correio	110,84
Extração de petróleo e gás, inclusive as atividades de apoio	Extr.Petrol	92,50
Extração de carvão mineral e de minerais não-metálicos	Extr.Carvao	78,54
Produção de ferro-gusa/ferroligas, siderurgia e tubos de aço sem costura	Siderurgia	55,53
Metalurgia de metais não-ferrosos e a fundição de metais	MetNF	53,05
Fabricação de produtos da madeira	Madeira	48,80
Fabricação de químicos orgânicos e inorgânicos, resinas e elastômeros	Quim.Org	46,71

Extração de minerais metálicos não-ferrosos, inclusive beneficiamentos	Extr.MetNF	42,04
Energia elétrica, gás natural e outras utilidades	Energia	41,67
Extração de minério de ferro, inclusive beneficiamentos e a aglomeração	Extr.Ferro	36,39
Pecuária, inclusive o apoio à pecuária	Pecu	36,37
Agricultura, inclusive o apoio à agricultura e a pós-colheita	Agro	35,83
Fabricação de celulose, papel e produtos de papel	Papel	31,29
Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	Plástico	27,87
Fabricação de defensivos, desinfestantes, tintas e químicos diversos	Quim.Diverso	21,91
Produção florestal; pesca e aquicultura	Floresta	15,64
Água, esgoto e gestão de resíduos	Água	15,10
Fabricação de produtos de limpeza, cosméticos/perfumaria e higiene pessoal	Higiene	13,39
Fabricação e refino de açúcar	Açúcar	13,11
Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos	Metal	12,78
Outros produtos alimentares	Alim.Outros	10,92

Fabricação de produtos têxteis	Têxteis	10,00
Fabricação de bebidas	Bebidas	9,08
Fabricação de peças e acessórios para veículos automotores	Peças	6,20
Serviços de arquitetura, engenharia, testes/análises técnicas e P & D	Eng.P&D	4,45
Construção	Construção	4,32
Fabricação de máquinas e equipamentos elétricos	Eletro	3,27
Alimentação	Alimentação	2,94
Fabricação de produtos farmoquímicos e farmacêuticos	Farmac	1,87
Fabricação de automóveis, caminhões e ônibus, exceto peças	Veículos	1,78
Abate e produtos de carne, inclusive os produtos do laticínio e da pesca	Abate	1,69
Fabricação de calçados e de artefatos de couro	Calçados	1,21
Fabricação de máquinas e equipamentos mecânicos	Maq.Mec	0,95
Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos	Manut	0,87
Administração pública, defesa e seguridade social	Pública	0,76

Comércio por atacado e a varejo, exceto veículos automotores	Com.Geral	0,58
Aluguéis não-imobiliários e gestão de ativos de propriedade intelectual	Aluguéis	0,57
Fabricação de móveis e de produtos de indústrias diversas	Móveis	0,47
Educação pública	Educ.Pub	0,41
Confecção de artefatos do vestuário e acessórios	Vestuário	0,32
Organizações associativas e outros serviços pessoais	Pessoal	0,22
Fabricação de outros equipamentos de transporte, exceto veículos automotores	Out.Transp	0,22
Saúde pública	Saúde.Pub	0,19
Fabricação de produtos do fumo	Fumo	0,17
Impressão e reprodução de gravações	Impressão	0,17
Alojamento	Alojamento	0,11
Atividades de vigilância, segurança e investigação	Segurança	0,07
Saúde privada	Saúde.Priv	0,06
Fabricação de equipamentos de informática, produtos eletrônicos e ópticos	Info.Eletr	0,05

Comércio e reparação de veículos automotores e motocicletas	Com.Veic	0,04
Outras atividades profissionais, científicas e técnicas	Prof.Cient	0,04
Atividades artísticas, criativas e de espetáculos	Artes	0,03
Educação privada	Educ.Priv	0,03
Refino de petróleo e coquerias	Refino	0,02
Atividades jurídicas, contábeis, consultoria e sedes de empresas	Jurídico	0,02
Atividades de televisão, rádio, cinema e gravação/edição de som e imagem	Mídia	0,01
Outras atividades administrativas e serviços complementares	Adm.Serv	0,01
Edição e edição integrada à impressão	Edição	0,01
Intermediação financeira, seguros e previdência complementar	Finanças	0,01
Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação	TI	0,01
Telecomunicações	Telecom	0,00
Atividades imobiliárias	Imobiliária	0,00
Serviços domésticos	Domésticos	-