

# Transportes Terrestres e Emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil: Uma Análise Estrutural e Comparativa. \*

Murillo Adolfo de Oliveira Fernandes § Angélica Raminelly Escovedo §  
Weslem Rodrigues Faria § Admir A. Betarelli Junior §

## Resumo

O setor de transportes é fundamental para a economia brasileira, mas sua estrutura modal, fortemente centrada no transporte rodoviário, contribui significativamente para as emissões nacionais de CO<sub>2</sub>. Este estudo investiga a contribuição dos modais terrestres (rodoviário de carga, ferroviário de carga, metroviário e rodoviário de passageiros) para a geração de valor bruto da produção (VBP) e para as emissões nacionais, com base na matriz de insumo-produto brasileira de 2015. Através do método da extração hipotética, são simuladas retiradas setoriais parciais para mensurar os impactos diretos e indiretos na produção e nas emissões. Os resultados revelam que o transporte rodoviário de carga exerce o maior efeito multiplicador negativo nas emissões, seguido pelo rodoviário de passageiros. A análise evidencia o papel central da estrutura modal nos encadeamentos produtivos e nas emissões associadas, oferecendo subsídios relevantes para políticas públicas voltadas à transição modal, à eficiência energética e à redução de emissões no setor de transportes.

## Palavras-chave

Transportes terrestres; emissões de CO<sub>2</sub>; extração hipotética;

## Abstract

The transport sector plays a central role in the Brazilian economy, yet its modal structure, heavily reliant on road transport, significantly contributes to national CO<sub>2</sub> emissions. This study examines the contribution of terrestrial transport modes (freight road, freight rail, metro rail, and passenger road) to the gross value of production (GVP) and national emissions, using Brazil's 2015 input-output matrix. By applying the hypothetical extraction method, partial sectoral removals are simulated to measure direct and indirect impacts on production and emissions. Results show that freight road transport has the highest negative multiplier effect on emissions, followed by passenger road transport. The analysis underscores the importance of modal structure in shaping production linkages and associated emissions, offering valuable insights for public policy focused on modal shift, energy efficiency, and emissions reduction in the transport sector.

## Keywords

Land transport; CO<sub>2</sub> emissions; hypothetical extraction

## Área de submissão

6 - infra-estrutura, transporte, energia, mobilidade e comunicação

## Classificação JEL

R41; Q53; C67

\*Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento ao Projeto nº APQ-02343-22 da Demanda Universal (Edital Nº 001/2022), que tornou possível a realização desta pesquisa, realizada em conjunto com o grupo de pesquisa LATES - Laboratório de Análises Territoriais e Setoriais da faculdade de economia da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF).

§ Departamento de Economia - UFJF

## 1 Introdução

O setor de transportes é um pilar fundamental para o desenvolvimento socioeconômico global, atuando como um catalisador para a circulação de pessoas e mercadorias, e para a integração de mercados (Figueiredo et al. 2010, apud Macedo e Andrade 2024). Ao longo da história, a evolução dos modais de transporte, isto é, os diferentes meios de transporte têm sido impulsionados por inovações tecnológicas e demandas crescentes, resultando em sistemas cada vez mais complexos e interconectados. Contudo, essa expansão, especialmente a dependência de fontes de energia não renováveis, trouxe à tona desafios ambientais prementes que exigem uma análise aprofundada de seus impactos (Santos, 2009).

Nesse contexto, a queima de combustíveis fósseis nos meios de transporte é uma das principais fontes de emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (BRASIL, 2022), um gás de efeito estufa que além de poluidor, contribui significativamente para as mudanças climáticas (da Silva Dias, 2006). Outro fator importante, é que o mercado de transportes não é plenamente concorrencial e carece de contratos completos, o que pode resultar numa alocação ineficiente de recursos e levar à exploração exaustiva de diversas fontes de energia não renováveis, com impactos ambientais notáveis em níveis local, regional e global (De Palma et al., 2011).

No Brasil, a matriz de transportes é marcada pela predominância do modal rodoviário, responsável por 64,85% da circulação de mercadorias, seguido pelo ferroviário (14,95%) (CNT, 2024). Essa concentração acarreta custos operacionais elevados e altas emissões de CO<sub>2</sub>, já que o consumo de diesel pelo transporte rodoviário é cerca de 34 vezes superior ao das operações ferroviárias (CNT, 2024). A dependência excessiva desse modal também contribui para congestionamentos e deterioração da qualidade do ar, especialmente nas áreas urbanas. Além disso, o transporte de passageiros tem crescido a uma média de 1,2% ao ano entre 2014 e 2023 (ANTT, 2023), ampliando os desafios ambientais e logísticos do setor.

Diante desse cenário, este estudo analisa o papel de cada modal terrestre (rodoviário de carga, ferroviário de carga, metroviário e rodoviário de passageiros) na estrutura produtiva nacional e nas emissões de CO<sub>2</sub>, por meio do método de extração hipotética aplicado a uma matriz insumo-produto. Essa abordagem permite isolar e quantificar os efeitos diretos e indiretos da retirada de cada modal sobre o valor bruto da produção (VBP) e as emissões totais, oferecendo uma base analítica robusta para subsidiar políticas públicas voltadas à transição modal e à redução das emissões no setor de transportes.

Nesse contexto, este trabalho se diferencia da literatura existente ao aplicar no contexto brasileiro, o método de extração no modelo insumo-produto para analisar os efeitos de cada modal terrestre nas emissões setoriais de CO<sub>2</sub>. Ao extrair individualmente as atividades de transporte terrestre da matriz intersetorial, é possível mensurar comparativamente os impactos das estruturas de custo e de receita de cada modal nas emissões setoriais de CO<sub>2</sub>. Essa metodologia possibilita uma compreensão mais abrangente sobre o papel sistêmico de cada modal terrestre nas emissões associadas à matriz de transportes no Brasil.

Além desta introdução, o presente estudo está organizado em mais cinco capítulos. O capítulo 2 apresenta a revisão da literatura relevante. O capítulo 3 descreve a metodologia empregada. A base de dados e as estatísticas descritivas são discutidas no capítulo 4. Os principais resultados da pesquisa são analisados no capítulo 5. Por fim, O capítulo 6 traz as considerações finais.

## 2 - Revisão de literatura

Segundo o Ministério de Transportes (2012), o incentivo ao transporte rodoviário foi intensificado com o Plano Rodoviário Nacional e, mais tarde, com investimentos do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC). A priorização de rodovias, sem articulação intermodal, comprometeu a eficiência do sistema logístico brasileiro, ampliando a dependência de um modal menos adequado para longas distâncias e cargas de baixo valor agregado (Guimarães, 2015). No Brasil, essa concentração modal é estrutural: cerca de 60% da carga transportada utiliza rodovias, gerando altos custos logísticos e intensificando as emissões de CO<sub>2</sub> (Gonçalves e Palmeira, 2006).

O transporte rodoviário é um dos mais intensivos em carbono por tonelada-quilômetro. Santos, Behrendt e Teytelboym (2010) apontam que suas emissões superam as do modal ferroviário. A expansão da infraestrutura rodoviária tende a aumentar os congestionamentos e a demanda por deslocamentos, perpetuando um ciclo vicioso de emissões. Estudos internacionais, como o de Dai et al. (2023), corroboram esse efeito, mostrando que o crescimento da malha rodoviária e o uso de combustíveis fósseis elevaram as emissões no setor de transportes nos Estados Unidos, enquanto o uso de fontes renováveis apresenta efeito mitigador.

Nesse contexto, Macedo e Baptista (2024) defendem investimentos estruturantes em infraestrutura, com destaque para a modernização da malha ferroviária, a eficiência dos portos e a diversificação modal conforme as características da carga e da rota. Tais medidas, aliadas a políticas de segurança viária e eficiência energética, são vistas como pilares de um sistema logístico mais sustentável e competitivo em escala global.

Além da escolha modal, fatores estruturais também influenciam as emissões. Ahmed et al. (2020) e Adams, Boateng e Acheampong (2020) destacam que a urbanização pode reduzir emissões ao promover o transporte coletivo e o adensamento urbano. Zhao et al. (2023) observam que a renda per capita eleva o consumo energético do transporte pessoal, mas políticas que incentivam o transporte ativo, como bicicleta e caminhada, contribuem para a mitigação ambiental.

Do ponto de vista metodológico, destaca-se o uso de matrizes insumo-produto ambientalmente estendidas. O método da extração hipotética (Hypothetical Extraction Method – HEM) permite avaliar a importância relativa de setores nas emissões de CO<sub>2</sub>. Ali (2015), ao aplicar o HEM na economia italiana, identificou setores-chave com forte impacto nas emissões, sugerindo intervenções estratégicas. A técnica permite estimar não apenas as emissões diretas, mas também os efeitos encadeados da remoção de setores da estrutura produtiva.

Chang e Lin (1998) aplicaram uma decomposição estrutural da matriz input-output de Taiwan e concluíram que o transporte, especialmente o rodoviário, foi responsável por parcela expressiva do crescimento das emissões industriais entre 1981 e 1991. O aumento da demanda final e das exportações impulsionou esse crescimento, enquanto os ganhos em intensidade energética exerceram efeito moderador.

Em síntese, a articulação entre estrutura modal, incentivos econômicos e estratégias tecnológicas é central na análise ambiental do setor de transportes. Ferramentas como o HEM e indicadores como intensidade de carbono são fundamentais para vincular as decisões de infraestrutura às metas de descarbonização.

A literatura empírica internacional também oferece diversas abordagens para mensurar os impactos ambientais dos transportes. Na Malásia, Solaymani (2022) identificou que o PIB por trabalhador e a urbanização explicam as emissões do setor, com atenuação pelo uso de renováveis. Zhao et al. (2023), na Inglaterra, relacionam renda e padrões de deslocamento ao consumo energético. Na Irlanda, O’Riordan et al. (2022) mostraram que ônibus e metrô emitem menos CO<sub>2</sub> por passageiro-quilômetro que o carro particular. Em países africanos, Adams et al. (2020) observaram que os efeitos do consumo energético sobre as emissões variam conforme a estrutura modal e o contexto institucional.

No caso brasileiro, Betarelli et al. (2022) estimam que, em 2015, o setor de transportes foi responsável por 7.992,26 toneladas de CO<sub>2</sub>. Júnior et al. (2015) demonstram que o transporte rodoviário domina o escoamento de commodities de baixo valor agregado, o que contribui para o elevado consumo energético e as emissões do setor. Os autores simulam quatro cenários de mitigação, sendo o mais eficaz a combinação entre redistribuição modal e uso de biocombustíveis, conforme diretrizes do Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT), resultando em significativa redução de emissões e melhora na eficiência energética.

Corroborando esses resultados, Silva et al. (2020) compararam os modais rodoviário e ferroviário e constataram que as ferrovias emitem até 37% menos CO<sub>2</sub> e apresentam um custo médio 40% inferior. Mesmo com uma malha ferroviária reduzida, o Brasil tem potencial para expandir o transporte sobre trilhos. O estudo também oferece uma metodologia de inventário de emissões aplicável à formulação de políticas públicas sustentáveis. A evidência empírica reforça, portanto, a robustez da abordagem insumo-produto e o papel central da transição modal na mitigação dos impactos ambientais do setor de transportes.

### 3 - Metodologia

Extração hipotética do consumo intermediário e da oferta dos modais de transporte terrestre e seu efeito nas emissões nacionais e setoriais.

#### Modelo insumo-produto

Considere a estrutura fundamental do modelo de insumo-produto de Wassily Leontief (MILLER & BLAIR, 2009), com uma economia.

O modelo básico de *Leontief* é dado por:

$$x = (I - A)^{-1}f \therefore x = Bf \quad (1)$$

Em que  $x$  é o vetor coluna da produção total bruta dos  $n$  setores da economia.  $A$  é a matriz de coeficientes técnicos e  $f$  é vetor coluna da produção total bruta destinada à demanda final. A matriz  $B$ , conhecida como inversa de *Leontief*, permite obter os efeitos da extração hipotética das compras de determinado setor sobre a produção de diferentes setores da economia (encadeamentos para trás).

Já a abordagem de *Ghosh*, também chamada de modelo de oferta induzida, possibilita a análise das relações entre as atividades pela ótica das vendas (encadeamentos para frente). O modelo de oferta supõe que a oferta inicial de insumos por setor ( $v'$ ) é externa (RODRIGUES & GUILHOTO, 2007). Qualquer variação nessa oferta provoca mudanças nos insumos totais por setor ( $x'$ ) através do coeficiente técnico pelo lado da oferta ( $A_G$ ).  $G$  é a matriz inversa de *Ghosh*:

$$x' = v'(I - AG)^{-1} \therefore x' = v'G \quad (2)$$

#### Técnica da Extração Hipotética

O método de extração hipotética objetiva analisar o quão dependente é a estrutura produtiva de uma economia em relação a um setor específico. Este trabalho segue o procedimento de Miller e Blair (2009), porém, como complementar aos índices de Hirschman (1958), essa abordagem no modelo de insumo-produto foi introduzida por Dietzenbacher, Linden e Steenge (1993) num estudo sobre as interdependências setoriais na União Europeia dos anos 1970 e 1980, baseado na ideia de Paelinck, de Caemel e Degueldre (1965) e Strassert (1968).

Ao extrair a linha de determinado setor é possível verificar a dependência da estrutura econômica em relação à oferta deste setor (efeitos para frente). Ao extrair a coluna, identificamos sua importância pela ótica da demanda (efeitos para trás).

No modelo de produção de *Leontief* a estrutura da simulação a matriz  $A$  é representada  $A_{(j)}$ , indicando a extração de determinada coluna (PEROBELLI et al., 2015). Nesse caso, a nova economia será igual a:

$$x_{(j)} = (I - A_{(j)})^{-1}f \quad (3)$$

$x_{(j)}$  é a produção total da economia sem a demanda intermediária de determinado setor  $j$ . Assim, o impacto total da extração das ligações para trás do setor  $j$  na economia será (e.g. VBP):

$$T_{(j)} = i'x - i'x_{(j)} \quad (4)$$

A nível setorial:

$$t_j = x_i - x_{i(j)} \quad (5)$$

Essa expressão fornece o impacto total em um setor  $i$  em específico.  $x_{i(j)}$  é o VBP do setor  $i$  após a extração do setor  $j$ .

Para a extração das linhas, utiliza-se o modelo de *Ghosh*:

$$x_i' = v'(I - AG_{(i)})^{-1} \quad (6)$$

O termo  $AG_{(i)}$  é a matriz de coeficientes de oferta após a extração da linha  $i$ . As expressões abaixo calculam o impacto da extração das ligações para frente, total ( $S_i$ ) e por setor ( $s_i$ ):

$$S_i = x_i' - [x_{(i)}']i \quad (7)$$

$$s_i = x_j' - x_{j(i)}' \quad (8)$$

### Matriz geradora de emissões e multiplicadores de emissão

A intensidade das emissões diretas de CO<sub>2</sub> é estimada como a razão entre as emissões diretas de CO<sub>2</sub> (pela ótica da produção), em toneladas, e a produção total (VBP):

$$\varphi_{j= \frac{\epsilon}{x_j}} \quad (9)$$

onde  $\varphi_j$  é a intensidade direta de emissão de CO<sub>2</sub> do setor  $j$ .  $x_j$  é a produção total do setor  $j$ . Perceba que valores altos de produção (em R\$) podem subvalorizar as intensidades reais das emissões (Ton. CO<sub>2</sub>) para indústrias intensivas em poluição. Isso ocorre porque o coeficiente de emissão calculado associa valores físicos (massa) com valores monetários.

As intensidades totais de emissões diretas e indiretas de CO<sub>2</sub> são calculadas multiplicando o vetor de intensidade direta de emissão de CO<sub>2</sub>  $\varphi$ , pela matriz inversa de Leontief. As emissões totais de CO<sub>2</sub> podem ser calculadas multiplicando  $\varphi(10)$  pela Equação (2):

$$P = \hat{\varphi}(1 - A)^{-1}f \therefore P = Mf \quad (10)$$

em que  $P$  é um vetor das emissões totais de CO<sub>2</sub> dos  $n$  setores da economia.  $M$  é a matriz de efeitos diretos e indiretos de poluição. A matriz  $M$  representa o efeito total da poluição gerada por dólar de demanda final  $f$ . Em outras palavras,  $M$  é um operador linear que transforma aumentos na demanda final em aumentos no vetor de emissão poluente. As somas das colunas da matriz  $M$  representam o efeito multiplicador das emissões.

### Análise do efeito das ligações de CO<sub>2</sub> através do método de extração

Através da equação (4) podemos obter a variação na produção total da economia sem a demanda intermediária do setor  $j$ . Ao pré-multiplicar o vetor coluna  $T_{(j)}$  pelo vetor de

intensidade de emissões diagonalizado  $\hat{\varphi}$ (10), obtém-se o efeito da extração da demanda de uma atividade  $j$ , nas emissões de CO<sub>2</sub> da estrutura produtiva, que chamaremos de  $TE_{(j)}$ :

$$TE_{(j)} = \hat{\varphi}[i'x - i'x_{(j)}] \quad (11)$$

Ou simplesmente

$$TE_{(j)} = \hat{\varphi} \cdot T_{(j)}$$

E utilizando a equação (5), a nível setorial:

$$te_j = \hat{\varphi}[x_i - x_{i(j)}] \quad (12)$$

Ou simplesmente

$$te_j = \hat{\varphi} \cdot t_j$$

De maneira análoga, pelo lado da oferta, de (9) e (10), podemos obter o efeito da extração da oferta de uma atividade  $i$ , nas emissões de CO<sub>2</sub> na estrutura produtiva, que chamaremos de  $SE_{(i)}$ :

$$SE_{(i)} = \left( x'i - \left[ x'_{(i)} \right] i \right) \hat{\varphi} \quad (13)$$

Ou

$$SE_{(i)} = S_{(i)} \cdot \hat{\varphi}$$

E a nível setorial

$$se_{(i)} = [x'_j - x'_{j(i)}] \hat{\varphi} \quad (14)$$

Ou simplesmente

$$se_{(i)} = s_i \cdot \hat{\varphi}$$

## 4 - Base de dados

Utiliza-se como fonte primária de dados a matriz de insumo-produto (IP) do Brasil para o ano de 2015. Em sua forma original sua estrutura é composta por 127 produtos e 67 setores. As margens de transporte na matriz são discriminadas em: Transporte terrestre de passageiros (49002); Armazenamento e serviços auxiliares aos transportes (52801) e Transporte Terrestre de Carga (49001). No entanto, este estudo utiliza a matriz estimada por Betarelli *et al.* (2017), composta por 136 produtos e 67 setores. Nesta matriz, além de outras desagregações, as margens das atividades 49001<sup>1</sup> e 49002 foram abertas em 4 modais de transporte de carga e passageiros: (i) Ferroviário de carga; (ii) Rodoviário de carga; (iii) Rodoviário de passageiros<sup>2</sup> e (iv) Metroviário de passageiros. Estes foram os modais analisados neste estudo.

A estimativa do vetor total de emissões para o ano de 2015 advém de Betarelli et al (2022). A construção desse vetor utiliza dados setoriais extraídos do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG). São avaliadas todas as fontes de emissões - Agropecuária, Energia, Mudanças de Uso da Terra, Processos Industriais e Resíduos. A compatibilização com os setores da MIP do IBGE foi realizada observando os seis níveis da tabela do SEEG e as colunas “atividade econômica” e “produto” (Betarelli et al, 2022).

### 4.1 Estatísticas da matriz geradora de poluição

#### Multiplicador de poluição tipo I

O multiplicador de poluição indica o quanto é gerado, direta e indiretamente, de poluição, para cada unidade diretamente gerada de poluição.

O Gráfico 1 apresenta os multiplicadores de poluição tipo I na ótica da oferta, que quantificam a poluição total - direta e indireta - gerada por cada unidade de poluição emitida diretamente pelos modais de transporte. O transporte rodoviário de carga destaca-se com o maior multiplicador (7,44), revelando que cada unidade de poluição direta desse modal gera 7,44 unidades ao considerar toda sua cadeia de suprimentos. Esse valor substancialmente elevado reflete a intensidade de insumos poluentes como combustíveis e peças necessários para sua operação. Em contraste, os modais de passageiros apresentam multiplicadores significativamente menores: o metroferroviário registra 1,42 e o rodoviário 1,10, ambos abaixo da média geral de 1,88, indicando que seus processos produtivos geram menos poluição indireta por unidade emitida.

O transporte ferroviário de carga aparece com valor moderado (1,38), próximo ao metroferroviário, mas consideravelmente inferior ao rodoviário de carga, diferença que pode estar relacionada à maior eficiência energética e à estrutura distinta de insumos. A média setorial de 1,88 supera três dos quatro modais analisados, mostrando que, em geral, outros setores da economia tendem a ter cadeias produtivas mais poluentes que os transportes de passageiros e o ferroviário de carga. A exceção notável é o rodoviário de carga, cujo multiplicador quase quadruplica a média, evidenciando seu papel desproporcional como gerador de poluição indireta na economia. Os resultados demonstram assimetrias marcantes entre os modais: enquanto o rodoviário de carga amplifica fortemente as emissões através de

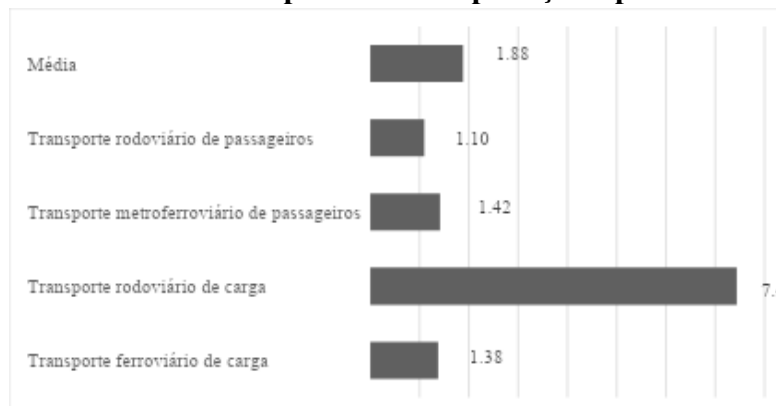
---

<sup>1</sup> Ignora-se o transporte dutoviário.

<sup>2</sup> A matriz utilizada discrimina este setor em: (1) Transporte rodoviário passageiros municipal e metropolitano; (2) Transporte escolar, táxi e rodoviário de passageiros fretado; (3) Transporte rodoviário coletivo de passageiros, com itinerário fixo, intermunicipal, interestadual e internacional (Betarelli et al, 2017). Para simplificar nossos cálculos agregamos essas atividades como (iv) Transporte rodoviário de passageiros.

sua demanda por insumos, os modais de passageiros e o ferroviário de carga apresentam impactos indiretos mais contidos.

**GRÁFICO 1 - Multiplicadores de poluição tipo I - Oferta**



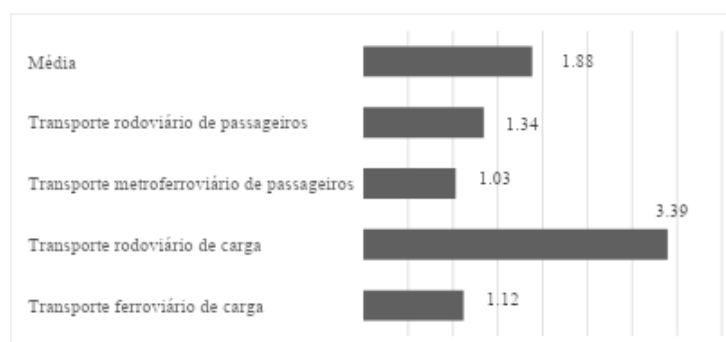
Fonte: Elaboração própria com base nos indicadores extraídos da matriz insumo-produto 2015

O gráfico 2 apresenta os multiplicadores de poluição tipo I na ótica da produção, que medem o impacto poluidor total (direto + indireto) por unidade de poluição gerada diretamente em cada modal. O transporte ferroviário de carga apresenta o maior multiplicador (3,39), indicando que cada unidade de emissão direta gera 3,39 unidades ao considerar toda sua cadeia produtiva. O transporte rodoviário de carga aparece em segundo lugar (1,88), ainda acima da média setorial (1,84), mostrando que sua produção envolve processos relativamente mais poluentes.

Os modais de passageiros registram os menores valores: o rodoviário tem multiplicador de 1,34, enquanto o metroferroviário apresenta o menor índice (1,03), significativamente abaixo da média. O transporte ferroviário de carga destaca-se com valor quase três vezes superior ao metroferroviário, revelando diferenças estruturais nos processos produtivos entre os modais.

A média geral (1,84) situa-se entre os valores dos principais modais, indicando que o setor de transportes como um todo apresenta multiplicadores próximos à média da economia. Os resultados mostram variações importantes entre os modais: enquanto o ferroviário de carga amplifica consideravelmente suas emissões na cadeia produtiva, os sistemas de passageiros - especialmente o metroferroviário - demonstram menor capacidade de geração indireta de poluição por unidade emitida.

**GRÁFICO 2 - Multiplicadores de poluição tipo I - Produção**



Fonte: Elaboração própria com base nos indicadores extraídos da matriz insumo-produto 2015

## 5 – Resultados

A Tabela 1 mostra os efeitos setoriais no valor bruto da produção (VBP) após a extração da oferta de serviços de cada categoria de transporte terrestre no sistema produtivo brasileiro. A tabela também indica a dependência relativa dos setores mais impactados pela simulação. Devido à maior magnitude da estrutura de receita do transporte rodoviário de carga entre os modais, os setores mais afetados são os que dependem mais desse modal.

Conforme os resultados da simulação, ao considerar o efeito de todos os modais, o Comércio por atacado e varejo registra a queda mais significativa no VBP (R\$ -41.313,8 mi.), sendo o setor mais dependente. Em seguida, aparecem os setores de Transporte rodoviário de carga, Carne de bovinos e outros produtos de carne, Edificações e Serviços de alimentação. Essas cinco atividades demonstram alta dependência dos serviços do modal rodoviário de carga – em média, 95% das perdas simuladas após a extração da oferta dos quatro modais terrestres decorrem da oferta desse modal. Por outro lado, os serviços dos transportes Ferroviário de carga (3,10%), Metroferroviário de passageiros (0,08%) e Rodoviário de passageiros (1,87%) apresentam menor relevância para essas mesmas atividades.

**TABELA 1 - Efeitos para frente (%) no VBP setorial**

| Modais de Transporte            | Comércio por atacado e varejo | Transporte rodoviário de carga | Carne de bovinos e outros produtos de carne | Edificações | Serviços de alimentação | Demais atividades |
|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---|-------------|-------------------------|-------------------|
| Ferroviário de carga            | 1,54                          | 0,67                           | 4,45  | 6,03        | 2,83                    | 6,15              |
| Rodoviário de carga             | 97,12                         | 98,27                          | 94,28                                       | 89,57       | 95,49                   | 87,93             |
| Metroferroviário de passageiros | 0,04                          | 0,04                           | 0,04  | 0,21        | 0,07                    | 0,14              |
| Rodoviário de passageiros       | 1,30                          | 1,01                           | 1,23  | 4,19        | 1,61                    | 7,39              |
| Total                           | 100,00                        | 100,00                         | 100,00                                      | 100,00      | 100,00                  | 100,00            |
| Var. total (milhões)            | -41313,8                      | -22163,5                       | -10338,8                                    | -10355,8    | -9317,8                 | -249494,9         |

Fonte: Resultados da pesquisa

A Tabela 2 apresenta os impactos setoriais nas emissões de CO<sub>2</sub> (em mil toneladas) decorrentes da extração hipotética da oferta de serviços dos modais de transporte no sistema produtivo brasileiro, destacando os cinco setores mais afetados. O transporte rodoviário de carga é o principal responsável pelas reduções nas emissões, representando entre 87,63% (Café beneficiado) e 98,28% (Transportes terrestres) do total. Os demais modais têm contribuições marginais: o ferroviário de carga varia de 0,67% a 11,13%, o rodoviário de passageiros oscila entre 1,01% e 5,07%, e o metroferroviário de passageiros apresenta a menor influência, com menos de 0,15% em todos os setores.

Em termos absolutos, as maiores quedas nas emissões ocorrem no setor de Transportes terrestres (-8.503,7 mil ton.) e em Demais atividades (-71.526,2 mil ton.), reforçando o peso desses segmentos na matriz de emissões. Os resultados confirmam a centralidade do modal rodoviário de carga, tanto nos efeitos econômicos (VBP) quanto ambientais (CO<sub>2</sub>), enquanto os outros modais exercem um papel secundário. Os setores analisados - como Café beneficiado, Conservas de frutas e Rações balanceadas para animais - demonstram alta dependência do transporte terrestre, refletida tanto na produção quanto nas emissões associadas.

**TABELA 2 - Efeitos para frente (%) nas emissões de CO<sub>2</sub> (Mil ton.)**

| <b>Modais de Transporte</b>            | <b>Transportes terrestres*</b> | <b>Café beneficiado</b> | <b>Conservas de frutas, legumes, outros vegetais e sucos de frutas</b> | <b>Rações balanceadas para animais</b> | <b>Transporte rodoviário passageiros munic. e metropol</b> | <b>Demais atividades</b> |
|--|--------------------------------|-------------------------|--|--|--|--------------------------|
| Ferrovário de carga                    | 0,67                           | 11,13                   | 10,93  | 10,86                                  | 0,68   | 6,18                     |
| Rodoviário de carga                    | 98,28                          | 87,63                   | 87,82  | 87,89                                  | 98,10  | 88,61                    |
| Metroferrovário de passageiros         | 0,04                           | 0,04                    | 0,04   | 0,04                                   | 0,05   | 0,14                     |
| Rodoviário de passageiros              | 1,01                           | 1,20                    | 1,21   | 1,21                                   | 1,18   | 5,07                     |
| <b>Total</b>                           | <b>100,00</b>                  | <b>100,00</b>           | <b>100,00</b>  | <b>100,00</b>                          | <b>100,00</b>  | <b>100,00</b>            |
| Var. Total (Mil ton. CO <sub>2</sub> ) | -8503,7                        | -1391,9                 | -1385,8  | -1385,0                                | -1344,9  | -71526,2                 |

Fonte: Resultados da pesquisa. \*Transporte escolar, táxi e rodoviário fretado; Transporte dutoviário; Transporte rodoviário coletivo de passageiros, com itinerário fixo, intermunicipal, interestadual e internacional; Transporte ferroviário de carga; Transporte metroferroviário de passageiros; Transporte rodoviário de carga.

Os efeitos para trás na produção e nas emissões decorrentes são apresentados em nível, devido à limitação da estrutura de custos dos transportes terrestres, por falta de informações detalhadas, que incorpora a estrutura de custos dos setores principais: Transporte terrestre de passageiros (49002); e Transporte Terrestre de Carga (49001) (BETARELLI et al., 2017). Assim, a estrutura de custos para cada tipo de transporte assume proporções fixas, gerando efeitos relativos iguais para as perdas de cada atividade fornecedora de insumos para os quatro modais analisados neste estudo. Ainda assim, discutem-se aqui os efeitos *para trás* com valores em nível. A Tabela 3 apresenta os efeitos para trás no Valor Bruto da Produção (VBP) setorial, em R\$ milhões, decorrentes da extração hipotética do consumo intermediário dos modais de transporte no sistema produtivo brasileiro. Os resultados mostram as doze atividades que mais perderam em termos de VBP, além do impacto total na economia nacional.

**TABELA 3 - Efeitos para trás no VBP setorial (R\$ Milhões)**

| Setores mais afetados  | Ferroviário de carga | Rodoviário de carga | Metroferroviário de passageiros | Rodoviário de passageiros | Total     |
|--|----------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------------|-----------|
| Diesel - biodiesel   | -2021,0              | -36713,7            | -510,0                          | -17506,7                  | -56751,4  |
| Transporte rodoviário de carga                               | -1197,1              | -21781,0            | -302,1                          | -10383,2                  | -33663,3  |
| Outros produtos do refino do petróleo                        | -1131,7              | -20566,3            | -285,6                          | -9809,6                   | -31793,2  |
| Comércio por atacado e varejo                                | -871,8               | -15876,5            | -220,0                          | -7593,5                   | -24561,9  |
| Petróleo, gás natural e serviços de apoio                    | -861,3               | -15650,2            | -217,4                          | -7465,4                   | -24194,2  |
| Intermediação financeira, seguros e previdência complementar | -459,1               | -8378,0             | -115,9                          | -4202,5                   | -13155,4  |
| Peças e acessórios para veículos automotores                 | -294,5               | -5360,1             | -74,3                           | -2554,6                   | -8283,5   |
| Serviços jurídicos, contabilidade e consultoria              | -262,9               | -4811,1             | -66,3                           | -2310,2                   | -7450,4   |
| Etanol e outros biocombustíveis                              | -239,6               | -4353,2             | -60,5                           | -2078,6                   | -6731,8   |
| Artigos de borracha  | -181,5               | -3297,8             | -45,8                           | -1572,6                   | -5097,8   |
| Atividades auxiliares aos transportes terrestres             | -170,3               | -3099,2             | -43,0                           | -1477,5                   | -4790,0   |
| Eletricidade, gás e outras utilidades                        | -132,3               | -2434,6             | -33,4                           | -1187,9                   | -3788,2   |
| Demais setores   | -2136,7              | -39107,8            | -539,2                          | -19113,0                  | -60896,8  |
| VBP nacional   | -9959,9              | -181429,4           | -2513,4                         | -87255,2                  | -281158,0 |

Fonte: Resultados da pesquisa.

O setor de Diesel e biodiesel registrou a maior queda absoluta (-R\$ 56.751,4 milhões), seguido pelo Transporte rodoviário de carga (-R\$ 33.663,3 milhões) e outros produtos do refino do petróleo (-R\$ 31.793,2 milhões). O Comércio por atacado e varejo e as atividades ligadas ao petróleo e gás natural também apresentaram reduções significativas, com perdas superiores a R\$ 24 bilhões cada. Entre os demais setores mais afetados, destacam-se serviços financeiros, peças automotivas e biocombustíveis, todos com quedas relevantes no VBP.

O modal rodoviário de carga foi o que mais contribuiu para as perdas totais (-R\$ 181.429,4 milhões), representando a maior parcela do impacto econômico *da simulação*. Em seguida, o rodoviário de passageiros também teve um peso considerável (-R\$ 87.255,2 milhões). Os

modais ferroviário de carga e metroferroviário de passageiros apresentaram efeitos menores, mas ainda perceptíveis em setores específicos. No agregado, a extração do consumo intermediário dos modais de transporte resultou em uma redução de R\$ 281.158 milhões no VBP nacional. Assim evidencia-se a importância desses serviços como insumos para a economia. Os resultados mostram a dependência da produção brasileira em relação aos transportes, com foco no modal rodoviário, tanto para carga quanto para passageiros.

A Tabela 4 mostra os impactos nas emissões setoriais de CO<sub>2</sub> (mil toneladas) que resultam da extração hipotética do consumo intermediário dos modais de transporte no sistema produtivo brasileiro. Os dados revelam as doze atividades com maiores reduções de emissões, além do efeito total nas emissões nacionais.

O setor de Diesel e biodiesel apresenta a maior queda absoluta (-6.613 mil toneladas), seguido por outros produtos do refino do petróleo (-2.758 mil toneladas) e Artigos de borracha (-2.735 mil toneladas). O Transporte rodoviário de carga e as Atividades auxiliares aos transportes terrestres também registram reduções significativas, com quedas acima de 2.100 mil toneladas cada. Entre os demais setores mais impactados, destacam-se atividades vinculadas ao petróleo e gás, peças automotivas e transporte dutoviário, todos com declínios relevantes nas emissões.

O modal rodoviário de carga responde pela maior parte das reduções (-28.044 mil toneladas), representando a contribuição mais expressiva. O rodoviário de passageiros também apresenta impacto considerável (-13.483 mil toneladas). Os modais ferroviário de carga e metroferroviário de passageiros demonstram efeitos menores, porém ainda perceptíveis em setores específicos.

Destaca-se a relevância desses serviços como fontes indiretas de emissões na economia. No total, a extração do consumo intermediário dos modais de transporte causa uma redução de 43.454 mil toneladas nas emissões nacionais de CO<sub>2</sub>,

**TABELA 4 - Efeitos para trás nas emissões de CO<sub>2</sub> (Mil Ton.)**

| <b>Setores mais afetados</b>  | <b>Ferrovário de carga</b> | <b>Rodoviário de carga</b> | <b>Metroferroviário de passageiros</b> | <b>Rodoviário de passageiros</b> | <b>Total</b> |
|---|----------------------------|----------------------------|--|----------------------------------|--------------|
| Diesel - biodiesel  | -235,52                    | -4278,41                   | -59,43                                 | -2040,13                         | -6613        |
| Outros produtos do refino do petróleo                                   | -98,19                     | -1784,31                   | -24,78                                 | -851,07                          | -2758        |
| Artigos de borracha   | -97,38                     | -1769,06                   | -24,57                                 | -843,58                          | -2735        |
| Transporte rodoviário de carga  | -76,30                     | -1388,31                   | -19,26                                 | -661,82                          | -2146        |
| Atividades auxiliares aos transportes terrestres                        | -74,91                     | -1363,22                   | -18,90                                 | -649,92                          | -2107        |
| Petróleo, gás natural e serviços de apoio                               | -69,60                     | -1264,69                   | -17,56                                 | -603,28                          | -1955        |
| Peças e acessórios para veículos automotores                            | -55,70                     | -1013,58                   | -14,05                                 | -483,07                          | -1566        |
| Transporte dutoviário   | -55,16                     | -1003,38                   | -13,92                                 | -478,79                          | -1551        |
| Etanol e outros biocombustíveis   | -53,41                     | -970,47                    | -13,48                                 | -463,39                          | -1501        |
| Naftas para petroquímica  | -36,77                     | -668,59                    | -9,28                                  | -319,03                          | -1034        |
| Transporte aquaviário   | -36,47                     | -663,39                    | -9,20                                  | -316,32                          | -1025        |
| Aluguéis não imobiliários e gestão de ativos de propriedade intelectual | -34,67                     | -631,52                    | -8,75                                  | -304,97                          | -980         |
| Demais setores  | -615                       | -11245                     | -155                                   | -5467                            | -17482       |
| Emissões nacionais  | -1539                      | -28044                     | -388                                   | -13483                           | -43454       |

Fonte: Resultados da pesquisa

## 6 – Considerações finais

Os resultados revelam padrões consistentes nos efeitos econômicos e ambientais dos serviços de transporte no sistema produtivo brasileiro. O modal rodoviário de carga apresenta os maiores efeitos tanto no Valor Bruto da Produção (VBP) quanto nas emissões de CO<sub>2</sub>, com reduções que representam a maior parcela dos totais em todas as simulações. Os setores ligados a combustíveis (Diesel-biodiesel, refino de petróleo) e transporte rodoviário de carga aparecem entre os mais afetados em ambos os cenários - extração da oferta e do consumo intermediário.

Os resultados indicam que o transporte rodoviário de passageiros ocupa a segunda posição em termos de impacto, enquanto os modais ferroviário de carga e metroferroviário de passageiros apresentam contribuições menores. Os resultados demonstram que a extração dos serviços de transporte gera efeitos em cascata em diversos setores da economia, com perdas significativas no VBP nacional e reduções consideráveis nas emissões de CO<sub>2</sub>.

A estrutura produtiva brasileira mostra dependência do sistema de transportes, particularmente do modal rodoviário, tanto para a produção de bens e serviços quanto para os padrões de emissões setoriais. As simulações de extração da oferta e do consumo intermediário produzem impactos quantitativos distintos, mas mantêm a hierarquia de importância entre os modais e setores afetados. Ademais, segundo os resultados, o agregado da oferta dos serviços de transporte terrestres mostrou-se 96,84% mais poluente do que o consumo intermediário destes.

Apesar deste trabalho trazer luz aos efeitos produtivos e ambientais (em termos de emissão) dos serviços promovidos pelos modais de transporte terrestre no Brasil, ainda existem lacunas a serem preenchidas. Para uma análise mais consistente dos efeitos para trás, investigações futuras podem buscar desagregar as estruturas de custo específicas de cada modal. Além disso, este trabalho se limita aos efeitos setoriais. Através de um modelo fechado de insumo-produto é possível avaliar os efeitos em relação aos componentes da demanda final.

## Referências

- ADAMS, Samuel; BOATENG, Elliot; ACHEAMPONG, Alex O. Transport energy consumption and environmental quality: does urbanization matter? *Science of the Total Environment*, v. 744, p. 1–12, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140617>.
- AHMED, Zahoor; ALI, Sajid; SAUD, Shah; SHAHZAD, Syed Jawad Hussain. Transport CO<sub>2</sub> emissions, drivers, and mitigation: an empirical investigation in India. *Air Quality, Atmosphere & Health*, v. 13, p. 1367–1374, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00891-x>.
- ALI, Yousaf. Measuring CO<sub>2</sub> emission linkages with the hypothetical extraction method (HEM). *Ecological Indicators*, v. 54, p. 171–183, 2015.
- BETARELLI, A. A.; FARIA, W. R.; PEROBELLI, F. S.; VALE, V. de A. Expansões logísticas, competitividade e efeitos regionais: os casos dos setores ferroviário e portuário na política comercial brasileira (No. 444188/2015–0), CNPq/MCTI No 25/2015. Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brasília, 2017.
- BETARELLI JUNIOR, A. A. Facilitação de comércio, sistemas produtivos e efeitos regionais: uma modelagem para a avaliação das políticas do setor portuário no Brasil. Projeto financiado pelo CNPq. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2023.
- BETARELLI JUNIOR, A. A. Efeitos econômicos da renovação dos contratos de concessão das empresas ferroviárias no sistema produtivo mineiro. Projeto financiado pela FAPEMIG. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2022.
- BRASIL. Estimativas de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. 2022.
- CHANG, Yih F.; LIN, Sue J. Structural decomposition of industrial CO<sub>2</sub> emission in Taiwan: an input-output approach. *Energy Policy*, v. 26, n. 1, p. 5–12, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(97\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(97)00089-X).
- CNT. Boletins Técnicos CNT – Agosto/2024.
- DAI, Jiapeng et al. Transport infrastructure, economic growth, and transport CO<sub>2</sub> emissions nexus: does green energy consumption in the transport sector matter? *Environmental Science*

*and Pollution Research*, v. 30, p. 40094–40106, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-25100-3>.

DA SILVA DIAS, M. A. F. Efeito estufa e mudanças climáticas regionais. *Revista USP*, n. 71, p. 44–51, 2006.

DE ANDRADE, André Luiz Campos; MATTEI, Lauro. Consumo energético e emissões de CO<sub>2</sub>: uma análise do setor de transportes brasileiro. 2011.

DE MACEDO, Alice Alves; DE ANDRADE BAPTISTA, Jose Abel. O trade-off dos modais de transporte no Brasil: desafios e soluções. *Revista do Encontro de Gestão e Tecnologia*, v. 1, n. 6, p. 58–67, 2024.

DE PALMA, A.; LINDSEY, R.; QUINET, E.; VICKERMAN, R. *A handbook of transport economics*. Edward Elgar Publishing, 2011.

DIETZENBACHER, E.; VAN DER LINDEN, J. A.; STEENGE, A. E. The regional extraction method: EC Input-output comparisons. *Economic Systems Research*, p. 186–207, 1993.

FERNANDES, Maria Eduarda de Paula; BETARELLI JUNIOR, A. A. Transportes, investimentos e transmissões intersetoriais: os efeitos econômicos das concessões ferroviárias à economia brasileira. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Econômicas) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2017.

FIGUEIREDO, Kleber F.; FLEURY, Paulo F.; WANKE, Peter (Orgs.). *Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento do fluxo de produtos e dos recursos*. São Paulo: Atlas, 2010. (Coleção Coppead de Administração).

GONÇALVES, R.; PALMEIRA, Eduardo. Análise do setor de transportes. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, 2006.

GUIMARÃES, Vanessa de A. Modelagem matemática para localização-alocação de centros de integração logística considerando as demandas par-a-par. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – PET/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

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

JUNIOR, Ilton Curty Leal et al. Análise da matriz de transporte brasileira: consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub>. *Revista Uniabeu*, v. 8, n. 18, p. 49–64, 2015.

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

MINISTÉRIO DO TRANSPORTE. Plano Nacional de Logística e Transportes – PNLT. Relatório Executivo. 2012. Disponível em: <http://www2.transportes.gov.br/bit/01-inicial/pnlt.html>.

O’RIORDAN, Vera et al. Passenger transport demand, fuel consumption, and emissions data for the Irish Passenger Transport Emissions and Mobility (IPTeM) model. *Data in Brief*, v. 42, p. 108154, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108154>.

PAELINCK, J.; DE CAEVEL, J.; DEGUELDRE, J. Analyse quantitative de certaines phénomènes du développement régional polarisé: essai de simulation statique d’itinéraires de propagation. *Bibliothèque de l’Institut de Science Économique*, v. 7, p. 341–387, 1965.

PEROBELLI, F. S. et al. Estimativa da matriz de insumo-produto da Bahia (2009): características sistêmicas da estrutura produtiva do estado. *Revista Econômica do Nordeste*, v. 46, n. 4, p. 97–115, 2015.

RODRIGUES, R. L.; GUILHOTO, J. J. M. Análise setorial e topografia da estrutura produtiva: as cooperativas agropecuárias no Paraná. *Estudos Econômicos (São Paulo)*, v. 37, p. 487–513, 2007.

SANTOS, F. D. Os desafios ambientais criados pela grande aceleração do pós-guerra. *Nação e Defesa*, n. 122, p. 61–78, 2009.

SANTOS, Georgina; BEHRENDT, Hannah; TEYTELBOYM, Alexander. Policy instruments for sustainable road transport. *Research in Transportation Economics*, v. 28, n. 1, p. 46–91, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2010.03.002>.

SILVA, Philippe Barbosa; RIBEIRO, Rogério Lemos; VIEIRA, Fabiano Adriano. Potencial de redução de emissão de CO<sub>2</sub> pelo uso de transporte ferroviário: um estudo de caso no Brasil. *Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia*, v. 6, n. 1, p. 1–17, 2020.

SOLAYMANI, Saeed. CO<sub>2</sub> emissions and the transport sector in Malaysia. *Frontiers in Environmental Science*, v. 9, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.774164>.

STRASSERT, G. Zur Bestimmung strategischer Sektoren mit Hilfe von Input-Output-Modellen. *Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik*, v. 182, n. 1, p. 211–215, 1968. DOI: <https://doi.org/10.1515/jbnst-1968-0114>.

YORO, Kelvin O.; DARAMOLA, Michael O. CO<sub>2</sub> emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. In: *Advances in Carbon Capture: Methods, Technologies and Applications*, p. 3–28, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819657-1.00001-3>.

ZHAO, Jingjing et al. Investigating correlates of personal and freight road transport energy consumption: a case study of England. *Journal of Transport Geography*, v. 112, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2023.103693>.