

Emissões regionais de CO₂: uma análise temporal sistêmica¹

Regional CO₂ Emissões: a systemic temporal analysis

Gabriel Marcos Arcanjo*, Juliano da Costa da Silva†, Fernando Salgueiro Perobelli‡

GT07. Desenvolvimento rural, territorial e regional

Resumo

Este artigo aborda a crescente importância das discussões globais sobre a descarbonização, enfatizando o papel dos sistemas produtivos nas emissões de gases de efeito estufa. O Brasil se destaca como objeto de análise devido às disparidades regionais, à sua rica biodiversidade, à capacidade produtiva do setor agrícola e à sua integração no comércio internacional. Utilizando Matrizes de Insumo-Produto inter-regional para os anos de 2011 e 2015, que abrangem 27 Unidades Federativas e 67 setores econômicos, o estudo classifica as unidades federativas em quatro grupos com base em suas inter-relações econômicas e emissões de CO₂, utilizando o índice de ligação. A análise de Decomposição Estrutural identifica as principais fontes das variações nas emissões de cada grupo. Os resultados mostram uma concentração espacial das emissões de CO₂ em regiões ecologicamente importantes, como o bioma Amazônico, o Cerrado e a Mata atlântica. Essas emissões estão vinculadas à estrutura produtiva regional, especialmente no setor agrícola, onde as exportações desempenham um papel fundamental. Ainda, observa-se um padrão regional entre o valor da produção e as emissões, influenciado pela diversidade produtiva das regiões. Enquanto o Norte e o Nordeste estão em transição para atividades agrícolas, o Sul e o Sudeste são mais industrializados.

Palavras-chave: Emissões; Brasil; Mudança Estrutural; Insumo-Produto; Tipologia regional

Abstract

This article addresses the increasing importance of global discussions on decarbonization, emphasizing the role of production systems in greenhouse gas emissions. Brazil stands out as the object of analysis due to regional disparities, rich biodiversity, the productive capacity of the agricultural sector, and its integration into international trade. Using inter-regional Input-Output Matrices for the years 2011 and 2015, covering 27 Federative Units and 67 economic sectors, the study categorizes federative units into four groups based on their economic interrelations and CO₂ emissions using the linkage index. Structural Decomposition Analysis identifies the main sources of variations in emissions for each group. The results show a spatial concentration of CO₂ emissions in ecologically important regions such as the Amazon biome, the Cerrado, and the Atlantic Forest. These emissions are linked to the regional production structure, especially in the agricultural sector, where exports play a fundamental role. Furthermore, a regional pattern is observed between production value and emissions, influenced by the productive diversity of the regions. While the North and Northeast are transitioning to agricultural activities, the South and Southeast are more industrialized.

Keywords: Emissions; Brazil; Structural Change; Input-Output; Regional Typology

1. Introdução

As discussões mundiais vêm fortificando as pressões e compromissos para a descarbonização dos países (Höhne et al. 2021), adesão de sistemas produtivos que sejam capazes de estimular práticas sustentáveis e mitigar os impactos ambientais, em especial as emissões de gases de efeito estufa (Black et al. 2021). De certo modo, essa exigência pode influenciar e modificar a cadeia produtiva dos países, criando-se assim um *trade-off* entre o

¹ O terceiro autor agradece ao financiamento do CNPq proveniente de recursos da Chamada CNPq/MCTI/FNDCT Nº 59/2022 e do Processo 310958/2020-2 relativo à Bolsa de Produtividade em Pesquisa.

* Mestrando em Economia Aplicada pela Universidade Federal de Juiz de Fora; arcanjo.gabriel@estudante.ufjf.br

† Mestrando em Economia Aplicada pela Universidade Federal de Juiz de Fora; silva.juliano@estudante.ufjf.br

‡ Professor Titular Departamento de Economia – UFJF, PPGE – UFJF e Bolsista de Produtividade CNPq; fernando.perobelli@ufjf.br

crescimento econômico sustentado por impactos ambientais, assim como foi a China (Yunfeng e Laike 2009), ou a possibilidade de acionar limitações ao crescimento da economia adequando sua estrutura produtiva para reduzir as emissões.

Além da produção, o consumo dos agentes e os fluxos de comércio são grandes propulsores de emissões (de Araújo et al. 2020; Kim e Tromp 2021). De modo específico, às emissões de CO₂ dissociadas entre esses mecanismos se difundem de acordo com as características econômicas do país, ou seja, aqueles desenvolvidos e em desenvolvimento. Araújo et al (2020) consentem na predisposição dos países desenvolvidos em consolidar menores níveis de emissões durante o processo produtivo, mas por outro lado incorporaram as emissões globais através do consumo. Seguindo a mesma perspectiva, Arto e Dietzenbacher (2014) apontam que importações líquidas de emissões pelos países desenvolvidos aumentaram, resultante do crescimento das exportações líquidas de emissões dos países em desenvolvimento. As principais justificativas das emissões baseadas nos padrões de produção dos países em desenvolvimento estão associadas, em parte, aos baixos custos de produção, menores salários e rigidez nas regulações ambientais (Grether e Mathys 2013; Z. Zhang, Zhu, e Hewings 2017).

Uma das características que diferencia o processo gerador de emissões entre os países está relacionada à estrutura produtiva. A China por exemplo, possui grande relevância nas exportações provenientes das indústrias de transformação, já as exportações brasileiras provêm das indústrias primárias (Kim e Tromp 2021). Em relação a este último setor, durante as últimas décadas o país alavancou sua participação no comércio internacional, influenciado pela expansão da atividade agropecuária, em especial, o cultivo de soja e a produção de carne bovina (Cederberg et al. 2011; Salvo et al. 2015; Tollefson 2010)

O crescimento neste setor é função também da expansão de terras agrícolas, que é frequentemente associada à mudança no uso da terra (Curtis et al 2018) . Em 33 anos, o país perdeu 102,4 milhões de hectares de vegetação natural devido às atividades agrícolas e pecuárias, equivalente em média a 3,1 milhões de hectares por ano (de Souza, 2022). Adicionalmente, (Souza, Domingues, e Magalhaes 2023) apontam que a maior pressão sobre a cobertura original ocorreu nos biomas Amazônia e Cerrado, correspondendo a cerca de 75,6% das áreas desmatadas de 1985 a 2017. Essa transição foi responsável por 66% das emissões de CO₂ no Brasil em 2021 (SEEG, 2021) e cerca de 9% das emissões globais (Friedlingstein et al. 2022).

Assim como em países desenvolvidos e em desenvolvimento, a disparidade regional do território brasileiro possibilita identificar padrões semelhantes. A forte concentração dos setores mais dinâmicos nas regiões Sul e Sudeste sugere desequilíbrios regionais quando comparadas às regiões Norte e Nordeste. A diversificação da estrutura produtiva nessas regiões mais desenvolvidas pode contribuir para a redução dos níveis de emissões de CO₂.

Por outro lado, o desenvolvimento industrial tardio nas regiões Norte e Nordeste tem implicações que vão além das questões políticas e econômicas. A densa complexidade econômica em regiões específicas pressupõem que as atividades menos sofisticadas ocupam a periferia da rede². Somando-se a isso, o fator regional relacionado aos aspectos edafoclimáticos podem proporcionar uma vantagem competitiva em outros setores que não a indústria, como os setores agrícolas. Estes, por sua vez, desempenham contribuições complementares, agregando valor à cadeia de produção, mas, consequentemente, também contribuem para níveis significativos de emissões.

Sob uma perspectiva de valor de produção e encadeamentos produtivos, o mix industrial concentrado nas regiões Sul e Sudeste se mostram mais integrados ao restante do sistema

² Abreu et al (2020) apontam a discussão de complexidade econômica e redes para o Brasil.

produtivo, bem como têm maior participação no valor da produção, quando comparadas às atividades primárias, localizadas principalmente no Centro-Norte do país. Sendo assim, inicia-se uma discussão acerca da disparidade regional, estrutural e suas implicações no crescimento econômico brasileiro de maneira sustentável no que tange ao processo de produção. Esse debate sistêmico das emissões levando em consideração a heterogeneidade da estrutura produtiva regional para identificar desafios econômicos e ambientais, ainda é pouco abordado na literatura.

No que tange a literatura internacional, existe a discussão acerca do nível de propagação de emissão desses diferentes setores e sua importância na cadeia de valor da economia (Cansino, Román, e Ordóñez 2016; Meng et al. 2018; Su, Ang, e Li 2017). Outros trabalhos adicionam a perspectiva regional, mais precisamente sobre a possibilidade de a heterogeneidade regional influenciar diferentes padrões em relação aos níveis de emissões na cadeia produtiva quando comparado ao absoluto (Liang, Fan, e Wei 2007; W. Zhang, Peng, e Sun 2015). Para o Brasil, são inúmeros os trabalhos que indagam os diferentes mecanismos de propagação das emissões ao longo do processo produtivo das cadeias de valores (Cardoso et al. 2016; Imori e Guilhoto 2015; Perobelli, Faria, e de Almeida Vale 2015; Ribeiro et al. 2023; Silva e Perobelli 2012). Ainda na mesma perspectiva, outros trabalhos enfatizam uma investigação para estados brasileiros específicos (Carvalho, Santiago, e Perobelli 2013).

Dessa maneira, o interesse neste artigo reside na oportunidade de preencher um espaço na literatura, expondo questões relativas à propagação das emissões brasileiras de CO₂ num contexto sistêmico, setorial e espacial. De uma perspectiva histórica e que vem permanecendo com o passar dos anos, a importância da temática está centrada na cobrança mundial pela adoção de práticas sustentáveis ao longo das cadeias de produção que amenizem os impactos ambientais. Para o Brasil em especial, busca-se compreender como a diversidade regional e suas respectivas estruturas produtivas impulsionam tanto o crescimento econômico quanto o desenvolvimento sustentável da economia.

Para tanto, recorre-se à análise de insumo produto, que permite investigar de maneira sistêmica as economias através de ligações setoriais, utilizando relações de interdependência intersetoriais e inter-regionais. Na primeira etapa da análise, é fundamental identificar e desenvolver uma tipologia dos estados brasileiros. Isso requer compreender o grau de encadeamento da cadeia produtiva em termos de interconexões econômicas e também de emissões de CO₂. De acordo com as tipologias criadas, a segunda etapa envolveria a utilização da Análise de Decomposição Estrutural (SDA) para verificar as fontes que contribuem para as mudanças nas emissões de CO₂. Considerando as etapas anteriores, será possível associar o padrão estrutural de produção das regiões brasileiras e suas respectivas contribuições econômicas e ambientais.

Além dessa introdução, o artigo em sua segunda seção apresenta a base de dados e metodologia que consiste na análise de ligações regionais e SDA, ambos sob a perspectiva de emissões de CO₂. A terceira seção traz a descrição e análise dos resultados e, por fim, na seção quarta tecemos algumas conclusões.

2. Base de Dados e Metodologia

2.1 Base de Dados

Os dados que viabilizam a análise sistêmica das emissões na economia brasileira são encontrados no Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). Estes dados foram compatibilizados com a estrutura regional e estrutural da matriz de insumo-produto utilizada nesse artigo pelo Núcleo de Economia Regional e Urbana da

Universidade de São Paulo (NEREUS). Além desta minuciosa base de dados, também foram cedidas as matrizes de Insumo-Produto inter-regionais para o Brasil, cobrindo as 27 unidades da Federação (Ver Tabela 1) referentes aos anos de 2011 e 2015. Ademais, as matrizes apresentam uma desagregação para 67 setores, fornecendo assim, maiores detalhes para as conclusões futuras.

O SDA requer que as matrizes de Insumo-Produto sejam expressas em preços constantes para analisar as mudanças estruturais ao longo dos diferentes períodos, sendo assim, a matriz referente ao ano de 2011 foi restabelecida a preços de 2015.

Tabela 1 - Descrição das unidades da Federação

Unidades Federativas	Sigla	Região	Unidade Federativas	Sigla	Região
Acre	AC	Norte	Paraíba	PB	Nordeste
Alagoas	AL	Nordeste	Paraná	PR	Sul
Amapá	AP	Norte	Pernambuco	PE	Nordeste
Amazonas	AM	Norte	Piauí	PI	Nordeste
Bahia	BA	Nordeste	Rio de Janeiro	RJ	Sudeste
Ceará	CE	Nordeste	Rio Grande do Norte	RN	Nordeste
Distrito Federal	DF	Centro-Oeste	Rio Grande do Sul	RS	Sul
Espírito Santo	ES	Sudeste	Rondônia	RO	Norte
Goiás	GO	Centro-Oeste	Roraima	RR	Norte
Maranhão	MA	Nordeste	Santa Catarina	SC	Sul
Mato Grosso	MT	Centro-Oeste	São Paulo	SP	Sudeste
Mato Grosso do Sul	MS	Centro-Oeste	Sergipe	SE	Nordeste
Minas Gerais	MG	Sudeste	Tocantins	TO	Norte
Pará	PA	Norte			

2.2 Metodologia

Conforme descrito por Miller e Blair (2009), o modelo básico inter-regional de insumo produto pode ser descrito como:

$$x = Ax + f \quad (1)$$

$$x = (I - A)^{-1}f = Bf \quad (2)$$

a partir da interação entre regiões mn e setores r , considera-se $x_{mn \times 1}$ o vetor do produto bruto total; $f_{mn \times 1}$ é o vetor de demanda final; $A_{mn \times mn}$ é a matriz de coeficientes técnicos; $I_{mn \times mn}$ é a matriz identidade; $B_{mn \times mn}$ é a matriz inversa de Leontief.

Representando o sistema de Equações (1) e (2) em um contexto inter-regional na forma matricial, com m diferentes regiões:

$$x = \begin{bmatrix} x^1 \\ \vdots \\ x^m \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} A^{11} & \dots & A^{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{m1} & \dots & A^{mm} \end{bmatrix}; f = \begin{bmatrix} f^1 \\ \vdots \\ f^r \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} B^{11} & \dots & B^{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B^{mm} & \dots & B^{mm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Incorporando e definindo o vetor de coeficientes de intensidade de emissão direta ($c_{mn \times 1}$) representamos o volume de CO₂ por unidade de produção, tal como:

$$C = cx = c(I - A)^{-1}f = cLf \quad (4)$$

onde C é total de emissões de CO₂ na economia.

Ainda na mesma perspectiva, em vez de relacionar o produto com a demanda final, pode-se investigar a relação entre o produto e os insumos primários (ótica das vendas) descrito por Ghosh (1958):

$$x = v(I - F)^{-1} = vG \quad (5)$$

sendo $v_{1 \times mn}$ o valor adicionado; $F_{mn \times mn}$ a matriz de coeficientes técnicos pelo lado da oferta; $G_{mn \times mn}$ matriz inversa de Ghosh. Para desenvolver uma abordagem de emissões, o modelo pode ser generalizado como:

$$C = cx = v(I - F)^{-1}c = cGc \quad (6)$$

Com base nas equações (4) e (6), a sequência metodológica irá abordar a ótica das emissões através das análises de ligações regionais e análise de decomposição estrutural (SDA), respectivamente.

2.1 Ligações para frente e para trás

As relações de compra e venda intra e inter-setorial apresentam embutidas nas mesmas emissões provenientes de seus processos produtivos (Sánchez-Chóliz e Duarte 2003). Neste sentido, os índices de ligações de Rasmussen (1956) e Hirschman (1958) permitem identificar os setores que têm maior poder de encadeamento na economia. Adaptações a esses índices, conforme (Chang 2015; Chang e Han 2022; Lenzen 2003), permite mapear o sistema de distribuição das emissões de maneira espacial, sistêmica e na perspectiva de interdependência regional.

Com a finalidade de encontrar as medidas de ligação, a primeira representação é baseada na matriz inversa de Leontief, em que as somas j^{th} setor e s^{th} região ($\sum_r \sum_i b_{ij}^{rs}$) medem a produção total de todos os setores em todas as regiões a partir da variação de uma unidade da demanda final da produção do setor j na região s . A mesma intuição é estendida às ligações de emissões ($\sum_r \sum_i c_i^r b_{ij}^{rs}$), que representam a parcela adicional das emissões de CO₂ para atender a uma unidade adicional de demanda final produzida pelo setor j na região s .

Estendendo a análise pela ótica de Ghosh, o elemento g_{ij}^{rs} baseado no inverso da matriz $G = (I - F)^{-1}$, implica o aumento da produção da indústria j na região s devido a um aumento unitário dos insumos primários na indústria i na região r . Para refletir as ligações futuras para o setor i na região r basta somar os elementos do i^{th} setor da r^{th} região da matriz inversa de Ghosh ($\sum_s \sum_j g_{ij}^{rs}$). Da mesma maneira, estende-se a análise para as emissões, ou seja, ($\sum_s \sum_j g_{ij}^{rs} c_j^s$) mensura-se o subtotal de emissões de CO₂ na economia necessárias para satisfazer uma unidade de demanda final produzida pelo setor j na região s .

Por fim, ainda é necessário atentar-se para dois elementos: o primeiro ($\sum_j \alpha_j^s$) que expressa a demanda final do setor j na região s ponderada pela demanda final da região s . O segundo elemento trata da ponderação³ das medidas de ligações para trás e para frente de acordo com a medida global para a economia como um todo (inter-regional e intersetorial). A normalização descreve as características da interação regional, ou seja, para explorar o potencial de intensidade regional e as possíveis distorções sobre o crescimento econômico, é necessário considerar a escala da produção na análise das ligações (Hirschman, 1958; Jones, 1976).

Dessa maneira, define-se as medidas normalizadas de ligação para trás e para frente em termos econômicos (BL_s e FL_r), assim como, emissões de CO₂ (BL_s^c e FL_r^c):

$$BL_s = \frac{\sum_j \alpha_j^s (\sum_r \sum_i b_{ij}^{rs})}{\sum_s (\sum_j \alpha_j^s (\sum_r \sum_i b_{ij}^{rs}))} \quad FL_r = \frac{\sum_j \alpha_j^s (\sum_r \sum_i g_{ij}^{rs})}{\sum_s (\sum_j \alpha_j^s (\sum_r \sum_i g_{ij}^{rs}))} \quad (7)$$

$$BL_s^c = \frac{\sum_j \alpha_j^s (\sum_r \sum_i c_i^r b_{ij}^{rs})}{\sum_s (\sum_j \alpha_j^s (\sum_r \sum_i c_i^r b_{ij}^{rs}))} \quad FL_r^c = \frac{\sum_j \alpha_j^s (\sum_r \sum_i g_{ij}^{rs} c_j^s)}{\sum_s (\sum_j \alpha_j^s (\sum_r \sum_i g_{ij}^{rs} c_j^s))} \quad (8)$$

Interpretações conjuntas serão realizadas a partir dos resultados encontrados nas Equações (7) e (8), mas primeiro é necessário descrever brevemente ambas as implicações. A Equação (7) apresenta quatro desfechos: ($BL_s > 1$ e $FL_r < 1$) implica o quanto uma região demanda das demais regiões. Dito de outra forma, uma mudança unitária na demanda final da região s cria um aumento acima da média na economia, ou seja, a região s gera uma resposta das outras regiões acima da média. ; ($BL_s < 1$ e $FL_r > 1$) estima quanto uma determinada região r é demandada pelas demais. Dessa forma, indica que uma mudança unitária na demanda final de todas as regiões gera um aumento acima da média na região r , logo a região r tem uma dependência acima da média da produção das outras regiões; ($BL_s > 1$ e $FL_r > 1$) classificam-se como regiões de alto poder de encadeamento para o crescimento da economia, sendo considerado como região chave; ($BL_s < 1$ e $FL_r < 1$) regiões com baixos encadeamentos na estrutura produtiva e, portanto, alterações relativas nessas regiões podem não ter efeitos importantes numa economia.

A partir da Equação (8), a mesma interpretação pode ser facilmente aplicada as ligações estendidas ao contexto das emissões de CO₂: ($BL_s^c > 1$ e $FL_r^c < 1$) sugere que um aumento na demanda final da região s resultará em um aumento acima da média na emissões de CO₂; ($BL_s^c < 1$ e $FL_r^c > 1$) implica que um aumento unitário da produção da região r aumenta acima da média as emissões de CO₂; ($BL_s^c > 1$ e $FL_r^c > 1$) considera-se regiões chaves devido aos fortes encadeamentos das emissões na cadeia de valor da economia; ($BL_s^c < 1$ e $FL_r^c < 1$) implica em regiões com baixas emissões provenientes da cadeia produtiva.

Com base na discussão anterior será possível realizar uma avaliação sistêmica (e.g. vínculos intersetoriais e inter-regionais) em relação as emissões de CO₂, representando assim o primeiro passo do estudo para identificar medidas de mitigação. Para equilibrar o conflito entre crescimento econômico e emissões de CO₂, as ligações produtivas e de emissões devem ser consideradas simultaneamente durante a discussão entre o papel das regiões e setores numa economia. Chang (2015) acredita que seja injusto e inviável a tarefa de mitigar as emissões

³ A ponderação é referente ao denominador das equações (7) e (8), ver (Hirschman, 1958; Jones, 1976).

recair apenas em determinada região, ainda mais quando esses territórios estão conectados (compras e vendas).

Sendo assim, cria-se uma tipologia de regiões de acordo com suas ligações (para frente e para trás) econômicas e de emissões: A primeira faz referência as regiões identificadas como “Antagonista”, em outras palavras, aquelas que possuem fracos encadeamentos ao longo da cadeia produtiva, mas que por outro lado, apresentam elevados níveis de emissões decorrentes dessa cadeia. De modo contrário, classifica-se como “Protagonista” as regiões na qual as estruturas produtivas sejam integradas ao longo da cadeia (regiões chaves) e apresentam baixas emissões de CO₂ durante esse processo. Para analisar uma posição entre as extremidades, identificamos um grupo de regiões denominado “Intermediário”, que contribuem significativamente para as emissões ao longo da cadeia produtiva, porém, de certa forma, possuem significativas ligações econômicas. Por fim, as demais regiões são classificadas como “Outros”, uma vez que o foco do estudo está nas regiões com maior contribuição para as emissões.

$$\text{Grupo Intermediário: } (BL_s > 1 \text{ e } FL_r < 1) \text{ ou } (BL_s < 1 \text{ e } FL_r > 1) \text{ e } (BL_s^c > 1 \text{ e } FL_r^c > 1) \quad (9)$$

$$\text{Grupo Protagonista: } (BL_s > 1 \text{ e } FL_r > 1) \text{ e } (BL_s^c < 1 \text{ e } FL_r^c < 1) \quad (10)$$

$$\text{Grupo Antagonista: } (BL_s < 1 \text{ e } FL_r < 1) \text{ e } (BL_s^c > 1 \text{ e } FL_r^c > 1) \quad (11)$$

Outros: Diferente das tipologias anteriores

O grupo antagonista, seguido pelo grupo intermediário, apresenta maior potencial para mitigar as emissões, principalmente devido à natureza poluente da cadeia de abastecimento, que por sua vez, possui baixos encadeamentos na economia e está mais suscetível a mudanças na estrutura produtiva. Em contrapartida, o grupo protagonista é reconhecido como regiões de destaque, apresentando uma característica marcante de interligação na cadeia produtiva, juntamente com baixas emissões decorrentes dessa conexão. Portanto, esse grupo não seria sujeito a mudanças na estrutura produtiva para reduzir as emissões, mas sim, regiões que servem de modelo para as demais.

A partir do mapeamento e caracterização dos grupos, basta entender os principais impulsionadores das mudanças nas emissões de CO₂. Para isso, o próximo passo metodológico baseia-se na análise de decomposição estrutural.

2.2 Análise de Decomposição Estrutural (SDA)

O SDA é um método padrão em modelos de Insumo-Produto que permite verificar as mudanças no produto, renda ou outras variáveis em diferentes esferas, como variação tecnológica ou variação na demanda final (Miller e Blair 2009). Assim como os trabalhos de Xu e Deitzenbacher (2014); Hoekstra et al (2016); De Araújo et al (2020); Jiang et al (2021); Ribeiro et al (2023) o presente trabalho estende o SDA para um modelo de Insumo-Produto inter-regional para avaliar diferentes fontes de variação das emissões para os grupos de regiões classificados na seção anterior.

O ponto de partida para a decomposição das mudanças de emissões de CO₂ é considerar dois períodos de tempo (0 e 1). Seguindo os métodos de decomposição polar de Dietzenbacher e Los (1997, 1998), a variação das emissões de CO₂ (ΔC) pode ser decompostas desse modo:

$$\begin{aligned}\Delta C = & \frac{1}{2}(\Delta c L_1 f_1 + \Delta c L_0 f_0) \text{ Efeito Intensidade} \\ & + \frac{1}{2}(\Delta c_0 \Delta L f_1 + \Delta c_1 L f_0) \text{ Efeito Tecnológico} \\ & + \frac{1}{2}(c_0 L_0 \Delta f + c_1 L_1 \Delta f) \text{ Efeito de Demanda Final}\end{aligned}\quad (13)$$

em que o efeito intensidade mede as mudanças nas emissões por unidade de produto por setor e região; o efeito tecnológico mostra a influência de mudanças nos coeficientes técnicos sobre as emissões, ou seja, alterações nos tipos e quantidades de insumos, que podem levar a uma alteração no nível de emissões para produção de um determinado setor; o efeito da demanda final diz respeito as emissões setoriais ligadas ao consumo das famílias, exportações, variação de estoques e governo.

Para finalidades da pesquisa, considera-se importante identificar adequadamente mudanças nas composições da demanda final, ou seja, distinguir de maneira sistêmica qual a contribuição do consumo das famílias e das exportações para os níveis de emissões de CO₂. A fim de atingir esse propósito, será necessário decompor o efeito da demanda final (f), mas primeiro define-se sua estrutura:

$$f = D_f + G_g + O g \quad (14)$$

em que, D_f representa o consumo das famílias; G_g exportações, $O g$ simboliza os demais componentes, governo, formação bruta de capital fixo e variação de estoques.

Feito isso, reescreve-se o efeito de demanda final definido no terceiro termo da Equação (13) como:

$$\begin{aligned}\Delta f = & \frac{1}{2}(c_0 L_0 \Delta D_f + c_1 L_1 \Delta D_f) + \frac{1}{2}(c_0 L_0 \Delta G_g + c_1 L_1 \Delta G_g) \\ & + \frac{1}{2}(c_0 L_0 \Delta O g + c_1 L_1 \Delta O g)\end{aligned}\quad (15)$$

caracterizando assim, três novos efeitos: Efeito Consumo das famílias, Efeito Exportação e Efeito dos Demais Componentes.

3. Resultados

3.1 Índices de Ligação

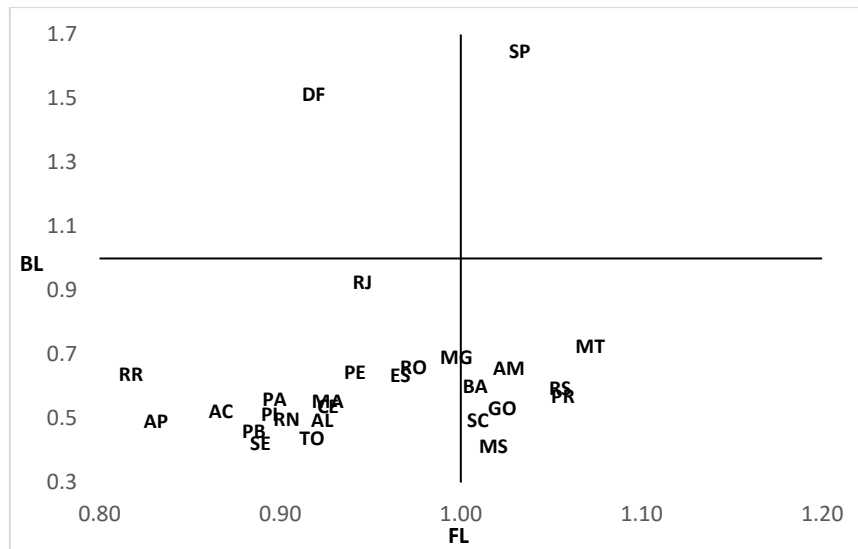
Seguindo a Equação (7) e (8), foram calculadas as ligações para trás e para frente por região⁴, configurando uma visão geral dos encadeamentos produtivos e das emissão para as 27 unidades da federação nos anos de 2011 e 2015.

Em relação ao primeiro ano, a Figura 1 mostra que apenas o estado de São Paulo (SP) foi considerado estado chave para a economia brasileira, esse resultado não é inusitado e pode ser explicado pela hierarquia produtiva, interdependência comercial e produtiva com os demais

⁴ Ver Hadadd et al (2023).

territórios. Algumas regiões apresentaram estados com forte dependência para frente, ou seja, integração nas vendas na cadeia produtiva (AM, BA, MG, SC, GO, MS, RS, PR, MT), impulsionado pelos setores agrícolas (Agricultura e Pecuária), Comércio e Construção. O Distrito Federal (DF) apresentou ligações provenientes das compras, resultado notável por se tratar de uma região administrativa e de estrutura produtiva peculiar quando comparado às demais unidades da Federação. Por fim e, embora já esperado, parte dos resultados apontam que a maior parte dos estados brasileiros são pouco integrados na cadeia produtiva, reiterando uma das problemáticas que contribuem para a fragilidade da economia brasileira.

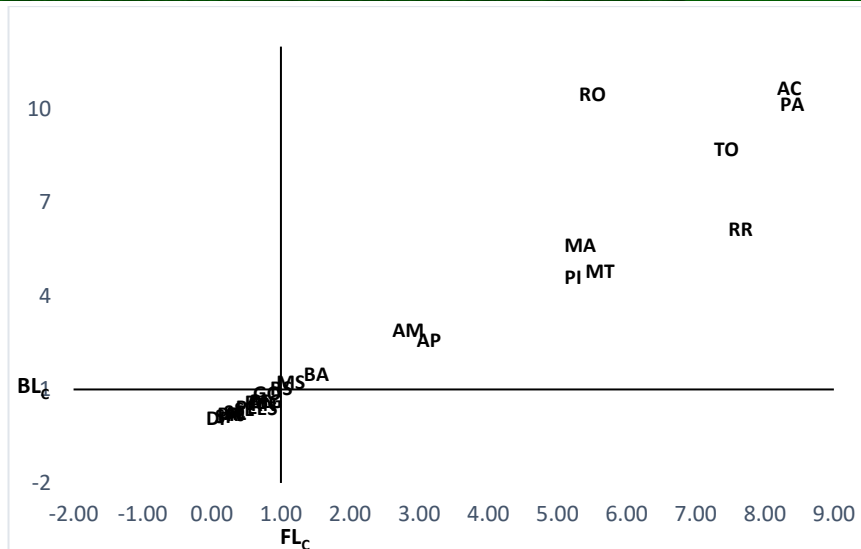
Figura 1 - Índices de ligações para os estados brasileiros em 2011



Fonte: Elaboração própria com base na Matriz de Inter-regional de Insumo-produto.

De forma semelhante, ao analisar de modo sistêmico a disseminação das emissões nas diferentes regiões brasileiras (Figura 2), destaca-se os estados (RO, AC, AP, RR, TO, MA, PI, MT, AM, BA, MS, RS, GO) que estão integrados em termos de emissões por meio das transações de compra e venda ao longo da cadeia produtiva ($BL_s^c > 1$ e $FL_r^c > 1$). O setor agrícola, além de ser a principal característica produtiva na maior parte desses estados, é também o principal propulsor dessas emissões, independente da participação no valor da produção. Os demais estados brasileiros, apresentam baixos encadeamentos nas emissões ($BL_s^c < 1$ e $FL_r^c < 1$).

Figura 2 - Índices de ligações de emissões de CO₂ para os estados brasileiros em 2011



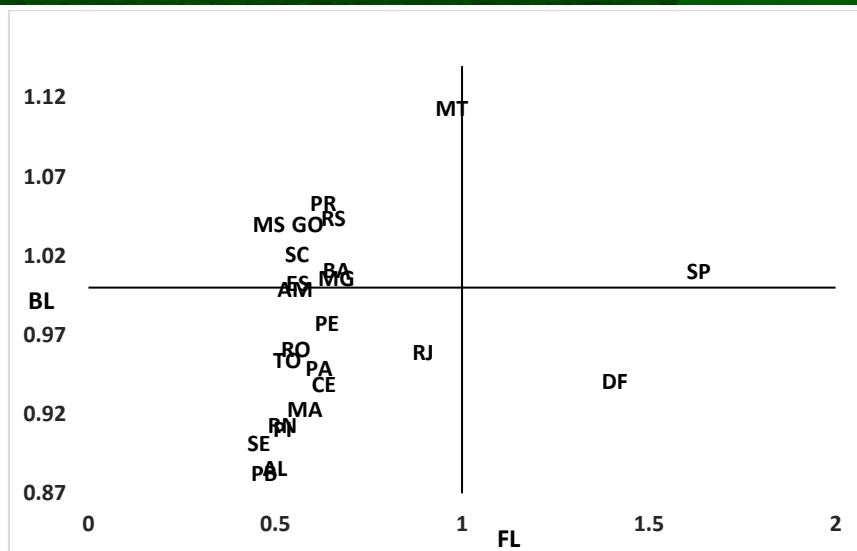
Fonte: Elaboração própria com base na Matriz de Inter-regional de Insumo-produto..

Associado aos resultados das Figuras 1 e 2, o estado de São Paulo (SP) além de apresentar a característica de ser um estado chave para a economia brasileira, ainda possui baixas emissões de CO₂ provenientes da cadeia produtiva. Ainda, é interessante visualizar estados (RO, AC, AP, RR, TO, MA, PI, MT, AM, MS, GO) com alta propagação de emissões e baixa participação na cadeia de valor produtiva brasileira. A parcela dessas cadeias é baseada na expansão de terras pela agricultura e pecuária, como exemplo as fronteiras agrícolas. Ainda nessa perspectiva, julga-se que as emissões de dióxido de carbono no território brasileiro são ocasionadas aos avanços desses setores a biomas como o Cerrado, Mata Atlântica e Amazônia.

Apesar da heterogeneidade regional e produtiva do Brasil, os resultados associam os estados de acordo com as definições já apresentadas na metodologia. A principal contribuição dessa divisão está na caracterização das regiões com base em no encadeamento produtivo e as emissões derivadas das cadeias inter-regionais de valor.

Para o ano de 2015, os resultados apresentados na Figura 3 continuam apontando São Paulo como sendo o único estado chave para a economia brasileira, impulsionado, principalmente, pelo setor de Comércio, Atividades imobiliárias, Construção e Refino de petróleo. De maneira divergente ao analisado anteriormente, os estados (BA, MG, ES, MS, GO, PR, RS, SC, MT) apresentaram maior integração nas compras na cadeia produtiva brasileira provenientes, principalmente, dos setores de Comércio, Agricultura e Construção. Além disso, o Distrito Federal aparece como integrado nas vendas, resultado inusitado por se tratar de uma região administrativa e de estrutura produtiva peculiar quando comparado as demais unidades da Federação. Contudo, a principal explicação está relacionada a definição do conceito do índice de ligação para frente, em que o setor de administração pública tem uma dependência acima da média da produção dos demais setores da região.

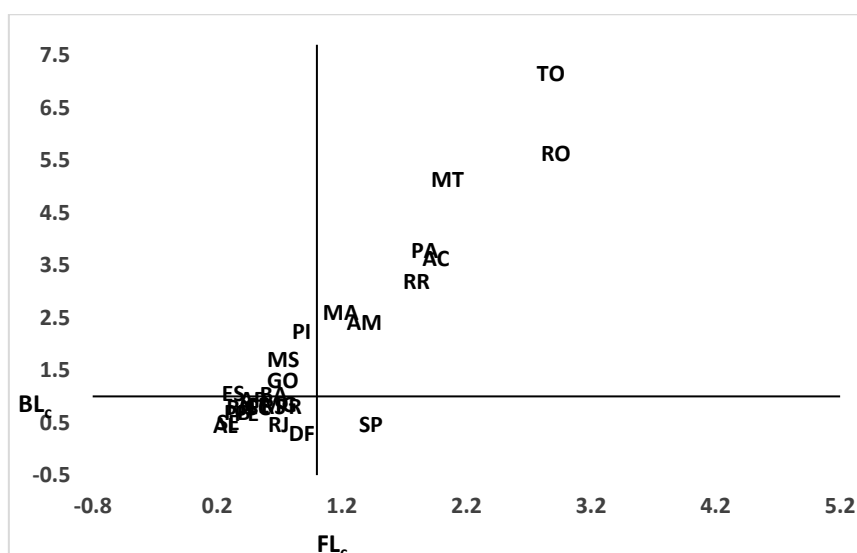
Figura 3 - Índices de ligações para os estados brasileiros em 2015



Fonte: Elaboração própria com base na Matriz de Inter-regional de Insumo-produto..

O encadeamento das emissões regionais brasileiras pelo lado das vendas e compras ao longo da cadeia produtiva, conforme ilustrado na Figura 4, é predominantemente caracterizado por estados (TO, RO, MT, PA, AC, RR, AM, MA) na qual a sua principal atividade econômica continua sendo o setor agrícola. Apesar dessa característica marcante e, diferentemente do ano de 2011, chama-se atenção também para outros setores responsáveis por esses resultados, como: Energia elétrica, Transporte terrestre, Extração e refino de petróleo e Fabricação de minerais não metálicos. Houve mudanças significativas desde 2011, particularmente com o estado de São Paulo emergindo como um importante emissor de CO₂ devido às vendas na cadeia produtiva brasileira, além do surgimento de estados adicionais que também demandam emissões, como (PI, MS, GO, BA e ES).

Figura 4 - Índices de ligações de emissões de CO₂ para os estados brasileiros em 2015



Fonte: Elaboração própria com base na Matriz de Inter-regional de Insumo-produto.

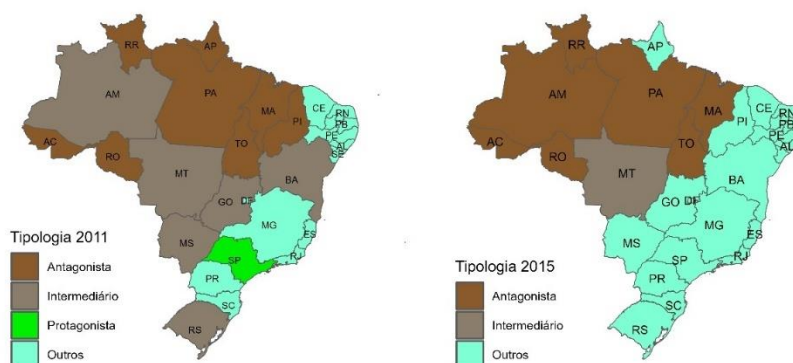
Nessa mesma perspectiva, mas sob um enfoque específico, destaca-se o estado do Amazonas que permanece com participação elevada nas emissões, mostrando de fato que o país carrega o difícil desafio de preservação dessas reservas florestais, principalmente quando existe

a possibilidade de expansão das atividades agrícolas nessa região. Os resultados apresentam a característica geográfica dos estados emissores (RO, RR, AC, MT, PA) possuírem fronteiras com o estado do Amazonas, indicando uma aproximação que possa ser preocupante a longo prazo. Por fim, os estados do Tocantins e Maranhão englobam a fronteira agrícola brasileira que se desenvolveu em direção ao bioma do cerrado, juntamente aos estados do Piauí e Bahia, denominada como MATOPIBA.

Do ponto de vista da dependência para trás e para frente, às cadeias produtivas dos estados e, também, as ligações que remetem aos encadeamentos das emissões nessas cadeias, o estado de São Paulo perde a característica de protagonista. A região apresentou forte interação nas compras e vendas na cadeia produtiva, contudo, quando considerada a propagação de emissões ao longo da cadeia produtiva, o estado é visto como emissor pelo lado das vendas. Tal resultado contrapõe o apresentado para o ano de 2011, sendo o crescimento do setor de refino de petróleo o principal propulsor das emissões para o estado, e que consequentemente, retira o status construído anteriormente de possuir a capacidade de ser impulsionador do crescimento econômico para o país com baixos níveis de emissões ao longo da cadeia produtiva.

A Figura 5 ilustra as mudanças na composição espacial das tipologias criadas indicando que o estado de São Paulo deixa de ser uma região com uma cadeia de abastecimento limpa, que contribui acima da média para o crescimento econômico. Além disso, notou-se uma redução das unidades federativas com uma contribuição significativa nas emissões provenientes da cadeia produtiva. Assim sendo, torna-se evidente a dificuldade da região Centro-Norte em mitigar as emissões ao longo dos anos. Ao contrário da região Sul do país, a modesta estrutura produtiva em termos industriais, em consonância com característica regional (*e.g.* biomas, clima), potencializa a especialização em atividades agrícolas. Por último, a concentração espacial das emissões nos biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica representa uma ameaça para o ecossistema.

Figura 5 - Tipologia para os anos de 2011 e 2015



Fonte: Elaboração própria com bases nos resultados das tipologias regionais

Por fim, é importante abrir uma breve contextualização a respeito da presença do setor agrícola, principalmente pela alta participação na formação do produto interno bruto brasileiro. Apesar da grande capacidade produtiva, historicamente o poder de encadeamento desses setores não foi suficiente para potencializar o crescimento econômico. Em consonância, os resultados apresentados até então corroboram com essa afirmativa e acrescentam o poder de encadeamento

desse setor no que tange às emissões de CO₂. Sendo assim, torna-se crucial criar um discernimento sobre a relação entre as atividades agrícolas e as emissões, especialmente ao considerar a inserção do Brasil no comércio internacional. Uma hipótese levantada seria o crescimento das exportações, que, por sua vez, poderia estar associado ao aumento das emissões. Para orientar essa discussão, o método de Análise de Decomposição Estrutural permitirá testar essa hipótese e entender melhor as outras fontes de variação das emissões.

3.1 Análise de Decomposição Estrutural

A decomposição das variações nas emissões de CO₂ para o período entre 2011 e 2015 será analisada com base nas tipologias estabelecidas na seção anterior, considerando os setores que possuem maior relevância na estrutura produtiva brasileira em termos de emissões. A Tabela 2 mostra os resultados para os estados classificados como antagonista, ou seja, aqueles nos quais o poder de encadeamento das emissões na cadeia produtiva é maior. Os efeitos do SDA são agregados em 5 categorias: Intensidade, Tecnologia, Exportação, Consumo das famílias e Restante da demanda agregada.

Tabela 2 – Decomposição das mudanças nas emissões de CO₂(t) para o grupo Antagonista.

	Toneladas (t)					
	Intensidade	Tecnológico	Exportações	Consumo das Famílias	Resto da Demanda Final	Variação Total de Emissões
Agricultura	-23088.55	-1621.24	21100.70	6658.06	-3764.79	-715.83
Pecuária	-69053.07	24971.30	24451.74	8686.16	5891.62	-5052.25
Produção florestal	-8357.37	489.48	1675.79	5828.72	-1620.51	-1983.89
Energia Elétrica	2025.72	3021.47	-19.26	1545.47	-201.37	6372.03
Refino de Petróleo	-686370.73	482455.88	563.71	190980.11	12427.59	56.56
Extração de petróleo e gás	-1147.34	984.80	-6.32	25.86	226.08	83.09
Transporte Terrestre	4967.15	381.27	-2176.07	682.52	-373.13	3481.74

Fonte: Elaboração própria.

Como já apresentado, o grupo é o maior responsável pelo desencadeamento das emissões ao longo da cadeia produtiva, principalmente pela estrutura produtiva direcionada para o setor agrícola. Os resultados da decomposição mostram uma alteração na trajetória das emissões totais, com os setores agrícolas e, mais especificamente, a pecuária, apresentando a maior redução nas emissões de CO₂ (-5.052.25t). A principal contribuição para essa mudança está ligada ao efeito intensidade da agricultura (23088.55t) e pecuária (-69053.07t), demonstrando que ao longo dos anos foi possível produzir a mesma quantidade com menores níveis de emissão.

Outra contribuição que corrobora com a hipótese levantada está relacionada à participação das exportações nas emissões de CO₂ nos setores agrícolas, em especial a agricultura (21100.70t) e pecuária (24451.74t). Esse resultado ajuda a enriquecer a discussão da participação do fluxo de comércio internacional nessa temática e, além disso, enfatizar a necessidade de analisar tanto por parte do Brasil quanto de seus parceiros comerciais sobre esse crucial canal de emissões. Por fim, o consumo das famílias impulsiona o aumento na variação das emissões, enquanto o restante da demanda final revela resultados distintos para esses setores, nos quais a atuação do governo pode ter implicações significativas.

De modo breve, uma análise para os demais setores desse grupo consiste na apresentação daqueles (Energia Elétrica e Transporte Terrestre) que contribuíram positivamente para o aumento das emissões de CO₂, mas proporcionalmente menor quando comparado aos setores agrícolas. Ademais, devido à sua aptidão produtiva, os setores de Refino de Petróleo (-0.11t) e Extração de Petróleo e Gás (0.00t), nessas regiões contribuem com uma parcela pequena das emissões.

O grupo Intermediário é representado exclusivamente pelo estado do Mato Grosso, que exibe um forte encadeamento na cadeia produtiva provenientes das emissões de CO₂, mas visto sua participação econômica na cadeia de produção destaca-se a necessidade de uma análise específica por meio dos resultados da decomposição, exibido na Tabela 3.

Tabela 3 - Decomposição das mudanças nas emissões de CO₂(t) para o grupo Intermediário Mato Grosso.

	Toneladas (t)					
	Intensidade	Tecnológico	Exportações	Consumo das Famílias	Resto da Demanda Final	Variação Total de Emissões
Agricultura	694.24	1198.79	17220.57	873.92	-1537.92	18449.60
Pecuária	34645.06	-10879.54	11642.08	2180.34	-3004.71	34583.23
Produção florestal	757.52	167.26	470.69	692.02	-390.97	1696.52
Energia Elétrica	1082.85	180.67	64.03	90.69	-54.25	1363.99
Refino de Petróleo	-5103.30	4491.68	2.43	1121.00	-511.93	-0.11
Extração de petróleo e gás	-4.85	3.77	0.00	0.02	1.05	0.00
Transporte Terrestre	-2451.08	3083.56	31.56	1015.81	-580.60	1099.25

Fonte: Elaboração própria

O resultado da decomposição apresenta a significativa participação do Mato Grosso nas emissões de CO₂, especialmente o setor agrícola, que responde por 95% das emissões nesta região e que representa 12% do total das emissões provenientes da estrutura produtiva brasileira. Mais uma vez, as exportações marcam positivamente o aumento nas emissões nesses setores agrícolas, em especial agricultura (17220.57t) e pecuária (11642.08t), confirmando a preocupação com a dependência do país nesses setores e sua fragilidade no que diz respeito as altas emissões.

Um fato curioso e não esperado é a relação entre a estrutura produtiva consolidada do setor agrícola e o efeito intensidade desempenhando um papel fundamental para o crescimento das emissões, principalmente na pecuária (34645.06t). Apesar dessa consolidação, o resultado indica que, para manter a mesma produção do ano referência (2011), o estado tem aumentado suas emissões, sendo uma possível explicação a pecuária extensiva. O efeito tecnológico produz resultados distintos na agricultura e na pecuária, o que contradiz o padrão observado no grupo de regiões apresentado na Tabela 4. Essa divergência pode ser atribuída às diferenças na aptidão produtiva. Por último o consumo das famílias exerce influência positiva sobre as emissões, enquanto o restante da demanda final, provavelmente devido a ações do governo, contribuiu para reduzir a variação final das emissões.

Apesar de o setor agrícola ser o principal propulsor das emissões, é importante destacar a participação de outros setores, como Energia Elétrica e Transporte Terrestre, em que o efeito intensidade e consumo das famílias, respectivamente são as principais fontes de aumento das emissões. Os demais setores apresentados na tabela (Refino de Petróleo, Extração de Petróleo e Gás) têm um nível reduzido de emissões.

A última tipologia apresentada para os estados brasileiros refere-se as regiões em que a cadeia produtiva é pouco intensiva no que tange as emissões, quando comparado as demais regiões. Contudo, os resultados da decomposição exibidos na Tabela 4 apresentam significativas ponderações para o país.

Tabela 4 - Decomposição das mudanças nas emissões de CO₂(t) para o grupo Outros

	Toneladas (t)					
	Intensidade	Tecnológico	Exportações	Consumo das Famílias	Resto da Demanda Final	Variação Total de Emissões
Agricultura	-37877.50	-3994.41	18754.26	586.53	-4384.31	-26915.43
Pecuária	-32116.25	-6538.16	9301.16	9375.63	-944.41	-20922.03
Produção florestal	-4425,68	-2130,47	2856,31	722,18	-809,35	-3787,03
Energia Elétrica	30090.42	5410.70	656.03	3163.19	-960.71	38359.62
Refino de Petróleo	-158635286.6	123597236.8	635027.83	35183283.4	-777698.3	2563.1
Extração de petróleo e gás	-4358.24	6348.11	-457.47	97.92	695.03	2325.34
Transporte Terrestre	11433.50	-11067.37	3386.28	-375.32	-5154.13	11433.50

Fonte: Elaboração própria

Os resultados para o setor de energia elétrica exibem o aumento no nível de variação das emissões de CO₂ (38359.62t), o qual foi generalizado em quase todos os efeitos, com exceção do efeito "restante da demanda final". Detalhadamente, o efeito intensidade (30090.42t) realmente aponta que essas regiões têm enfrentado dificuldades para produzir a mesma quantidade de energia com níveis inferiores de emissões. O aumento das emissões nesse setor aponta um gargalo contestável, sobretudo para um país como o Brasil, que possui vastas possibilidades de gerar energia renovável. Os resultados também indicam que a participação do restante da demanda final (-960.71t), ou seja, investimentos e gastos

governamentais foram os únicos mecanismos capazes de reduzir a quantidade de emissões geradas pelo setor elétrico.

Adicionalmente, outros setores tiveram um papel no aumento das emissões de CO₂ nessas regiões (*e.g.* Transporte Terrestre e Extração de Petróleo e gás). Em contrapartida, o setor de Refino de Petróleo não apenas possui uma participação significativa e alto valor agregado, mas também apresenta o maior nível de emissões ao longo da cadeia produtiva. A variação total das emissões (2563.1t) é menor em comparação com outros setores. No entanto, a magnitude das emissões é marcante, evidenciada pelo impacto significativo do efeito tecnológico (123597236.8t) e do consumo das famílias (35183283.4t). Em contrapartida, destaca-se que o efeito de intensidade (-158635286.6t) e o restante da demanda final (-777698.3t) desempenharam um papel relevante na redução das emissões de CO₂.

É também crucial, destacar que para essas regiões, as variações nas emissões pelo setor agrícola diminuíram, tal explicação pode ser baseada na estrutura produtiva diversificada em alguma dessas regiões. Por fim, enfatiza-se novamente o efeito positivo das exportações da agricultura (18754.26t) e pecuária (9301.16t) sobre as emissões de CO₂ em todas as tipologias, evidenciando um canal de transmissão com potenciais implicações.

A descrição dos resultados evidencia como a disparidade regional brasileira e suas estruturas produtivas combinadas influenciam significativamente a contribuição do Brasil para as emissões de gases de efeito estufa. Liddle (2018); Cavaleiro e Schor (2014) indicam que o aumento do valor da produção de um país está correlacionado positivamente com o crescimento do nível de emissões. Fazendo analogia para o caso das regiões brasileiras, observa-se um resultado inverso, no qual o baixo valor da produção bruta é proveniente de regiões com altas emissões. Esse caso em específico retrata a estrutura produtiva da região Centro-Norte do Brasil, que apresenta uma evolução gradual e altamente especializada nos setores agrícolas.

Embora os resultados mostrem que as emissões do setor agrícola diminuíram em certa medida em algumas regiões, essa atividade continua sendo a maior responsável pelas emissões de CO₂. O modelo de produção agrícola brasileiro baseado na mudança do uso do solo é contestável, uma vez que essa transição é o principal componente das emissões brasileiras. Além disso, a dependência desse setor do mercado externo expõe uma vulnerabilidade para a economia brasileira, pois, em conjunto com os resultados da decomposição, a exportação representa ser um dos predominantes canais de crescimento da variação das emissões de CO₂.

Contudo, é interessante mencionar a importância da agricultura no processo de desenvolvimento sustentável. O Brasil, por exemplo, tem buscado demonstrar que as atividades agrícolas e as questões ambientais não são apenas substitutas, mas sim complementares. A título de exemplo, o país é considerado um dos maiores produtores mundiais de biocombustíveis, com ênfase no etanol e biodiesel. Também é fundamental mencionar que, além de estimular essa produção, o país implementou políticas públicas de incentivo à agricultura de baixa emissão de carbono (Plano ABC). Além disso, adotou também estratégias para otimizar o uso da terra, como a integração-pecuária-floresta (ILPF).

4. Implicações e conclusões

O presente artigo tem como propósito analisar de maneira sistêmica as questões pertinentes à propagação das emissões de dióxido de carbono (CO₂) provenientes do Brasil. A utilização de índices de ligação e a aplicação da Análise de Decomposição Estrutural, baseados na Matriz de Insumo-Produto dos anos de 2011 e 2015, proporcionaram uma

discussão aprofundada acerca da disseminação das emissões em um contexto sistêmico, setorial e espacial. Tal análise contribui significativamente para o debate em torno do impacto ambiental em um país que detém uma importância relativa no ecossistema mundial, no qual sua estrutura de produção desempenha um papel preponderante na intensificação das emissões de CO₂.

Detalhadamente, o método de insumo-produto empregado neste estudo possibilitou a criação de tipologias com base nas interdependências entre produção e emissão nas regiões brasileiras. O propósito da caracterização é mapear e reconhecer padrões espaciais entre as regiões de acordo com suas contribuições relativas para a economia, considerando sua estrutura produtiva e, conseqüentemente, suas emissões ao longo do processo. Posteriormente, a análise SDA permitiu capturar e avaliar os efeitos sistêmicos que afetam as emissões de CO₂. Em relação ao Brasil e suas diversas disparidades, como as espaciais, regionais e relacionadas à estrutura produtiva, compreender essas implicações nas emissões oferece uma compreensão essencial para a formulação de políticas destinadas ao conjunto de unidades federativas.

Enfatizando os resultados a partir das tipologias, as principais conclusões revelam que há uma diminuição ao longo dos anos na quantidade de regiões classificadas como antagonistas e intermediárias. Essas regiões são caracterizadas pela fragmentação da cadeia produtiva (integração com as demais regiões), mas com alto poder de emissão proveniente da cadeia produtiva. Nessa perspectiva, os resultados mostram padrões na distribuição espacial dessas regiões que carecem de uma discussão sistêmica e regional. A primeira implicação reside na concentração espacial desses grupos em regiões ricas em biodiversidade (*e.g.* Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica), transferindo-lhes a responsabilidade pela preservação. No entanto, são esses mesmos grupos que estão encarregados da principal atividade econômica, que excede os limites e contribui significativamente para a degradação ambiental.

De forma conjunta, as estruturas produtivas desempenham um papel fundamental na caracterização dessas regiões, influenciando tanto o valor da produção quanto as atividades setoriais correspondentes. A complexidade industrial nas regiões Sul e Sudeste reflete uma estrutura produtiva modesta com perspectivas limitadas de mudança estrutural nas regiões Centro-Norte. Essa configuração, combinada à biodiversidade dessas áreas, possibilitou o crescimento e a especialização do setor agrícola.

Embora os resultados do SDA mostrem que as emissões do setor agrícola diminuíram em certa medida em algumas regiões, essa atividade continua sendo a maior responsável pelas emissões de CO₂. O modelo de produção agrícola brasileiro baseado na mudança do uso do solo é insustentável, uma vez que essa transição é o principal componente das emissões brasileiras. Além disso, a dependência desse setor do mercado externo expõe uma vulnerabilidade para a economia brasileira. Em conjunto com os resultados da decomposição, as exportações, independentemente dos grupos, tiveram um papel predominante para o aumento na variação das emissões de CO₂. Apesar da produção ser de responsabilidade nacional, esses resultados assumem relevância devido à compreensão de que a pressão ambiental transcende fronteiras nacionais. Enquanto a integração comercial pode contribuir para mitigar as disparidades regionais, há também o risco de intensificar as emissões de CO₂ devido à produção de bens e consumo fora da região de origem.

A implicação desses resultados evidencia a fragilidade que o setor representa para a economia nacional, especialmente a regional. Entre as possibilidades, sugere-se que o Brasil aproveite sua vantagem comparativa no setor agrícola e aprimore sua competência na produção sustentável, especialmente nas atividades que possuem um alto encadeamento na

cadeia produtiva brasileira e que possuam potencial para inserção no comércio internacional. Essa alternativa representa uma oportunidade para o país compensar, de certa forma, as alterações feitas ao ecossistema, no entanto, existe o *trad-off* entre as possibilidades de compensação. Por outro lado existe a possibilidade de traçar planos para restauração dessas regiões degradada.

Considerando o exposto, a dificuldade de promover um desenvolvimento sustentável é persistente e estrutural. Diante da necessidade de desacelerar as emissões de CO₂ nessas regiões do Centro-Norte, é essencial adotar uma abordagem política e econômica orientada para investimentos em capital físico e humano, em contraste com o atual enfoque no consumo. A mudança estrutural tem que ocorrer simultaneamente à incorporação da tecnologia nos setores, especialmente aqueles inovadores que garantam uma participação no mercado global e estimulem crescimento da indústria nacional. Com essas implementações realizadas, acredita-se na possibilidade da descentralização da indústria das regiões mais desenvolvida, o que resultaria em uma variedade de novas atividades que possa impulsionar o crescimento dessas regiões Centro-Norte em termos de valor da produção, de maneira mais eficaz e sustentável.

Ainda na perspectiva de vulnerabilidade, os resultados da decomposição das unidades ferativas não abordadas na caracterização das regiões propensas à emissão, destacou-se a participação significativa do setor de energia elétrica nas emissões de CO₂. Além do consumo das famílias exercer uma influência positiva nas emissões, o efeito intensidade revelou as dificuldades enfrentadas pelo setor para produzir a mesma quantidade de energia sem alterar o nível de emissões. Para o Brasil, esse resultado evidencia uma deficiência inesperada que desafia sua capacidade de produção energética renovável. Junto à necessidade de intensificar o uso e produção de energias renováveis, a orientação estrutural produtiva deve estar alinhada ao contexto energético, para que o crescimento da economia não seja baseado em desafios futuros. Os resultados do SDA ainda revelam que o restante da demanda final foi o único mecanismo eficaz para reduzir as emissões. Nesse cenário, a existência de investimentos e iniciativas governamentais sugere possíveis estratégias para mitigar as emissões.

5. Referências Bibliográficas

de Araújo, Inácio Fernandes, Randall W. Jackson, Amir B. Ferreira Neto, e Fernando S. Perobelli. 2020. “European union membership and CO₂ emissions: A structural decomposition analysis”. *Structural change and economic dynamics* 55: 190–203.

Arto, Iñaki, e Erik Dietzenbacher. 2014. “Drivers of the Growth in Global Greenhouse Gas Emissions”. *Environmental Science & Technology* 48(10): 5388–94. doi:10.1021/es5005347.

Black, Richard, Kate Cullen, Byron Fay, Thomas Hale, John Lang, Saba Mahmood, e Steve Smith. 2021. “Taking stock: A global assessment of net zero targets”. *Energy & Climate Intelligence Unit and Oxford Net Zero* 23.

Cansino, José M., Rocío Román, e Manuel Ordóñez. 2016. “Main drivers of changes in CO₂ emissions in the Spanish economy: A structural decomposition analysis”. *Energy Policy* 89: 150–59.

Cardoso, Abmael S., Alexandre Berndt, April Leytem, Bruno JR Alves, Isabel das NO de Carvalho, Luis Henrique de Barros Soares, Segundo Urquiaga, e Robert M. Boddey. 2016. “Impact of the intensification of beef production in Brazil on greenhouse gas emissions and land use”. *Agricultural Systems* 143: 86–96.

- Carvalho, Terciane Sabadini, Flaviane Souza Santiago, e Fernando Salgueiro Perobelli. 2013. "International trade and emissions: The case of the Minas Gerais state — 2005". *Energy Economics* 40: 383–95. doi:10.1016/j.eneco.2013.07.002.
- Cederberg, Christel, U. Martin Persson, Kristian Neovius, Sverker Molander, e Roland Clift. 2011. "Including Carbon Emissions from Deforestation in the Carbon Footprint of Brazilian Beef". *Environmental Science & Technology* 45(5): 1773–79. doi:10.1021/es103240z.
- Chang, Ning. 2015. "Changing industrial structure to reduce carbon dioxide emissions: a Chinese application". *Journal of Cleaner Production* 103: 40–48. doi:10.1016/j.jclepro.2014.03.003.
- Chang, Ning, e Chaohui Han. 2022. "Regional CO₂ Emissions and Cross-Boundary Mitigation Potential in China". *Economic Systems Research* 34(3): 367–82. doi:10.1080/09535314.2021.1974354.
- Friedlingstein, Pierre, Matthew W. Jones, Michael O'Sullivan, Robbie M. Andrew, Dorothee CE Bakker, Judith Hauck, Corinne Le Quéré, et al. 2022. "Global carbon budget 2021". *Earth System Science Data* (4). <https://www.vliz.be/projects/marinebiotech/imis.php?module=ref&refid=352502> (2 de abril de 2024).
- Grether, Jean-Marie, e Nicole A. Mathys. 2013. "The pollution terms of trade and its five components". *Journal of Development Economics* 100(1): 19–31. doi:10.1016/j.jdeveco.2012.06.007.
- Hirschman, Albert O. 1958. "The Strategy of Economic Development Yale Univ". *Press, New Haven*.
- Hoekstra, Rutger, Bernhard Michel, e Sangwon Suh. 2016. "The Emission Cost of International Sourcing: Using Structural Decomposition Analysis to Calculate the Contribution of International Sourcing to CO₂ -Emission Growth". *Economic Systems Research* 28(2): 151–67. doi:10.1080/09535314.2016.1166099.
- Höhne, Niklas, Matthew J. Gidden, Michel den Elzen, Frederic Hans, Claire Fyson, Andreas Geiges, M. Louise Jeffery, et al. 2021. "Wave of net zero emission targets opens window to meeting the Paris Agreement". *Nature Climate Change* 11(10): 820–22.
- Imori, Denise, e Joaquim Guilhoto. 2015. "Tracing Brazilian regions? CO₂ emissions in domestic and global trade". <https://www.econstor.eu/handle/10419/124662> (2 de abril de 2024).
- Jiang, Meihui, Haizhong An, Xiangyun Gao, Nanfei Jia, Siyao Liu, e Huiling Zheng. 2021. "Structural decomposition analysis of global carbon emissions: The contributions of domestic and international input changes". *Journal of environmental management* 294: 112942.
- Kim, Tae-Jin, e Nikolas Tromp. 2021. "Carbon emissions embodied in China-Brazil trade: Trends and driving factors". *Journal of Cleaner Production* 293: 126206.
- Lenzen, Manfred. 2003. "Environmentally important paths, linkages and key sectors in the Australian economy". *Structural Change and Economic Dynamics* 14(1): 1–34.
- Liang, Qiao-Mei, Ying Fan, e Yi-Ming Wei. 2007. "Multi-regional input–output model for regional energy requirements and CO₂ emissions in China". *Energy policy* 35(3): 1685–1700.
- Meng, Bo, Glen P. Peters, Zhi Wang, e Meng Li. 2018. "Tracing CO₂ emissions in global value chains". *Energy Economics* 73: 24–42.
- Miller, Ronald E., e Peter D. Blair. 2009. *Input-output analysis: foundations and extensions*. Cambridge university press..

"NEREUS | Núcleo de Economia Regional e Urbana da USP". *NEREUS | Núcleo de Economia Regional e Urbana da USP*. <http://www.usp.br/nereus/>.

Perobelli, Fernando Salgueiro, Weslem Rodrigues Faria, e Vinicius de Almeida Vale. 2015. "The increase in Brazilian household income and its impact on CO2 emissions: Evidence for 2003 and 2009 from input–output tables". *Energy Economics* 52: 228–39.

Rasmussen, P. Nørregaard. 1956. "Studies in inter-sectoral relations". (No Title). <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282270402523008> (2 de abril de 2024).

Ribeiro, Luiz Carlos De Santana, José Firmino De Sousa Filho, Gervásio Ferreira Dos Santos, e Lúcio Flávio Da Silva Freitas. 2023. "Structural decomposition analysis of Brazilian greenhouse gas emissions". *World Development Sustainability* 2: 100067. doi:10.1016/j.wds.2023.100067.

Salvo, Gabriele, Moana S. Simas, Sergio A. Pacca, Joaquim JM Guilhoto, Acacio RG Tomas, e Ricardo Abramovay. 2015. "Estimating the human appropriation of land in Brazil by means of an Input–Output Economic Model and Ecological Footprint analysis". *Ecological Indicators* 53: 78–94.

Sánchez-Chóliz, Julio, e Rosa Duarte. 2003. "Analysing pollution by way of vertically integrated coefficients, with an application to the water sector in Aragon". *Cambridge Journal of Economics* 27(3): 433–48.

Silva, Marcos Paulo Novais, e Fernando Salgueiro Perobelli. 2012. "Efeitos tecnológicos e estruturais nas emissões brasileiras de CO2 para o período 2000 a 2005: uma abordagem de análise de decomposição estrutural (SDA)". *Estudos Econômicos (São Paulo)* 42: 307–35.

Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa - SEEG. Emissões Totais

Souza, Gessica, Edson Domingues, e Aline Magalhaes. 2023. "IMPACTS OF ECONOMIC GROWTH WITH FOREST PRESERVATION IN THE AMAZON AND CERRADO BIOMES IN BRAZIL". https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=7015 (2 de abril de 2024).

Su, Bin, B. W. Ang, e Yingzhu Li. 2017. "Input-output and structural decomposition analysis of Singapore's carbon emissions". *Energy Policy* 105: 484–92.

Tollefson, Jeff. 2010. "The global farm: with its plentiful sun, water and land, Brazil is quickly surpassing other countries in food production and exports. But can it continue to make agricultural gains without destroying the Amazon? Jeff Tollefson reports from Brazil". *Nature* 466(7306): 554–57.

Xu, Yan, e Erik Dietzenbacher. 2014. "A structural decomposition analysis of the emissions embodied in trade". *Ecological Economics* 101: 10–20.

Zhang, Wencheng, Shuijun Peng, e Chuanwang Sun. 2015. "CO2 emissions in the global supply chains of services: an analysis based on a multi-regional input–output model". *Energy Policy* 86: 93–103.

Zhang, Zengkai, Kunfu Zhu, e Geoffrey J. D. Hewings. 2017. "A multi-regional input–output analysis of the pollution haven hypothesis from the perspective of global production fragmentation". *Energy Economics* 64: 13–23. doi:10.1016/j.eneco.2017.03.007.