

# Emissões regionais de CO<sub>2</sub>: uma análise temporal sistêmica<sup>1</sup>

## Regional CO<sub>2</sub> Emissões: a systemic temporal analysis

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

Área temática: Economia

Apoio: Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES  
Fundação Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG  
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq

### Resumo

Este artigo aborda a propagação das emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil de forma sistêmica, setorial e espacial. Utilizando uma análise de insumo-produto inter-regional, desenvolve-se uma tipologia para as regiões, considerando as emissões no fluxo comercial setorial e sua participação no valor bruto da produção. Os resultados evidenciam que a dificuldade de promover um desenvolvimento sustentável é persistente e estrutural. Regiões com alto poder de encadeamento das emissões e baixa participação no valor bruto de produção estão concentradas em áreas biodiversas. Apesar da redução nas emissões agrícolas, a economia brasileira permanece vulnerável devido à dependência do mercado externo.

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

### Abstract

This article addresses the spread of CO<sub>2</sub> emissions in Brazil in a systemic, sectoral, and spatial manner. Using an inter-regional input-output analysis, it develops a typology for regions, considering emissions in sectoral trade flow and their share in gross production value. The results highlight the persistent and structural challenges in promoting sustainable development. Regions with high emission linkage and low gross production value are concentrated in biodiverse areas. Despite the decline in agricultural emissions, the Brazilian economy remains vulnerable due to external market dependence.

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

## 1. Introdução

As discussões mundiais vêm fortalecendo 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 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

---

<sup>1</sup> O terceiro autor agradece ao financiamento do CNPq proveniente de recursos da Chamada CNPq/MCTI/FNDCT N° 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

emissões de CO<sub>2</sub> dissociadas entre esses mecanismos se difundem de acordo com as características econômicas do país, ou seja, aqueles desenvolvidos e em desenvolvimento. Para Araújo et al (2020) os países desenvolvidos apresentam 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 CO<sub>2</sub> no Brasil em 2021 (SEEG, 2021) e cerca de 9% das emissões globais (Friedlingstein et al. 2022).

A heterogeneidade regional é uma característica marcante do processo de crescimento econômico brasileiro. A acentuada concentração de setores diversificados e tecnologicamente avançados nas regiões Sul e Sudeste aponta para desequilíbrios regionais tanto na participação do valor adicionado quanto nas emissões de CO<sub>2</sub>. Acredita-se que a diversificação da estrutura produtiva nessas regiões mais desenvolvidas contribui para a redução dos níveis de emissões de CO<sub>2</sub>.

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 pressupõe que as atividades menos sofisticadas ocupem a periferia da rede<sup>2</sup>. 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, conseqüentemente, também contribuem para níveis significativos de emissões.

Sob uma análise do valor da produção e dos encadeamentos produtivos, evidencia-se que o mix industrial concentrado nas regiões Sul e Sudeste revela maior integração com o restante do sistema produtivo nacional. Com base nos dados de 2015 da Matriz de Insumo-Produto inter-regional do Núcleo de Economia Regional e Urbana da Universidade de São Paulo (NEREUS), observa-se que a região Sul contribui com cerca de 17,74% e o Sudeste com 54% do valor total da produção bruta brasileira. Em contrapartida, as atividades primárias, predominantemente situadas no Centro-Oeste, Nordeste e Norte do país, apresentam diferenças

---

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

marcantes, contribuindo com 9,75%, 13,75% e 5,15%, respectivamente, para o valor de produção bruto nacional. Sendo assim essa disparidade regional instiga uma discussão sobre suas implicações estruturais no crescimento econômico do Brasil de forma sustentável, particularmente no que diz respeito aos processos de produção. No entanto, é importante notar que o debate sistemático sobre as emissões, levando em consideração a heterogeneidade da estrutura produtiva regional para identificar desafios econômicos e ambientais, ainda é pouco abordado na literatura especializada.

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, em comparação com as emissões totais (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 CO<sub>2</sub> num contexto sistêmico, setorial e espacial. 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 CO<sub>2</sub>. 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 CO<sub>2</sub>. Essas análises permitem a visualização das emissões por meio de dois prismas: a contribuição do comércio intersetorial brasileiro e a participação do comércio internacional nas emissões. Além disso, ao considerar as etapas anteriores, será viável associar o padrão estrutural de produção das regiões brasileiras com 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 CO<sub>2</sub>. A terceira seção traz a descrição e análise dos resultados e, por fim, na seção quarta tecemos algumas conclusões.

## **2. Material e Método**

### **2.1 Material**

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 em Anexo) 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.

## 2.2 Método

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 ( $c_{mn \times 1}$ ) o volume de CO<sub>2</sub> por unidade de produção, pode ser assim representado:

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

onde  $C$  é total de emissões de CO<sub>2</sub> 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 o valor adicionado (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 intrasetorial e intersetorial também apresentam embutidas as 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), permitem 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 CO<sub>2</sub> 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 no valor adicionado 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 CO<sub>2</sub> 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 ponderação<sup>3</sup> 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 CO<sub>2</sub> ( $BL_s^c$  e  $FL_r^c$ ):

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

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

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

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:  $(BL_s > 1 \text{ e } FL_r < 1)$  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;  $(BL_s < 1 \text{ e } FL_r > 1)$  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;  $(BL_s > 1 \text{ e } FL_r > 1)$  classificam-se como regiões de alto poder de encadeamento para o crescimento da economia, sendo considerado como região chave;  $(BL_s < 1 \text{ e } FL_r < 1)$  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 às ligações estendidas ao contexto das emissões de CO<sub>2</sub>:  $(BL_s^c > 1 \text{ e } FL_r^c < 1)$  sugere que um aumento na demanda final da região  $s$  resultará em um aumento acima da média nas emissões de CO<sub>2</sub>;  $(BL_s^c < 1 \text{ e } FL_r^c > 1)$  implica que um aumento unitário da produção da região  $r$  aumenta acima da média as emissões de CO<sub>2</sub>;  $(BL_s^c > 1 \text{ e } FL_r^c > 1)$  considera-se regiões chaves devido aos fortes encadeamentos das emissões na cadeia de valor da economia;  $(BL_s^c < 1 \text{ e } FL_r^c < 1)$  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 às emissões de CO<sub>2</sub>, representando assim o primeiro passo do estudo para identificar medidas de mitigação. Para equilibrar o conflito entre crescimento econômico e emissões de CO<sub>2</sub>, 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 mitigação das emissões 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 CO<sub>2</sub> durante esse processo. Para analisar uma posição entre as extremidades, identifica-se 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.

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

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

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

A partir do mapeamento e caracterização dos grupos, busca-se entender os principais impulsionadores das mudanças nas emissões de CO<sub>2</sub>. 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 Dietzenbacher (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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> ( $\Delta C$ ) pode ser decomposta 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 CO<sub>2</sub>. A fim de atingir esse propósito, será necessário decompor o efeito da demanda final ( $f$ ), mas primeiro define-se sua estrutura:

$$f = D_f + X + Og \quad (14)$$

em que,  $D_f$  representa o consumo das famílias;  $X$  exportações,  $Og$  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:

$$\Delta f = \frac{1}{2}(c_0L_0\Delta D_f + c_1L_1\Delta D_f) + \frac{1}{2}(c_0L_0\Delta X + c_1L_1\Delta X) + \frac{1}{2}(c_0L_0\Delta Og + c_1L_1\Delta Og) \quad (15)$$

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

### 3. Resultados

#### 3.1 Índices de Ligação

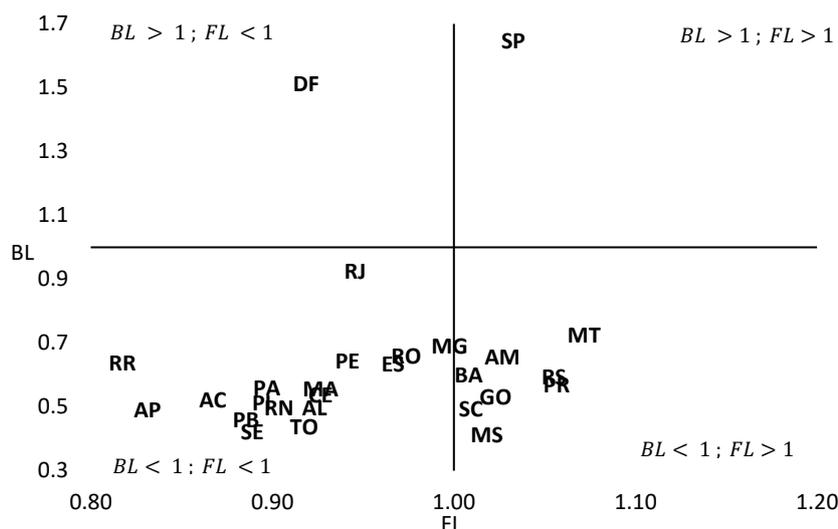
Seguindo a Equação (7) e (8), foram calculadas as ligações para trás e para frente por região<sup>4</sup>, configurando uma visão geral dos encadeamentos produtivos e das emissões para as 27 unidades da federação nos anos de 2011 e 2015.

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 territórios. Algumas regiões apresentaram estados com forte dependência para frente, ou seja, integração pelo lado das vendas na cadeia produtiva (AM, BA, MG, SC, GO, MS, RS, PR, MT), impulsionado, em parte, pelos setores Agricultura, 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 a fragmentação espacial brasileira, sendo essa questão uma potencial contribuição para a fragilidade da economia brasileira.

Figura 1 - Índices de ligações para as unidades Federativas brasileiras em 2011

---

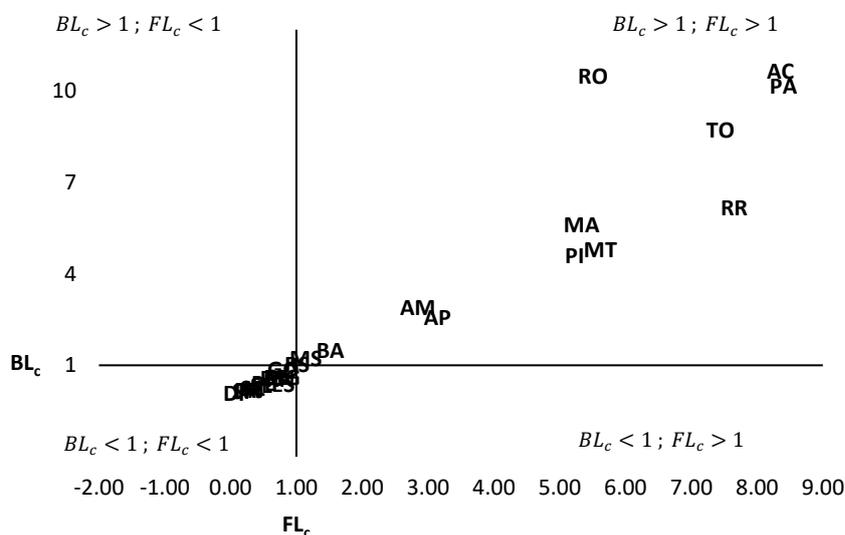
<sup>4</sup> Ver Hadadd et al (2023).



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 apresentam maior emissão embutida nos fluxos de compras e vendas ( $BL_s^c > 1$  e  $FL_r^c > 1$ ). O setor agrícola, que na maior parte desses estados tem participação relevante, 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 CO<sub>2</sub> para as unidades da Federação em 2011



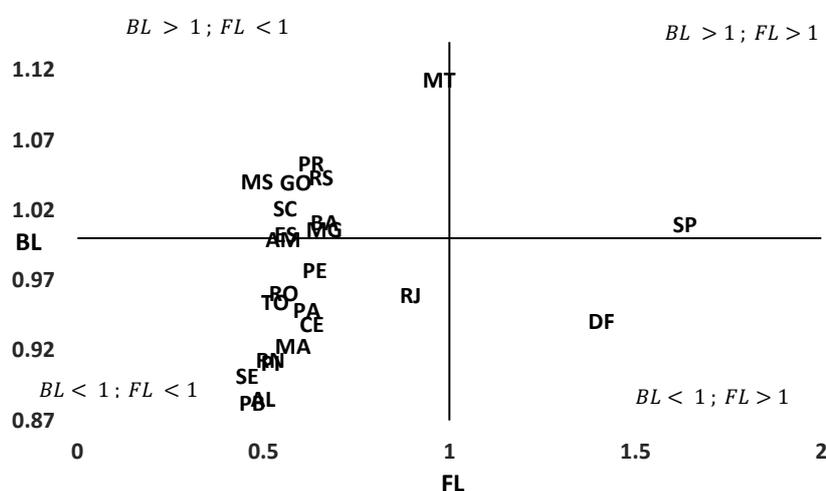
Fonte: Elaboração própria com base na Matriz de Inter-regional de Insumo-produto.

Associado aos resultados das Figuras 1 e 2, o estado de São Paulo (SP) além de apresentar a característica de ser um estado chave, no sentido das interações econômicas, para a economia brasileira, ainda possui baixas emissões de CO<sub>2</sub> embutidas em sua 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 biomassas como o Cerrado, Mata Atlântica e Amazônia.

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 sob a ótica das compras na cadeia produtiva brasileira provenientes, principalmente, dos setores de Comércio, Agricultura e Construção. Além disso, o Distrito Federal aparece mais integrado sob a ótica das vendas, resultado inusitado por se tratar de uma região administrativa e de estrutura produtiva peculiar quando comparado às demais unidades da Federação. Contudo, a possível 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.

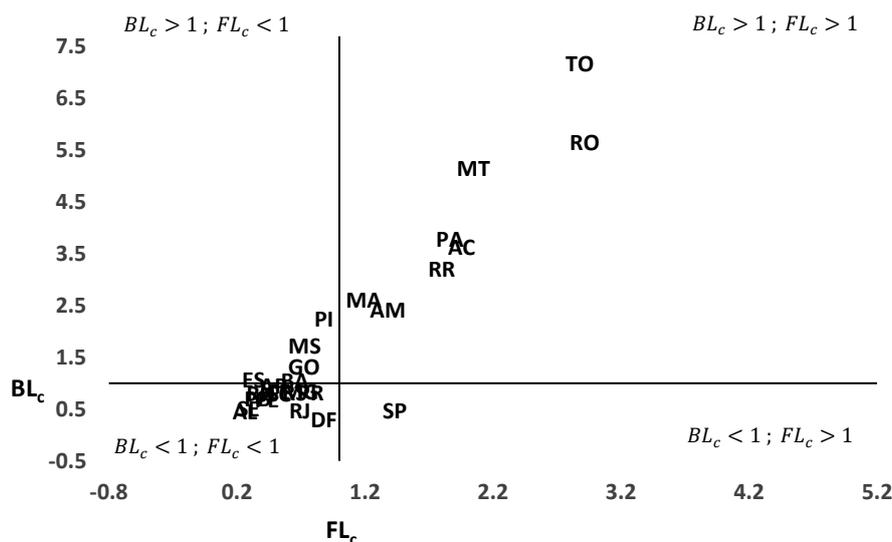
Figura 3 - Índices de ligações para as unidades da Federação brasileira em 2015



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

As emissões regionais brasileiras embutidas nas vendas e compras ao longo da cadeia produtiva, conforme ilustrado na Figura 4, é predominantemente caracterizada por estados (TO, RO, MT, PA, AC, RR, AM, MA) na qual a 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 CO<sub>2</sub> devido as emissões embutidas nas vendas. Por outro lado, surgiram estados adicionais que demandam emissões através do fluxo de trocas intrasetorial e intersetorial, como (PI, MS, GO, BA e ES). Essa relação também pode ser interpretada a partir da estrutura de *linkages* para trás, que é mais intensa em relação às emissões, ou seja, um aumento na demanda final dessas regiões resultará em um aumento acima da média nas emissões de CO<sub>2</sub>.

Figura 4 - Índices de ligações de emissões de CO<sub>2</sub> para os estados brasileiros em 2015



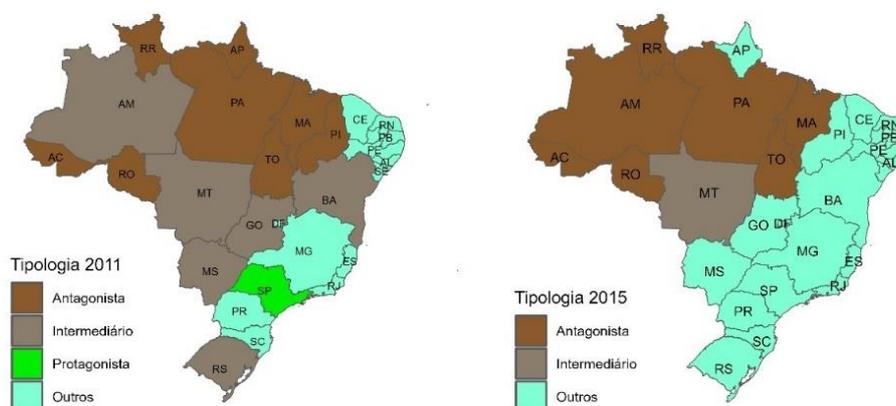
Fonte: Elaboração própria com base na Matriz de Inter-regional de Insumo-produto.

Nessa mesma perspectiva, mas sob um enfoque específico, destaca-se o estado do Amazonas que permanece sendo uma região chave nas emissões devido aos fortes encadeamentos na cadeia produtiva. Isso evidencia o difícil desafio que o país enfrenta na preservação dessas reservas florestais, principalmente quando existe a possibilidade de expansão das atividades agrícolas nessa região. Os resultados apresentam a característica geográfica dos estados com encadeamento das emissões acima da média (RO, RR, AC, MT, PA) possuem 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, pelo lado econômico, 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 conseqüentemente, 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 embutidas na 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 indução das emissões nos biomas Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica devido à estrutura de compras e vendas 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 CO<sub>2</sub>. 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 CO<sub>2</sub> 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, Tecnológico, Exportações, Consumo das famílias e Restante da demanda agregada. Por fim, é apresentada a contribuição individual de cada setor para as emissões totais dentro do próprio grupo.

Tabela 2 – Decomposição das mudanças nas emissões de CO<sub>2</sub>(t) para o grupo Antagonista.

	Toneladas (t)						
	Intensidade	Tecnológico	Exportações	Consumo das Famílias	Resto da Demanda Final	Variação Total de Emissões	Participação de Emissões
<b>Agricultura</b>	-23088.55	-1621.24	21100.70	6658.06	-3764.79	-715.83	18.58%

<b>Pecuária</b>	-69053.07	24971.30	24451.74	8686.16	5891.62	-5052.25	68.46%
<b>Produção florestal</b>	-8357.37	489.48	1675.79	5828.72	-1620.51	-1983.89	4.91%
<b>Energia Elétrica</b>	2025.72	3021.47	-19.26	1545.47	-201.37	6372.03	2.53%
<b>Refino de Petróleo</b>	-686370.73	482455.88	563.71	190980.11	12427.59	56.56	0.14%
<b>Extração de petróleo e gás</b>	-1147.34	984.80	-6.32	25.86	226.08	83.09	0.09%
<b>Transporte Terrestre</b>	4967.15	381.27	-2176.07	682.52	-373.13	3481.74	3.59%
<b>Demais Setores</b>	-2506.47	5759.86	-5852.31	1504.67	246.63	-847.63	1.70%

Fonte: Elaboração própria.

Conforme mencionado anteriormente, o grupo é o principal responsável pelas emissões ao longo da cadeia produtiva brasileira, sobretudo devido à estrutura voltada para o setor agrícola representado pelos três primeiros setores da Tabela 2. Isso corresponde a aproximadamente 35% das emissões totais de CO<sub>2</sub> no Brasil e a 92% nas regiões associadas a essa tipologia. 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 CO<sub>2</sub> (-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 CO<sub>2</sub> nos setores agrícolas, em especial a agricultura (21100.70t) e pecuária (24451.74t). Esse resultado enriquece a discussão sobre a participação do fluxo de comércio internacional nessa temática e destaca a necessidade de análise tanto por parte do Brasil quanto de seus parceiros comerciais sobre esse importante canal de emissões. Além disso, o vetor consumo das famílias impulsiona o aumento na variação das emissões. De modo breve, uma análise para outros setores desse grupo consiste na apresentação daqueles (Energia Elétrica e Transporte Terrestre) que contribuíram positivamente para o aumento das emissões de CO<sub>2</sub>, mas proporcionalmente menos quando comparado aos setores agrícolas. Ademais, devido à sua aptidão produtiva, os setores de Refino de Petróleo (56,56t) e Extração de Petróleo e Gás (83.09t), nessas regiões contribuem com uma parcela pequena das emissões.

O grupo Intermediário é representado exclusivamente pelo estado do Mato Grosso, que exhibe um forte encadeamento na cadeia produtiva provenientes das emissões de CO<sub>2</sub>, 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 CO<sub>2</sub>(t) para o grupo Intermediário Mato Grosso.

	Toneladas (t)						
	Intensidade	Tecnológico	Exportações	Consumo das Famílias	Resto da Demanda Final	Variação Total de Emissões	Participação de Emissões
<b>Agricultura</b>	694.24	1198.79	17220.57	873.92	-1537.92	18449.60	32.84%
<b>Pecuária</b>	34645.06	-10879.54	11642.08	2180.34	-3004.71	34583.23	59.35%
<b>Produção florestal</b>	757.52	167.26	470.69	692.02	-390.97	1696.52	2.91%
<b>Energia Elétrica</b>	1082.85	180.67	64.03	90.69	-54.25	1363.99	0.78%
<b>Refino de Petróleo</b>	-5103.30	4491.68	2.43	1121.00	-511.93	-0.11	0.00%
<b>Extração de petróleo e gás</b>	-4.85	3.77	0.00	0.02	1.05	0.00	0.00%
<b>Transporte Terrestre</b>	-2451.08	3083.56	31.56	1015.81	-580.60	1099.25	3.57%
<b>Demais Setores</b>	-339,94	603,43	26,52	123,98	-27,94	386,05	0,56%

Fonte: Elaboração própria

O resultado da decomposição revela a significativa contribuição do Mato Grosso nas emissões de CO<sub>2</sub>, especialmente pelo setor agrícola representado pelos três primeiros setores da Tabela 3, respondendo por 95% das emissões nesta região e representando 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 a 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.

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 às 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 CO<sub>2</sub>(t) para o grupo Outros

Toneladas (t)

	Intensidade	Tecnológico	Exportações	Consumo das Famílias	Resto da Demanda Final	Variação Total de Emissões	Participação de Emissões
<b>Agricultura</b>	-37877.50	-3994.41	18754.26	586.53	-4384.31	-26915.43	14,09%
<b>Pecuária</b>	-32116.25	-6538.16	9301.16	9375.63	-944.41	-20922.03	21,91%
<b>Produção florestal</b>	-4425,68	-2130,47	2856,31	722,18	-809,35	-3787,03	1,87%
<b>Energia Elétrica</b>	30090.42	5410.70	656.03	3163.19	-960.71	38359.62	10,75%
<b>Refino de Petróleo</b>	-158635286	123597236	635027.83	35183283.4	-777698.3	2563.1	4,75%
<b>Extração de petróleo e gás</b>	-4358.24	6348.11	-457.47	97.92	695.03	2325.34	1,56%
<b>Transporte Terrestre</b>	11433.50	-11067.37	3386.28	-375.32	-5154.13	11433.50	26,84%
<b>Demais Setores</b>	1761,84	-22388,01	17609,18	436,18	-7946,20	-105	18,26%

Fonte: Elaboração própria

Os resultados para o setor de energia elétrica exibem o aumento no nível de variação das emissões de CO<sub>2</sub> (38359.62t), o qual foi generalizado em quase todos os efeitos. 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.

Adicionalmente, outros setores tiveram um papel no aumento das emissões de CO<sub>2</sub> 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) desempenhou um papel relevante na redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

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 em especial os estados da região Sul e Sudeste. Por fim, enfatiza-se novamente o efeito positivo das exportações da agricultura (18754.26t) e pecuária (9301.16t) sobre as emissões de CO<sub>2</sub> 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 a baixa participação no valor da produção bruta é proveniente de regiões com altas emissões. Esse caso específico ilustra a estrutura produtiva da região Centro-Norte do Brasil, que demonstra uma evolução modesta no processo de

diversificação da sua estrutura produtiva, com uma relativa especialização na atividade agrícola.

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 CO<sub>2</sub>. O modelo de produção agrícola brasileiro, centrado na mudança do uso do solo, é objeto de contestação, visto que essa transição constitui o principal componente das emissões do Brasil. Além disso, a dependência desse setor do mercado externo expõe uma vulnerabilidade para a economia brasileira. Isso se evidencia quando consideramos os resultados da decomposição, onde a exportação emerge como um dos principais catalisadores para a variação das emissões de CO<sub>2</sub>.

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 teve como propósito analisar de maneira sistêmica as questões pertinentes à propagação das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) 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 CO<sub>2</sub>.

Detalhadamente, o método de insumo-produto empregado neste estudo possibilitou não apenas a criação de tipologias, mas também uma visão que permite analisar as emissões de CO<sub>2</sub> por meio do fluxo comercial intersetorial e da participação no comércio internacional. A caracterização das regiões por meio das tipologias teve como propósito mapear e identificar padrões espaciais entre elas com base em suas contribuições relativas para a economia, levando em conta sua estrutura produtiva e, por conseguinte, suas emissões ao longo do processo. Posteriormente, a análise SDA permitiu capturar e avaliar os efeitos sistêmicos que afetam as emissões de CO<sub>2</sub>. 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 das tipologias, as principais conclusões revelam uma diminuição ao longo dos anos na quantidade de regiões classificadas como antagonistas e intermediárias. A característica principal dessas regiões é sua alta capacidade de encadeamento das emissões ao longo da cadeia produtiva, aliada a uma baixa participação no valor bruto da produção brasileira. 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 CO<sub>2</sub>. 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 CO<sub>2</sub>. 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>. 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. Anexo

Tabela 1 - Descrição das unidades da Federação

<b>Unidades Federativas</b>	<b>Sigla</b>	<b>Região</b>	<b>Unidade Federativas</b>	<b>Sigla</b>	<b>Região</b>
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			

Fonte: Elaboração própria.

## 6. 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>-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? CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> emissions in China”. *Energy policy* 35(3): 1685–1700.

Meng, Bo, Glen P. Peters, Zhi Wang, e Meng Li. 2018. “Tracing CO<sub>2</sub> 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](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.