

Emissões regionais de CO₂: uma análise temporal sistêmica¹

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

Resumo

Este artigo aborda a propagação das emissões de CO₂ no Brasil de forma sistêmica, setorial e espacial. Utilizando uma análise de insumo-produto inter-regional para os anos de 2011 e 2015, desenvolve-se uma tipologia para as regiões, considerando as emissões no fluxo comercial setorial e sua participação no valor bruto da produção. Os resultados das tipologias revelam que grande parte dos estados localizados nas regiões Sul e Sudeste desempenham um papel central na economia brasileira. Além de apresentarem um maior potencial latente para promover o crescimento econômico, esses estados possuem cadeias produtivas mais sustentáveis em comparação aos estados da região Centro-Norte. Essa diferenciação espacial está atrelada ao contexto estrutural e produtivo. De um lado, há uma estrutura econômica baseada em indústria, comércio e serviços; do outro, uma especialização e dependência no setor primário, principal propulsor das emissões de CO₂. Além disso, regiões com alto poder de encadeamento das emissões e baixa participação no valor bruto de produção estão concentradas em áreas biodiversas (e.g. Cerrado, Amazônia, Mata Atlântica). Apesar de os resultados da decomposição indicarem que estados com alto encadeamento nas emissões e baixa participação na estrutura produtiva conseguiram reduzir suas emissões, o setor primário continua sendo o principal responsável pelo aumento das emissões. Além disso, os estados classificados como intermediários na tipologia mostram sua forte dependência do setor primário, o que compromete sua reputação como regiões-chave devido aos altos níveis de emissão. Por fim, evidencia-se que a dificuldade brasileira em se tornar sustentável pode estar baseado na especialização de um setor que para o país não é sustentável, pois sua premissa baseia-se na expansão de terras e, portanto, na mudança no uso do solo, principal componente das emissões de gases de efeito estufa para o Brasil. Os resultados indicam que a inserção do setor primário no comércio internacional por meio das exportações continua a aumentar as emissões de CO₂, revelando a dependência econômica desse setor e a consequente fragilidade ambiental, destacando que um mecanismo crucial para o crescimento econômico também exerce uma pressão significativa sobre o meio ambiente.

Palavras-chave: Emissões; Insumo-Produto; Tipologia regional

Abstract

This article addresses the systemic, sectoral, and spatial propagation of CO₂ emissions in Brazil. Using an inter-regional input-output analysis for the years 2011 and 2015, a typology is developed for regions, considering emissions in sectoral trade flows and their share in gross production value. The typology results reveal that a large portion of states in the South and Southeast regions play a central role in the Brazilian economy. These states not only exhibit greater latent potential for promoting economic growth but also possess more sustainable production chains compared to states in the North-Central region. This spatial differentiation is linked to structural and productive contexts. On one hand, there exists an economic structure based on industry, commerce, and services; on the other, specialization and dependence on the primary sector, the main driver of CO₂ emissions. Additionally, regions with high emission linkage and low participation in gross production value are concentrated in biodiverse areas (e.g. Cerrado, Amazon, Atlantic Forest). Despite decomposition results indicating that states with high emission linkage and low participation in production structure managed to reduce emissions, the primary sector remains the main contributor to emission increases. Furthermore, states classified as intermediate in the typology demonstrate strong dependence on the primary sector, compromising their reputation as key regions due to high emission levels. Finally, it is evident that Brazil's challenge in achieving sustainability may be rooted in the specialization of a sector that is unsustainable for the country, as it is based on land expansion and hence changes in land use, a primary component of greenhouse gas emissions in Brazil. The results indicate that integrating the primary sector into international trade through exports continues to increase CO₂ emissions, revealing the

¹ O primeiro autor agradece ao financiamento da Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES. O segundo autor agradece o financiamento concedido pela FAPEMIG, sob o código de concessão APQ-04036-22. O terceiro autor agradece o suporte financeiro do CNPq, proveniente dos recursos da Chamada CNPq/MCTI/FNDCT N° 59/2022, além do apoio do Processo 310958/2020-2 relacionado 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

economic dependence of this sector and consequent environmental fragility, highlighting that a crucial mechanism for economic growth also exerts significant pressure on the environment.

Keywords: Emissions; Input-Output; Regional Typology

Área temática 09: Meio ambiente, recursos naturais e sustentabilidade

JEL: R11, R15; Q15

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 emissões de CO₂ 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 por meio 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).

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 CO₂. Acredita-se que a diversificação da estrutura produtiva nessas regiões mais desenvolvidas contribui 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 pressupõe que as atividades menos sofisticadas ocupem 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, 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 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 CO₂ 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 por meio 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

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

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. 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 CO₂. 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 referentes aos anos de 2011 e 2015, com uma desagregação setorial para 67 setores.

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 de valor bruto da produção; $f_{mn \times 1}$ 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 CO₂ 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 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 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:

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

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 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 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 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

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

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 os canais de transmissão dos choques (*e.g.* interações). 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 às 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 nas emissões de CO₂; ($BL_s^c < 1$ e $FL_r^c > 1$) implica que um aumento unitário da produção da região r acumenta 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 às 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 mitigação das emissões recair apenas em determinada região, ainda mais quando esses territórios estão conectados (compras e vendas).

Sendo assim, O estudo propõe uma tipologia de regiões baseada em suas interconexões econômicas e emissões: "Antagonistas" são identificadas por fracos encadeamentos na cadeia produtiva, mas com elevadas emissões decorrentes; "Protagonistas" são caracterizadas pela alta integração de suas estruturas produtivas na cadeia, resultando em baixas emissões de CO₂ durante este processo; um grupo intermediário, denominado "Intermediário", exhibe elevada integração na cadeia produtiva, ao mesmo tempo em que contribui significativamente para as emissões provenientes dos fluxos de compra e venda intersetoriais. Regiões não enquadradas nas categorias principais são designadas como "Outros", concentrando-se nas regiões com maior impacto nas emissões analisadas no estudo.

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

Grupo Protagonista: $(BL_s > 1 \text{ e } FL_r > 1) \text{ e } (BL_s^c < 1 \text{ e } FL_r^c < 1)$ (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 apresenta maior potencial para mitigar as emissões devido à natureza poluente da cadeia de abastecimento, que possui baixos encadeamentos na economia e é suscetível a mudanças na estrutura produtiva. O grupo intermediário é um alvo para medidas de mitigação, embora sua participação consolidada na estrutura produtiva represente desafios significativos. Em contraste, o grupo protagonista é exemplar devido à forte integração na cadeia produtiva e baixas emissões, servindo de modelo para influenciar positivamente o crescimento econômico e reduzir a pressão ambiental. A partir do mapeamento e caracterização dos grupos, busca-se 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 Dietzenbacher (2014), Hoekstra et al (2016), De Araújo et al (2020), Jiang et al (2021) e Ribeiro et al (2023) o presente trabalho estende o SDA para um modelo de Insumo-Produto 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 decomposta desse modo:

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

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:

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

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.

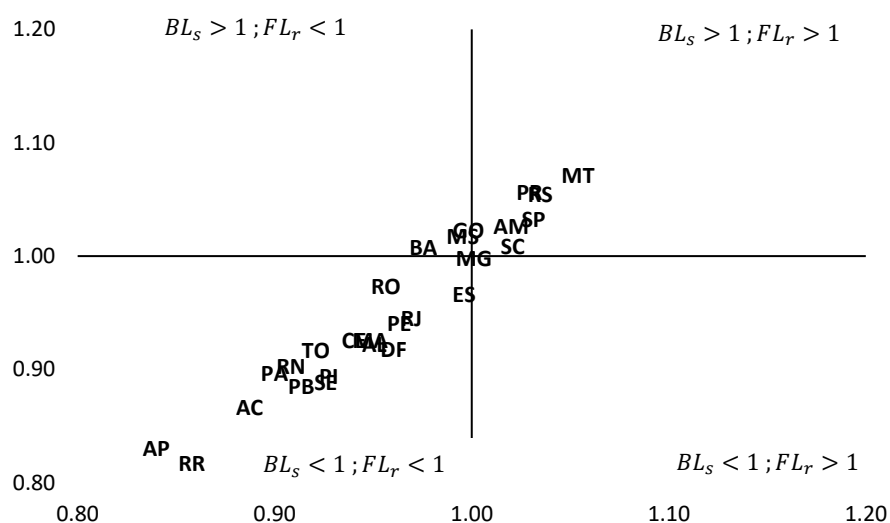
3. Resultados

3.1 Índices de Ligação

Seguindo a Equação (7) e (8), foram calculadas as ligações para trás e para frente por região, 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 estados como o de São Paulo (SP), Mato Grosso (MT), Paraná (PR), Rio Grande do Sul (RS), Santa Catarina (SC) e Amazônia (AM) são considerados estados chaves para a economia brasileira. Por outro lado, a grande maioria das unidades federativas está situada no quadrante $BL_s < 1 ; FL_r < 1$, evidenciando que em termos ligações econômicas (*e.g.* compras e vendas), a participação na cadeia produtiva não é equitativa. Isso reitera a fragmentação espacial brasileira, sendo esta uma potencial contribuição para a fragilidade da economia brasileira. Uma exceção a essa conclusão são os estados de Bahia (BA), Mato Grosso do Sul (MS) e Goiás (GO), que apresentam forte dependência para trás, ou seja, uma integração pelo lado das compras na cadeia produtiva ($BL_s > 1 ; FL_r < 1$). Além disso, o estado de Minas Gerais é caracterizado por uma forte dependência para frente, mostrando-se integrado na cadeia produtiva pelo lado das vendas ($BL_s < 1 ; FL_r > 1$).

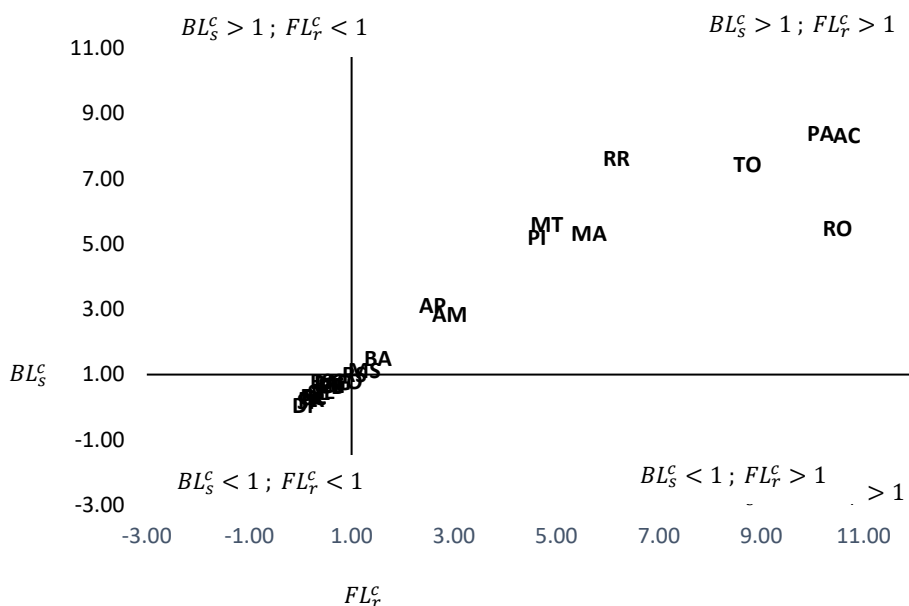
Figura 1 - Índices de ligações para as unidades Federativas brasileiras em 2011



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), destacam-se os estados de Rondônia (RO), Acre (AC), Amapá (AP), Pará (PA), Roraima (RR), Tocantins (TO), Maranhão (MA), Piauí (PI), Mato Grosso (MT), Amazonas (AM), Bahia (BA), Mato Grosso do Sul (MS) e Rio Grande do Sul (RS), 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 são aqueles com baixos encadeamentos nas emissões provenientes de suas compras e vendas intersetoriais ($BL_s^c < 1$ e $FL_r^c < 1$)

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



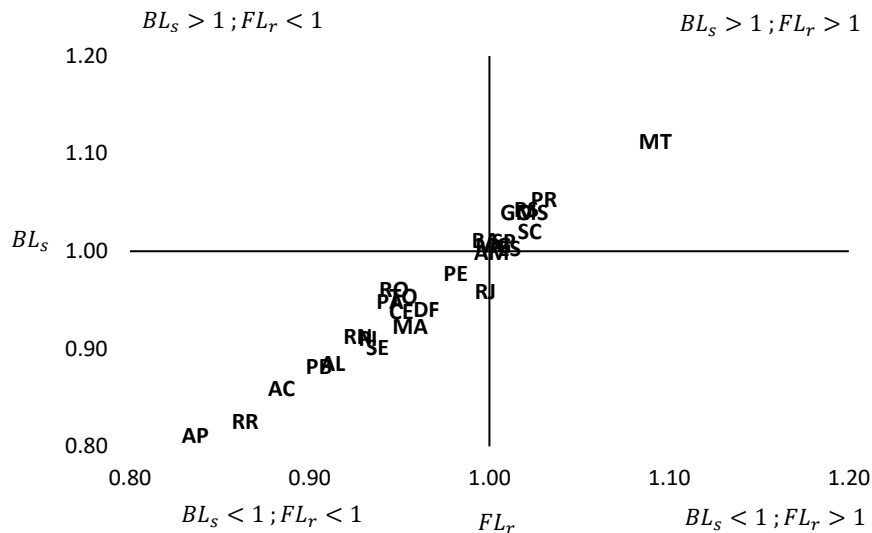
Fonte: Elaboração própria com base na Matriz de Inter-regional de Insumo-produto

Associado aos resultados das Figuras 1 e 2, os estados de São Paulo (SP), Paraná (PR) e Santa Catarina (SC) não apenas se destacam como regiões chave nas interações econômicas do Brasil, mas também exibem baixas emissões de CO₂ incorporadas em suas cadeias produtivas. Em contrapartida, os estados de Rondônia (RO), Acre (AC), Amapá (AP), Pará (PA), Roraima (RR), Tocantins (TO), Maranhão (MA) e Piauí (PI) apresentam alta propagação de emissões e baixa participação na cadeia de valor produtiva brasileira. Essas cadeias são impulsionadas pela expansão de terras para agricultura e pecuária, como exemplo as fronteiras agrícolas. Ainda nessa perspectiva, julga-se que as emissões de dióxido de carbono (CO₂) no território brasileiro são ocasionadas aos avanços desses setores a biomas como o Cerrado, Mata Atlântica e Amazônia.

Para o ano de 2015, os resultados apresentados na Figura 3 continuam destacando São Paulo (SP), Paraná (PR), Santa Catarina (SC), Rio Grande do Sul (RS) e Mato Grosso do Sul (MS) como estados-chave. No entanto, diferentemente de 2011, os estados do Espírito Santo (ES), Minas Gerais (MG) e Goiás (GO) também são classificados como estados-chave. Por outro lado, a grande parte das unidades federativas brasileira encontra-se no quadrante $BL_s^c < 1$; $FL_r^c < 1$, indicando conexão limitada com as demais regiões. Detalhadamente, essa

característica está relacionada a uma estrutura produtiva pouco desenvolvida. Além disso, observa-se um padrão espacial em que essas regiões são geograficamente vizinhas.

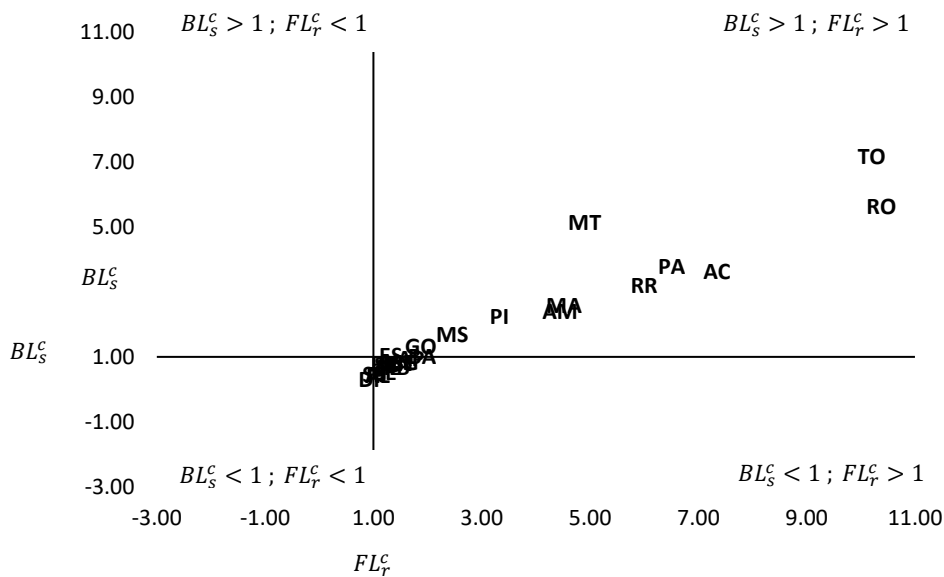
Figura 3 - Índices de ligações para as unidades da Federação brasileira em 2015



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, são predominantemente associadas a estados como Tocantins (TO), Rondônia (RO), Mato Grosso (MT), Pará (PA), Acre (AC), Roraima (RR), Amazonas (AM), Maranhão (MA), Piauí (PI), Mato Grosso do Sul (MS), Goiás (GO) e Pará (PA), nos quais o setor agrícola desempenha um papel significativo na economia local. O estado de Goiás (GO), cuja principal atividade econômica é o setor pecuarista, destaca-se agora, ao contrário de 2011, como parte do grupo de regiões com alto encadeamento em termos de emissões ($BL_s^c > 1$; $FL_r^c > 1$). Esse aumento é resultado da sua intensa integração comercial com as demais unidades federativas. Além disso, diferentemente de 2011, o estado da Bahia (BA) não pertence mais ao grupo de estados com maiores ligações econômicas em termos de emissões de CO₂. No entanto, surge como uma região com alta participação na propagação das emissões pelo lado das compras ($BL_s^c > 1$; $FL_r^c < 1$), assim como o estado do Espírito Santo (ES).

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



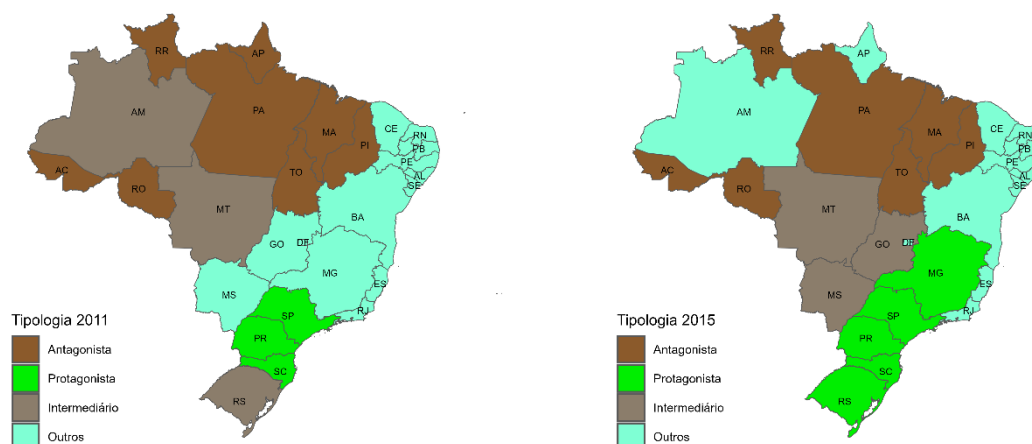
Fonte: Elaboração própria com base na Matriz de Inter-regional de Insumo-produto.

Nessa mesma perspectiva, mas sob um enfoque específico, destaca-se o estado do Amazonas (AM) 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 Rondônia (RO), Roraima (RR), Acre (AC), Mato Grosso (MT) e Pará (PA) possuem fronteiras com o estado do Amazonas, indicando uma aproximação que possa ser preocupante a longo prazo. Por fim, os estados do Tocantins (TO), Maranhão (MA) englobam a fronteira agrícola brasileira que se desenvolveu em direção ao bioma do cerrado, juntamente aos estados do Piauí (PI) e Bahia (BA), denominada como MATOPIBA.

Do ponto de vista da dependência para trás e para frente, tanto nas cadeias produtivas dos estados quanto nas ligações que influenciam os encadeamentos das emissões, os estados do Rio Grande do Sul (RS) e Minas Gerais (MG) se destacam ao lado de São Paulo (SP), Paraná (PR) e Santa Catarina (SC), assumindo um papel de protagonismo. Essas regiões apresentam uma forte interação econômica nas compras e vendas na cadeia produtiva. No entanto, quando consideramos a propagação das emissões ao longo dessa cadeia, esses estados têm uma baixa participação. Este resultado sublinha uma caracterização espacial que impacta a estrutura produtiva desses estados, especialmente devido à presença de setores industriais, em contraste com a predominância da dependência da atividade primária em muitas outras unidades federativas.

A Figura 5 oferece uma ilustração mais clara da composição espacial das tipologias criadas, destacando o surgimento, entre 2011 e 2015, de novos estados protagonistas, como Minas Gerais (MG) e Rio Grande do Sul (RS), como mencionado anteriormente. Esses estados são identificados não apenas como potenciais regiões latentes para promover o crescimento econômico, mas também como bases de integração produtiva mais limpa ao longo da cadeia. Além disso, observou-se uma redução no número de unidades federativas que contribuem significativamente para a propagação das emissões de CO₂ ao longo da cadeia produtiva, o que resulta em uma perda de potencial espacial em termos de mitigação.

Figura 5 - Tipologia para os anos de 2011 e 2015



Fonte: Elaboração própria com bases nos resultados das tipologias regionais

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, marcada pela expansão das fronteiras agrícolas e, conseqüentemente, pela sua estrutura de venda e compra, representa uma ameaça para o ecossistema.

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 análise das variações nas emissões de CO₂ entre 2011 e 2015 será conduzida com base nas tipologias estabelecidas para o último ano na seção anterior (2015), focando nos setores mais relevantes da 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. 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 CO₂(t) para o grupo Antagonista.

Toneladas (t)

	Intensidade	Tecnológico	Exportações	Consumo das Famílias	Resto da Demanda Final	Varição Total de Emissões	Participação Setorial nas Emissões
Agricultura	-32379,96	-2058,78	22620,52	7333,85	-3471,58	-7955,96	18,37%
Pecuária	-82394,30	24271,59	24410,90	7550,03	9652,77	-16509,01	69,58%
Produção florestal	-10267,16	-100,73	3574,49	4918,73	-1479,19	-3353,85	4,83%
Energia Elétrica	3328,97	1260,95	-74,59	1323,89	139,45	5978,67	1,61%
Refino de Petróleo	-694180,83	487375,77	583,92	193852,23	12434,15	65,24	0,02%
Extração de petróleo e gás	-1342,19	1101,75	-0,41	8,08	283,83	51,06	0,01%
Transporte Terrestre	5634,24	-189,64	-2144,65	982,77	-418,41	3864,31	3,91%
Demais Setores	-2054,50	5677,73	-5791,13	1258,09	278,51	-631,26	1,68%
Total	-813655,73	517338,65	43179,04	217227,69	17419,52	-18490,83	100%

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 33,36% das emissões totais de CO₂ no Brasil e a 92,78% nas regiões associadas a essa tipologia. Os resultados da decomposição revelam uma mudança na trajetória das emissões totais, com os setores agrícolas e, mais especificamente, a pecuária apresentando uma redução nas emissões de CO₂ (-7955,96t), sendo a agricultura responsável pela maior parte das reduções (-16509,0t). A principal contribuição para essa mudança está ligada ao efeito intensidade da agricultura (-32379,96t) e pecuária (-82394,30t), 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 (22620,52t) e pecuária (24410,90t). 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 canal de emissões. De forma sucinta, uma análise adicional para outros setores deste grupo inclui o setor de Refino de Petróleo, que, apesar das regiões em questão não possuem aptidão produtiva nesse campo, apresenta alta intensidade na produção de emissões em toneladas. No entanto, de maneira geral, esse impacto acaba sendo compensado por outros mecanismos, sendo responsável por apenas 0,02% das emissões totais dentro deste grupo.

Apesar do grupo ser composto por estados que o caracterizam como antagonista, os resultados evidenciam uma redução de 18490,83t em suas emissões. As principais reduções ocorreram nos setores agrícola e pecuário, responsáveis por -7955,96t e -16509,01t, respectivamente. Para concluir a análise deste grupo, observa-se que o efeito intensidade foi o principal mecanismo para mitigar as emissões de CO₂ durante esses períodos (-813655,73t). Uma possível explicação para esses resultados pode estar associada à modificação no uso do solo ocorrida no primeiro ano, a qual foi compensada pela produção nessas novas áreas no último ano de análise.

O grupo intermediário é composto pelos estados de Mato Grosso (MT), Goiás (GO) e Mato Grosso do Sul (MS), os quais demonstram um forte encadeamento na cadeia produtiva, tanto no que se refere ao processo produtivo quanto às emissões de CO₂. Ao observar 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.

	Toneladas (t)						
	Intensidade	Tecnológico	Exportações	Consumo das Famílias	Resto da Demanda Final	Variação Total de Emissões	Participação Setorial nas Emissões
Agricultura	400,73	2348,22	19972,94	1374,39	-2236,32	21859,96	28,74%
Pecuária	45758,79	-11898,16	14685,33	2998,41	-3500,44	48043,93	58,09%
Produção florestal	1080,55	174,59	542,88	897,31	-469,59	2225,74	2,58%
Energia Elétrica	3377,17	479,16	104,66	194,57	-95,20	4060,36	1,70%
Refino de Petróleo	-187236,65	143626,79	1046,95	46982,69	-4422,20	-2,42	0,00%
Extração de petróleo e gás	-7,72	5,97	0,00	0,03	1,72	0,00	0,00%
Transporte Terrestre	-3342,23	5386,64	166,41	1170,49	-987,30	2394,01	6,99%
Demais Setores	-77,95	1327,49	601,96	260,22	-191,12	1920,59	1,92%
Total	-140047,31	141450,70	37121,14	53878,09	-11900,45	80502,17	100%

Fonte: Elaboração própria

O resultado da decomposição revela a significativa contribuição desses estados nas emissões de CO₂, especialmente pelo setor primário representado pelos três primeiros setores da Tabela 3, que respondem por 89,40% das emissões nestas regiões, correspondendo a 18,05% 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 (19972,94t) e pecuária (14685,33t), 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 primário e o efeito intensidade desempenhando um papel fundamental para o crescimento das emissões, principalmente na pecuária (45758,79t). Apesar dessa consolidação, o resultado indica que, para manter a produção do ano referência (2011), esses estados tem aumentado suas emissões, sendo uma possível explicação a pecuária extensiva. Embora o setor agrícola seja o principal propulsor das emissões, é importante destacar a participação do setor de Transporte Terrestre, que representa aproximadamente 7% das emissões setoriais nesse grupo. Em contrapartida, apesar do setor de refino de petróleo ter uma expressiva contribuição para as emissões, sua variação total é negativa, principalmente devido ao efeito intensidade e à demanda final.

Os resultados permitem uma comparação entre os grupos Antagonista e Intermediário. O primeiro foi capaz de reduzir suas emissões totais em -18490,83t, enquanto o segundo teve um aumento nas emissões totais de 80502,17t. Apesar de o primeiro grupo ser identificado como um alvo potencial para a implementação de políticas públicas destinadas a reduzir as emissões de CO₂, o segundo grupo também apresenta ter uma contribuição significativa e que aumentou com o passar dos anos. Ainda mais preocupante é o impacto deste segundo grupo na estrutura produtiva, que, apesar de ser de grande importância, está associado a emissões consideráveis decorrentes desse processo.

Para o grupo protagonista, os resultados da Análise de Decomposição Estrutural (SDA) apresentados na Tabela 4 diferem consideravelmente dos outros grupos em vários aspectos. Em primeiro lugar, a participação do setor agrícola nas emissões totais deste grupo é de apenas 27,10%. Além disso, a variação total das emissões nesses setores apresentou uma redução: agricultura (-23255,81t), pecuária (-19603,66t) e produção florestal (-2608,50t). O efeito intensidade foi o principal responsável pela queda nas emissões. No entanto, assim como em todos os outros grupos, as exportações continuam impulsionando o aumento dessa propagação.

Tabela 4 – Decomposição das mudanças nas emissões de CO₂(t) para o grupo Protagonista.

	Toneladas (t)						
	Intensidade	Tecnológico	Exportações	Consumo das Famílias	Resto da Demanda Final	Varição Total de Emissões	Participação Setorial nas Emissões
Agricultura	-27668,03	-2545,06	10736,97	-1880,50	-1899,18	-23255,81	13,45%
Pecuária	-23790,23	-318,78	3667,14	1456,97	-618,75	-19603,66	12,07%
Produção florestal	-2719,00	-515,37	451,95	608,88	-434,96	-2608,50	1,58%
Energia Elétrica	6357,13	1892,03	657,41	-34,51	-140,61	8731,45	7,64%
Refino de Petróleo	2428,39	-468,51	281,69	-908,27	-818,98	514,32	5,72%
Extração de petróleo e gás	-8182,85	7468,26	223,98	19,90	1208,68	737,97	0,30%
Transporte Terrestre	-4168,05	12743,38	954,79	-4223,24	-2406,29	2900,58	35,98%
Demais Setores	-3218,33	-7077,95	7629,42	-1150,90	-5548,08	-9365,84	23,26%
Total	-60960,98	11178,01	24603,34	-6111,68	-10658,17	-41949,48	100%

Fonte: Elaboração própria.

Destaca-se também as emissões provenientes do setor de transporte terrestre, que representam 35,98% das emissões setoriais desse grupo e 7,95% das emissões totais no território brasileiro. Além disso, essas emissões apresentaram uma variação positiva ao longo dos anos de 2011 a 2015, de 2900,58t. Ao considerar a soma em todos os setores da economia, o efeito intensidade foi o principal mecanismo responsável pela diminuição das emissões, totalizando aproximadamente -60960,98t. Por outro lado, as exportações setoriais, impulsionadas principalmente pela agricultura, foram responsáveis pelo aumento de 24603,34 t.

A última tipologia (Tabela 5) aborda as demais unidades federativas, que em geral compartilham uma estrutura produtiva com baixa integração em termos de compras e vendas, além de apresentarem similaridades no nível de emissões de CO₂.

Tabela 5 - Decomposição das mudanças nas emissões de CO₂(t) para o grupo Outros

	Toneladas (t)						
	Intensidade	Tecnológico	Exportações	Consumo das Famílias	Resto da Demanda Final	Varição Total de Emissões	Participação Setorial nas Emissões
Agricultura	4899,91	-1981,71	1075,94	327,17	-1301,87	3019,45	13,96%
Pecuária	2868,20	-2463,37	1175,96	4411,33	-3253,83	2738,29	26,04%

Produção florestal	234,99	-433,54	312,29	506,34	-340,89	279,21	2,65%
Energia Elétrica	17028,15	5514,71	24,81	3497,09	-1093,93	24970,83	16,31%
Refino de Petróleo	-158448364,11	123453825,02	633817,99	35135518,71	-772811,09	1986,52	4,71%
Extração de petróleo e gás	3927,35	-1200,97	-683,45	93,23	-555,19	1580,97	3,30%
Transporte Terrestre	4355,30	254,26	-809,04	624,75	-771,86	3653,40	17,69%
Demais Setores	13423,64	-19617,21	4861,32	1284,64	-2673,06	-2673,06	15,34%
Total	-158401626,57	123433897,20	639775,81	35146263,27	-782801,72	35508,00	100%

Fonte: Elaboração própria

Os resultados para o setor de energia elétrica exibem o aumento no nível de variação total das emissões de CO₂ (24970,83t). Excluindo o efeito do restante da demanda final, os demais efeitos contribuíram positivamente para essa variação. Detalhadamente, o efeito intensidade (17028,15t) 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. Ainda, a variação total das emissões ao longo dos anos para esse grupo específico apresentou um crescimento de 35508,00t, impulsionado principalmente pelo setor energético.

Adicionalmente, outros setores, como Transporte Terrestre e Extração de Petróleo e Gás, tiveram um papel no aumento das emissões de CO₂ nessas regiões, correspondendo a 4,71% e 3,30%, respectivamente. 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 (1986,52t) é menor em comparação com outros setores. No entanto, a magnitude das emissões é marcante, evidenciada pelo impacto significativo do efeito tecnológico (123453825,02t) e do consumo das famílias (35135518,71t). Em contrapartida, destaca-se que o efeito de intensidade (-158448364,11t) desempenhou um papel relevante na redução das emissões de CO₂.

Para essas regiões, as variações nas emissões pelo setor agrícola aumentaram e representam 42,65% do total de emissões para esse grupo. Enfatiza-se novamente o efeito positivo das exportações da agricultura (1075,94t) e pecuária (1175,96t) sobre as emissões de CO₂ em todas as tipologias, evidenciando um canal de transmissão com potenciais implicações. Como se sabe, o estado da Amazônia pertence a este grupo, o que pode explicar, em parte, o aumento da variação das emissões no setor primário. Similarmente, o estado da Bahia também apresenta uma participação significativa deste setor em sua estrutura produtiva.

Os resultados apresentados até então evidenciam 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) e Cavaleiro e Schor (2014) indicam que o aumento do valor da produção de um país está positivamente correlacionado com o crescimento dos níveis 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 em atividades primárias.

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, 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 os resultados da decomposição são considerados, onde a exportação emerge como um dos principais catalisadores para a variação das emissões.

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 método de insumo-produto empregado neste estudo possibilitou não apenas a criação de tipologias, mas também uma visão que permite analisar as emissões de CO₂ 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 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. Os resultados das tipologias revelam um aumento contínuo ao longo dos anos no número de regiões classificadas como protagonistas, com um padrão espacial notável concentrado principalmente no sul e sudeste do país.

Por outro lado, há também uma concentração geográfica de regiões no centro-norte que apresentam alta participação nas emissões de CO₂ provenientes de sua estrutura produtiva, concentrando-se especialmente em áreas ricas em biodiversidade como Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica. Essas regiões são responsáveis não apenas pela preservação ambiental, mas também pela atividade econômica predominante, que frequentemente ultrapassa os limites ambientais e contribui para as emissões. Essa percepção evidencia que, na discussão existente na literatura sobre o *trade-off* entre crescimento econômico e sustentabilidade produtiva, o Brasil segue em direções opostas. A estrutura produtiva do país continua baseada em atividades primárias que, apesar de sua significativa participação no comércio internacional, têm baixo valor agregado e, historicamente, não foram capazes de promover o crescimento econômico brasileiro. Essas atividades estão se expandindo espacialmente em estados conhecidos como regiões de fronteiras agrícolas, com a mudança no uso do solo sendo uma das principais fontes dessa expansão e um dos principais mecanismos geradores de emissões de CO₂.

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 (*e.g.* grupo antagonista), 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 *trade-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, para resultados a médio e longo prazo, torna-se necessária uma abordagem política e econômica orientada para investimentos em capital físico e humano. Para promover um desenvolvimento sustentável e eficiente nas regiões do Centro-Norte, é essencial realizar investimentos na reestruturação da cadeia de valor local através da descentralização industrial. Esta estratégia demanda uma abordagem de longo prazo, uma vez que fatores locais como mão de obra, sistema de transporte e logística não sofrem mudanças significativas a curto prazo. Ao diversificar as atividades econômicas, é possível impulsionar um crescimento mais robusto e sustentável em termos de valor da produção.

Na perspectiva de vulnerabilidade, a análise da decomposição por tipologias revela que o setor de energia elétrica desempenha um papel significativo nas emissões de CO₂. Sua participação relativa no total de emissões cresceu substancialmente, passando de 2,63% em 2011 para 6,16% em 2015. O efeito intensidade, por exemplo, revelou as dificuldades enfrentadas pelo setor para produzir a mesma quantidade de energia sem aumentar o nível de emissões. Esses achados destacam uma deficiência inesperada que compromete a capacidade de produção de energia renovável no Brasil. Dessa maneira, 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 indicam que a redução das emissões do setor elétrico foi alcançada principalmente pela implementação de mecanismos do restante da demanda final. Nesse contexto, investimentos e iniciativas governamentais, como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) e o Programa Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), além dos compromissos internacionais como o Acordo de Paris (2015), são essenciais para mitigar as emissões de gases de efeito estufa.

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 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.