

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EM GESTÃO E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA

CARLOS EDUARDO ESPINEL CAMPOS

**DETERMINANTES DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DA
ECONOMIA BRASILEIRA: UMA ANÁLISE DE DECOMPOSIÇÃO ESTRUTURAL
(2010 A 2017)**

Sorocaba

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EM GESTÃO E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA

CARLOS EDUARDO ESPINEL CAMPOS

**DETERMINANTES DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DA
ECONOMIA BRASILEIRA: UMA ANÁLISE DE DECOMPOSIÇÃO ESTRUTURAL
(2010 A 2017)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia, para obtenção do título de Mestre em Economia.

Orientação: Profa. Dra. Maria Aparecida Silva Oliveira

Coorientação: Prof. Dr. Eduardo Rodrigues de Castro

Sorocaba

2021

CARLOS EDUARDO ESPINEL CAMPOS

**DETERMINANTES DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DA
ECONOMIA BRASILEIRA: UMA ANÁLISE DE DECOMPOSIÇÃO ESTRUTURAL
(2010 A 2017)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia, para obtenção do título de Mestre em Economia.

Universidade Federal de São Carlos. Sorocaba,
29 de março de 2021.

Orientador (a):

Prof. Dra. Maria Aparecida Silva Oliveira
Universidade Federal de São Carlos

Coorientador (a):

Prof. Dr. Eduardo Rodrigues de Castro
Universidade Federal de São Carlos

Examinador (a):

Prof. Dr. Danilo Rolim Dias de Aguiar
Universidade Federal de São Carlos

Examinador (a):

Prof. Dr. Fernando Salgueiro Perobelli
Universidade Federal de Juiz de Fora

Espinel Campos, Carlos Eduardo

Determinantes das emissões de gases de efeito estufa da economia brasileira: uma análise de decomposição estrutural (2010 a 2017)

/ Carlos Eduardo Espinel Campos -- 2021.
103f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador (a): Maria Aparecida Silva Oliveira

Banca Examinadora: Danilo Rolim Dias de Aguiar,

Fernando Salgueiro Perobelli

Bibliografia

1. Transportes. 2. Emissões de GEE. 3. Insumo-Produto.

I. Espinel Campos, Carlos Eduardo. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -
CRB/8 6979



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências em Gestão e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Economia

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Carlos Eduardo Espinel Campos, realizada em 29/03/2021.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Maria Aparecida Silva Oliveira (UFSCar)

Prof. Dr. Danilo Rolim Dias de Aguiar (UFSCar)

Prof. Dr. Fernando Salgueiro Perobelli (UFJF)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Economia.

*À memória dos meus avós:
João Espinel, Durval Campos e Maria Zenite*

AGRADECIMENTOS

À Profa. Dra. Maria Aparecida Silva Oliveira, por aceitar ser minha orientadora e pelo exemplo de profissionalismo. Obrigado por todas as ideias, correções, ensinamentos e sugestões. A máxima: *'sangue, suor e lágrimas'*, que tão bem representa a pós-graduação em economia, foi mais fácil de ser tolerada com a sua ajuda;

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Eduardo Rodrigues de Castro, pelos comentários e incentivos e por todo o apoio dirigido a mim, durante a graduação e pós-graduação;

Ao Prof. Dr. Alexandre Gomes e ao Prof. Dr. Danilo Aguiar, pelos comentários e sugestões na ocasião do meu exame de qualificação;

Ao Prof. Dr. Fernando Perobelli pela disponibilidade em compor minha banca de defesa e por suas sugestões;

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Economia e do Departamento de Economia da UFSCar, pelas aulas de excelência, tão fundamentais para moldar a minha formação acadêmica e profissional;

À secretaria e à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Economia da UFSCar, por sempre fazerem o possível para atender minhas demandas;

Aos meu pais, Rosângela e Edicarlos, por sempre priorizarem a minha educação;

À minha Gracinha, pela hospitalidade e companhia;

Aos colegas do mestrado, em especial à Letícia Macedo e Poliana Oliveira, por tornarem essa jornada mais fácil e divertida;

A todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a elaboração deste trabalho;

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos;

E por último, à Universidade Federal de São Carlos, por tudo o que me proporcionou e ainda proporcionará.

*A resposta certa, não importa nada:
o essencial é que as perguntas estejam certas.*

Mário Quintana

RESUMO

CAMPOS, Carlos Eduardo Espinel. Determinantes das emissões de gases de efeito estufa da economia brasileira: uma análise de decomposição estrutural (2010 a 2017). 2021. Dissertação (Mestrado em Economia) – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, Sorocaba, 2021.

As alterações nas concentrações de diferentes gases na atmosfera terrestre constituem fenômeno preocupante, visto que o processo de aquecimento do clima global em curso não se explica apenas por causas naturais e deve-se, em grande parte, às emissões de gases de efeito estufa (GEE), agravadas por atividades antrópicas, em especial as emissões ligadas aos transportes. Desta forma, o presente estudo tem por objetivo avaliar as mudanças estruturais da economia brasileira (em nível de intensidade, tecnologia, estrutura da demanda final, volume da demanda final, tamanho da população, entre outras) relativas às emissões de GEE, tanto sob uma ótica agregada, quanto setorial e, neste caso, com foco direcionado sobre o setor de transportes, responsável por volume considerável de GEE emitidos no país. A metodologia empregada consistiu na Análise de Decomposição Estrutural (SDA), com foco ambiental, a partir das matrizes de insumo-produto estimadas para o Brasil, entre 2010 e 2017 e dados do Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). Os resultados obtidos permitiram identificar que o Brasil apresentou crescimento em seu nível de emissões de GEE, fomentado tanto pelos efeitos tecnológicos, quanto pelos efeitos relativos à demanda final. Neste sentido, a intensidade das emissões e as mudanças nas tecnologias de produção dos setores, aliadas aos aumentos ocasionados pela população e nível da demanda final, contribuíram para o aumento das emissões de poluentes no país. Além disso, em uma perspectiva setorial, o setor ‘Transporte Terrestre’ foi caracterizado como intenso poluente, ao emitir elevado nível de poluição por unidade monetária produzida e por influenciar indiretamente as emissões de GEE em outras atividades econômicas.

Palavras-Chave: Insumo-Produto, Mudanças Estruturais, Emissões.

ABSTRACT

The evolution of the concentration of different gases in the Earth's atmosphere is a worrying phenomenon, because the ongoing process of global warming is not explained only by natural causes and is largely due to greenhouse gas emissions (GHGs), which are aggravated by human activities, in particular transport-related emissions. Thus, this study aims to assess the structural changes in the Brazilian economy (level of intensity, technology, structure of final demand, volume of final demand, size of the population, among others) related to GHG emissions, from both an aggregate and sectoral point of view and, in this case, focusing on the transport sector, which is responsible for a large volume of GHGs emitted in Brazil. The methodology applied was the structural decomposition analysis (SDA) with an environmental approach, based on input-output matrices estimated for Brazil, between 2010 and 2017 and data from the Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). The results showed that Brazil showed an increase in its level of GHG emissions, fueled both by technological effects and by effects linked to final demand. Therefore, the intensity of emissions and changes in production technologies in economic sectors, combined with population growth and the level of final demand, have contributed to the increase in pollutant emissions in the country. From a sector perspective, the 'Land Transport' sector has been characterized as an intense pollutant, as it emits a high level of pollution per monetary unit produced and indirectly influences GHG emissions in other economic activities.

Keywords: Input-Output, Structural Changes, Emissions.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Emissões de gases de efeito estufa no Brasil, por modal de transporte, entre 2010 e 2018 (em MtCO₂e GWP – AR5).
- Figura 2. Evolução dos investimentos em infraestrutura de transportes, entre 2010 e 2019.
- Figura 3. Uso de fontes energéticas no Brasil em 2018 (em %).
- Figura 4. Emissões de gases de efeito estufa do setor de transportes brasileiro, entre 2010 e 2018 (em MtCO₂e GWP – AR5).
- Figura 5. Alterações projetadas nas temperaturas e precipitações médias, em comparação com o período pré-industrial e a diferença entre (1,5 °C e 2,0 °C), a partir do aquecimento global.
- Figura 6. Representação esquemática das relações fundamentais de uma tabela de insumo-produto, com dois setores e uma única região.
- Figura 7. Evolução das emissões de gases de efeito estufa (em tCO₂e GWP-AR5) dos setores ‘Agropecuária’, ‘Extrativa Mineral’ e ‘Minerais Não Metálicos’, de 2010 a 2017.
- Figura 8. Evolução das emissões de gases de efeito estufa (em tCO₂e GWP-AR5) dos setores ‘Transporte Terrestre’ e ‘Energético’, de 2010 a 2017.
- Figura 9. Coeficientes de intensidade de emissão dos setores econômicos (2010-2017).
- Figura 10. Evolução da participação das termelétricas na geração de energia total do Brasil, entre 2010 e 2017.
- Figura 11. Efeitos da decomposição estrutural das emissões de gases de efeito estufa (em tCO₂e GWP – AR5) na economia brasileira, entre 2010 e 2017.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 Setores econômicos considerados na análise.
- Tabela 2. Fatores estruturais considerados na análise.
- Tabela 3. Emissões de gases de efeito estufa (em tCO₂e GWP – AR5) dos setores da economia brasileira, em 2010 e 2017.
- Tabela 4. Participação dos setores de transportes nos coeficientes de impacto ambiental das atividades econômicas do Brasil, em 2010 e 2017
- Tabela 5 Decomposição Estrutural das emissões de GEE: efeitos intensidade, tecnológico e demanda final dos setores econômicos, entre 2010 e 2017.
- Tabela 6. Efeitos intensidade, tecnologia do setor ‘Transporte Terrestre’, tecnologia do setor ‘Transporte Aéreo’, tecnologia do setor ‘Transporte Aquaviário’ e tecnologia dos ‘Outros Setores’ da economia, entre 2010 e 2017 (em tCO₂e GWP – AR5).
- Tabela 7. Efeitos estrutura da demanda final, volume da demanda final em relação ao PIB, nível do PIB per capita e tamanho da população, entre 2010 e 2017 (em tCO₂e GWP – AR5).
- Tabela 8. Síntese da Análise de Decomposição Estrutural (SDA) das emissões de GEE brasileiras (2010-2017).

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
AR5	“ <i>Fifth Assessment Report of the IPCC</i> ” – (Quinto Relatório de Avaliação do IPCC)
BEN	Balanco Energético Nacional
BRIC	Brasil, Rússia, Índia e China
CH ₄	Metano
CIA	Coefficiente de Impacto Ambiental
CIE	Coefficiente de Intensidade de Emissão
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONIT	Conselho Nacional de Integração de Políticas de Transporte
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO _{2e}	Dióxido de Carbono Equivalente
COP	“ <i>Conference of the Parties</i> ” – (Conferência das Partes)
EMPLASA	Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A
ENR	Energia Não Renovável
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EUA	Estados Unidos da América
FBCF	Formação Bruta de Capital Fixo
GEE	Gases de Efeito Estufa
GgCO _{2e}	Giga-gramas de Dióxido de Carbono Equivalente
GMST	“ <i>Global Mean Surface Temperature</i> ” – (Temperatura Média Global da Superfície)
GTP	“ <i>Global Temperature Change Potential</i> ” – (Potencial de mudança de Temperatura Global)
GWP	“ <i>Global Warming Potential</i> ” – (Potencial de Aquecimento Global)
HFCs	Hidrofluorcarbonetos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPAM	Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia
IPCC	“ <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> ” – (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
KLEM	“ <i>Capital, Labor, Energy and Material Aggregates</i> ” – (Capital, Trabalho, Energia e Materiais)

MtCO _{2e}	Milhão de Toneladas de Dióxido de Carbono Equivalente
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MIP	Matriz de Insumo-Produto
MIT	“ <i>Massachusetts Institute of Technology</i> ” – (Instituto de Tecnologia de Massachusetts)
MME	Ministério de Minas e Energia
NAMEA	“ <i>National Accounting Matrix including Environmental Accounts</i> ” – (Matriz de Contabilidade Social incluindo as Contas Ambientais)
NEREUS	Núcleo de Economia Regional e Urbana da Universidade de São Paulo
N ₂ O	Óxido Nítrico
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
O ₃	Ozônio
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
PIB	Produto Interno Bruto
PNLT	Plano Nacional de Logística e Transportes
POF	Pesquisa de Orçamentos Familiares
ppm	Partes por milhão
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SCN	Sistema de Contas Nacionais
SDA	“ <i>Structural Decomposition Analysis</i> ” – (Análise de Decomposição Estrutural)
SO ₂	Dióxido de Enxofre
SEEG	Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
tCO _{2e}	Tonelada de Dióxido de Carbono Equivalente
tep	Tonelada Equivalente de Petróleo
UE	União Europeia
UF	Unidades Federativas
UNFCCC	“ <i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> ” – (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima)
WIOD	“ <i>World Input-Output Database</i> ” – (Banco de Dados Mundial de Insumo-Produto)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS.....	22
1.1.1 Objetivos Específicos	23
1.2 HIPÓTESES.....	23
2 TRANSPORTES, ENERGIA E EMISSÕES	24
2.1 INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES NO BRASIL.....	24
2.2 CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DO SETOR DE TRANSPORTES DO BRASIL.....	26
2.3 EMISSÕES DE GEE E MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS.....	28
3 METODOLOGIA	33
3.1 BASE DE DADOS.....	33
3.2 DEFLACIONAMENTO.....	33
3.3 AGREGAÇÃO E COMPATIBILIZAÇÃO.....	35
3.4 ANÁLISE DE INSUMO-PRODUTO.....	36
3.4.1 Modelagem das emissões de Gases de Efeito Estufa	41
3.4.2 Análise de Decomposição Estrutural (SDA)	41
3.4.2.1 SDA das emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil.....	43
3.5 A ‘ANÁLISE DE INSUMO-PRODUTO’ EM APLICAÇÕES AMBIENTAIS.....	48
3.5.1 A ‘Análise de Decomposição Estrutural (SDA)’ em avaliações ambientais.....	53
4 RESULTADOS	63
4.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DAS EMISSÕES DE GEE NO BRASIL (2010-2017)....	63
4.2 ANÁLISE DE DECOMPOSIÇÃO ESTRUTURAL DAS EMISSÕES DE GEE NO BRASIL (2010-2017).....	70
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	80

REFERÊNCIAS.....	82
APÊNDICES.....	91

1. INTRODUÇÃO

A partir de meados da década de 1960, grupos científicos emitiram alertas a respeito de alterações nas concentrações de diferentes gases na atmosfera terrestre¹ (GAZZONI, 2014). Os avisos advertiam acerca do processo de aquecimento do clima global em curso, que não se explicava por causas naturais e devia-se, em grande parte, às emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente referente às emissões de dióxido de carbono (CO₂), originadas a partir de atividades humanas (ZAPPAROLI *et al.*, 2018). De acordo com Lima (2011), a orientação das políticas de cunho ambiental no Brasil iniciou-se em resposta à Conferência de Estocolmo em 1972 e a partir de pressões de grupos ambientalistas internos, que motivaram o governo brasileiro a estabelecer, de forma gradativa, um sistema de agências ambientais para regularizar a gestão de políticas ambientais nacionais.

Segundo Leal *et al.* (2015), o Brasil é signatário de diferentes acordos multilaterais orientados à redução dos GEE, porém, o país não apresenta metas obrigatórias de diminuição nos níveis emitidos de CO₂. Além disso, as políticas em vigor não são suficientes para controlar formalmente as emissões em termos de comércio de quotas ou implementação de impostos. Conforme aponta o Relatório Síntese de 2019, do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), em 2018, as emissões de GEE mantiveram-se estáveis, mesmo com engajamento governamental reduzido ante às variações climáticas. Neste mesmo ano, o Brasil emitiu 1,93 bilhão de toneladas brutas de GEE medidos em gás carbônico equivalente (CO₂e)², um valor aproximadamente 0,3% maior do que volume total de emissões de 2017.

A trajetória de emissões de GEE no Brasil (o sétimo maior emissor mundial, responsável por 2,9% do volume total emitido) apresenta particularidades relevantes em comparação a outros países. Enquanto no resto do planeta existe uma tendência de elevação no nível de emissões impulsionada pelo setor energético, no Brasil há oscilação entre períodos ascendentes

¹ Um marco relevante foi a criação do Clube de Roma em 1965, cujos objetivos consistem em definir soluções abrangentes para os desafios mundiais, originados a partir de décadas de crescimento do consumo exponencial e populacional, que colocaram em risco o clima da Terra. Em 1972, uma equipe do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), publicou o relatório '*The Limits to Growth*', onde foram analisadas as relações entre população mundial, industrialização, produção de alimentos, esgotamento de recursos e poluição. Em 1987, o relatório '*Our Common Future*', promoveu discussões acerca do uso de fontes energéticas renováveis e diminuição de poluentes. Disponível em: <<https://donellameadows.org/wp-content/userfiles/Limits-to-Growth-digital-scan-version.pdf>> e <<https://sustainabledevelopment.un.org/milestones/wced>>. Acesso em novembro de 2020.

² Conforme aponta o Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM), o dióxido de carbono equivalente (CO₂e) é uma medida métrica para comparar as emissões de vários gases de efeito estufa com base em seus respectivos potenciais de aquecimento global. Disponível em: <<https://ipam.org.br/glossario/co2-equivalente-co2e/>>. Acesso em novembro de 2020.

e descendentes no volume de emissões. Entretanto, no ano de 2015, as emissões per capita brutas brasileiras (9,3 toneladas de CO₂/ano) encontravam-se acima da média mundial de 7,2 toneladas de CO₂/ano. Ademais, a intensidade de carbono³ da economia brasileira também foi superior à média internacional, uma vez que o mundo em 2015 gerava US\$ 1.484 por tonelada de CO₂ emitida, em oposição aos US\$ 970 gerados pelo Brasil (SEEG, 2019).

Conforme aponta Sesso *et al.* (2020), a matriz energética dos países é normalmente a fonte primaz dos problemas relativos à poluição, entretanto, as emissões de GEE não são provenientes apenas da queima de combustíveis fósseis para a produção de energia e uso industrial e, neste caso, outros aspectos devem ser considerados para que se amplie a análise do fenômeno de efeito estufa. O consumo, o investimento e as exportações, ao constituírem a força motriz do crescimento econômico, são os principais contribuintes para a emissão de gases na atmosfera terrestre e, como demandas finais, estas variáveis exercem seus papéis através de efeitos indutores, explicitando as relações de interdependência setoriais (GUO; LIU, 2016).

Desde o ano de 2009, quando a Política Nacional sobre Mudança do Clima estabeleceu metas para reduzir o volume emitido de GEE no Brasil, as emissões do setor de energia cresceram em torno de 19%. O setor de energia compreende a produção e o consumo de combustíveis fósseis, assim como a geração de eletricidade, e corresponde à terceira maior fonte de emissões de GEE no país⁴ e suas emissões são, majoritariamente, consequências do aumento das atividades relativas ao transporte (SEEG, 2019). Ademais, dados do Relatório Síntese de 2019 do SEEG também indicam que em 2018, cerca de 200,2 MtCO₂e GWP-AR5⁵ foram emitidas pelo setor de transporte, fracionadas entre o transporte de cargas (104,4 MtCO₂e) e passageiros (95,8 MtCO₂e), sendo que os caminhões, a maior fonte poluente, emitiram cerca de 82,6 MtCO₂e na atmosfera. A Figura 1 expõe o total de emissões por modal de transporte (em MtCO₂e GWP-AR5) na economia brasileira entre os anos de 2010 e 2018.

³ De acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), a intensidade de carbono é relação da emissão de gases causadores do efeito estufa, computada no processo produtivo do combustível, por unidade de energia, com base em uma avaliação do ciclo de vida. Disponível em: <https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/52003440/do1-2018-11-27-resolucao-n-758-de-23-de-novembro-de-2018-52003305>. Acesso em novembro de 2020.

⁴ As mudanças de uso da terra, provocadas pelo desmatamento, são as maiores causas de emissões no Brasil, com 44% do total. A agropecuária, em segundo lugar, representa 28% do total de gases de efeito estufa do Brasil, principalmente, devido à pecuária (SEEG, 2019).

⁵ O Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) considera todos os gases de efeito estufa contidos no inventário nacional, como CO₂, CH₄, N₂O e os HFCs. Os dados também são apresentados em milhões de toneladas de carbono equivalente (MtCO₂e), tanto na métrica GWP (Potencial de Aquecimento Global) como GTP (Potencial de Mudança de Temperatura Global), de acordo com os fatores de conversão estabelecidos no 2º, 4º e 5º relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). A partir de 2017, o padrão da plataforma SEEG passou a apresentar os dados nos fatores de conversão do GWP-AR5. Disponível em: <<http://seeg.eco.br/o-que-e-o-seeg>>. Acesso em outubro de 2020.

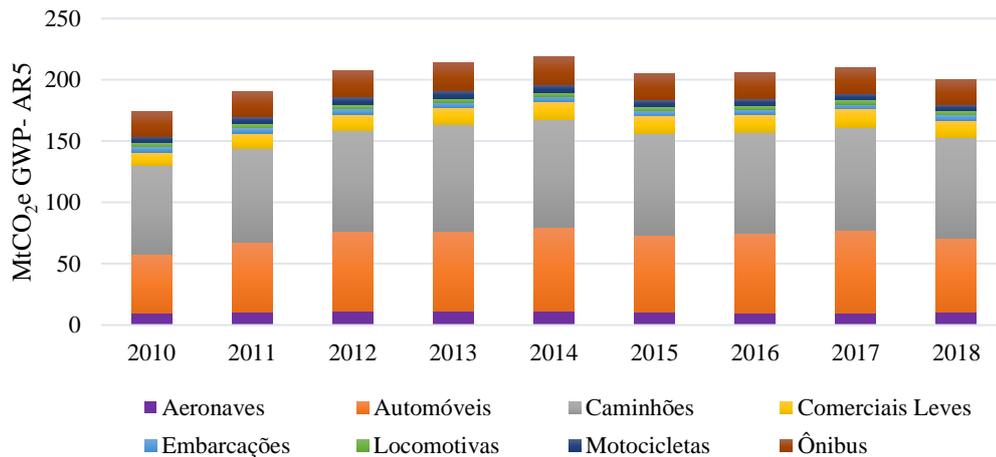


Figura 1. Emissões de gases de efeito estufa no Brasil, por modal de transporte, entre 2010 e 2018 (em MtCO₂e GWP – AR5). Elaboração própria a partir dos dados do SEEG.

De acordo com Pompermayer (2012), o desequilíbrio na matriz de transportes, acentua o nível de emissão de GEE visto que, o modal rodoviário consome até dez vezes mais combustível por tonelada-quilômetro transportada do que o ferroviário e hidroviário e, conseqüentemente, gera até dez vezes mais GEE, entre outros poluentes. Fleury (2012), expressa que a ineficiência dos modais de transporte no Brasil, contribui fortemente para a emissão de GEE na atmosfera. Neste caso, a mitigação das emissões geradas pelo setor de transportes deveria constituir prioridade por parte do governo brasileiro, na articulação dos agentes públicos e privados, com a finalidade de operacionalizar os respectivos modais ao menor custo possível e com níveis reduzidos de emissões de GEE.

A poluição do ar é a fonte mais importante de externalidades ambientais para o transporte, principalmente porque a atmosfera permite uma difusão rápida e ampla de poluentes. Embora a natureza dos poluentes atmosféricos seja claramente identificada, a escala e o escopo de como eles influenciam a biosfera estão sujeitos à controvérsia. Entretanto, dois principais grupos de fatores contribuem para a poluição atmosférica, principalmente em áreas urbanas: os fatores estruturais que estão inerentemente ligados ao tamanho e nível de consumo de uma economia, onde características como o nível de renda e educação tendem a ser proporcionais às emissões de GEE e os fatores comportamentais ligados ao individualismo, consumismo e preferências de transporte (RODRIGUE, 2020).

Para identificar os impactos das emissões de GEE no Brasil, a metodologia de insumo-produto tem sido amplamente utilizada⁶. Uma forma de analisar as emissões de GEE

⁶ Young (1998); Machado *et al.* (2001); Hilgemberg e Guilhoto (2006); Carvalho e Perobelli (2009); Oliveira (2011); Perobelli *et al.* (2015); Souza *et al.* (2015); Freitas *et al.* (2016); Montoya *et al.* (2016); Souza *et al.* (2016); Suela (2019); Carvalho *et al.* (2020); Lima (2020) e Teixeira *et al.* (2020). Para mais informações, ver seção 3.5.

detalhadamente, ocorre através da Análise de Decomposição Estrutural (SDA). Conforme apontam Silva e Perobelli (2012), a SDA é uma extensão do modelo de insumo-produto, que possibilita detalhar as mudanças estruturais relativas ao processo produtivo e de origens tecnológicas. Wachsmann (2005) assinala que as mudanças estruturais ocorrem durante processo de desenvolvimento de um país e são ainda mais proeminentes em países não desenvolvidos. Entretanto, Ramos (1996) indica que as mudanças estruturais não apresentam uma definição e classificação simples.

Em uma ótica de insumo-produto, Syed (1997) aponta que as mudanças estruturais indicam alterações na estrutura de insumo-produto e Souza e Perobelli (2009) expressam que a análise estrutural através da matriz de insumo-produto (MIP) objetiva construir modelos, para organizar o conjunto de informação disponível nas bases de dados, de forma a definir a estrutura de uma economia e realizar projeções. Ademais, Sonis *et al.* (1996) indicam que a análise estrutural em modelos de insumo-produto oferece uma perspectiva de compreensão qualitativa da evolução temporal das economias, ao possibilitar uma exploração muito mais rica e detalhada das mudanças estruturais, diferenciando as alterações autogeradas das não autogeradas⁷, de forma a ampliar e sistematizar a capacidade de rastreamento das mudanças na economia.

Em uma aplicação ambiental, a SDA viabiliza uma análise detalhada das emissões, onde cada atividade produtiva é separada de todo o sistema de produção, promovendo a identificação de padrões pelos quais a poluição é gerada e transmitida, assinalando as especificidades individuais das emissões originadas por cada um dos setores da economia. Pode-se então analisar a origem destas emissões, uma vez que se obtém acesso a informações relevantes sobre o processo de poluição de GEE, caracterizando as emissões efetivas de cada setor econômico, independentemente da atividade que originou o nível final de poluição. Desta forma, de acordo com Llop e Tol (2013), pode-se destacar os papéis diferenciados dos inúmeros setores de uma economia, no que tange ao nível total de poluição da mesma e devido à essas características, são encontrados na literatura internacional diversos estudos utilizando essa técnica para a análise de emissões de poluentes.⁸

Embora a análise de insumo-produto aplicada à questão ambiental no Brasil tenha sido amplamente usada, o mesmo não se verifica com a SDA. Moraes (2007) identificou a relação entre a estrutura produtiva do Brasil e suas respectivas emissões de CO₂, destacando o setor

⁷ Sonis *et al.* (1996) exemplificam que cada componente da mudança no produto bruto no setor *i* pode ser dividido em duas partes, ou seja, em 'alterações autogeradas' e 'alterações não autogeradas'. No primeiro caso, a mudança na produção pode ser atribuída às mudanças no próprio setor (alterações na demanda final ou em variações tecnológicas), enquanto as mudanças não autogeradas ocorrem em outros setores.

⁸ Para exemplos dessas aplicações ver seção 3.5.1.

‘Transportes’; Carneiro (2010) constatou que as variações nas emissões de CO₂ foram ocasionadas por mudanças tecnológicas ou provocadas por um choque de demanda, também destacando o impacto negativo do setor ‘Transportes’ nas emissões; Silva e Perobelli (2012) constataram que as emissões de setores como ‘Transportes’ e ‘Siderurgia’ cresceram devido às variações na demanda final, enquanto as emissões dos setores como ‘Minerais Não Metálicos’ e ‘Papel e Celulose’ destacaram-se por reduções nas emissões de CO₂ por causa de mudanças tecnológicas; Lenzen *et al.* (2013) destacaram a relação entre crescimento populacional e aumento das emissões de CO₂ e Freitas (2015) constatou que o efeito escala foi superior aos efeitos composição e tecnológico e o setor ‘Transportes’ apresentou peso crescente nas emissões de GEE.

Outros estudos utilizaram a abordagem da SDA de emissões de GEE, para analisar o desempenho brasileiro entre os membros do BRIC⁹, utilizando dados da *World Input-Output Database* (WIOD): Oliveira *et al.* (2020) indicaram que para o Brasil, a demanda final via exportação foi o fator que mais contribuiu para o aumento das emissões e Sesso *et al.* (2020) que demonstraram que os países do BRIC apresentaram crescimento em seus níveis de poluição, devido às variações na estrutura e no volume da demanda final.

A avaliação acerca das características estruturais da economia brasileira, e suas variações, relativas às emissões de GEE, tais como composição da demanda final, concentração da matriz de transportes, intensidade de emissões e tecnologia de produção, tornam-se relevantes tanto sob uma ótica agregada quanto setorial, neste caso, com foco direcionado sobre o setor de transportes. O setor é responsável por volume considerável de emissões de GEE, em função do consumo quase que estrito de combustíveis fósseis e tem apresentado altas taxas de consumo energético (FLEURY, 2012; POMPERMAYER, 2012). Além disso, dados obtidos a partir do Boletim Unificado 2019 da Confederação Nacional do Transporte (CNT), expressam uma tendência de queda nos investimentos destinados ao setor de transportes em anos recentes e a manutenção da dependência de recursos investidos no modal rodoviário, caracterizado como grande poluente devido a sua baixa eficiência energética (POMPERMAYER, 2012).

Propõe-se como diferencial para este estudo desagregar o setor de transportes¹⁰ da economia brasileira, em diferentes modais, uma vez que o respectivo setor, de forma agregada, apresentou elevada intensidade de emissões de GEE em estudos anteriormente realizados.¹¹A

⁹ Brasil, Rússia, Índia e China.

¹⁰ O setor de transportes brasileiro foi desagregado em ‘Transporte Terrestre’, ‘Transporte Aéreo’ e ‘Transporte Aquaviário’.

¹¹ O setor de transportes se apresenta como grande emissor de GEE nos estudos de Morais (2007); Carvalho e Perobelli (2009); Silva e Perobelli (2012); Perobelli *et al.* (2015); Freitas (2015) e Teixeira *et al.* (2020).

desagregação do setor em termos de seus modais viabilizará uma análise mais detalhada dos transportes, de forma a distingui-los em termos de eficiência. Ainda, será possível verificar se os setores de transportes foram capazes de transmitir os ganhos de eficiência ao longo da cadeia produtiva. Além disso, a desagregação do setor permitirá identificar o peso direto e indireto das emissões de GEE na economia brasileira resultante de cada modal.

Também, nesse estudo empregar-se-á a base de dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG)¹², ainda não utilizada na literatura disponível, para os anos de 2010 a 2017¹³. A base de dados do SEEG avalia todos os setores que são fontes de emissões: Agropecuária, Energia, Mudanças de Uso da Terra, Processos Industriais e Resíduos. Ademais, serão utilizadas matrizes de insumo-produto para o Brasil estimadas para períodos mais recentes (2010-2017). Cabe ressaltar que a escolha dos anos 2010 e 2017, ocorre consoante à disponibilidade dos dados. Ademais, 2010 configura-se como um ano típico, entre os períodos disponíveis, para a execução do estudo.

Segue-se a esta introdução uma análise acerca do setor de transportes nacional, contemplando informações sobre investimentos infraestruturais, consumo energético e emissão de poluentes no Brasil e algumas observações a respeito das políticas de combate as emissões globais de GEE. A seção 3 expõe os dados e os métodos usados durante a elaboração do trabalho, bem como uma breve revisão da literatura nacional e internacional acerca da utilização da metodologia de insumo-produto em avaliações ambientais, com destaque ao método específico empregado nesta pesquisa, a ‘Análise de Decomposição Estrutural’ (SDA), salientando as vantagens decorrentes de sua utilização. A seção 4 apresenta os resultados, que se dividem entre uma análise exploratória das emissões de GEE no Brasil e uma análise dos resultados obtidos com a aplicação da SDA. A seção 5 expõe as considerações finais desta pesquisa.

1.1. Objetivos

Em vista da situação apresentada, o objetivo geral desta pesquisa consiste em analisar e identificar as características estruturais da economia brasileira que mais influenciaram o comportamento das emissões de gases de efeito estufa (GEE), entre os anos de 2010 e 2017.

¹² A base de dados do SEEG é gerada a partir de diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), com base na metodologia dos Inventários Brasileiros de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa do MCTI e em dados provenientes de relatórios governamentais, centros de pesquisa, entidades setoriais, institutos e organizações não governamentais.

¹³ As bases de dados do Balanço Energético Nacional (BEN), assim como do balanço de emissões do Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e do Ministério de Minas e Energia (MME) foram amplamente utilizadas.

1.1.1. Objetivos Específicos

Como objetivos específicos pretende-se: a) Identificar os fatores que fundamentaram as variações no volume emitido de GEE na economia brasileira (em nível de intensidade, tecnologia, estrutura da demanda final, volume da demanda final em relação ao Produto Interno Bruto (PIB), PIB per capita e tamanho da população); b) Determinar os elementos estruturais que mais influenciaram as emissões de GEE em uma perspectiva setorial e c) Evidenciar a participação indireta do setor transportes na emissão de GEE dos outros setores da economia.

1.2. Hipóteses

Conforme apontam Lenzen *et al.* (2013), para projetar e implementar políticas eficazes na redução das emissões futuras, é preciso compreender quais processos econômicos, tecnológicos, sociais e demográficos geraram emissões no passado e também o que induz os países a conterem as emissões de poluentes. Sendo assim, as hipóteses deste estudo referem-se ao comportamento dos fatores estruturais que afetaram as emissões de gases de efeito estufa no Brasil, entre os anos de 2010 a 2017.

Em termos dos componentes estruturais que se associam à demanda final, espera-se que ocorram elevações das emissões de GEE a partir de aumentos populacionais, crescimento no nível do PIB per capita e no volume da demanda final, fator que, de acordo com Sesso *et al.* (2020), pode ser caracterizado como o crescimento econômico. Com relação as variações dos fatores tecnológicos, isto é, as modificações das relações entre os setores econômicos, estes geralmente caracterizam-se como as fontes mais importantes para a redução das emissões em um país, mas dificilmente são capazes de compensar as emissões associadas à demanda final da economia (HOEKSTRA; VAN DE BERGH, 2002).

Com relação aos transportes, uma vez que estes setores apresentam forte ligações com as demais atividades da economia, isto é, caracterizam-se como setores-chave, de acordo com a literatura¹⁴, espera-se que os mesmos atuem indiretamente no nível de emissão de gases de efeito estufa dos demais setores econômicos. De forma que, quando há maior demanda por insumos e/ou produtos dos setores de transporte, há maior emissão de poluentes pelos setores demandantes, sobretudo por causa da matriz de transportes do Brasil, concentrada no transporte terrestre, responsável por elevado nível de poluição.

¹⁴ Guilhoto *et al.* (1994), Firme e Perobelli (2012) e Montoya *et al.* (2015).

2. TRANSPORTES, ENERGIA E EMISSÕES

2.1. Infraestrutura de transportes no Brasil

Os investimentos em infraestrutura são apontados pela literatura econômica como um dos principais responsáveis por promover o crescimento sustentado da economia. Os setores de energia, telecomunicações e transportes ao gerarem externalidades positivas, elevam a produtividade de outros investimentos e proporcionam ganhos de escala e escopo a outras atividades (BERTUSSI; ELLERY JÚNIOR, 2012). Consequentemente, a complexidade inerente à distribuição da atividade produtiva nas esferas funcionais e espaciais, demanda uma participação progressiva do setor de transportes em função do deslocamento necessário dos fluxos de bens finais (produzidos no sistema econômico), bem como de fatores de produção e bens intermediários, fundamentais à produção dos bens finais. O setor de transportes, portanto, representa um dos mais importantes setores da produção intermediária, ao promover um serviço indispensável à operação de todas as unidades produtivas (BARAT, 1969).

Na década de 1950, o modelo brasileiro de desenvolvimento fundamentava-se em uma atuação sólida do setor público junto ao setor privado, ao prover insumos básicos, como matérias-primas, financiamentos de longo prazo e infraestrutura. Dada a sua capacidade de mobilização e coordenação de recursos, o Estado investia em infraestrutura e em indústrias de base, demandantes de altos volumes de capital e longos períodos de amortização de investimentos. Ainda que este padrão de desenvolvimento tenha se esgotado, foi fundamental para estimular a economia e criar uma estrutura industrial completa no país. Contudo, durante a década perdida de 1980, a capacidade de investimento público, incluindo empresas estatais, reduziu-se, o que refreou a expansão e a qualidade dos serviços e bens ofertados nos setores de infraestrutura (MARCHETTI; FERREIRA, 2012).

No começo dos anos 1990, as estatais sofreram um novo colapso na capacidade de financiamento de seus investimentos, devido à promulgação da Constituição Federal em 1988, que extinguiu os tributos vinculados ao setor de infraestrutura. Em função da crise que afligia o setor público, a degradação das fontes usuais de financiamento e a má qualidade dos serviços prestados, um longo processo de privatizações foi iniciado. A Lei de Concessões 9.879/95, que regulamentou o art. 175 da Constituição Federal, constituiu o marco fundamental na reforma setorial e criou condições jurídicas para que concessionárias privadas passassem a operar serviços públicos. Devido à heterogeneidade das atividades, cada segmento obteve um marco regulatório, responsável por delimitar seu funcionamento. Coube ao Estado manter a responsabilidade pela formulação de políticas públicas e de regulação, assim como parte dos

direitos de exploração. A entrada do setor privado realizou-se com a concessão de direito de exploração de determinados serviços e ativos, obtidos, majoritariamente, através de licitações (FERREIRA; MALLIAGROS, 1999; CAMPOS NETO, 2016).

Conforme aponta Campos Neto (2016), a iniciativa privada compartilhou com o setor público a gestão dos ativos e serviços setoriais de infraestrutura. Entretanto, devido à alta diversidade dos segmentos que o compõe, o setor de transportes exige uma visão integrada, tanto regional, quanto modal. Desta forma, o Conselho Nacional de Integração de Políticas de Transporte (CONIT) tornou-se o instrumento responsável pelas diretrizes estratégicas, em relação às políticas setoriais de transportes.

Em 2007, tem início o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), formado por um conjunto de projetos e ações, fundamentais para a retomada e sustento do crescimento da economia brasileira, através de grandes obras de infraestrutura social, urbana, logística e energética no Brasil, contribuindo para o seu desenvolvimento acelerado e sustentável.¹⁵ De acordo com Campos Neto (2016), a seção relativa aos transportes do PAC baseou-se no Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT), o principal suporte para a promoção de políticas públicas e projetos de investimento. O programa em sua segunda versão, PAC 2, iniciado em 2011, objetivou a ampliação e diversificação da malha de transportes, com ações que buscavam a interligação entre os modais.

Conforme aponta Oliveira (2006), o estímulo histórico aos segmentos da indústria automobilística, incentivou a expansão do modal rodoviário em detrimento dos demais e, através de recursos públicos, as rodovias obtiveram aumentos expressivos em suas extensões: de um total de 47.000 km, divididos entre a malha rodoviária federal e estadual em 1945, saltou para 206.543 km na década de 1980. O investimento no modal rodoviário, não somente constituiu prioridade, como quase que a totalidade das inversões no setor de transportes até a década de 1970, acentuando fortemente a concentração da matriz de transportes nacional em torno de um único modal. Em 2018, de acordo com o Boletim Unificado 2019 da CNT, a malha rodoviária brasileira ultrapassou 1,7 milhões de km.

Uma vez que a consecução da ambiciosa transformação estrutural da matriz nacional de transporte de cargas, expressa no PNLT, depende da expansão dos modais ferroviário e hidroviário, para balancear a matriz de transportes, é necessário que se estabeleça uma agenda política e um arcabouço institucional, capaz de incentivar e modernizar estes modais, obtendo recursos para a realização dos investimentos necessários às suas expansões (CAMPOS NETO,

¹⁵ Sobre o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC). Disponível em: <<http://pac.gov.br/sobre-o-pac>>. Acesso em maio de 2020.

2016). A Figura 2, elaborada a partir dos dados do Boletim Unificado 2019 da CNT, ilustra a tendência de queda nos investimentos relativos ao setor de transportes nos últimos quatro anos e a concentração persistente dos recursos investidos no modal rodoviário, em oposição aos demais.

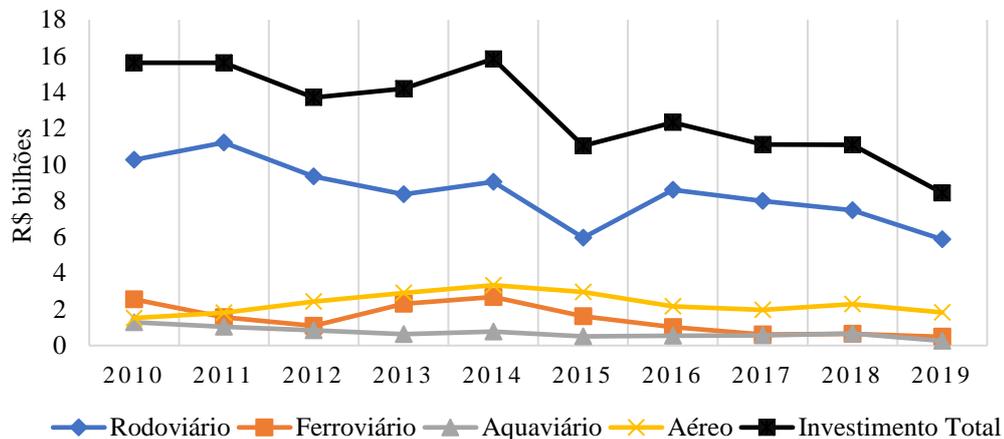


Figura 2. Evolução dos investimentos em infraestrutura de transportes, em R\$ bilhões, entre 2010 e 2019. Adaptado do Boletim Unificado 2019 da Confederação Nacional do Transporte (CNT).

2.2. Consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa do setor de transportes do Brasil

Segundo Ferreira Neto *et al.* (2016), o processo de crescimento econômico de um país ou região relaciona-se fortemente com a disponibilidade de insumos relativos à produção, os quais destacam-se o capital, o trabalho, a terra e a energia e, neste caso, para que haja um desenvolvimento sustentável, é premente que uma determinada região tenha uma orientação a respeito de como será realizado o provimento desses recursos ao longo do tempo, para que não haja excesso ou escassez. Ainda, para que um país ou região obtenha sustentabilidade econômica, é necessário integrar capacidade logística e oferta de energia, com o objetivo de desenvolver sua produção, de forma segura, em condições competitivas e ambientalmente sustentáveis (TOLMASQUIM, 2012).

Conforme apontam Montoya e Pasqual (2015), um ponto de discussão relevante e um grande desafio para o crescimento econômico sustentável é justamente a questão acerca do consumo de energia versus as incertezas de uma maior degradação ambiental. Desta forma, nos últimos anos, as tendências ao uso de energia renovável e limpa foram inseridas no país através, do incentivo da agricultura direcionada para o biocombustível (Proálcool, biodiesel), da fomentação de gasodutos e implementação de um novo marco regulatório direcionado ao meio ambiente, caracterizando a matriz energética brasileira como uma das mais limpas do mundo.

Entretanto, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), empresa pública vinculada ao

MME, destacou em seu Relatório Final de 2019¹⁶, do Balanço Energético Nacional (BEN)¹⁷, que ainda predominam no Brasil as fontes de energia não renováveis. Em 2018, a produção de petróleo, gás natural, carvão vapor, carvão metalúrgico, urânio (U_3O_8) e outras fontes não renováveis representavam 58,2% do total, com destaque para o petróleo (43,7% das fontes não renováveis). Por outro lado, a geração de energia através de produtos da cana-de-açúcar constituía a maior parcela relativa as fontes renováveis (16,6%), seguida pela energia hidráulica (10,9%). A Figura 3 detalha a participação das fontes renováveis e não renováveis de energia primária no Brasil, no ano de 2018.

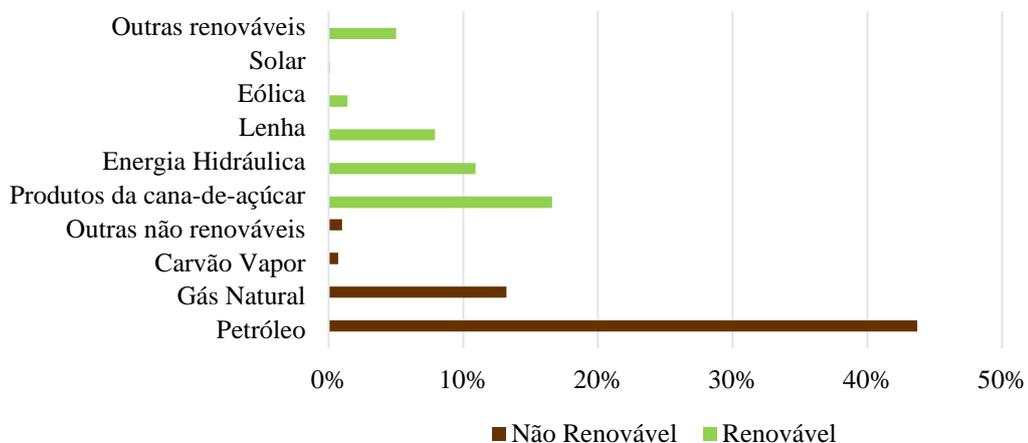


Figura 3. Uso de fontes energéticas no Brasil em 2018 (em %). Elaboração própria a partir de dados do Relatório Unificado de 2019 do Balanço Energético Nacional.

De acordo com Castro (2012), o desenvolvimento sustentável ainda é um conceito amplo e continuamente desafiado pelas demandas da sociedade em termos da viabilização dos meios de transporte e mobilidade, visto que o setor, mesmo no século XXI, permanece esgotando uma grande parcela de recursos não renováveis ao assegurar esses anseios. No Brasil, em 2018, o setor de transportes foi o maior demandante de energia, representando 32,7% do consumo energético no país. Como consequência de ser o maior consumidor de energia, o setor apresentou em 2018, a maior parcela de emissões antrópicas, cerca de 46,3% do total (EPE, 2019).

Conforme aponta Pompermayer (2012), a energia consumida no setor provém majoritariamente de combustíveis fósseis, como o petróleo, característica associada à baixa eficiência energética dos transportes no Brasil, devido a dependência excessiva no modal

¹⁶ Ano base 2018.

¹⁷ O Balanço Energético Nacional (BEN), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), tem por finalidade contabilizar a oferta e demanda de energia do Brasil considerando as atividades de extração de recursos energéticos primários, a conversão destes recursos em formas secundárias, importação e exportação, a distribuição e o uso final de energia. Disponível em <<https://ben.epe.gov.br>>. Acesso em abril de 2020.

rodoviário. A Figura 4 ilustra as emissões geradas pela queima de combustíveis no setor de transportes brasileiro, entre 2010 e 2018. Ainda, apresenta as emissões fugitivas, que de acordo com a Resolução 382/2006 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), são as emissões caracterizadas pelo lançamento difuso na atmosfera de qualquer forma de matéria sólida, líquida ou gasosa, realizado por uma fonte desprovida de dispositivo projetado para dirigir ou controlar seu fluxo.

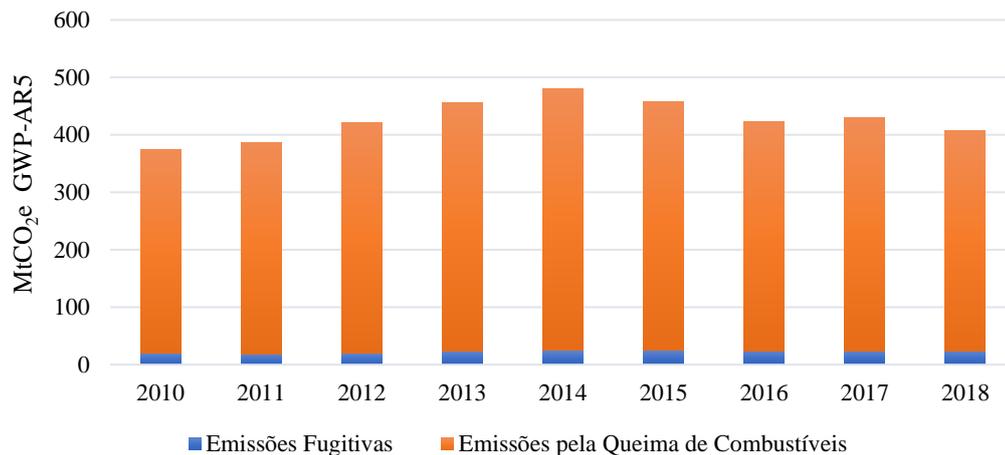


Figura 4. Emissões de gases de efeito estufa do setor de transportes brasileiro, entre 2010 e 2018 (em MtCO₂e GWP-AR5). Elaboração própria a partir de dados do SEEG.

Segundo o Relatório Síntese de 2019 publicado pelo SEEG, houve um forte crescimento das emissões do setor de transportes, a partir do ano de 2009. No que tange ao transporte de passageiros, a elevação das emissões ocorreu por dois fatores: o forte aumento da quilometragem total rodada por automóveis e motocicletas e a queda da participação do consumo de álcool, devido à perda de competitividade do etanol em relação à gasolina nos preços relativos ao consumidor final. Em 2013, esta tendência começou a se reverter e no ano de 2015, as emissões de GEE relativas ao transporte de passageiros apresentaram uma queda, auxiliadas pela recuperação da indústria do etanol. Em relação ao transporte de cargas, os caminhões, a maior fonte poluidora, lançaram 82,6 MtCO₂e na atmosfera em 2018, mais do que todas as termelétricas em operação no país, que emitiram 48,7 MtCO₂e (SEEG, 2019).

2.3. Emissões de gases de efeito estufa e mudanças climáticas globais

O efeito estufa foi observado pela primeira vez na comunidade científica pelo matemático francês Jean-Baptiste Fourier, no ano de 1827. Fourier sugeriu que o efeito estufa mantinha o planeta em uma temperatura mais elevada do que seria normalmente sem este fenômeno natural. Além disso, Fourier indicou que as atividades humanas seriam capazes de alterar o clima natural da Terra. No ano de 1896, Svante Arrhenius, publicou um artigo

relacionando o efeito observado na temperatura média global com o aumento na concentração natural de CO₂ no ar do planeta. Entretanto, apenas a partir da década de 1980, as evidências científicas da interferência humana no clima terrestre aumentaram significativamente, em conjunto com a preocupação da população sobre os assuntos ambientais em nível global, fomentando pressões para que estes assuntos fossem incluídos em agendas políticas (MATTOS, 2001).

De acordo com Magalhães (2013), um dos efeitos mais agressivos da atividade econômica sobre o meio ambiente são as mudanças climáticas globais ocasionadas pela maior emissão de gases de efeito estufa (GEE). A humanidade, através da queima de combustíveis fósseis, foi capaz de transformar a composição da atmosfera, com grandes alterações nas concentrações de CO₂ (dióxido de carbono), CH₄, (metano), N₂O (óxido nitroso), O₃ (ozônio), aerossóis e nuvens, etc. Ademais, conforme aponta Moraes (2005), estes gases promovem as chuvas ácidas e nuvens de poluição urbana, dentre outros males à saúde dos seres humanos, além de acentuarem o processo de aquecimento global. Por meio das atividades humanas, injetam-se anualmente, cerca de 9 milhões de toneladas adicionais de carbono fóssil na atmosfera e a concentração de CO₂ aumentou de 280 partes por milhão (ppm), para 400 ppm¹⁸, desde o início da Primeira Revolução Industrial. Do total emitido na atmosfera terrestre, 27% são absorvidos pelos mares e oceanos, promovendo rápida acidificação, 28% estão sendo dissipados em ecossistemas terrestres e os 45% restantes acumulam-se na atmosfera, elevando a concentração de CO₂ (ARTAXO NETO, 2014).

O setor de transportes e o meio ambiente vivem, segundo Rodrigue (2020), um paradoxo, uma vez que o transporte acarreta benefícios socioeconômicos substanciais, mas, ao mesmo tempo, impacta os sistemas ambientais. De um lado, as atividades de transporte atendem às demandas crescentes de mobilidade de passageiros e cargas, enquanto, de outro, estas atividades associam-se a danos ao meio ambiente. Como consequência do aumento da mobilidade de passageiros e de cargas, o setor de transportes caracteriza-se como expressa fonte de emissão de poluentes e seus múltiplos impactos ambientais dividem-se em três categorias: a) os impactos diretos, que ocorrem como consequência imediata das atividades de transporte no meio ambiente; b) os impactos indiretos que normalmente apresentam repercussões maiores

¹⁸ Quatrocentas partes por milhão (ou 400 ppm), significam que, em cada milhão de moléculas de ar, há quatrocentas de dióxido de carbono (CO₂). Nesse ritmo de crescimento, a concentração de CO₂ terá dobrado em relação à era pré-industrial antes do final do século XXI. Modelos climáticos indicam que, com duas vezes mais CO₂ no ar, o aumento da temperatura global seria de aproximadamente 3°C, valor superior ao limite considerado 'seguro'. Disponível em: <<http://blog.observatoriodoclima.eco.br/?p=2376#sthash.UjgwZGj7.dpbs>>. Acesso em maio de 2020.

do que os impactos diretos, mas as relações envolvidas costumam ser mais difíceis de estabelecer e c) os impactos cumulativos, que consideram os efeitos dos impactos diretos e indiretos em um ecossistema e que muitas vezes são imprevisíveis, como as mudanças climáticas, cujas causas e consequências complexas, são resultado de diversos fatores, nos quais o transporte desempenha um papel importante.

Em relatório divulgado em 2018, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), destacou que um aquecimento global de 1,5 °C na Temperatura Média Global da Superfície (GMST), implicaria temperaturas médias mais altas em comparação com os tempos pré-industriais, tanto em terra como nos oceanos. Além disso, um aquecimento global de 2,0 °C versus 1,5 °C resultaria em fortes diferenças nas temperaturas médias em quase todos os locais. O contraste observado ‘terra-mar’ no aquecimento é importante, pois reflete mudanças particularmente grandes na temperatura do solo. O maior aumento da temperatura média ocorreria em altas latitudes do hemisfério norte, conforme ilustrado pela Figura 5. Segundo o IPCC, as projeções para precipitação são mais incertas, mas destacam aumentos robustos na precipitação média em altas latitudes do hemisfério norte a 1,5 °C de aquecimento global, bem como a 2 °C, em comparação às condições anteriores à Revolução Industrial.

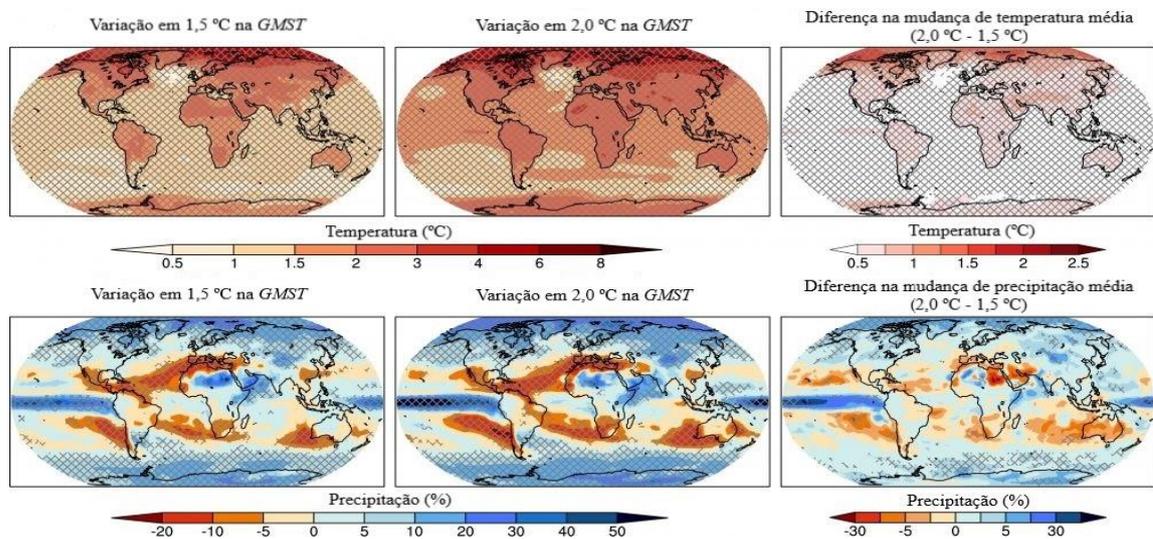


Figura 5. Alterações projetadas nas temperaturas e precipitações médias, em comparação com o período pré-industrial e a diferença entre (1,5 °C e 2,0 °C), a partir do aquecimento global. Adaptado do Relatório *Global Warming of 1.5 °C* do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2018).

Conforme apontam Souza e Corazza (2017), as mudanças climáticas apresentam características que distinguem a problemática ambiental atual, uma vez que as dificuldades enfrentadas são sistêmicas, unidirecionais, retroalimentadas, com múltiplas fontes, apresentam consequências cumulativas e ultrapassam as fronteiras entre os países. Neste sentido, a busca da solução do problema na forma de negociações internacionais é estabelecida pela constituição

de acordos que precisam ser assinados por delegados e/ou chefes de Estado nas Conferências das Partes¹⁹. A concepção destes acordos ambientais instituiu a definição de regras e procedimentos, em torno das decisões a serem aderidas, onde convergem as expectativas dos agentes que as negociam e que são, muitas vezes distintas e até mesmo conflituosas. Held e Roger (2018) caracterizam os acordos ambientais realizados nas últimas duas décadas, como ‘modelos básicos de governança climática global’, que os países adotaram sucessivamente desde a assinatura da UNFCCC²⁰, na “Cúpula da Terra” do Rio em 1992: o Protocolo de Quioto (1997), o Acordo de Copenhague (2009) e o Acordo de Paris (2015).

O Protocolo de Kyoto pode ser considerado a primeira abordagem sistemática do regime climático para lidar com o problema do aquecimento global, onde uma meta geral de redução de GEE foi estabelecida (5% abaixo dos níveis de 1990, durante o primeiro período de compromisso de 2008–2012), as metas individuais de redução foram negociadas e, uma vez definidas, as partes eram legalmente obrigadas a cumprir seus compromissos. Além disso, alguma flexibilidade foi permitida, uma vez que o Protocolo de Quioto não prescreveu uma abordagem doméstica específica, porém os signatários eram responsáveis, sob a lei internacional a atingir os resultados. Durante a realização da conferência em Quioto, ficou claro que apesar das mudanças climáticas serem um problema de âmbito global, as contribuições relativas de cada país em termos de emissão de poluentes são distintas. Neste sentido, um dos princípios fundamentais do Protocolo foi o da ‘responsabilidade comum, mas diferenciada’²¹ (SOUZA; CORAZZA, 2017, HELD; ROGER, 2018).

A COP 15 em Copenhague, iniciou um movimento em direção a um modelo de governança climática global que operaria, no fundo, de acordo com uma lógica de governança estritamente voluntária e ampliaria a responsabilidades dos países emergentes, como o Brasil, a Índia e a China. As partes elencariam ações que estariam dispostas a tomar (que teoricamente, seriam monitoradas e verificadas), entretanto muitas promessas foram vagamente definidas. Uma das realizações mais positivas do Acordo foi a meta de longo prazo, limitando o aumento

¹⁹ A Conferência das Partes (COP) é o órgão supremo da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), que reúne anualmente os países Parte em conferências mundiais. Suas decisões, coletivas e consensuais, só podem ser tomadas se forem aceitas unanimemente pelas Partes, sendo soberanas e valendo para todos os países signatários. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/conferencia-das-partes.html>> . Acesso em julho de 2020.

²⁰“*United Nations Framework Convention on Climate Change*” – (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima), assinada em 1992, estabeleceu objetivos globais relacionados às mudanças climáticas, além de fornecer uma plataforma para futuras negociações (HELD; ROGER, 2018).

²¹ Conforme aponta Brunnée e Streck (2013), o princípio da responsabilidade comum, mas diferenciada modera a premissa de direitos e obrigações iguais para atores soberanos nocionalmente iguais e permite uma abordagem distinta dos esforços ambientais internacionais, que reconhece as profundas desigualdades existentes e as diferentes prioridades, entre os países desenvolvidos e em desenvolvimento.

das temperaturas globais em 2° C acima dos níveis pré-industriais. Contudo, nada no acordo garantia que esta meta seria alcançada e não haveria reais consequências em caso de insucesso. O Acordo de Copenhague não constituiu um tratado internacional, como Quioto, mas uma declaração política de intenções ou aspirações, que dependia quase inteiramente das ações “de baixo para cima” dos países (SOUZA; CORAZZA, 2017, HELD; ROGER, 2018).

De acordo com Held e Roger (2018), o Acordo de Paris combinou características das duas abordagens anteriores e, em certos casos, avançou sobre elas em aspectos importantes. O acordo consagrou a meta de 2° C acima dos níveis pré-industriais, proposta na COP 15, acrescentando que os países terão como objetivo não apenas atingir os 2° C, mas tentar manter as temperaturas ‘bem abaixo dessa meta’, incluindo um objetivo ambicioso de 1,5° C. Ainda, no cerne do Acordo de Paris encontram-se as contribuições determinadas nacionalmente, ou seja, as ‘promessas’ que as países buscam alcançar. O acordo, entretanto, não obriga os signatários a cumprirem suas metas, nem os penaliza caso não as cumpram, diferenciando fortemente Paris do Protocolo de Quioto e indo além de Copenhague, ao estabelecer compromissos dentro de uma estrutura juridicamente vinculativa, que cria em torno deles uma série de obrigações processuais relevantes.

O Brasil possui uma reconhecida atuação nas negociações climáticas, sediando a Rio-92, participando do Protocolo de Quioto, ratificando diversos acordos internacionais, anunciando metas voluntárias durante a COP 15, em Copenhague e defendendo a responsabilidade histórica dos países desenvolvidos. Contudo, nos últimos anos passou a reconhecer a necessidade de também criar e implementar suas políticas de mitigação. Durante a Conferência de Paris, o Brasil se comprometeu a reduzir o desmatamento, privilegiar as energias renováveis e o uso de biocombustíveis, a partir de metas a serem alcançadas em todos os setores emissores de GEE, principalmente agricultura, energia e mudança do uso da terra (BARBIERI *et al.*; 2018).

3. METODOLOGIA

3.1. Base de Dados

Com o intuito de atingir os objetivos propostos, utilizar-se-ão dados coletados das matrizes de insumo-produto do Brasil relativos aos anos de 2010 e 2017, compostas por 68 setores e 128 produtos. Estas matrizes foram estimadas de acordo com o método proposto por Guilhoto e Sesse Filho (2005, 2010), baseadas no Sistema de Contas Nacionais (SCN) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), divulgado em novembro de 2019. Tais matrizes encontram-se disponíveis no site do Núcleo de Economia Regional e Urbana da Universidade de São Paulo (NEREUS). A relação de setores e produtos das matrizes de insumo-produto utilizadas neste trabalho, podem ser conferidas nos Apêndices A e B.

Também serão utilizados os dados do Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), em sua versão 8.0, acerca das emissões de GEE relacionadas ao consumo de energia no Brasil, entre 2010 e 2017. Estas estimativas são geradas de acordo com diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), conforme metodologia dos Inventários Brasileiros de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa, estruturados pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e através de dados provenientes de relatórios governamentais, centros de pesquisa, institutos, entidades setoriais e organizações não governamentais.

3.2. Deflacionamento

Conforme apontam Miller e Blair (2009), ao comparar dados de matrizes insumo-produto de períodos distintos, é necessário diferenciar as mudanças originadas a partir de preços, daquelas atribuídas a outros tipos de fontes. Sendo assim, é necessário converter os valores correntes das tabelas para valores constantes de um determinado ‘ano-base’, de forma que seja possível identificar as mudanças ‘reais’ ocorridas no período analisado. Este trabalho utiliza como método de deflacionamento, a “*chaining technique*” proposta por De Haan (2001) e utilizada recentemente em estudos realizados por Xu e Dietzenbacher (2014) e Cansino *et al.* (2016).

A “*chaining technique*” é utilizada para eliminar os efeitos de preço a fim de obter os efeitos de fontes físicas. Por exemplo, subtraindo a produção de 2010 (a preços correntes) da produção de 2011 (a preços do ano anterior), obtém-se o crescimento do volume da produção entre 2010 e 2011, porque os bens e serviços são expressos em preços de 2010. Isso é feito usando os índices de preços de 2011 (com 2010 = 100). Da mesma forma, o uso da produção

em preços de 2011 fornece o crescimento de volume entre 2011 e 2012 e a adição de ambos os aumentos de volume resulta na variação de volume entre 2010 e 2012.

Enquanto as tabelas em preços constantes expressam todos os dados em preços do mesmo ano-base (2010, neste exemplo), a “*chaining technique*” utiliza anos-base que mudam anualmente. Como os dados a preços constantes usam o mesmo ano-base, sua precisão geralmente diminui à medida que nos afastamos do ano-base, ao passo que o uso de uma série de tabelas anuais em preços do ano anterior implica que a cesta de bens (que é usada para determinar o índice de preços) seja atualizada a cada ano. O uso da “*chaining technique*” evita, portanto, o acúmulo de vieses (XU; DIETZENBACHER, 2014).

Os valores correntes da demanda intermediária, da demanda final e do valor bruto da produção são deflacionados a partir de um índice de preços setorial, construído a partir da Tabela de Recursos e Usos do IBGE. Conforme aponta Figueiredo (2015), ao considerar 2010 como o ano-base (ou seja, 2010 = 100), o índice pode ser definido genericamente como:

$$Ix_{2010} = 100 \quad (3.1)$$

$$x_t = Ix_{t-1} * \frac{Px_t * Qx_t}{Px_{t-1} * Qx_t}$$

Em que $x =$ setor 1, ... , 68; $t = 2010, \dots, 2017$; $Px_t * Qx_t$ é o valor da produção em t , a preços correntes e $Px_{t-1} * Qx_t$ é o valor da produção em t , a preços do ano anterior. Para que todos os valores sejam expressos em preços do ano mais recente, é necessário que se converta o ano-base de 2010 para 2017, de forma que:

$$\pi_x^t = (Ix_{2017}/Ix_t) \quad (3.2)$$

Onde π_x^t equivale ao índice de preços dos 68 setores da economia brasileira, em que $x =$ setor 1, ... , setor 68 e $t = 2010, \dots, 2017$. Em notação matricial é possível expressar os índices calculados da seguinte maneira:

$$\pi_t = [\pi_1^t \pi_2^t \dots \pi_{68}^t] \quad (3.3)$$

Sendo assim, a demanda intermediária Z^b , a demanda final f^b e o valor bruto da produção X^b podem ser deflacionados por:

$$Z^b = (\hat{\pi}^t)^{-1} Z^t \quad (3.4)$$

$$f^b = (\hat{\pi}^t)^{-1} f^t \quad (3.5)$$

$$X^b = (\hat{\pi}^t)^{-1}X^t \quad (3.6)$$

3.3. Agregação e Compatibilização

As matrizes de insumo-produto do Brasil relativas aos anos de 2010 a 2017, estimadas por Guilhoto e Sesso Filho (2005, 2010), apresentam uma desagregação setorial para 68 atividades econômicas e 128 produtos. Dada a necessidade de compatibilizar os dados das matrizes de insumo-produto com os dados referentes às emissões do SEEG, uma nova agregação foi realizada, possibilitando a obtenção de matrizes de consumo intermediário (16x16), para os anos de 2010 e 2017. A Tabela 1 apresenta os dezesseis setores da nova agregação.

Tabela 1. Setores econômicos considerados na análise.

Setores Econômicos	
1	Agropecuária
2	Extrativa Mineral
3	Minerais Não Metálicos
4	Siderurgia
5	Metais Não Ferrosos e Outros Metais
6	Papel e Celulose
7	Química
8	Têxtil
9	Alimentos e Bebidas
10	Comércio e Serviços
11	Administração Pública
12	Outras Indústrias
13	Energético
14	Transporte Terrestre
15	Transporte Aéreo
16	Transporte Aquaviário

Fonte: Elaboração própria.

Dos 68 setores originais, 3 setores passaram a constituir o setor 'Energético' (refino de petróleo e coqueiras, fabricação de biocombustíveis e energia elétrica, gás natural e outras utilidades). Ainda, o setor de transportes foi mantido desagregado para captar o efeito dos modais sobre os níveis de emissões de GEE. Maiores detalhes acerca da agregação e compatibilização entre as duas bases de dados podem ser conferidos no **Apêndice C**.

3.4. Análise de Insumo-Produto

O referencial analítico utilizado neste trabalho é fundamentado na análise de insumo-produto. Leontief, responsável pelo artigo seminal referente ao método, o define como: “[...] uma base empírica do estudo da interdependência entre as diferentes partes de nossa economia nacional, com base na teoria do equilíbrio econômico geral.” (LEONTIEF, 1936, p. 116, tradução nossa)²².

Um modelo de insumo-produto é construído a partir de dados observados para uma área econômica específica – um país, uma região, um estado, etc. Os dados correspondem aos fluxos de produtos de cada um dos setores vendedores, para cada um dos setores compradores. Esses fluxos (ou transações interindustriais) são medidos em um horizonte temporal específico (geralmente um ano) e em termos monetários (MILLER; BLAIR, 2009).

Um conjunto essencial de dados para um modelo de insumo-produto são os valores monetários das transações entre os pares de setores (de cada setor i para cada setor j). Estes são normalmente definidos como z_{ij} . A demanda do setor j por insumos de outro setor, durante certo período, será relativa à quantidade de bens produzidos pelo setor j no mesmo período. Além disso, em qualquer país existem vendas a compradores exógenos aos setores industriais, como por exemplo, vendas às famílias, ao governo e ao comércio exterior. As demandas dessas unidades exógenas geralmente não são relacionadas à quantidade produzida e tendem a ser utilizadas como bens (e não como um insumo dentro de um processo produtivo) e caracterizam a demanda final (MILLER; BLAIR, 2009).

De acordo com Miller e Blair (2009), se uma economia pode ser definida por n setores e se é possível denotarmos por x_i a produção total do setor i e por f_i a demanda final total do produto do setor i , então pode-se definir uma simples equação explicitando a maneira pela qual o setor i distribui seu produto através de vendas para outros setores e para a demanda final, como ilustrado pela equação (3.1).

$$x_i = z_{i1} + \dots + z_{ij} + \dots + z_{in} + f_i = \sum_{j=1}^n z_{ij} + f_i \quad (3.7)$$

Os termos z_{ij} representam as vendas interindustriais do setor i para todos os setores j (incluindo a si próprio, quando $j = i$). Generalizando para os n setores de uma economia:

$$x_1 = z_{11} + \dots + z_{1j} + \dots + z_{1n} + f_1$$

²² “[...] an empirical background for the study of the interdependence between the different parts of our national economy on the basis of the theory of general economic equilibrium.”

$$\begin{aligned}
& \vdots \\
x_i &= z_{i1} + \cdots + z_{ij} + \cdots + z_{in} + f_i \\
& \vdots \\
x_n &= z_{n1} + \cdots + z_{nj} + \cdots + z_{nn} + f_n
\end{aligned} \tag{3.8}$$

Onde:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, Z = \begin{bmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & \cdots & z_{nn} \end{bmatrix} e f = \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

Com essa notação, as relações apresentadas em (3.8) acerca da distribuição das vendas de cada setor podem ser expressas em notação matricial:

$$x = Zi + f \tag{3.10}$$

Onde i^{23} representa um vetor coluna unitário (de dimensão apropriada, aqui n). Conforme apontam Miller e Blair (2009), as informações contidas na j -ésima coluna de Z indicam as compras efetuadas por j dos demais setores da economia. A coluna expressa em (3.11) representa, portanto, as fontes e as magnitudes dos insumos do setor j .

$$\begin{bmatrix} z_{1j} \\ \vdots \\ z_{ij} \\ \vdots \\ z_{nj} \end{bmatrix} \tag{3.11}$$

Ao dedicar-se à produção, um setor também adquire outros insumos, como mão-de-obra e capital e utiliza itens de estoque. Todos esses insumos em conjunto, representados em valores monetários como a remuneração ao seu uso, são denominados valor adicionado do setor j . Ainda, bens importados também podem ser comprados para serem usados como insumos pelo setor j . Estes insumos e importações são frequentemente agrupados como compras, enquanto os elementos do lado direito da relação (3.8) registram os insumos intermediários. Como cada equação em (3.8) inclui a possibilidade de um setor comprar parte de sua própria produção, os insumos interindustriais também incluem transações intra-industriais (MILLER; BLAIR, 2009).

²³ De acordo com Miller e Blair (2009), i é conhecido como “vetor soma”. Uma observação importante é que a pós-multiplicação de uma matriz por i cria um vetor coluna cujos elementos são somas da linha da matriz. Similarmente, i' é um vetor linha unitário e a pré-multiplicação de uma matriz por i' cria um vetor linha cujos elementos são somas das colunas da matriz.

As magnitudes dos fluxos interindustriais podem ser registradas em uma tabela. Tendo por finalidade a exemplificação, a Figura 6 apresenta uma representação esquemática das relações fundamentais de uma tabela de insumo-produto, com dois setores e uma única região. As linhas da tabela de insumo-produto representam as vendas (em valores monetários) da produção de cada setor da economia, enquanto as colunas representam as compras e pagamentos (em valores monetários), realizados por cada setor da economia e por cada um dos componentes da demanda final (MILLER; BLAIR; 2009; VALE, 2014).

		<i>Compras (j)</i>						Demanda Total	
		Demanda Intermediária		Demanda Final					
<i>Vendas (i)</i>	<i>Setores</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>C</i>	<i>I</i>	<i>G</i>	<i>E_x</i>	<i>DT</i>	
		<i>1</i>	z_{11}	z_{12}	c_1	i_1	g_1	e_{x1}	x_1
		<i>2</i>	z_{21}	z_{22}	c_2	i_2	g_2	e_{x2}	x_2
<i>Importações</i>		m_1	m_2	m_c	m_i	m_g	m_{ex}		
<i>Impostos</i>		t_1	t_2	t_c	t_i	t_g	t_{ex}		
<i>Valor Adicionado</i>		va_1	va_2						
<i>Valor Bruto da Produção</i>		x_1	x_2						

Figura 6. Representação esquemática das relações fundamentais de uma tabela de insumo-produto, com dois setores e uma única região. Adaptado de Miller e Blair (2009), Guilhoto (2011) e Vale (2014).

Conforme apontam Miller e Blair (2009) e Vale (2014), sob a perspectiva das linhas, as células z_{11} e z_{22} representam as vendas intra-industriais dos setores 1 e 2, ao descreverem as vendas de cada setor para si mesmo e as células z_{12} e z_{21} correspondem às vendas interindustriais das respectivas atividades produtivas. Sendo assim, estas células expressam as vendas dos insumos intermediários dos setores 1 e 2. Os elementos que compõem o vetor de demanda final, para os setores 1 e 2, equivalem ao consumo das famílias (c_1 , c_2), aos investimentos (i_1 , i_2), aos gastos do governo (g_1 , g_2) e às exportações (e_{x1} , e_{x2}) e neste caso, podem ser expressas como em (3.12) e (3.13):

$$f_1 = c_1 + i_1 + g_1 + e_{x1} \quad (3.12)$$

$$f_2 = c_2 + i_2 + g_2 + e_{x2} \quad (3.13)$$

Do ponto de vista das colunas, as células z_{11} e z_{22} descrevem às compras efetuadas intra-indústria e z_{12} e z_{21} representam às compras interindustriais. Ademais, (c_1 , c_2), (i_1 , i_2), (g_1 , g_2) e (e_{x1} , e_{x2}) correspondem às compras de cada componente da demanda final: consumo das famílias, aos investimentos, aos gastos do governo e às exportações dos setores 1 e 2,

respectivamente. As células m_1 e m_2 caracterizam os pagamentos de importações de bens e serviços realizados pelos setores 1 e 2 e pelos componentes da demanda final (m_c , m_i , m_g e m_{ex}). Adicionalmente, t_1 e t_2 exprimem os pagamentos de impostos por parte da demanda intermediária e t_c , t_i , t_g e t_{ex} aos pagamentos de impostos por parte da demanda final. Ainda, as células va_1 e va_2 equivalem ao pagamento dos fatores de produção (aluguéis, juros, lucros e salários), relativos aos setores 1 e 2. Por fim, a produção total de cada setor (x_1 , x_2) e a demanda total (x_1 , x_2) são, por definição contábil, iguais (GUILHOTO, 2011; VALE, 2014).

Segundo Miller e Blair (2009), uma suposição fundamental, da análise de insumo-produto é a de que o fluxo intersetorial que flui de i para j , durante certo período de tempo, depende inteiramente da produção total do setor j , no mesmo período. A partir de z_{ij} e x_j , é possível mensurar, conforme indicado pela equação (3.14), os coeficientes técnicos de produção, a_{ij} , os quais estabelecem o requerimento direto de insumo do setor i , necessário para a produção de uma unidade monetária do setor j .

$$a_{ij} = \frac{z_{ij}}{x_j} \quad (3.14)$$

Uma vez que se conhecem os coeficientes técnicos, as equações lineares expressas em (3.8) podem ser reescritas, substituindo os fluxos z_{ij} por $a_{ij}x_j$:

$$\begin{aligned} x_1 &= a_{11}x_1 + \dots + a_{1i}x_i + \dots + a_{1n}x_n + f_1 \\ &\vdots \\ x_i &= a_{i1}x_1 + \dots + a_{ii}x_i + \dots + a_{in}x_n + f_i \\ &\vdots \\ x_n &= a_{n1}x_1 + \dots + a_{ni}x_i + \dots + a_{nn}x_n + f_n \end{aligned} \quad (3.15)$$

Estas equações, conforme destacado por Miller e Blair (2009), tornam explícitas as dependências dos fluxos interindustriais nos resultados totais de cada setor produtivo. Em (3.15), f_1, \dots, f_n são valores definidos, os coeficientes técnicos a_{ij} são conhecidos e os termos x_1, \dots, x_n precisam ser determinados. Ao se rearranjar os termos das equações, obtém-se:

$$\begin{aligned} (1 - a_{11})x_1 - \dots - a_{1i}x_i - \dots - a_{1n}x_n &= f_1 \\ &\vdots \\ -a_{i1}x_1 - \dots + (1 - a_{ii})x_i - \dots - a_{in}x_n &= f_i \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} & \vdots \\ & -a_{n1}x_1 - \dots - a_{ni}x_i - \dots + (1 - a_{nn})x_n = f_n \end{aligned}$$

Seja I uma matriz identidade²⁴ nxn , então:

$$(I - A) = \begin{bmatrix} (1 - a_{11}) & -a_{12} & \dots & -a_{1n} \\ -a_{21} & (1 - a_{22}) & \dots & -a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{n1} & -a_{n2} & \dots & (1 - a_{nn}) \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Onde, o sistema de equações nxn demonstrado em (3.16), pode ser definido em notação matricial como:

$$(I - A)x = f \quad (3.18)$$

Através da álgebra matricial, obtém-se a solução de (3.18):

$$x = (I - A)^{-1}f = Lf \quad (3.19)$$

Em que, $(I - A)^{-1}$ é conhecida como a Matriz Inversa de Leontief ou Matriz de Requerimentos Totais (MILLER; BLAIR, 2009). Em maiores detalhes, as equações sintetizadas em (3.19) são:

$$\begin{aligned} x_1 &= l_{11}f_1 + \dots + l_{1j}f_j + \dots + l_{1n}f_n \\ & \vdots \\ x_i &= l_{i1}f_1 + \dots + l_{ij}f_j + \dots + l_{in}f_n \\ & \vdots \\ x_n &= l_{n1}f_1 + \dots + l_{nj}f_j + \dots + l_{nn}f_n \end{aligned} \quad (3.20)$$

A Inversa de Leontief, portanto, capta os requerimentos totais (diretos e indiretos) de produção, onde cada coeficiente corresponde às requisições diretas e indiretas de insumos do setor i necessários para produzir uma unidade monetária de demanda final do setor j (GUILHOTO, 2011).

²⁴ A matriz identidade apresenta todos os elementos da diagonal principal iguais à unidade.

3.4.1. Modelagem das emissões de Gases de Efeito Estufa

Uma abordagem direta para contabilizar a geração de poluição associada às atividades intersetoriais, de acordo com Miller e Blair (2009), consiste em assumir um vetor diagonalizado de produção de poluição ou coeficientes de impactos diretos, $\widehat{D} = [d_{kj}]$, onde cada elemento deste vetor indica a quantidade de poluente do tipo k gerado por unidade monetária de produto do setor j . Desta forma, \widehat{D} exprime os coeficientes de intensidade de emissão (CIE). Sendo assim, o nível de poluição associado a um vetor de produção total pode ser expresso como:

$$c = \widehat{D}x \quad (3.21)$$

Em que, c é o vetor ($n \times 1$) dos níveis de poluição. Portanto, adicionando ao modelo tradicional de Leontief, $x = Lf$, onde $L = (I - A)^{-1}$, pode-se calcular c em função da demanda final, ou seja, a poluição total de cada tipo, gerada pela economia direta e indiretamente, para atender a essa demanda final:

$$c = [\widehat{D}L]f = \widehat{D}(I - A)^{-1}f \quad (3.22)$$

Onde, a quantidade entre colchetes pode ser entendida como uma matriz de coeficientes de impacto ambiental (CIA) e, cada elemento contido na mesma expressa o impacto total da poluição gerado por unidade monetária de demanda final apresentada à economia.

3.4.2. Análise de Decomposição Estrutural (SDA)

De acordo com Miller e Blair (2009), quando existem dois ou mais conjuntos de dados de insumo-produto, para uma economia, a análise de decomposição estrutural pode ser empregada com o intuito de desagregar a quantidade total de mudança, em algum aspecto dessa economia, em contribuições determinadas por seus vários componentes. Para se ter uma ideia geral do método, ilustra-se a seguir a decomposição das mudanças em termos do produto (Δx), indicada em Miller e Blair (2009).

Supondo que existam dois períodos de tempo distintos, para os quais os dados de insumo-produto encontram-se disponíveis, usam-se os subscritos 0 e 1 para indicar estes diferentes anos. A equação (3.23) representa a produção para cada um dos períodos.

$$x^1 = L^1 f^1 \quad \text{e} \quad x^0 = L^0 f^0 \quad (3.23)$$

Onde, f^t é o vetor da demanda final no período t e L^t representa a matriz inversa de Leontief no período t , ou seja, $L^t = (I - A^t)^{-1}$. Sendo assim, a mudança na produção entre os anos 0 e 1 pode ser expressa da seguinte forma:

$$\Delta x = x^1 - x^0 = L^1 f^1 - L^0 f^0 \quad (3.24)$$

Conforme apontam Miller e Blair (2009), a tarefa consiste em decompor a mudança total na produção em termos de seus componentes, o que, neste ponto, significa atribuir à (Δx) às variações em L ($\Delta L = L^1 - L^0$) e variações em f ($\Delta f = f^1 - f^0$). Utilizando apenas valores do ano 1 para L e somente valores do ano 0 para f e substituindo L^0 por $(L^1 - \Delta L)$ e f^1 por $(f^0 + \Delta f)$ na equação (3.24), os autores obtiveram:

$$\Delta x = L^1(f^0 + \Delta f) - (L^1 - \Delta L)f^0 = (\Delta L)f^0 + L^1(\Delta f) \quad (3.25)$$

A expressão (3.25) produz uma decomposição direta da mudança total na produção (Δx) , que pode ser atribuída às mudanças na tecnologia, isto é, em (ΔL) , ponderada pela demanda final do ano 0 (f^0) e às mudanças na demanda final, ou seja, em (Δf) , ponderada pela tecnologia do ano 1 (L^1). De maneira alternativa, utilizando somente os valores do período 0 para L e apenas valores do período 1 para f , o que significa substituir L^1 por $(L^0 + \Delta L)$ e f^0 por $(f^1 - \Delta f)$, a expressão (3.24) torna-se:

$$\Delta x = (L^0 + \Delta L)f^1 - L^0(f^1 - \Delta f) = (\Delta L)f^1 + L^0(\Delta f) \quad (3.26)$$

Neste caso, a mudança tecnológica (ΔL) é ponderada pela demanda final do ano 1 (f^1) e mudança relativa à demanda final (Δf) é ponderada pela tecnologia do ano 0 (L^0). Ambas as alternativas apresentadas em (3.25) e (3.26) são ‘matematicamente corretas’, dada a expressão (3.24) e as definições $\Delta L = (L^1 - L^0)$ e $\Delta f = (f^1 - f^0)$, contudo, as contribuições individuais das mudanças tecnológicas e das demandas finais diferirão em (3.25) e (3.26), exceto nos casos em que não haja alterações na tecnologia, nos níveis de demanda final, ou em ambos os casos (MILLER; BLAIR, 2009).

Novas expressões surgem, caso apenas valores referentes ao período 0 ou período 1 sejam utilizados para ponderar ambos os termos de mudanças. Se somente valores do período 0 forem utilizados, então L^1 e f^1 serão substituídos por $(L^0 + \Delta L)$ e $(f^0 + \Delta f)$, respectivamente. A expressão (3.24) torna-se então:

$$\Delta x = (L^0 + \Delta L)(f^0 + \Delta f) - L^0 f^0 = (\Delta L)f^0 + L^0(\Delta f) + (\Delta L)(\Delta f) \quad (3.27)$$

No caso da expressão (3.27), ambas as mudanças na tecnologia e na demanda final são ponderadas apenas por valores do período 0. Ademais, a expressão apresenta um termo de interação adicional que, diferentemente dos termos anteriores, não suscita qualquer interpretação intuitiva. Utilizando apenas valores do período 1, a equação (3.24) pode ser reescrita da seguinte forma e, novamente há a presença do termo de interação.

$$\Delta x = L^1 f^1 - (L^1 - \Delta L)(f^1 - \Delta f) = (\Delta L)f^1 + L^1(\Delta f) - (\Delta L)(\Delta f) \quad (3.28)$$

De acordo com Miller e Blair (2009), vários autores utilizaram as quatro alternativas, anteriormente citadas, entretanto, Dietzenbacher e Los (1998) examinaram uma grande variedade de possibilidades de decomposição e concluíram que a utilização de uma média dos resultados de (3.25) e (3.26) constituiria uma abordagem aceitável. Desta forma, tem-se:

$$2\Delta x = (\Delta L)f^0 + L^1(\Delta f) + (\Delta L)f^1 + L^0(\Delta f) \quad (3.29)$$

E, portanto:

$$\Delta x = \left(\frac{1}{2}\right) (\Delta L)(f^0 + f^1) + \left(\frac{1}{2}\right) (L^0 + L^1)(\Delta f) \quad (3.30)$$

Sendo assim, o primeiro termo do lado direito da expressão (3.30) é ponderado pela média das demandas finais, e o segundo termo, pela média da tecnologia dos períodos 0 e 1 (MILLER; BLAIR, 2009; GAZONATO, 2016).

3.4.2.1. SDA das emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil

A partir da equação (3.22), que define o modelo de insumo-produto que engloba às emissões de GEE, pode-se definir c , um vetor ($n \times 1$) dos lançamentos de GEE realizados por toda a economia, \widehat{D} como um vetor diagonalizado ($n \times n$), que ilustra os coeficientes de intensidade de emissões por setor (CIE) e x como um vetor ($n \times 1$) que compreende o produto setorial. Tem-se, portanto:

$$c = \widehat{D}x \quad (3.31)$$

Uma vez que o produto setorial pode ser entendido como uma proporção da demanda final, é possível reescrever a equação (3.31) como:

$$c = \widehat{D}Lf \quad (3.32)$$

Em relação à demanda final, esta pode ser decomposta em estrutura da demanda final, volume da demanda final em relação ao PIB, nível do PIB per capita e população, de forma que:

$$f = f^s f^v y p \quad (3.33)$$

Conforme aponta Wachsmann (2005), f^s é uma matriz ($n \times d$), com d categorias da demanda final. No presente estudo, $d = 5$: consumo das famílias, consumo da administração pública, formação bruta de capital fixo (FBCF), variação de estoques e exportações. A matriz f^s relaciona as parcelas dos setores econômicos em relação aos níveis absolutos de cada categoria da demanda final: ($f_{i,h}^s = f_{i,h}/f_h$), onde h indica as categorias que variam de 1 a d e $f_h = \sum_{i=1}^n f_{i,h}$. Ademais, f^v é um vetor coluna que indica o volume da demanda final em relação ao PIB, y é um escalar do PIB per capita e p é um escalar de população. Ao substituir (3.33) em (3.32), obtém-se:

$$c = \widehat{D} L f^s f^v y p \quad (3.34)$$

Uma possível decomposição desta equação pode ser realizada da seguinte forma:

$$\Delta c = (\Delta \widehat{D} + \Delta L + \Delta f^s + \Delta f^v + \Delta y + \Delta p) \quad (3.35)$$

A equação (3.35) pode ser definida como resultado de mudanças na intensidade das emissões setoriais (efeito intensidade); nas variações nos coeficientes técnicos (efeito tecnológico); em alterações nas parcelas setoriais dos componentes da demanda final: consumo das famílias, consumo da administração pública, formação bruta de capital fixo, variação de estoques e exportações (efeito estrutura da demanda final); em mudanças no volume da demanda final em relação ao PIB (efeito volume da demanda final em relação ao PIB), mudanças no PIB per capita (efeito nível do PIB per capita) e mudanças no tamanho da população (efeito tamanho da população). Em (3.35), a variação das emissões totais é definida por Δc , enquanto os efeitos intensidade, tecnologia, estrutura da demanda final, volume da demanda final em relação ao PIB, nível per capita da atividade econômica e tamanho da população são captados por $\Delta \widehat{D}$, ΔL , Δf^s , Δf^v , Δy e Δp respectivamente. A decomposição estrutural da variação das emissões de GEE pode então ser determinada por:

$$\begin{aligned} \Delta c = & \Delta \widehat{D} L_t f_t^s f_t^v y_t p_t + \widehat{D}_{t-1} \Delta L f_t^s f_t^v y_t p_t + \widehat{D}_{t-1} L_{t-1} \Delta f_t^s f_t^v y_t p_t \\ & + \widehat{D}_{t-1} L_{t-1} f_{t-1}^s \Delta f_t^v y_t p_t + \widehat{D}_{t-1} L_{t-1} f_{t-1}^s f_{t-1}^v \Delta y p_t + \widehat{D}_{t-1} L_{t-1} f_{t-1}^s f_{t-1}^v y_{t-1} \Delta p \end{aligned} \quad (3.36)$$

A equação definida em (3.36) representa apenas uma das situações possíveis. Uma outra é apresentada abaixo:

$$\begin{aligned} \Delta c = & \Delta \widehat{D} L_{t-1} f_{t-1}^s f_{t-1}^v y_{t-1} p_{t-1} + \widehat{D}_t \Delta L f_{t-1}^s f_{t-1}^v y_{t-1} p_{t-1} \\ & + \widehat{D}_t L_t \Delta f^s f_{t-1}^v y_{t-1} p_{t-1} + \widehat{D}_t L_t f_t^s \Delta f^v y_{t-1} p_{t-1} + \widehat{D}_t L_t f_t^s f_t^v \Delta y p_{t-1} + \widehat{D}_t L_t f_t^s f_t^v y_t \Delta p \end{aligned} \quad (3.37)$$

A SDA também pode ser utilizada para decompor as mudanças na inversa de Leontief entre dois períodos de tempo e, segundo Miller e Blair (2009), estas mudanças refletem as variações subjacentes nas matrizes de coeficientes diretos de insumo. De acordo com Schuschny (2005), o efeito tecnológico mostra como variam as ligações entre os setores (enfraquecimento ou fortalecimento dos elos), uma vez que é calculado a partir das mudanças na matriz de Leontief. Os fatores que explicam as mudanças tecnológicas são as inovações, as substituições de importações, o crescimento dos benefícios decorrentes de economias de escala, as alterações no *mix* de produtos, a mudança dos preços relativos e mudanças nos padrões comerciais. Esses fatores tendem a alterar os coeficientes técnicos na matriz de Leontief e se manifestam no efeito calculado das mudanças tecnológicas. As mudanças na inversa de Leontief entre dois períodos de tempo, de acordo com Miller e Blair (2009), refletem, portanto, as variações subjacentes nas matrizes de coeficientes diretos de insumo.

Se $L_t = (I - A_t)^{-1}$ e $L_{t-1} = (I - A_{t-1})^{-1}$, pós-multiplicando L_t por $(I - A_t)$, obtém-se:

$$L_t(I - A_t) = I = L_t - L_t A_t \quad (3.38)$$

E ao pré-multiplicar L_{t-1} por $(I - A_{t-1})$:

$$(I - A_{t-1})L_{t-1} = I = L_{t-1} - A_{t-1}L_{t-1} \quad (3.39)$$

Ao rearranjar (3.38) e pós-multiplicar por L_{t-1} , encontra-se:

$$L_t - I = L_t A_t \Rightarrow L_t L_{t-1} - L_{t-1} = L_t A_t L_{t-1} \quad (3.40)$$

Ainda, ao rearranjar (3.39) e pré-multiplicando por L^1 , tem-se:

$$L_{t-1} - I = A_{t-1} L_{t-1} \Rightarrow L_t L_{t-1} - L_t = L_t A_{t-1} L_{t-1} \quad (3.41)$$

Ao subtrair (3.41) de (3.40), obtém-se a expressão (3.42) que relaciona variações na inversa de Leontief com mudanças na matriz A:

$$\Delta L = L_t - L_{t-1} = L_t A_t L_{t-1} - L_t A_{t-1} L_{t-1} = L_t (\Delta A) L_{t-1} \quad (3.42)$$

Neste trabalho, com objetivo de evidenciar a participação do setor transportes na emissão de GEE na economia brasileira, será realizada uma decomposição da matriz A desagregada para os três setores de transporte das matrizes de insumo-produto estimadas pelo NEREUS (transporte terrestre, transporte aquaviário e transporte aéreo) e matriz A agregada para os outros setores da economia. Segundo Figueiredo e Oliveira (2015), a desagregação simples das mudanças nas colunas pode ser utilizada para decompor a matriz A, visto que cada coluna na matriz de coeficientes técnicos reflete a produção do setor, ou seja, pode-se através das mudanças coluna por coluna, definir os efeitos das mudanças de requerimentos de insumos em cada um dos setores analisados. Para uma economia com 4 setores (três setores de transportes e outros setores), tem-se:

$$A_t = A_{t-1} + \Delta A = \begin{bmatrix} a_{1;1}^0 + \Delta a_{1;1} & \dots & a_{1;4}^0 + \Delta a_{1;4} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{4;1}^0 + \Delta a_{4;1} & \dots & a_{4;4}^0 + \Delta a_{4;4} \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

sendo que $\Delta A^{(j)} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & \Delta a_{1;j} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \Delta a_{4;j} & \dots & 0 \end{bmatrix}$ representa as mudanças tecnológicas do

setor j , então:

$$\Delta A = \Delta A^{(1)} + \Delta A^{(2)} + \Delta A^{(3)} + \Delta A^{(4)} = \sum_{j=1}^4 \Delta A^j \quad (3.44)$$

A decomposição da mudança tecnológica pode ser então incluída na equação (3.37):

$$\begin{aligned} \Delta c &= \Delta \widehat{D} L_t f_t^s f_t^v y_t p_t \quad (3.45) \\ &+ \{ \widehat{D}_{t-1} [L_{t-1} (\Delta A^{(1)}) L_t] f_t^s f_t^v y_t p_t \} + \{ \widehat{D}_{t-1} [L_{t-1} (\Delta A^{(2)}) L_t] f_t^s f_t^v y_t p_t \} \\ &+ \{ \widehat{D}_{t-1} [L_{t-1} (\Delta A^{(3)}) L_t] f_t^s f_t^v y_t p_t \} + \{ \widehat{D}_{t-1} [L_{t-1} (\Delta A^{(4)}) L_t] f_t^s f_t^v y_t p_t \} \\ &\quad + \widehat{D}_{t-1} L_{t-1} \Delta f^s f_t^v y_t p_t + \widehat{D}_{t-1} L_{t-1} f_{t-1}^s \Delta f^v y_t p_t \\ &\quad + \widehat{D}_{t-1} L_{t-1} f_{t-1}^s f_{t-1}^v \Delta y p_t + \widehat{D}_{t-1} L_{t-1} f_{t-1}^s f_{t-1}^v y_{t-1} \Delta p \end{aligned}$$

Com r fatores considerados, poderão ocorrer $r!$ formas de decomposição estrutural, seguindo uma estrutura similar à descrita em (3.37). Sendo assim, com base na indicação de Dietzenbacher e Los (1998), o presente estudo utilizará uma média entre as formas polares existentes e, nesse caso, a influência de cada fator, de acordo com Perdigão *et al.* (2017), pode ser definida como:

$$\text{Efeito intensidade: } \frac{(\Delta \widehat{D} L_t f_t^s f_t^v y_t p_t) + (\Delta \widehat{D} L_{t-1} f_{t-1}^s f_{t-1}^v y_{t-1} p_{t-1})}{2}$$

$$\text{Efeito estrutura de demanda final: } \frac{(\widehat{D}_{t-1} L_{t-1} \Delta f^s f_t^v y_t p_t) + (\widehat{D}_t L_t \Delta f^s f_{t-1}^v y_{t-1} p_{t-1})}{2}$$

$$\text{Efeito volume de demanda final: } \frac{(\widehat{D}_{t-1} L_{t-1} f_{t-1}^s \Delta f^v y_t p_t) + (\widehat{D}_t L_t f_t^s \Delta f^v y_{t-1} p_{t-1})}{2}$$

$$\text{Efeito nível do PIB per capita: } \frac{\widehat{D}_{t-1} L_{t-1} f_{t-1}^s f_{t-1}^v \Delta y p_t + \widehat{D}_t L_t f_t^s f_t^v \Delta y p_{t-1}}{2}$$

$$\text{Efeito tamanho da população: } \frac{\widehat{D}_{t-1} L_{t-1} f_{t-1}^s f_{t-1}^v y_{t-1} \Delta p + \widehat{D}_t L_t f_t^s f_t^v y_t \Delta p}{2}$$

$$\text{Efeito tecnologia: } \frac{[\widehat{D}_{t-1} L_{t-1} (\Delta A^{(j)})_{L_t} f_t^s f_t^v y_t p_t] + [\widehat{D}_t L_t (\Delta A^{(j)})_{L_{t-1}} f_{t-1}^s f_{t-1}^v y_{t-1} p_{t-1}]}{2}$$

Com o intuito de fornecer uma apresentação mais clara dos componentes utilizados na análise de decomposição estrutural deste trabalho, a Tabela 2 sumariza os fatores adotados, suas respectivas abreviaturas e definições.

Tabela 2. Fatores estruturais considerados na análise.

Abreviatura	Nome do fator	Definição
\widehat{D}	Intensidade de emissão de GEE	Variações nos Coeficientes de Intensidade de Emissão (quantidade de GEE emitida por unidade de produto).
Δf^s	Estrutura da demanda final	Variações nas participações setoriais dos componentes da demanda final (consumo das famílias, consumo da administração pública, FBCF, variação de estoques e exportações).
Δf^v	Volume da demanda final em relação ao PIB	Variação da demanda final total, medidos em reais, em relação ao PIB.
ΔL_j	Tecnologia	Variações nos requerimentos diretos e indiretos do setor j para atender a uma unidade de demanda final.
Δy	Nível do PIB per capita	Variação do PIB per capita (PIB/população)
Δp	Tamanho da população	Variação populacional do Brasil.

Fonte: Elaboração própria.

3.5 A ‘Análise de Insumo-Produto’ em aplicações ambientais

A estrutura original de insumo-produto proposta por Leontief (1936), contém as funções de produção da indústria, que ele frequentemente chamava de ‘receitas’ de produção, medidas em unidades físicas. No entanto, os requisitos de coleta de dados e várias outras restrições tornaram a implementação da estrutura em unidades físicas muito complicada, tanto na época em que teoria de insumo-produto foi criada e até hoje em menor grau. As contribuições de muitos pesquisadores estenderam a estrutura de insumo-produto incrementalmente na direção do emprego de unidades físicas e, no processo, ajudaram a estabelecer as bases para novas áreas de pesquisa, como ecologia industrial e economia ecológica. Ainda, a crescente preocupação com as mudanças climáticas e questões relacionadas à energia e ao meio ambiente, definiram a análise de insumo-produto como uma ferramenta importante na avaliação de políticas ambientais (MILLER; BLAIR, 2009, XU; DIETZENBACHER, 2014).

Miller e Blair (2009), organizaram os modelos de insumo-produto ambientais em três categorias, ao considerar que o principal problema a ser resolvido neste tipo de modelagem é a unidade de medida apropriada (monetária ou física) das quantidades ambientais ou ecológicas. Os modelos generalizados de insumo-produto são formados pelo aumento da matriz de coeficientes técnicos com linhas e/ou colunas adicionais para refletir as atividades de geração e redução de poluição, os modelos econômico-ecológicos resultam da ampliação da estrutura interindustrial para incluir setores “ecossistêmicos” adicionais, onde os fluxos serão registrados entre os setores econômicos e ecossistêmicos ao longo das linhas de um modelo inter-regional de insumo-produto e os modelos *commodity-by-industry*²⁵, que expressam os fatores ambientais como “bens” em uma tabela de insumo-produto, de produtos por setores. Este trabalho se aproxima da primeira categoria, a dos modelos generalizados de insumo-produto, ao inserir dentro da estrutura da modelagem e da análise de decomposição estrutural (SDA), os dados (em unidades físicas) referentes às emissões de GEE dos setores econômicos brasileiros entre os anos 2010-2017, com o intuito de mensurar a geração de poluentes, que é inerente aos processos produtivos.

De acordo com Hoekstra e Van de Bergh (2002), a estrutura de insumo-produto é adequada para análise ambientais, uma vez que é capaz de integrar informações detalhadas acerca da economia com fluxos de dados físicos (estes fluxos são, então, organizados nas tabelas físicas de insumo-produto). Entretanto, além da disparidade entre a agregação, existem

²⁵ A observação subjacente da abordagem *commodity-by-industry*, é que as indústrias usam bens para fabricar outros bens. Estes bens são ao mesmo tempo insumos para os processos industriais e usados para satisfazer as demandas finais (MILLER; BLAIR, 2009).

outras diferenças entre as tabelas de insumo-produto monetárias e físicas, já que as tabelas de insumo-produto monetárias equilibram os fluxos financeiros de um setor, enquanto o princípio das tabelas físicas de insumo-produto consiste no equilíbrio do balanço de materiais, que estabelece que a massa dos insumos deve ser igual a massa dos produtos e fluxos residuais gerados pela economia.

Sendo assim, materiais e produtos físicos que têm um preço serão incluídos em ambas as tabelas, porém, alguns fluxos físicos, como o CO₂, não tem valor monetário e são apenas incluídos nas tabelas físicas de insumo-produto. Neste ponto é que a estrutura de insumo-produto se torna relevante, pela existência do método das unidades híbridas (ou mistas), uma vez que permite a constituição de tabelas que associam dados físicos e monetários de insumo-produto (HOEKSTRA; VAN DE BERGH, 2002).

Young (1998) utilizou a análise de insumo-produto para discutir os efeitos da poluição promovida pelas estratégias econômicas adotadas no Brasil na década de 1980. O estudo combinou coeficientes de emissão de poluentes hídricos e atmosféricos, com a matriz de insumo-produto para o Brasil para o ano de 1980, com o intuito de captar as emissões de toda a cadeia produtiva. Os principais resultados indicaram que a cadeia de exportação era mais intensiva em emissões do que a média da economia e que a indústria nacional como um todo tornou-se mais poluidora entre 1980 e 1985. Ainda, os resultados sugeriram que as políticas de combate aos déficits comerciais adotadas na década de 1980 resultaram em problemas ambientais crescentes no país.

Em seu estudo, Machado *et al.* (2001) aplicaram técnicas de insumo-produto à economia brasileira para avaliar os impactos totais do comércio internacional no uso de energia e nas emissões de CO₂. Um modelo de insumo-produto em unidades híbridas foi especificado para a economia brasileira no ano de 1995. Os resultados demonstraram que o Brasil não apenas é um exportador líquido de energia e de carbono incorporado nos bens não energéticos, como cada dólar ganho com as exportações incorporou cerca de 40% mais energia e 56% mais carbono, do que a cada dólar gasto nas importações. As descobertas dos autores indicaram que os legisladores brasileiros devem se preocupar com os impactos extras que a política comercial internacional pode ter sobre o uso de energia e as emissões de carbono do país.

O artigo de Hilgemberg e Guilhoto (2006) identificou as emissões de CO₂ provenientes do uso energético de gás natural, álcool e derivados de petróleo em seis regiões brasileiras e mensurou os impactos de eventuais políticas de controle de poluição. Ademais, o estudo apontou a ligação entre o nível de atividade e as emissões de CO₂ em cada região analisada, especificando para cada um dos energéticos considerados a parcela das emissões totais em razão

do consumo intermediário e da demanda final. Os autores também realizaram simulações com o objetivo de avaliar os efeitos de uma eventual restrição de emissões sobre os vários setores da economia e os efeitos de um imposto sobre emissões. Os resultados revelaram que as emissões em todas as regiões são atribuídas aos efeitos do aumento na produção sobre o consumo das famílias e que as políticas de controle deveriam ser direcionadas às regiões Nordeste e Sul.

Perobelli *et al.* (2007) analisaram as interações entre o estado de Minas Gerais e o restante do Brasil, no que diz respeito ao consumo de energia. Os autores especificaram um modelo híbrido de insumo-produto inter-regional, por meio do qual medidas de intensidade de energia foram calculadas para realizar a análise. A estudo apresentou informações desagregadas para 14 setores econômicos, duas áreas espaciais (Minas Gerais e o resto do Brasil) e um tipo de uso de energia (energia total), permitindo traçar um retrato preciso dos padrões de interdependência. Os resultados indicaram que em Minas Gerais, os setores ‘Ferro e Aço’, ‘Transporte’, ‘Energético’ e ‘Outras Indústrias’ foram os que mais pressionaram a demanda sobre o setor de energia do estado. No restante do Brasil, os setores ‘Energético’, ‘Transporte’, ‘Outras Indústrias’ e ‘Alimentos e Bebidas’ apresentaram-se mais relevantes neste sentido.

Carvalho e Perobelli (2009) quantificaram as emissões de CO₂ originadas a partir do consumo de combustíveis, considerando um modelo de insumo-produto inter-regional para São Paulo e o restante do Brasil, utilizando dados de 1996. Os autores calcularam a intensidade das emissões em 15 setores econômicos, diferenciando as emissões totais provenientes do consumo intermediário e da demanda final. Ademais, os setores ‘Agropecuária’, ‘Siderurgia’, ‘Alimentos e Bebidas’, ‘Outros Setores’ e ‘Transporte’ foram classificados como setores-chave nas duas regiões analisadas, a partir de um cálculo das elasticidades. O estudo também identificou que a pauta de exportação nacional é intensiva em poluição, visto que uma grande parcela de CO₂ é incorporada nas exportações brasileiras.

O estudo de Oliveira (2011) fez uso de um modelo de insumo-produto ambientalmente estendido para quantificar os impactos de um aumento na demanda final de bens e serviços da economia, utilizando a matriz de insumo-produto para o Brasil de 2005, publicada pelo IBGE. Os resultados apontaram que as exportações eram o componente da demanda final mais intensivo em emissões de gases de efeito estufa por unidade do valor do produto em 2005. Em uma análise setorial, a ‘Agricultura’ e ‘Mudança de uso de terra e florestas’ apresentaram os maiores índices de emissão de poluentes. A autora enfatizou que restringir o comércio internacional não seria eficiente para mitigar as emissões, de forma que caberia aos *policy-makers* promover medidas domésticas para incentivar a adoção de tecnologias mais limpas.

Perobelli *et al.* (2015) aplicaram o método da extração hipotética em um modelo semifechado de insumo-produto para o Brasil, com oito grupos de famílias, estratificadas de acordo com seus níveis de renda, de forma a avaliar os impactos do consumo desses grupos de domicílios em termos de emissões de CO₂. Os resultados indicaram que existe um *trade-off* entre a maior satisfação das famílias com o consumo e o retrocesso crescente nas emissões e que o setor ‘Transportes’ obteve o maior impacto negativo no período analisado para todas as categorias de famílias. Ademais, o estudo contribuiu para a agenda de pesquisas na área de emissões, ao mapear o comportamento recente da economia brasileira em termos de aumento de renda, mudanças na estrutura de consumo e seus impactos nas emissões.

O estudo de Souza *et al.* (2015) identificou os principais setores poluidores dos países que compõem o BRIC, no ano de 2009, relacionando a estrutura produtiva desses países com suas respectivas emissões de dióxido de carbono, através da metodologia de insumo-produto, a partir da base de dados da *World Input-Output Database* (WIOD). Os resultados mostraram que embora os membros do BRIC apresentem um grande potencial de crescimento econômico, também possuem alta capacidade de geração de poluição: no caso do Brasil, as atividades que envolveram o setor ‘Transportes’ foram as que apresentaram a maior participação nas emissões, enquanto na Rússia, Índia e China, o setor de ‘Eletricidade, Gás e Água’ foi responsável pelo maior nível de emissão de CO₂.

Em seu artigo, Freitas *et al.* (2016) mensuraram o impacto de uma política de tributação das emissões de GEE na economia brasileira, como um todo e em diferentes grupos de famílias, com base na renda no ano de 2009. A metodologia consistiu em um modelo nacional de insumo-produto capaz de incorporar a intensidade das emissões de GEE, bem como um vetor de consumo dividido em dez famílias representativas com diferentes níveis de renda. Os principais resultados indicaram que o sistema de tributação era ligeiramente regressivo e ocasionava um pequeno impacto negativo sobre a produção, entretanto os autores conjecturaram que apesar de seu caráter ligeiramente regressivo, um imposto sobre as emissões de GEE poderia estimular um caminho mais sustentável para o setor de energia no Brasil.

O estudo de Montoya *et al.* (2016) aplicou a metodologia de insumo-produto para avaliar, dentro da estrutura do agronegócio brasileiro, a renda, o emprego, o consumo energético e as emissões de CO₂. Os autores compatibilizaram a matriz energética fornecida pelo Balanço Energético Nacional em 2009, com a matriz de insumo-produto para o Brasil para o mesmo ano. Os resultados mostraram que o agronegócio responde por aproximadamente 22% do PIB do país, 32% dos empregos, 35% do consumo de energia e por 41% das emissões de CO₂. Ademais, os resultados apontaram que a intensidade das emissões nos setores ligados ao

agronegócio é superior à média nacional, de forma que as atividades do agronegócio são as que, proporcionalmente, emitem mais CO₂ no Brasil por trabalhador, por unidade monetária e por consumo de energia.

Souza *et al.* (2016) utilizaram um modelo de insumo-produto integrado à programação linear, com dados do ano de 2009, para avaliar os impactos econômicos de reduções nas emissões de GEE na economia brasileira. Os autores simularam metas de emissões para vários cenários potenciais, onde o desenho da política adotada considerou a composição setorial em termos de emissões e tecnologia de produção disponível, sendo que os resultados obtidos foram diretamente afetados pelo alto nível de emissões da pecuária. No curto prazo, metas de emissões setoriais associadas à política de tributação ou permissões de emissão poderiam ser desenvolvidas a fim de criar incentivos privados para mitigar as emissões. Além disso, os resultados também mostraram que diferentes metas setoriais poderiam ser capazes de equilibrar os benefícios ambientais, com as possíveis perdas econômicas incorridas por tais políticas.

Suela (2019) utilizou um modelo de insumo-produto inter-regional híbrido, com dados de 2011, para identificar os efeitos setoriais e intersetoriais, em termos de emissões de GEE, da implementação do Plano ABC, com foco direcionado à área do MATOPIBA, mas que também permitiu quantificar os impactos nas outras regiões do Brasil. Os resultados encontrados explicitaram a importância do plano de mitigação na região da fronteira agrícola: para cada R\$ 1 bilhão adicional na demanda final dos setores, o valor médio das emissões de CO₂e em um cenário hipotético, sem o Plano ABC, seria 4,5% superior a um cenário em que o mesmo seria implementado. Ademais, os resultados indicaram que os setores-chave de controle de emissões na região do MATOPIBA eram ‘Refino de açúcar, produção de bebidas e fumo’, ‘Pecuária’, ‘Energia Elétrica’, ‘Produção Florestal’ e ‘Administração Pública’.

O estudo de Carvalho *et al.* (2020) estimou as mudanças no padrão de consumo no Brasil, em função das variações previstas na pirâmide etária em 2050 e as consequências dessas alterações nas emissões de CO₂. Os autores efetuaram projeções a partir de um modelo de insumo-produto para a economia brasileira para o ano de 2010, considerando 67 setores produtivos e seis faixas etárias. Os resultados sugeriram um aumento no vetor de consumo do setor ‘Saúde’ e uma pequena queda no vetor de consumo do setor ‘Transportes’ em 2050, refletindo as características de um envelhecimento populacional. Ainda, o crescimento populacional, ao se considerar a mudança na estrutura etária, não pareceu causar um aumento proporcional nas emissões. Por fim, os resultados indicaram que, ao contrário da maioria dos países desenvolvidos, a mudança na estrutura etária brasileira pode influenciar o padrão de emissões.

Lima (2020) contabilizou as emissões brasileiras de gases de efeito estufa no ano de 2015, através da análise de insumo-produto ambientalmente estendida, onde os dados relativos as emissões podem ser analisados como parte de um sistema econômico interdependente. Os resultados do estudo indicaram que os setores ‘Indústria da Transformação’, ‘Agricultura’, ‘Pecuária’, ‘Produção Florestal’ e ‘Pesca e Aquicultura’ são os setores que apresentam a maior intensidade de emissão da economia do Brasil. Ainda, foram calculados os índices de Rasmussen-Hirschman, com o intuito de identificar o impacto econômico dos setores analisados. O setor ‘Indústria da Transformação’, considerado chave, é vital para o desenvolvimento econômico, constituindo o maior desafio da Política Nacional de Mudança Climática.

Teixeira *et al.* (2020) objetivaram identificar as atividades econômicas estratégicas para investimentos com foco na mitigação de emissões de GEE. Os autores estimaram as elasticidades ‘emissão-demanda’ dos setores produtivos brasileiros, através de um modelo de insumo-produto, com dados para o ano de 2011. Os resultados mostraram a importância de se dar atenção especial à estrutura produtiva do país e à pressão poluente que a mesma ocasiona. Ademais, permitiram identificar os setores com maiores impactos de poluição na economia e, que precisam, portanto, de maior prioridade de investimentos, bem como políticas de mitigação. O setor ‘Florestal’ foi identificado como destino relevante para a alocação de investimentos para mitigação de emissões de GEE, assim como ‘Agricultura’, ‘Transporte’ e ‘Indústria’.

3.5.1 A ‘Análise de Decomposição Estrutural (SDA)’ em avaliações ambientais

Conforme apontam Dietzenbacher e Los (1998), as técnicas de análise de decomposição estrutural tornaram-se uma ferramenta importante para desvendar o crescimento de alguma variável ao longo do tempo, separando as alterações nas partes constituintes da variável. Em essência, de acordo com Lenzen (2016), o objetivo da SDA é decompor as mudanças em uma variável em um conjunto de contribuições mutuamente exclusivas e coletivamente exaustivas, em um número de fatores determinantes, ou componentes.

A literatura da SDA é diversa e inclui estudos que decompõem variáveis como produto total, valor agregado e demanda por mão-de-obra. Além disso, a SDA ambiental decompõe mudanças nos fluxos físicos, como uso de energia, emissões de CO₂ e vários outros tipos de poluentes e recursos. A SDA é capaz de analisar detalhadamente as mudanças na estrutura econômica e, uma vez que se baseia no modelo insumo-produto, distingue as características diretas, a influência indireta da demanda final e as mudanças nos níveis tecnológicos. Portanto, é uma ferramenta útil para analisar a relação entre mudanças na estrutura econômica e

problemas ambientais ao longo do tempo ou entre países. (HOEKSTRA; VAN DE BERGH, 2002).

De acordo com Miller e Blair (2009), os trabalhos que inicialmente aplicaram a análise de decomposição estrutural no escopo de avaliações ambientais, estavam ligados às questões energéticas como os estudos de Ang (1995), Lin e Polenske (1995), Mukhopadhyay e Chakraborty (1999), Wielting, Biesiot e Moll (1999), Jacobsen (2000) e Kagawa e Inamura (2001) ou relacionados às emissões de poluentes, como os descritos brevemente a seguir.

Common e Salma (1992) descreveram e utilizaram uma metodologia de decomposição estrutural que contabilizou as emissões de gases de efeito estufa, ao decompor as alterações ao longo do tempo em componentes atribuíveis às mudanças na demanda final, mudanças na tecnologia e mudanças no *mix* de combustíveis. Os resultados, obtidos para a Austrália, indicaram a necessidade de considerar as implicações do uso direto e indireto de combustíveis neste tipo de análise e, que os níveis totais de emissão de GEE (crescentes ao longo do tempo), foram compatíveis com as contribuições relativas às variações na demanda final, mudança tecnológica e alterações no *mix* de combustíveis.

Ao utilizar a SDA para analisar as mudanças nas emissões relacionadas ao uso de energia na Dinamarca, o estudo de Wier (1998), abrangeu um período longo, baseando-se em tabelas anuais de insumo-produto para os anos de 1966 a 1988, o que possibilitou que as mudanças no consumo de energia fossem examinadas durante três décadas distintas. Ainda, o estudo considerou três tipos diferentes de emissão: CO₂, SO₂²⁶ e NO_x²⁷. Os resultados indicaram que embora o nível de CO₂ tenha aumentado proporcionalmente ao consumo de energia, o nível de emissões de NO_x aumentou relativamente mais e o nível de emissões de SO₂ diminuiu consideravelmente. Existem várias razões para esses desenvolvimentos, a principal razão sendo as mudanças no *mix* de combustíveis no setor de fornecimento de energia.

Em seu estudo, Casler e Rose (1998) forneceram uma avaliação empírica do impacto de várias influências nas emissões de CO₂. O estudo incorporou refinamentos metodológicos à análise de decomposição estrutural de insumo-produto. A análise foi realizada através de um modelo KLEM²⁸ de dois estratos, o que possibilitou a estimação dos efeitos de substituição e mudança tecnológica dentro e entre os insumos agregados. O modelo foi utilizado para

²⁶ Dióxido de Enxofre.

²⁷ Óxidos de Nitrogênio.

²⁸ Desde o artigo seminal de Hudson e Jorgenson (1974), acerca da análise de demanda de energia intermediária, tornou-se popular o emprego de formas funcionais flexíveis, para a modelagem de funções de produção em análises de recursos naturais. O exemplo mais comum é a função de produção *translog* especificada em termos de capital, trabalho, energia e materiais, geralmente denotados pelo acrônimo *KLEM – Capital, labor, energy and material aggregate* (CASLER; ROSE, 1998).

decompor as fontes de mudança nas emissões de CO₂ nos EUA no período 1972-1982. Os resultados mostraram o efeito significativo da substituição no setor energético e entre energia e outros insumos, como as principais causas do declínio nas emissões de CO₂.

O trabalho de Munksgaard, Pedersen e Wien (2000), ao fazer uso da análise de decomposição estrutural para a Dinamarca, evidenciou os fatores que afetaram o desenvolvimento de emissões de dióxido de carbono relativos ao consumo privado no período 1966-1992, distinguindo entre emissões diretas e indiretas de CO₂. Verificou-se que o crescimento geral no consumo doméstico de energia e outros bens constituiu a principal força motriz do crescimento das emissões de CO₂ no período analisado, entretanto, estas emissões teriam sido 16% mais altas do que as efetivamente observadas em 1992, caso a conservação de energia não houvesse sido implementada.

De Haan (2001) utilizou a SDA como uma ferramenta para descrever como as mudanças na economia holandesa podem afetar as variações nos níveis de poluição. A análise foi aplicada com a ajuda da Matriz de Contabilidade Social, incluindo as Contas Ambientais (NAMEA)²⁹ para a Holanda, cobrindo dados anuais para o período 1987-1998. Ao fornecer uma abordagem sistemática e flexível na decomposição de mudanças na poluição de acordo com suas diferentes causas, a metodologia possibilitou à identificação de mudanças na estrutura econômica, variações de volume na economia e alterações na ecoeficiência de produtores e consumidores.

O estudo de Rhee e Chung (2006) propôs a utilização da SDA para as economias da Coreia do Sul e do Japão, como forma de identificar a maneira e a extensão em que as emissões de CO₂ são influenciadas nos dois países, por seus padrões comerciais. O método decompôs a mudança total nas emissões ao longo do período 1990-1995 em quatro componentes: intensidade de emissão, tecnologia, estrutura e tamanho da economia. Segundo a análise, o volume absoluto de emissão de CO₂ na Coreia do Sul é cerca de um terço do que no Japão. No entanto, a taxa média anual de aumento de emissões na Coreia do Sul foi de cerca de 8,9% nos cinco anos analisados, enquanto a mesma para o Japão foi de apenas 1,6%.

Morais (2007) aplicou a análise de decomposição estrutural para identificar a relação entre a estrutura produtiva do Brasil e suas respectivas emissões de CO₂, entre 1990 e 2003. Foram utilizados dados do Balanço Energético Nacional e das matrizes de insumo-produto para o Brasil estimadas pelo IBGE. O instrumental da SDA permitiu que a análise fosse realizada em termos dos efeitos ‘estrutura da demanda final’, ‘volume da demanda final’, ‘tecnologia’ e

²⁹ *National Accounting Matrix including Environmental Accounts* (NAMEA). De acordo com De Haan (2001), uma das vantagens do uso da NAMEA para a análise de insumo-produto, é a consistência mútua entre dados ambientais e econômicos.

‘intensidade energética’. No período de 14 anos da análise, o Brasil apresentou crescimento em seus níveis de emissão de CO₂. Os resultados mostraram que o volume da demanda final foi responsável por 239,4% da variação das emissões de CO₂ entre 1990 e 2003. Além disso, ficou evidente que os setores ‘Transportes’ e ‘Transformação’ foram os responsáveis por grande parte da poluição gerada no país.

Wood (2009) utilizou a SDA para explicitar até que ponto as mudanças estruturais ocorridas na economia australiana, entre 1974 e 2005, influenciaram os níveis de emissão de GEE. Os resultados em um nível macro salientaram que as mudanças no *mix* de demanda final, de eficiência industrial, no destino da demanda final e no *mix* de exportação diminuíram as emissões. Por outro lado, mudanças nas inter-relações estruturais, riqueza e nível de exportação aumentaram fortemente as emissões de GEE. Em um nível desagregado, foi confirmada a importância dos setores de fornecimento de eletricidade, construção, transporte e serviços para alterar os níveis de emissão, mas nenhum setor mostrou um efeito constante ao longo de toda a série temporal.

Em seu artigo, Lin *et al.* (2009) quantificaram o consumo de energia e as emissões de CO₂ nos setores industriais sul-coreanos. As fontes das mudanças nas emissões de CO₂ para os anos 1990-2003 foram investigadas, através da SDA de insumo-produto em termos de variações no coeficiente de emissão (causadas por mudanças na intensidade energética e intensidade de emissão de carbono), variações no crescimento econômico e mudanças estruturais (em termos de mudanças na demanda final, exportações, importações e tecnologia de produção). Os resultados indicaram que a taxa de crescimento das emissões industriais de CO₂ diminuiu desde a crise financeira de 1998 na Coreia e entre todos os fatores individuais, o crescimento econômico foi responsável pelo maior aumento nas emissões de CO₂.

Em seu estudo, Guan *et al.* (2009) adotaram a análise de decomposição estrutural, para investigar os fatores que levaram ao aumento de emissões de dióxido de carbono na China. As emissões de CO₂ foram decompostas em cinco forças motrizes: população, intensidade de emissão, estrutura econômica de produção, padrão de consumo e volume de consumo per capita. Os resultados indicaram que entre 2002 e 2005, os dois fatores que mais impulsionaram o crescimento das emissões na China foram o aumento do consumo per capita e mudanças estruturais na produção, que se tornou majoritariamente, orientada para a exportação de manufaturas. Por outro lado, o ganho de eficiência, responsável por compensar parte das emissões em décadas anteriores, perdeu grande parte de sua capacidade de equilibrar o nível geral de emissões de CO₂.

Baiocchi e Minx (2010) utilizaram a análise de decomposição estrutural para investigar os fatores por trás das mudanças anuais nas emissões de CO₂ do consumo no Reino Unido entre 1992 e 2004. Os resultados expuseram que as melhorias das mudanças ‘domésticas’ na eficiência e na estrutura de produção levaram a uma redução de 148 MtCO₂, que compensou apenas parcialmente os aumentos de emissão de 217 MtCO₂ ocasionados por mudanças na cadeia de abastecimento global e pela crescente demanda do consumidores. Os autores sugeriram que as recentes reduções de emissões alcançadas no Reino Unido não foram apenas um reflexo de um ‘*esverdeamento*’ da cadeia de abastecimento doméstica, mas também de uma mudança na divisão internacional do trabalho.

Carneiro (2010) avaliou como as transformações na matriz energética brasileira, entre 2000 e 2005, impactaram as emissões de dióxido de carbono. A SDA foi utilizada para verificar se as variações nas emissões de CO₂ foram ocasionadas por mudanças tecnológicas ou provocadas por um choque de demanda. Os resultados sugeriram que entre os anos analisados, a maior parte da variação do produto do país originou-se a partir de um aumento na demanda final, influenciado principalmente pelo montante de gastos. Além disso, indicaram que houve uma transição para as fontes energéticas menos poluentes, como o gás natural, porém, devido ao aumento na intensidade da matriz energética, a transição não foi suficiente para atenuar o crescimento no nível de emissão poluição.

Minx *et al.* (2011) usaram a análise de decomposição estrutural para identificar os fatores que impulsionaram o crescimento de emissões de dióxido de carbono da China entre 1992 e 2007, com foco especial no período de 2002 a 2007. Os resultados sugeriram que as melhorias de eficiência compensaram amplamente as emissões adicionais de CO₂, oriundas do aumento nos níveis de consumo final. Ademais, os resultados demonstraram que o forte aumento no nível de CO₂ emitido foi ocasionado principalmente por investimentos de capital, com destaque para os investimentos dirigidos ao setor de construção e sua cadeia industrial intensiva em carbono e pela urbanização associada às mudanças no estilo de vida da população.

Silva e Perobelli (2012) utilizaram a SDA para decompor os efeitos tecnológicos e estruturais intrínsecos às emissões de CO₂ na economia brasileira, entre 2000 e 2005. Os resultados apontaram que os setores de transportes, siderurgia e alimentos e bebidas foram os que se mostraram mais propensos ao aumento de emissões de dióxido de carbono em termos de variações na demanda final, enquanto os setores indústria do cimento, de minerais não metálicos e papel e celulose destacaram-se pela redução de emissões, devido à mudança em suas tecnologias de produção. De acordo com os autores, os resultados podem assessorar o

formulador de políticas públicas, que procura atender às expectativas de crescimento econômico e ao mesmo tempo preocupa-se com a sustentabilidade ambiental.

Lenzen *et al.* (2013) utilizaram a análise de decomposição estrutural para investigar quais fatores ocasionaram o perfil de emissões de dióxido de carbono do Brasil, entre 1970 e 2008 e quais as implicações desses fatores para a formulação de políticas nacionais, visto que o país está se tornando uma das potências econômicas do mundo. Os autores mostraram que as emissões do Brasil cresceram principalmente devido ao aumento dos padrões de consumo individuais, exportações e tamanho da população, e que esse crescimento não foi desafiado por melhorias tecnológicas e estruturais, com o intuito de obter intensidades de emissões mais baixas e estruturas de produção mais eficientes.

Com base na análise de decomposição estrutural (SDA), Wang *et al.* (2013) analisaram as forças motrizes para o incremento nas emissões de CO₂ em Pequim, China, tanto da perspectiva de produção quanto da demanda final entre os anos de 1997 e 2010. De acordo com resultados encontrados pelos autores, o crescimento das emissões de CO₂ em Pequim foi impulsionado principalmente pela mudança na estrutura de produção e crescimento populacional, sendo parcialmente compensado pela redução da intensidade das emissões de CO₂ dos setores econômicos, bem como pelo declínio no volume de demanda final per capita, durante o período de estudo. Além disso, os resultados indicaram que a mudança na estrutura da demanda final obteve um efeito limitado sobre a mudança nas emissões de CO₂ em Pequim.

Brizga *et al.* (2014) utilizaram a análise de decomposição estrutural para identificar os fatores determinantes das emissões de CO₂ e nos Países Bálticos, entre 1995 e 2009, período que inclui o colapso da União Soviética, a reestruturação e o crescimento econômico e a grande recessão de 2008. Os resultados mostraram que a demanda final constituiu a principal força motriz para o crescimento das emissões nestes países e teria causado um aumento de 80%, 64% e 143% nos níveis de emissões de GEE da Estônia, Letônia e Lituânia, respectivamente. Ainda, a análise evidenciou que as políticas de energia e pró-clima são extremamente necessárias para garantir a dissociação contínua entre o crescimento econômico e elevação das emissões de CO₂ e nos Bálticos.

O estudo de Xu e Dietzenbacher (2014) aplicou a SDA em uma estrutura global multirregional de insumo-produto, a fim de identificar as forças motrizes por trás do crescimento das emissões de CO₂, incorporadas ao comércio mundial, de 1995 a 2007. Os resultados explicitaram mudanças na estrutura das trocas internacionais, visto que as economias emergentes, como os países do BRIC, aumentaram sua participação na produção e na comercialização às custas dos países desenvolvidos e, produtores e consumidores de países

desenvolvidos passaram a importar uma parcela maior de produtos de países emergentes, causando maior vazamento de CO₂ em todo o planeta.

Freitas (2015) analisou as relações entre o consumo das famílias e as emissões de gases de efeito estufa no Brasil entre 1995 e 2009. O autor utilizou a SDA para decompor as emissões relacionadas ao consumo das famílias entre diferentes efeitos (composição, escala, tecnológico e distributivo). Os resultados indicaram que o efeito escala foi superior à soma dos efeitos composição e tecnológico, os dois principais redutores da geração das emissões e os setores ligados à produção de alimentos determinaram o curso das emissões, mas o autor salientou o peso cada vez maior dos transportes e dos serviços à medida que a renda dos consumidores aumenta. Ademais, o trabalho corroborou a hipótese de que a melhor distribuição dos níveis de consumo entre as famílias, isolada de outros efeitos, atua para gerar maior pressão ambiental.

Em seu artigo Cansino *et al.* (2016) aplicaram a SDA em uma abordagem multissetorial, para identificar os principais fatores que explicam as mudanças anuais nas emissões de CO₂, de 1995 a 2009, na Espanha. A variação nas emissões de CO₂ foi decomposta entre os efeitos de carbonização, de intensidade de energia, de tecnologia, de demanda estrutural, de padrão de consumo e de escala. Os resultados observados permitiram concluir que o efeito escala foi o mais proeminente. Ademais, a implementação do Protocolo de Quioto resultou em um impacto positivo nas tendências de emissões no país, em conjunto com a maior utilização de fontes de energia renovável na economia.

Hoekstra *et al.* (2016) aplicaram a SDA para identificar o *Emission Cost of Sourcing* (ECS), que se origina a partir da substituição de produtos domésticos por importações de países com tecnologias mais intensivas em dióxido de carbono. Os resultados sugeriram que as mudanças nos padrões de abastecimento dos países, entre 1995 e 2007, contribuíram para reduzir as emissões territoriais em países com altos salários (UE, EUA, etc.) e para aumentar as emissões territoriais nos países com baixos salários (China, Índia, entre outros). O ECS, representou 18% do crescimento total das emissões globais de CO₂, o que levou a questionamentos acerca das políticas de mudanças climáticas baseadas em simples princípios territoriais.

O artigo de Su *et al.* (2017) aplicou a análise de decomposição estrutural para a economia do Cingapura, uma cidade-estado insular, cujas emissões de carbono relacionadas à energia aumentaram de 37,8 para 44,4 milhões de toneladas de CO₂, no período 2000-2010. Os resultados obtidos indicaram que as exportações representaram quase dois terços das suas emissões totais, que se elevaram com a expansão de indústrias orientadas à exportação. A troca no *mix* de combustível e a eficiência energética, no entanto, ajudaram a diminuir o crescimento

das emissões. Ademais, as emissões relacionadas ao consumo das famílias representaram cerca de um quarto do total de emissões do país.

O estudo de Chen *et al.* (2018) adotou a SDA para diferenciar as emissões de CO₂, no setor de construção, dos EUA e da China, entre 1995 e 2009. Os resultados sugeriram que as emissões de dióxido de carbono relativas à construção na China são muito superiores às americanas, visto que a diferença entre o nível de emissão elevou-se em 439,8%, no período analisado. Ainda, dentre os efeitos observados à partir da análise de decomposição estrutural, as mudanças na demanda final, na estrutura produtiva e na intensidade de energia apresentaram os resultados mais relevantes, uma vez que o efeito da demanda final foi capaz de diminuir a diferença de emissões entre os países e, os efeitos de estrutura de produção e intensidade energética alargaram a diferença.

Li *et al.* (2018) aplicaram a SDA para explorar e comparar as emissões diretas (emissões baseadas na produção), as emissões a montante impulsionadas pela demanda final (emissões baseadas no consumo) e as emissões a jusante permitidas por insumos primários (emissões baseadas na renda) na cidade de Pequim, na China, entre 2005 e 2012. A indústria de ‘mineração, construção, processamento de petróleo, coque e processamento de combustível nuclear’ foi identificada como a principal contribuinte para a emissão de CO₂. Ainda, ao utilizar a SDA tanto do lado da demanda quanto da oferta, o estudo constatou que a intensidade das emissões e as mudanças tecnológicas contribuíram para o decréscimo das emissões de CO₂ em Pequim, compensando os aumentos ocasionados pela população e variações na demanda final.

Fan *et al.* (2019) adotaram a SDA para decompor a mudança nas emissões de CO₂ na região de Pequim-Tianjin-Hebei, na China, entre 1997 e 2012, em cinco fatores determinantes: população, intensidade de emissão de carbono, estrutura de produção, estrutura de demanda final e PIB per capita regional. Os resultados mostraram que a população e o PIB per capita regional promoveram o crescimento das emissões de CO₂ em todas as regiões, enquanto a intensidade de emissão de carbono representou o maior fator de compensação. O efeito estrutura de demanda final sobre o crescimento das emissões de CO₂ em Pequim e Hebei permaneceu constante, enquanto o mesmo efeito em Tianjin apresentou redução. Ademais, os autores identificaram que o consumo doméstico urbano é o fator mais importante para compensar as emissões de CO₂ em Pequim.

Guo *et al.* (2020) utilizaram a SDA para identificar os principais fatores determinantes das emissões de GEE na Mongólia, cuja economia tem apresentado rápido crescimento nas últimas duas décadas e é dominada por indústrias intensivas em carbono, como a mineração e

a construção. Os resultados indicaram que as emissões de GEE aumentaram de 8.679 GgCO_{2e}³⁰ para 17.165 GgCO_{2e}, com uma taxa de crescimento anual de 4,65% durante o período 2000-2015. Além disso, o consumo das famílias e a FBCF foram identificados como os principais fatores impulsionadores para o aumento das emissões de GEE, enquanto a eficiência técnica caracterizou-se como o principal fator de redução das emissões na Mongólia.

O estudo de Araújo *et al.* (2020) aplicou a SDA para quantificar os principais fatores de mudanças nas emissões de CO₂, dos países que passaram a integrar a União Europeia, entre 2004 e 2007, devido a maior integração na economia global. As emissões de dióxido de carbono foram decompostas nos componentes de intensidade, estrutura industrial, preferências do consumidor, estrutura da demanda final e níveis de consumo. Os autores agruparam os países em cinco grupos: novos membros da UE, antigos membros da UE, EUA, China e resto do mundo. Os resultados mostraram que embora as emissões dos novos integrantes da UE tenham diminuído, não foram capazes de compensar o aumento de suas emissões devido à maior demanda de exportações. Ademais, o aumento das emissões de CO₂ incorporado às exportações foi significativo.

Sesso *et al.* (2020) utilizaram a SDA para decompor, entre 2000 e 2009, as variações das emissões de CO₂ nos efeitos tecnológicos e da demanda final nos EUA, UE e BRIC. Os resultados indicaram que os EUA e a UE reduziram suas emissões em 12,4% e 5,9%, respectivamente. Os EUA alcançaram reduções de emissões principalmente devido ao efeito de intensidade (emissões inerentes aos setores de produção), enquanto a UE por conta do efeito de tecnologia (emissões das cadeias de produção), ocasionados pela adoção de novas tecnologias e modificações na matriz energética. Em oposição, os países do BRIC apresentaram aumento em seus níveis de emissão, mesmo com os esforços praticados para a adoção de novas tecnologias, visto que as mudanças na estrutura e no volume da demanda final foram superiores aos efeitos tecnológicos.

O estudo de Oliveira *et al.* (2020) utilizou a SDA para decompor os fatores responsáveis pela evolução das emissões de GEE dos países do BRIC (Brasil, Rússia, Índia e China), de 1995 a 2009. A base de dados consistiu nas matrizes de insumo-produto e emissões setoriais de GEE da WIOD. Os resultados demonstram que, no Brasil, a exportação do setor 'Agropecuária' foi o fator que mais contribuiu para o aumento das emissões no período, a demanda intermediária da indústria Rússia obteve destaque e na Índia e na China, a demanda final da indústria concentrou a maior participação no aumento das emissões de poluentes. Ademais, os autores

³⁰ Giga-gramas de Dióxido de Carbono Equivalente

concluíram que os membros do BRIC se caracterizam como exportadores líquidos de emissão de GEE.

Os resultados empíricos são difíceis de comparar porque os países, períodos de tempo, os problemas ambientais e os métodos de decomposição variam significativamente, entretanto, em geral, a revisão da literatura acerca da utilização da SDA em avaliações ambientais, demonstrou que quase todos os estudos relatam a influência de mudanças no volume de demanda final, no *mix* de demanda final e na tecnologia. O efeito de volume de demanda final é geralmente o determinante mais importante, em relação ao aumento dos fluxos físicos (elevação do nível de emissões de GEE), enquanto as mudanças tecnológicas, geralmente são a fonte mais relevante de pressão descendente, em termos de emissões. Contudo, conforme apontam Hoekstra e Van de Bergh (2002), essa pressão descendente raramente excede a pressão ascendente do efeito de nível.

4. RESULTADOS

4.1. Análise exploratória das emissões de GEE no Brasil (2010-2017)

A Tabela 3, elaborada a partir de dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), expressa as emissões de GEE (em tCO₂e GWP – AR5) de cada uma das atividades econômicas consideradas neste estudo, nos anos de 2010 e 2017, as variações absolutas e relativas destas emissões e as participações das emissões dos setores nas emissões totais em cada ano.

As maiores reduções das emissões de GEE ocorreram em ‘Extrativa Mineral’ (-2.088.567 tCO₂e), ‘Minerais Não Metálicos’ (-1.485.710 tCO₂e) e ‘Outras Indústrias’ (-1.473.045 tCO₂e). Por outro lado, as atividades econômicas que apresentaram maior crescimento em suas emissões de GEE foram os setores ‘Transporte Terrestre’ (31.255.184 tCO₂e) e ‘Energético’ (28.380.265 tCO₂e), que juntos foram responsáveis por 73,4% das emissões de GEE no Brasil, em 2017.³¹ No todo, a economia brasileira tornou-se mais poluente no ano 2017, em comparação com o ano de 2010, com uma variação positiva de 57.886.247 tCO₂e nas suas emissões de GEE.

Tabela 3. Emissões de gases de efeito estufa (tCO₂e GWP – AR5) dos setores da economia brasileira, em 2010 e 2017.

Setor Econômico	Emissões em 2010	Emissões em 2017	Variação Absoluta	Variação Relativa (%)	(%) Participação 2010	(%) Participação 2017
Agropecuária	18.155.344	20.209.498	2.054.155	11,3	5,2%	5,0%
Extrativa Mineral	7.606.798	5.518.231	(2.088.567)	(27,5)	2,2%	1,4%
Minerais Não Metálicos	19.380.527	17.894.817	(1.485.710)	(7,7)	5,6%	4,4%
Siderurgia	6.545.377	7.443.732	898.355	13,7	1,9%	1,8%
Metais Não Ferrosos e Outros Metais	6.118.180	6.187.597	69.417	1,1	1,8%	1,5%
Papel e Celulose	4.719.403	5.067.084	347.681	7,4	1,4%	1,3%
Química	14.728.488	15.445.708	717.220	4,9	4,2%	3,8%
Têxtil	1.067.500	706.758	(360.742)	(33,8)	0,3%	0,2%
Alimentos e Bebidas	6.303.178	6.086.982	(216.195)	(3,4)	1,8%	1,5%
Comércio e Serviços	1.687.060	1.951.979	264.919	15,7	0,5%	0,5%
Administração Pública	1.234.759	907.971	(326.788)	(26,5)	0,4%	0,2%
Outras Indústrias	7.616.576	6.143.531	(1.473.045)	(19,3)	2,2%	1,5%

³¹ Uma tabela com as participações dos 16 setores econômicos nas emissões totais de GEE em 2010 e 2017, pode ser encontrada no **Apêndice D** deste estudo.

Energético	78.548.936	106.929.201	28.380.265	36,1	22,6%	26,4%
Transporte Terrestre	158.926.950	190.182.134	31.255.184	19,7	45,8%	47,0%
Transporte Aéreo	9.772.616	10.055.220	282.605	2,9	2,8%	2,5%
Transporte Aquaviário	4.450.382	4.017.874	(432.507)	(9,7)	1,3%	1,0%
Total	346.862.072	404.748.319	57.886.247	16,7	100,0%	100,0%

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG).

Segue-se agora, uma análise mais detalhada, dos setores que apresentaram maiores quedas e crescimentos no nível de emissão de GEE no Brasil, entre 2010 e 2017. A Figura 7 exhibe o comportamento das emissões de GEE dos setores ‘Minerais Não Metálicos’, ‘Extrativa Mineral’ e ‘Outras Indústrias’, de 2010 a 2017. O setor ‘Extrativa Mineral’ apresentou a maior redução nas emissões de GEE, entre todos os setores produtivos considerados na análise. Em 2010, o setor gerou 7.606.798 tCO₂e e nos anos seguintes manteve seu nível de emissão estável, até os anos de 2016 e 2017, quando apresentou níveis poluentes menores, 5.927.809 tCO₂e e 5.518.231 tCO₂e, respectivamente.

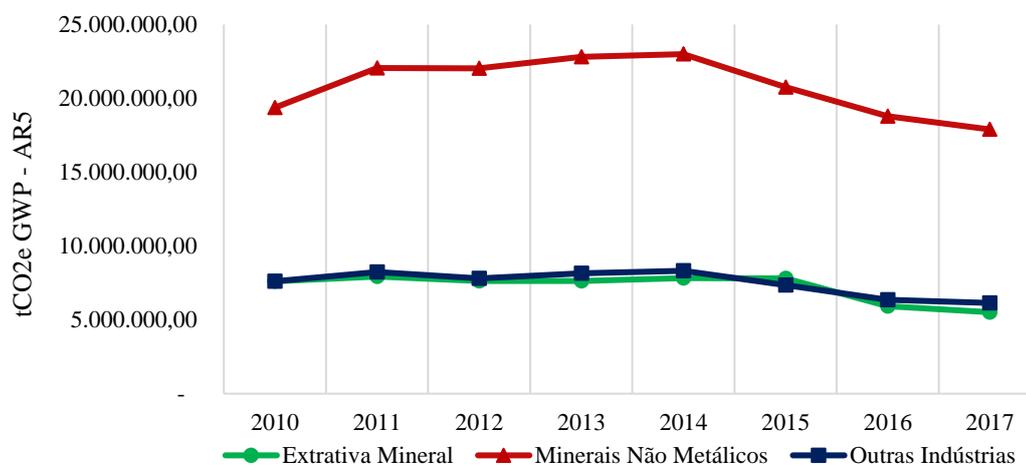


Figura 7. Emissões de gases de efeito estufa (em tCO₂e GWP-AR5) dos setores ‘Minerais Não Metálicos’, ‘Extrativa Mineral’ e ‘Outras Indústrias’ de 2010 a 2017. Elaboração própria a partir de dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG).

O setor ‘Minerais Não Metálicos’ apresentou a segunda maior queda na geração de GEE entre 2010 e 2017, uma diferença de 1.485.710 tCO₂e. O ápice de poluição produzida pelo setor ocorreu no ano de 2014, quando o setor, a partir de sua produção emitiu cerca de 22.994.169 tCO₂e. Em relação ao setor ‘Outras Indústrias’, em 2010 o setor contabilizou aproximadamente 7.616.575 tCO₂e e assim como o setor ‘Extrativa Mineral’, apresentou estabilidade em sua trajetória ascendente, entretanto apenas até o ano de 2014, quando o setor começou a apresentar reduções em seu nível de emissão de poluentes, gerando em torno de

6.143.530 tCO₂e no último ano da análise.

Por outro lado, os setores de ‘Transporte Terrestre’ e ‘Energético’ apresentaram aumento em suas emissões de gases de efeito estufa. A Figura 8 ilustra o comportamento similar das emissões dos setores em questão, já que de acordo com Firme e Perobelli (2012) e Montoya *et al.* (2015), o primeiro exerce forte pressão sobre o consumo de energia e conforme indicado por Moraes (2005), a evolução do setor de transportes brasileiro demanda um volume energético cada vez maior.

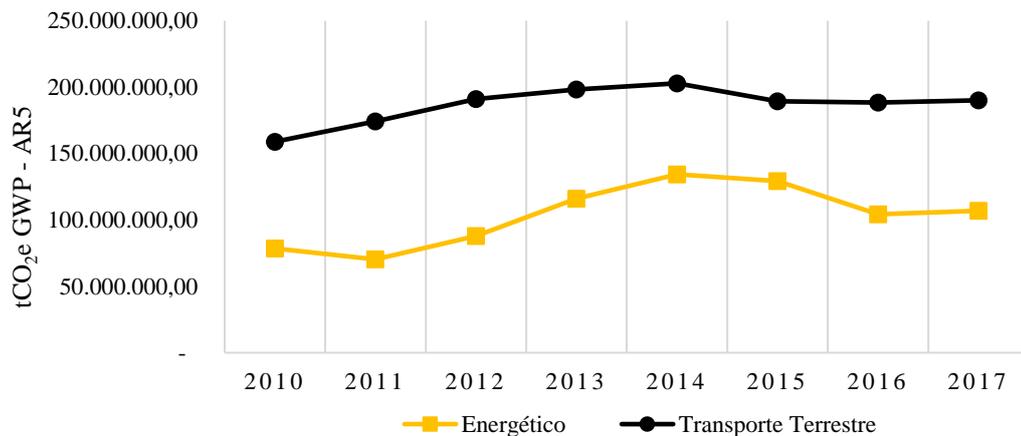


Figura 8. Evolução das emissões de gases de efeito estufa (em tCO₂e GWP-AR5) dos setores ‘Transporte Terrestre’ e ‘Energético’ de 2010 a 2017. Elaboração própria a partir de dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG).

O setor ‘Transporte Terrestre’ exibiu crescimento em seu nível de poluição desde 2010, atingindo cerca de 202.905.655 tCO₂e no ano de 2014. Houve então uma queda em 2015, quando o setor contabilizou 189.345.698 tCO₂e e em seguida, um novo crescimento, com a geração de 190.182.134 tCO₂e no ano de 2017. O setor ‘Energético’ apresentou conduta similar ao setor ‘Transporte Terrestre’, com trajetória crescente no nível de emissões de GEE, de 2010 a 2014 (ano em que emitiu 134.370.681 tCO₂e), seguido por uma redução na geração de poluentes, nos anos de 2015 e 2016 e um novo aumento nas emissões em 2017, quando gerou 106.929.201 tCO₂e.

O Relatório Síntese de 2019 publicado pelo SEEG corrobora a asserção de que o crescimento das emissões de GEE destes setores seja intrinsecamente relacionado: a partir de 2009, a elevação nas emissões do setor de transportes foi influenciada pela queda na participação do consumo de etanol, motivada pela perda de competitividade do álcool, em relação a outros combustíveis fósseis (como a gasolina), nos preços relativos ao consumidor final. No ano de 2013, entretanto, a tendência começou a se reverter e, em 2015, uma recuperação da indústria do etanol provocou redução nas emissões de poluentes dos respectivos

setores. Contudo, Nastari (2018) aponta que em 2017, o volume de cana-de-açúcar disponível foi prejudicado na segunda metade da safra, por um longo período de estiagem, ao mesmo tempo em que a demanda por combustíveis crescia. Houve então um aumento no consumo de combustíveis de origem fóssil e consequentemente, nas emissões de GEE.

A partir da estrutura de insumo-produto, pode-se fazer uma análise do coeficiente de intensidade de emissão (CIE) dos setores econômicos. O CIE indica a parcela de poluente do tipo k gerado por unidade monetária de produto do setor j e ao permitir a mensuração da intensidade de emissão de GEE de um setor econômico, possibilita a classificação das atividades econômicas como diretamente mais ou menos poluentes. A Figura 9 especifica os coeficientes de intensidade de emissão dos setores considerados neste estudo, nos anos de 2010 e 2017.

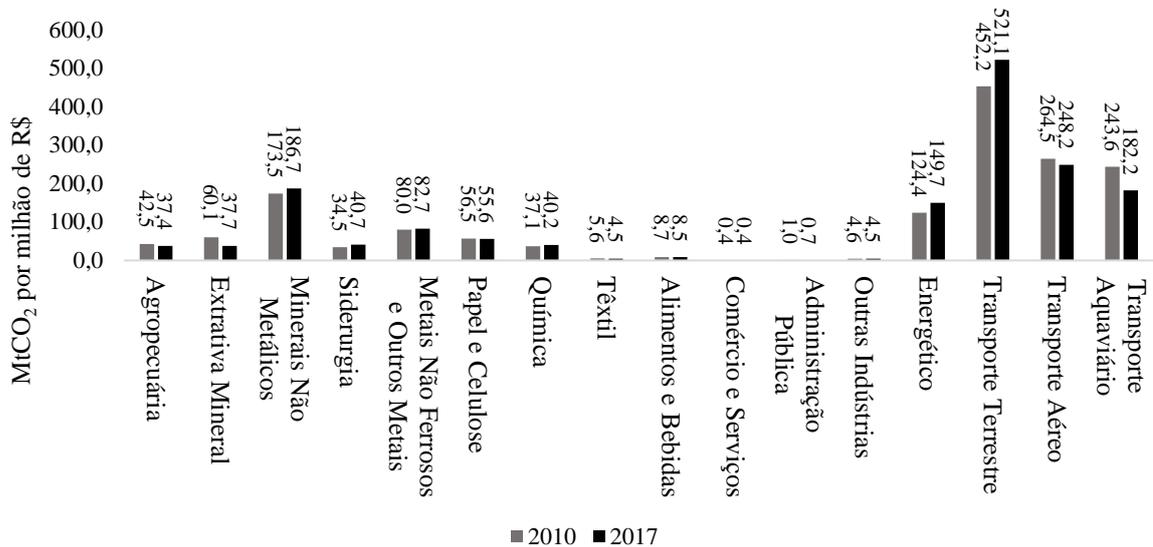


Figura 9. Coeficientes de intensidade de emissão dos setores econômicos (2010-2017). Elaboração própria.

Para o ano de 2010, o setor ‘Transporte Terrestre’ obteve o mais alto CIE (452,2 MtCO₂e por milhão de R\$), caracterizando-se como o mais poluente da economia brasileira. O setor apresentou um crescimento em sua intensidade de emissão de 18,34%, apresentando um CIE de 521,1 no ano de 2017. A elevação no CIE desta atividade econômica indicou que cada unidade monetária produzida pelo setor ‘Transporte Terrestre’ gerou mais poluição em 2017 do que em 2010. A partir do Relatório Síntese 2019 divulgado pelo SEEG, pode-se inferir que a forte expansão do CIE do setor relaciona-se com três fatores: i) aumento da quilometragem total rodada por automóveis e motocicletas; ii) queda na participação na demanda por álcool e aumento no consumo de gasolina, como consequência da perda de competitividade do etanol nos preços relativos ao consumidor final e iii) manutenção da

predominância do modal rodoviário na matriz de transportes nacional.

Os setores ‘Transporte Aéreo’ e ‘Transporte Aquaviário’ apresentaram o segundo e o terceiro mais altos coeficientes de intensidade de emissão da economia brasileira, nos anos de 2010 e 2017, respectivamente. Entretanto, diferiram-se do setor ‘Transporte Terrestre’, uma vez que apresentaram quedas em seus CIE entre os dois períodos da análise. O setor ‘Transporte Aquaviário’ apresentou uma redução em seu CIE de cerca de 25,23% enquanto o setor ‘Transporte Aéreo’ reduziu seu CIE em 6,14%, indicando que cada unidade monetária produzida por estes setores ocasionou menos poluição no ano de 2017 do que em 2010.

O setor ‘Energético’ exibiu o maior crescimento no CIE dentre os setores econômicos analisados. De 2010 a 2017, o CIE deste setor apresentou um crescimento de 20,26%. Uma vez que o setor em questão apresenta altos encadeamentos para a frente na economia³², a elevação em seu CIE indica que os setores demandantes do setor ‘Energético’, ao realizarem compras de insumos deste setor, tornaram a economia mais poluente em 2017 do que em 2010, visto que cada unidade monetária produzida pelo setor gerou um nível superior de emissão de GEE.

A Figura 10 apresenta a evolução da participação das termelétricas na geração de energia total no Brasil, entre 2010 e 2017. Observa-se que a energia produzida a partir de fontes termelétricas apresentou elevação a partir de 2011, atingido um pico de 34,7% na geração de total do país em 2014, ano marcado por forte crise hídrica na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP)³³, motivada pela combinação de baixos índices pluviométricos, grande crescimento na demanda de água e ausência de planejamento adequado para a gestão de recursos hídricos (MARENGO; ALVES, 2016). Conforme apontam Tundisi e Tundisi (2015), a redução no volume útil dos reservatórios diminuiu a produção de energia hidrelétrica e aumentou a demanda por energia termelétrica, o que acarreta crescimento no nível de emissões de GEE. Sendo assim, a maior participação das fontes termelétricas na matriz energética brasileira, entre

³² Conforme apontam Guilhoto *et al.* (1994), os índices de Rasmussen-Hirschman podem ser utilizados no modelo de insumo-produto para estabelecer quais são os setores dentro de uma economia que apresentam maior poder de encadeamento. Pode-se então calcular os índices de ligações para trás que indicariam o quanto um setor demanda dos outros e os índices de ligações para frente que determinariam o quanto este setor é demandado pelos demais. Firme e Perobelli (2012) demonstraram que o setor energético apresentou um forte índice de ligações para frente em 1997, mas em 2002 o mesmo índice diminuiu (talvez em decorrência de políticas de racionamento energético adotadas pelo governo). O estudo de Montoya *et al.* (2015), ao utilizar dados para o ano de 2009, caracterizou o setor energético como o principal ‘setor-chave’ do país, visto que o mesmo promoveu, com suas ligações para trás, o crescimento concentrado em algumas atividades econômicas e com suas ligações para frente, ao atuar como fornecedor de insumos básicos, impulsionou de forma abrangente diversos setores da economia.

³³ A Região Metropolitana de São Paulo concentra 39 municípios e é o maior polo de riqueza nacional. Em 2016, seu PIB correspondia a aproximadamente 17,7% do total brasileiro. A metrópole centraliza importantes complexos comerciais e financeiros que dinamizam as atividades econômicas no país (EMPLASA, 2019).

os anos de 2010 e 2017, pode ser incluída entre os fatores capazes de explicar o crescimento no coeficiente de intensidade de emissão do setor ‘Energético’.

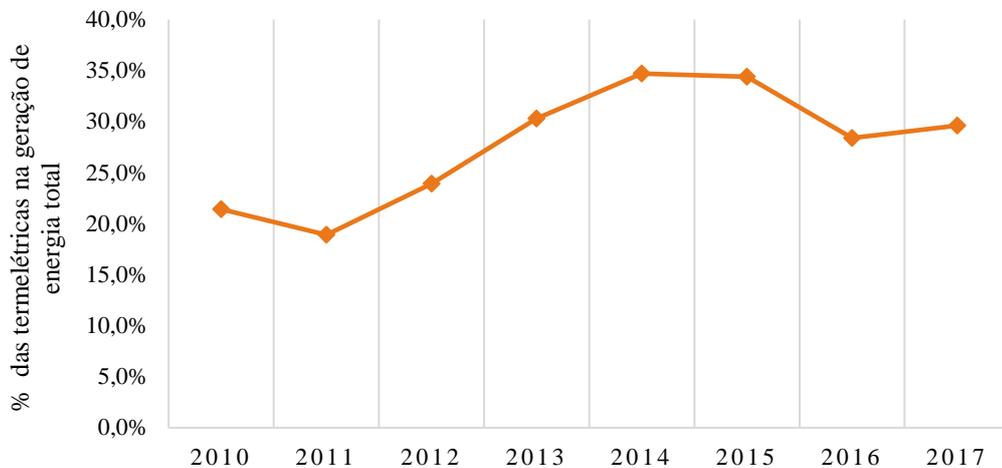


Figura 10. Evolução da participação das termelétricas na geração de energia total do Brasil, entre 2010 e 2017. Elaboração própria a partir de dados do Balanço Energético Nacional.

O setor ‘Minerais Não Metálicos’ apresentou o quarto maior CIE nos dois períodos do estudo. Em 2010, o CIE do setor era de 173,5 e em 2017, atingiu 186,7. Por sua vez, o setor ‘Minerais Não Ferrosos e Outros Metais’ ostentou o sexto maior coeficiente de intensidade de emissão nos anos analisados. Sendo assim, estes setores caracterizaram-se como as atividades econômicas, não relacionadas diretamente aos transportes, que mais poluíram no país.

O setor ‘Extrativa Mineral’ exibiu a maior redução entre os CIE, com queda de 37,18% no período (2010-2017). O setor ‘Agropecuária’, por sua vez apresentou redução em cerca de 11,95% em seu coeficiente de intensidade de emissão. Isso indicou que estes setores se tornaram mais limpos, visto que cada unidade monetária produzida emitiu menos poluentes no ano de 2017, em comparação com o ano de 2010. O setor ‘Extrativa Mineral’ gerou 37,8 MtCO₂e por milhão de reais em 2017, enquanto a ‘Agropecuária’ produziu 37,4 MtCO₂e por milhão de reais no mesmo ano. Ademais, os setores demandantes de ‘Extrativa Mineral’ e ‘Agropecuária’ tornaram a economia brasileira mais limpa, através dos efeitos indiretos.

As atividades econômicas que obtiveram os menores CIE entre os anos analisados foram, em ordem decrescente: ‘Alimentos e Bebidas’, ‘Têxtil’, ‘Outras Indústrias’, ‘Administração Pública’ e ‘Comércio e Serviços’. O baixo CIE destes setores indicou que cada unidade monetária produzida por eles gerou baixos níveis de poluição, tanto em 2010 quanto em 2017, caracterizando estes setores como os mais limpos da economia brasileira, diretamente, no período abarcado por este estudo.

De forma a ampliar a análise setorial, a Tabela 4 expressa as parcelas referentes aos

setores de transportes nos coeficientes de impacto ambiental (CIA)³⁴, das atividades econômicas consideradas neste estudo, nos anos de 2010 e 2017. Os CIA expressam o impacto total, ou seja, direto e indireto, da poluição gerado por unidade monetária de demanda final apresentada à economia. Por serem utilizados como insumos, os serviços dos setores de transportes participam indiretamente da poluição gerada pelos demais setores da economia. É possível afirmar, portanto, que, indiretamente os setores de transporte são responsáveis por elevar o nível de emissão de GEE na economia, com destaque para o setor ‘Transporte Terrestre’.

Tabela 4. Participação dos setores de transportes nos coeficientes de impacto ambiental das atividades econômicas do Brasil, em 2010 e 2017.

Setor Econômico	Transporte Terrestre		Transporte Aéreo		Transporte Aquaviário	
	2010	2017	2010	2017	2010	2017
Agropecuária	0,19	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00
Extrativa Mineral	0,23	0,33	0,03	0,04	0,06	0,07
Minerais Não Metálicos	0,12	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00
Siderurgia	0,36	0,35	0,01	0,01	0,01	0,01
Metais Não Ferrosos e Outros Metais	0,16	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00
Papel e Celulose	0,24	0,26	0,01	0,01	0,02	0,02
Química	0,28	0,30	0,01	0,01	0,01	0,01
Têxtil	0,45	0,50	0,01	0,01	0,01	0,01
Alimentos e Bebidas	0,45	0,48	0,01	0,01	0,01	0,01
Comércio e Serviços	0,51	0,53	0,07	0,05	0,01	0,01
Administração Pública	0,44	0,50	0,05	0,04	0,01	0,00
Outras Indústrias	0,39	0,41	0,02	0,01	0,01	0,01
Setor Energético	0,08	0,09	0,00	0,00	0,01	0,00
Transporte Terrestre	0,93	0,92	0,00	0,00	0,00	0,00
Transporte Aéreo	0,04	0,04	0,90	0,84	0,00	0,00
Transporte Aquaviário	0,05	0,06	0,01	0,01	0,87	0,84

Fonte: Elaboração própria

A análise das parcelas dos setores de transporte nos CIA dos demais setores explicita que o aumento indireto da poluição em outras atividades econômicas ocorre majoritariamente, devido à dependência que estas atividades apresentam em relação ao setor ‘Transporte Terrestre’. Os impactos ambientais são, portanto, transmitidos ao longo das cadeias produtivas dos demais setores, fomentados pela maior quantidade de insumos do setor demandados pelas demais atividades econômicas. Ainda, uma vez que o CIE do setor ‘Transporte Terrestre’ se elevou em 2017, o setor tornou-se mais poluente e, devido à dependência que as demais

³⁴ Os **Apêndices E.1 e E.2** apresentam os coeficientes de impacto ambiental (CIA) para todos os setores econômicos considerados neste estudo, em 2010 e 2017, respectivamente.

atividades econômicas têm em relação a ele, o impacto do aumento das emissões no respectivo setor foi transmitido para o restante da economia. A partir da Tabela 4, pode-se identificar que em 2017, o setor ‘Transporte Terrestre’, indiretamente, foi responsável por 53% das emissões de GEE do setor ‘Comércio e Serviços’, 50% das emissões do setor ‘Têxtil’, 50% da poluição do setor ‘Administração Pública’ e 48% das emissões do setor ‘Alimentos e Bebidas’.

Ademais, a análise da Tabela 4 evidencia que os setores ‘Transporte Aéreo’ e ‘Transporte Aquaviário’ foram responsáveis por pequena participação indireta nas emissões dos demais setores econômicos. Em 2017, o ‘Transporte Aéreo’ respondeu indiretamente por 5% da poluição do setor ‘Comércio e Serviços’ e 4% das emissões dos setores ‘Extrativa Mineral’ e ‘Administração Pública’, enquanto o setor ‘Transporte Aquaviário’ foi indiretamente responsável por 7% das emissões do setor ‘Extrativa Mineral’ e 2% da poluição do setor ‘Papel e Celulose’. Estes setores, portanto apresentaram reduções em seus CIE, mas não conseguiram transmitir esses ganhos ao restante da economia, em função de suas participações reduzidas na matriz nacional de transporte, visto que, conforme aponta Fleury (2012), a mesma apresenta pequena proporção de modais que não sejam terrestres.

Pode-se traçar um paralelo interessante entre os coeficientes de intensidade de emissão de alguns setores econômicos e às parcelas dos transportes em seus respectivos coeficientes de impacto ambiental: embora os setores de ‘Extrativa Mineral’ e ‘Outras Indústrias’ tenham, em 2017, apresentado reduções em seus CIE, indicando que os níveis de poluentes gerados por unidade monetária de seus produtos tenham diminuído, os mesmos setores apresentaram crescimento na participação dos insumos/produtos dos transportes em seus CIA. Neste sentido, ainda que os setores tenham se tornado menos poluentes, os mesmos foram indiretamente impactados pelo aumento das emissões dos setores de transporte. Sendo assim, a hipótese levantada acerca dos impactos indiretos das emissões de GEE dos setores de transporte foi asseverada.

4.2. Análise de Decomposição Estrutural das emissões de GEE no Brasil (2010-2017).

Os resultados da análise de decomposição estrutural (SDA) permitirão uma avaliação pormenorizada dos fatores que acarretaram o nível de emissão de GEE no país. A Figura 11 ilustra os efeitos da decomposição estrutural das emissões de GEE (em tCO₂e GWP-AR5) na economia brasileira, entre os anos de 2010 e 2017. Pode-se observar que os efeitos intensidade (D), tamanho da população (p), tecnologia dos ‘Outros Setores’ ($L_{Outros\ Setores}$), tecnologia do ‘Transporte Terrestre’ ($L_{Terrestre}$), volume da demanda final (f^v) e tecnologia do ‘Transporte

Aéreo' ($L_{Aéreo}$) foram positivos. O efeito intensidade (D), que mensura as mudanças nos coeficientes de intensidade de emissão (CIE), ou seja, a variação na quantidade de GEE emitida por unidade produzida em milhões de reais, constituiu a força motriz das emissões no Brasil no período analisado. Entre 2010 e 2017, o efeito (D) foi responsável por mais de 37.464.537 tCO₂e emitidas no país.

O efeito tamanho da população (p) obteve a segunda maior magnitude para o período (ocasionando um aumento nas emissões superior a 31.844.525 tCO₂e. Por outro lado, os efeitos nível do PIB per capita (y) e estrutura da demanda final (f^s), provocaram as maiores reduções nas emissões de GEE para o período analisado, com quedas de 13.263.379 tCO₂e e 10.723.907 tCO₂e, respectivamente. Fica, portanto, evidente que a queda de 3,48% no PIB per capita, entre 2010 e 2017, assim como as variações na estrutura da demanda final, foram capazes de exercer uma força descendente no nível de emissões de GEE na economia brasileira.

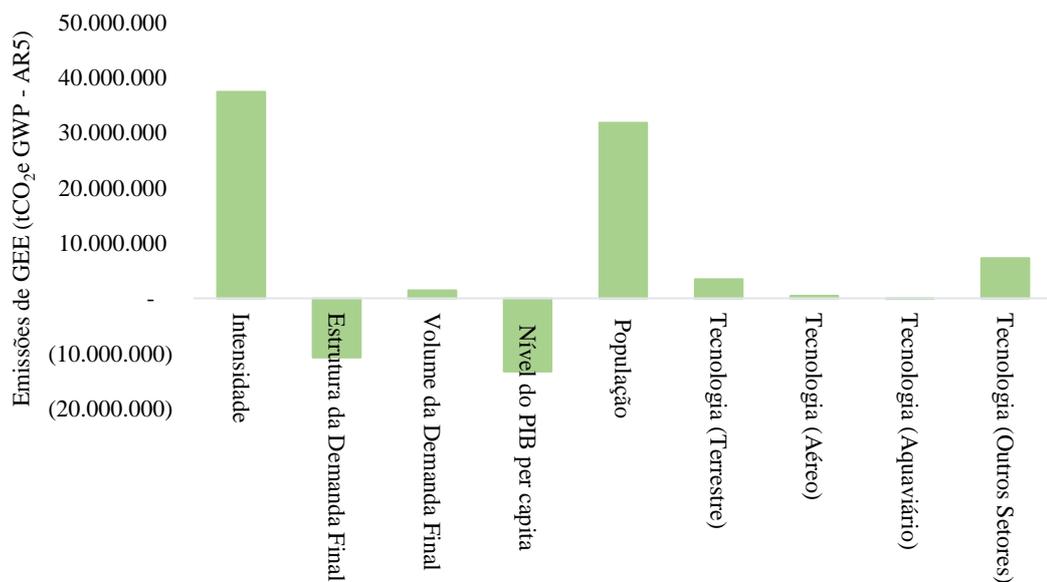


Figura 11. Efeitos da decomposição estrutural das emissões de Gases de Efeito Estufa (em tCO₂e GWP – AR5) na economia brasileira, entre 2010 e 2017. Elaboração própria.

Os resultados da SDA podem ser utilizados para conduzir uma análise setorial. Desta forma, a Tabela 5 apresenta a decomposição estrutural das emissões de GEE da economia brasileira, entre 2010 e 2017, em termos dos efeitos intensidade, demanda final e tecnológico, para os dezesseis setores considerados neste estudo e indica que, em geral, houve grande heterogeneidade entre os efeitos estruturais nos setores analisados.

Embora tenha se mostrado negativo para diversos setores da economia, o efeito intensidade, no agregado, apresentou-se positivo. A variação positiva, mensurada pelo efeito, pode ter ocorrido em função do elevado peso de setores como ‘Transporte Terrestre’ e

‘Energético’, no nível de emissão de GEE. Com relação ao efeito tecnológico, responsável por indicar a variação das emissões, ocasionadas por modificações na combinação de insumos dentro das cadeias produtivas da economia, este se manifestou negativo para considerável número de atividades econômicas, salvo ‘Agropecuária’, ‘Química’, ‘Comércio e Serviços’, ‘Energético’, ‘Transporte Terrestre’ e ‘Transporte Aquaviário’. No tocante ao efeito de demanda final, este também variou amplamente entre as atividades econômicas, se destacando pela redução das emissões nos setores ‘Minerais Não Metálicos’ e ‘Outras Indústrias’ e aumentos nos setores ‘Energético’, ‘Agropecuária’ e ‘Transporte Aéreo’.

Tabela 5. Decomposição Estrutural das emissões de GEE: efeitos intensidade, demanda final e tecnológico dos setores econômicos, entre 2010 e 2017 (em tCO_{2e}).

Setor Econômico	Variação Absoluta	Efeito Intensidade	Efeito Tecnológico	Efeito Demanda Final
Agropecuária	2.054.155	(2.455.615)	839.268	3.670.502
Extrativa Mineral	(2.088.567)	(3.046.128)	(47.354)	1.004.915
Minerais Não Metálicos	(1.485.710)	1.374.521	(442.238)	(2.417.993)
Siderurgia	898.355	1.154.454	(785.856)	529.757
Metais Não Ferrosos e Outros Metais	69.417	206.767	(406.704)	269.355
Papel e Celulose	347.681	(77.004)	(341.545)	766.231
Química	717.220	1.187.177	59.441	(529.399)
Têxtil	(360.742)	(204.158)	(39.628)	(116.956)
Alimentos e Bebidas	(216.195)	(110.120)	(10.431)	(95.644)
Comércio e Serviços	264.919	142.238	4.086	118.595
Administração Pública	(326.788)	(380.970)	(1.292)	55.474
Outras Indústrias	(1.473.045)	(106.432)	(90.783)	(1.275.831)
Energético	28.380.265	16.967.074	5.077.334	6.335.858
Transporte Terrestre	31.255.184	24.680.755	6.803.325	(228.897)
Transporte Aéreo	282.605	(628.490)	(319.154)	1.230.248
Transporte Aquaviário	(432.507)	(1.239.531)	826.456	(19.432)
Total	57.886.247	37.464.538	11.124.925	9.296.784

Fonte: Elaboração própria.

Pode-se identificar que a variação positiva nas emissões do setor ‘Agropecuária’, cerca de (2.054.155 tCO_{2e}), foi ocasionada pelo somatório dos efeitos tecnológico (839.268 tCO_{2e}) e demanda final (3.670.502 tCO_{2e}). O efeito intensidade do setor apresentou-se negativo (-2.455.615 tCO_{2e}) indicando que a atividade em questão se tornou mais eficiente, já que em 2017, emitiu um menor nível de emissão de GEE por quantidade de produto em comparação ao ano de 2010. Entretanto, o efeito intensidade não foi suficiente para compensar os efeitos que alavancaram as emissões. O setor ‘Extrativa Mineral’ apresentou efeito intensidade com comportamento similar ao setor ‘Agropecuária’: houve uma redução nas emissões de GEE, fomentada pelo mesmo (-3.046.128 tCO_{2e}). Contudo, esta atividade econômica diferenciou-se

da 'Agropecuária' ao também apresentar um efeito tecnológico negativo (-47.354 tCO_{2e}). A soma dos efeitos intensidade e tecnológico superou o efeito de demanda final para o setor (1.004.915 tCO_{2e}), de forma que a 'Extrativa Mineral' apresentou redução em seu nível de emissão de GEE em 2017.

O setor 'Energético' emitiu 28.380.265 tCO_{2e} a mais no ano de 2017 do que em 2010 e conforme resultados da SDA, o aumento nas emissões de GEE do setor foi principalmente acarretado pelo efeito intensidade (16.967.074 tCO_{2e}), indicando que houve aumento da quantidade de emissões por unidade de produto e pelo efeito de demanda final (6.335.858 tCO_{2e}), que evidenciou uma variação positiva no nível de demanda da economia por produto e serviços do respectivo setor. Além disso, o efeito tecnológico também se apresentou positivo (5.077.334 tCO_{2e}), caracterizando as ligações entre os setores da economia, no ano de 2017, como menos limpas.

Em relação ao setor 'Transporte Terrestre', este apresentou a maior variação absoluta nas emissões de GEE (31.255.184 tCO_{2e}), sendo que a principal força motriz por trás do crescimento do nível de poluição do setor foi o efeito intensidade, cerca de 24.680.755 tCO_{2e}, o que indicou que em 2017, o setor emitiu mais poluentes por quantidade de produto, em comparação com o ano de 2010. O efeito tecnológico também demonstrou um alto peso nas emissões de GEE do setor (6.803.325 tCO_{2e}), de forma que as relações intersetoriais tornaram o setor mais poluente, enquanto o efeito de demanda final apresentou redução de (-228.897 tCO_{2e}).

O setor 'Transporte Aéreo' apresentou a partir da SDA, os efeitos intensidade e tecnológico negativos, com (-628.490 tCO_{2e}) e (-319.154 tCO_{2e}), respectivamente. A partir destes resultados, pode-se concluir que houve uma redução no nível de emissões de GEE do setor, fomentadas tanto pela redução de poluição por quantidade de produto, quanto por variações entre as ligações setoriais que o tornaram o mais limpo. Entretanto, o somatório destes efeitos não foi suficiente para contrapor o peso do efeito de demanda final, acarretando elevação no nível de emissões do setor em cerca de 282.605 tCO_{2e}.

Diferentemente dos outros setores de transporte, o setor 'Transporte Aquaviário' apresentou redução nas emissões de GEE entre 2010 e 2017, em torno de 432.507 tCO_{2e}. A redução no nível de poluição foi motivada pelo efeito intensidade (-1.239.531 tCO_{2e}) e efeito de demanda final (-19.432 tCO_{2e}). A variação destes efeitos indicou que o setor emitiu, no ano de 2017, menos poluição por unidade produzida em comparação com o ano de 2010 e que a mudança de comportamento na demanda final da economia, em relação aos produtos e serviços deste setor, incentivou a menor geração de poluentes. O efeito tecnológico, entretanto,

apresentou-se positivo para o setor (826.456 tCO_{2e}), indicando que as variações nas ligações entre os setores da economia levaram o setor ‘Transporte Aquaviário’ a tornar-se menos limpo.

A Tabela 6 apresenta em detalhes a decomposição estrutural das emissões de GEE da economia brasileira, em termos de seus componentes tecnológicos. Os efeitos tecnológicos (L_j), apresentaram grande variação entre os setores da economia, entretanto, no agregado, os efeitos de tecnologia do setor ‘Transporte Terrestre’ ($L_{Terrestre}$), do setor ‘Transporte Aéreo’ ($L_{Aéreo}$) e dos ‘Outros Setores’ ($L_{Outros\ Setores}$) apresentaram-se positivos, com aumentos de 3.482.337 tCO_{2e}, 477.484 tCO_{2e} e 7.257.148 tCO_{2e}, respectivamente. Em relação as mudanças nas compras de insumos do setor ‘Transporte Terrestre’, ou seja, nos seus coeficientes técnicos, estas elevaram as emissões dos setores ‘Energético’, ‘Transporte Aquaviário’, ‘Extrativa Mineral’, ‘Química’ e ‘Agropecuária’. Por outro lado, as mudanças no respectivo setor promoveram a redução de emissões de GEE em outros setores, como, ‘Outras Indústrias’, ‘Minerais Não Metálicos’, ‘Siderurgia’ e ‘Papel e Celulose’.

Tabela 6. Efeito tecnológico agregado, tecnologia do setor ‘Transporte Terrestre’, tecnologia do setor ‘Transporte Aéreo’, tecnologia do setor ‘Transporte Aquaviário’ e tecnologia dos ‘Outros Setores’ da economia, entre 2010 e 2017 (em tCO_{2e} GWP – AR5).

Setor Econômico	Efeito Tecnológico	Tecnologia (Terrestre)	Tecnologia (Aéreo)	Tecnologia (Aquaviário)	Tecnologia (Outros Set.)
Agropecuária	839.267,99	10.832,10	3.724,39	(962,42)	825.673,93
Extrativa Mineral	(47.354,02)	40.356,59	19.992,56	(1.593,94)	(106.109,24)
Minerais Não Metálicos	(442.237,71)	(9.399,94)	1.475,37	(1.992,76)	(432.320,38)
Siderurgia	(785.855,86)	(4.535,44)	202,77	(366,56)	(781.156,63)
Metais Não Ferrosos e Outros Metais	(406.704,11)	72,73	(124,59)	(486,59)	(406.165,67)
Papel e Celulose	(341.545,26)	(922,51)	(1.232,32)	(2.640,30)	(336.750,13)
Química	59.441,04	11.119,25	(11.377,56)	(1.796,17)	61.495,53
Têxtil	(39.627,93)	(203,54)	(417,92)	(76,56)	(38.929,92)
Alimentos e Bebidas	(10.431,04)	2.124,40	212,23	(259,70)	(12.507,96)
Comércio e Serviços	4.085,85	1.679,34	(599,91)	(558,04)	3.564,46
Administração Pública	(1.292,27)	53,70	1,42	(32,03)	(1.315,36)
Outras Indústrias	(90.782,68)	(11.973,64)	123,05	(631,13)	(78.300,96)
Energético	5.077.334,02	953.788,31	472.295,64	(34.915,68)	3.686.165,74
Transporte Terrestre	6.803.325,35	2.426.738,64	(9.629,79)	(62.152,71)	4.448.369,20
Transporte Aéreo	(319.153,72)	8.810,31	131,36	(4.142,65)	(323.952,74)
Transporte Aquaviário	826.455,59	53.797,17	2.707,56	20.562,87	749.387,98
Total	11.124.925,23	3.482.337,49	477.484,26	(92.044,37)	7.257.147,84

Fonte: Elaboração própria.

O setor ‘Transporte Aéreo’, a partir de alterações em suas relações com as demais atividades da economia brasileira, fomentou o crescimento das emissões dos setores ‘Energético’, ‘Extrativa Mineral’, ‘Agropecuária’ e ‘Transporte Aquaviário’. Em contrapartida, as mudanças nas compras realizadas por este setor do restante da economia, ocasionaram a diminuição na emissão de poluentes dos setores de ‘Química’, ‘Transporte Terrestre’, ‘Papel e Celulose’ e ‘Têxtil’.

Em relação ao efeito de tecnologia do transporte aquaviário ($L_{Aquaviário}$), este apresentou-se negativo, indicando que as variações no consumo intermediário deste setor fomentaram reduções nos níveis de emissões de GEE de setores econômicos, principalmente ‘Transporte Terrestre’, ‘Energético’ e ‘Transporte Aéreo’. Ademais, de 2010 a 2017, as maiores reduções de emissões de GEE motivadas pelas compras do restante da economia ocorreram nos setores ‘Siderurgia’, ‘Minerais Não Metálicos’, ‘Metais Não Ferrosos e Outros Metais’ e ‘Papel e Celulose’, enquanto os setores ‘Transporte Terrestre’, ‘Energético’, ‘Agropecuária’ e ‘Transporte Aquaviário’ tornaram-se mais poluentes no período analisado, a partir de mudanças no ($L_{Outros Setores}$).

A Tabela 7 expõe detalhadamente os efeitos relativos à demanda final. O efeito tamanho da população (p) contribuiu fortemente com o aumento das emissões de GEE na economia brasileira no período 2010-2017, sendo positivo para todos os setores analisados. Os resultados para o efeito p estabeleceram uma relação direta entre crescimento populacional e aumento nos níveis de emissão de GEE, dado que, conforme aponta o IBGE³⁵, a população brasileira elevou-se em aproximadamente 9% de 2010 a 2017, ultrapassando os 207 milhões de habitantes. As alterações nas emissões do setor ‘Transporte Terrestre’, motivadas pelo aumento populacional, responderam por 46,24% do efeito p (15.047.222 tCO₂e no nível de emissões), enquanto o setor ‘Energético’ foi responsável por 24,60% do mesmo efeito (7.832.988 tCO₂e emitidas).

Tabela 7. Efeitos estrutura da demanda final, volume da demanda final, nível do PIB per capita e tamanho da população, entre 2010 e 2017 (em tCO₂e GWP – AR5).

Setor Econômico	Estrutura da Demanda Final	Volume da Demanda Final	Nível do PIB per capita	População
Agropecuária	5.440.839	(2.719.337)	(678.082)	1.627.081
Extrativa Mineral	(1.363.023)	2.041.564	(235.302)	561.677
Minerais Não Metálicos	(7.029.334)	3.687.156	(662.970)	1.587.154
Siderurgia	1.941.122	(1.757.310)	(247.074)	593.019
Metais Não Ferrosos e Outros Metais	(226.909)	191.505	(218.201)	522.960
Papel e Celulose	1.007.403	(483.361)	(173.182)	415.370
Química	1.963.719	(3.240.062)	(534.385)	1.281.330

³⁵ Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao.html>>. Acesso em setembro de 2020.

Têxtil	(60.953)	(100.170)	(31.902)	76.070
Alimentos e Bebidas	(362.877)	(39.791)	(220.038)	527.062
Comércio e Serviços	24.522	4.101	(64.235)	154.208
Administração Pública	14.193	(11.993)	(38.397)	91.671
Outras Indústrias	(1.204.280)	(413.278)	(245.835)	587.562
Energético	(2.033.075)	3.792.226	(3.256.281)	7.832.988
Transporte Terrestre	(8.319.809)	(537.007)	(6.155.393)	14.783.313
Transporte Aéreo	290.860	448.446	(351.376)	842.318
Transporte Aquaviário	(806.304)	576.856	(150.727)	360.743
Total	(10.723.907)	1.439.545	(13.263.379)	31.844.526

Fonte: Elaboração própria.

Por outro lado, o efeito nível do PIB per capita se apresentou negativo para todos os setores da economia, sendo que as principais reduções em termos das emissões ocorreram nos setores de ‘Transporte Terrestre’ (-6.155.393 tCO_{2e}) e ‘Energético’ (-3.256.281 tCO_{2e}). Neste sentido, pode-se inferir que a queda no nível do PIB per capita, de 3,48% entre 2010 e 2017³⁶, promoveu uma redução nos níveis de emissão dos GEE das atividades econômicas analisadas.

Conforme aponta Sesso *et al.* (2020), os efeitos da demanda final referem-se a variações nas emissões por meio de alterações em sua estrutura (f^s) e do volume (f^v), que pode ser definido como crescimento econômico. O efeito estrutura de demanda final (f^s) se apresentou negativo no agregado e para a maior parte dos setores econômicos no período 2010-2017. Este efeito revela as substituições entre os setores econômicos, ao evidenciar as variações na participação das atividades na demanda final. A análise das parcelas dos componentes da demanda final indicou redução nas exportações dos setores de ‘Transporte Aquaviário’ (-36,38%), ‘Energético’ (-30,53%), ‘Têxtil’ (-30,52%), ‘Alimentos e Bebidas’ (-19,69%), ‘Química’ (-19,17%), ‘Transporte Terrestre’ (-12,85) e ‘Transporte Aéreo’ (-10,05%). Por outro lado, os setores que responderam por maiores porções do componente de exportações foram os setores intensivos em recursos naturais: ‘Agropecuária’ (68%), ‘Extrativa Mineral’ (36,08%) e ‘Papel e Celulose’ (20,14%).

Com relação ao componente de consumo das famílias, houve crescimento nas parcelas dos setores ‘Transporte Aquaviário’ (53,09%), ‘Extrativa Mineral’ (50,89%), ‘Transporte Aéreo’ (34,31%) e ‘Energético’ (11,57%). Entretanto, o mesmo componente da demanda final apresentou redução em suas parcelas para o setor ‘Transporte Terrestre’ (-9,07%) e em setores ligados à indústria, como ‘Outras Indústrias’ (-22,34%), ‘Têxtil’ (-20,45%), ‘Alimentos e Bebidas’ (-9,25%) e ‘Química’ (-4,89%). O consumo da administração pública apresentou redução para todas as atividades econômicas consideradas neste estudo, com exceção dos

³⁶ A queda no PIB per capita foi mensurada a partir da base de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais.html>> e <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao.html>>. Acesso em setembro de 2020.

setores ‘Alimentos e Bebidas’ (3,45%) e ‘Administração Pública’ (1,58%).

O componente de FBCF da demanda final também apresentou modificações: houve crescimento na participação dos setores ‘Minerais Não Metálicos’ (66,88%), ‘Agropecuária’ (19,46%) e ‘Comércio e Serviços’ (16,60%) entre os anos de 2010 e 2017. Por outro lado, as maiores quedas nas participações deste componente da demanda final ocorreram em ‘Metais Não Ferrosos e Outros Metais’ (-23,40%), ‘Papel e Celulose’ (-18,87%), ‘Química’ (-18,54%) e ‘Administração Pública’ (-9,83%). Em relação à variação de estoque, o componente apresentou grande heterogeneidade entre os setores da economia brasileira no período analisado, sendo que a maior variação positiva ocorreu na participação do setor ‘Agropecuária’ e negativa na parcela referente ao setor ‘Outras Indústrias’.

A análise das variações nas participações de cada setor, nos componentes da demanda final têm potencial para explicar o resultado agregado do efeito estrutura da demanda final (f^s): a queda na participação do setor ‘Transporte Terrestre’ nos componentes de exportações de bens e serviços e consumo das famílias, a contração na parcela do setor ‘Energético’ no componente de exportações e a redução do setor ‘Outras Indústrias’ nos componentes de exportação, consumo da administração pública e consumo das famílias podem constituir alguns dos motivos para a força descendente do efeito estrutura de demanda final.

No que concerne ao volume da demanda final da economia brasileira, o efeito f^v (que pode ser visto como uma medida de crescimento econômico) apresentou valor positivo (um aumento de 1.439.545 tCO₂e de GEE emitidos), impulsionado principalmente pelo setor ‘Energético’, responsável pela emissão de 3.792.226 tCO₂e, ‘Minerais Não Metálicos’, que emitiu 3.687.156 tCO₂e e ‘Extrativa Mineral’, com emissão de 2.041.564 tCO₂e. De acordo com Sesso *et al.* (2020), o efeito volume da demanda final para as emissões de GEE, somente se apresentaria negativo caso o país estivesse em um cenário de recessão profunda e com queda em seu PIB.

Os resultados deste estudo se alinham às análises de Lenzen *et al.* (2013) e Sesso *et al.* (2020), ao confirmar o impacto do crescimento populacional brasileiro no aumento das emissões de GEE setoriais. Para a SDA realizada neste estudo, o efeito (p) apresentou-se positivo para todos os setores econômicos. Em relação ao efeito volume de demanda final (f^v), o mesmo também impulsionou o crescimento das emissões de poluentes, como apontando por Morais (2007) e Sesso *et al.* (2020), embora não tenha se apresentado como o fator mais relevante em relação ao aumento das emissões de GEE, como defendido por Hoekstra e Van de Bergh (2002). Sendo assim, a hipótese levantada acerca do impacto das emissões relacionadas à demanda final, foi confirmada para o efeito (p) e (f^v).

A Tabela 8 apresenta uma síntese da SDA das emissões de GEE brasileiras entre os anos de 2010 e 2017: o sinal positivo (+) assinala que o efeito em questão motivou o crescimento das emissões setoriais e o sinal negativo (-) indica que o efeito induziu a redução das emissões dos setores.

Tabela 8. Síntese da Análise de Decomposição Estrutural (SDA) das emissões de GEE brasileiras (2010-2017).

Setor Econômico	D	f^s	f^v	y	p	$L_{Terrestre}$	$L_{Aéreo}$	$L_{Aquaviário}$	$L_{OutrosSetores}$
Agropecuário	-	+	-	-	+	+	+	-	+
Extrativa Mineral	-	-	+	-	+	+	+	-	-
Minerais Não Metálicos	+	-	+	-	+	-	+	-	-
Siderurgia	+	+	-	-	+	-	+	-	-
Metais Não Ferrosos e Outros Metais	+	-	+	-	+	+	-	-	-
Papel e Celulose	-	+	-	-	+	-	-	-	-
Química	+	+	-	-	+	+	-	-	+
Têxtil	-	-	-	-	+	-	-	-	-
Alimentos e Bebidas	-	-	-	-	+	+	+	-	-
Comércio e Serviços	+	+	+	-	+	+	-	-	+
Administração Pública	-	+	-	-	+	+	+	-	-
Outras Indústrias	-	-	-	-	+	-	+	-	-
Energético	+	-	+	-	+	+	+	-	+
Transporte Terrestre	+	-	-	-	+	+	-	-	+
Transporte Aéreo	-	+	+	-	+	+	+	-	-
Transporte Aquaviário	-	-	+	-	+	+	+	+	+
Total	+	-	+	-	+	+	+	-	+

Fonte: Elaboração própria.

Neste estudo, o efeito intensidade (D) e os efeitos tecnológicos (L_j) se opuseram aos resultados frequentemente encontrados na literatura, como em Wang *et al.* (2013), Li *et al.* (2018) e Sesso *et al.* (2020), visto que impulsionaram as emissões de GEE no Brasil, não agindo, portanto, como elementos de oposição aos efeitos ascendentes de demanda final. O efeito intensidade, no agregado, ao exercer uma força positiva no nível de emissão de poluentes, indicou que cada unidade monetária produzida no Brasil em 2017 gerou mais poluição do que em 2010. O resultado para este efeito fundamenta-se principalmente nos pesos de setores como ‘Transporte Terrestre’ e ‘Energético’. Em oposição, o efeito intensidade nos setores ‘Extrativa Mineral’, ‘Transporte Aéreo’ e ‘Transporte Aquaviário’ alinhou-se às análises frequentemente encontradas na literatura, ao exercer nestas atividades, uma força descendente que se opôs aos efeitos de volume de demanda final. Sendo assim, para estes setores, confirma-se a hipótese levantada, entretanto, no agregado, a mesma é refutada.

O efeito do PIB per capita (y) mostrou-se negativo para todos os setores econômicos analisados. Isso se explica pela variação negativa no PIB per capita (cerca de 3,48%, entre os

anos de 2010 e 2017), já que a literatura aponta para uma elevação das emissões de GEE em épocas de crescimento do PIB per capita, como no estudo de Fan *et al.* (2019), que aplicou a SDA para as regiões de Beijing-Tianjin-Hebei, na China. Em relação ao efeito estrutura de demanda final, este se apresentou negativo no agregado e para maioria dos setores, entre os anos de 2010 e 2017, no Brasil. Ademais, Wang *et al.* (2013) apontaram para o alcance limitado do efeito, que através dos componentes da demanda final podem indicar substituições entre as atividades econômicas.

Em síntese, os resultados obtidos permitiram identificar que o Brasil apresentou crescimento em seu nível de emissões de GEE, fomentado tanto pelos efeitos tecnológicos, quanto pelos efeitos relativos à demanda final. Neste sentido, o efeito intensidade (D), os efeitos tecnológicos (L_j), com exceção do efeito ($L_{Aquaviário}$), o efeito tamanho da população (p) e o efeito de volume da demanda final (f^v) contribuíram para o aumento das emissões de poluentes no país no período 2010-2017.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas últimas décadas, o efeito estufa, ocasionado pela alteração na concentração de gases poluentes na atmosfera terrestre tem se destacado como um problema ambiental que transcende as fronteiras entre os países, constituindo-se como um problema ambiental global. Estas alterações nas concentrações de diferentes gases na atmosfera constituem um fenômeno preocupante, visto que o processo de aquecimento do clima global em curso não se explica apenas por causas naturais e deve-se, em grande parte, às emissões de gases de efeito estufa (GEE), originadas a partir de atividades antrópicas, em especial as emissões ligadas ao uso de energia nos setores de transporte.

Desta forma, o presente estudo realizou uma avaliação, entre os anos de 2010 a 2017, acerca das mudanças estruturais da economia brasileira (nível de intensidade, estrutura da demanda final, volume da demanda final, nível do PIB per capita, tamanho da população e tecnologia) relativas às emissões de GEE, tanto sob uma ótica agregada, quanto setorial e, neste caso, com foco direcionado sobre o setor de transporte, responsável por volume considerável de GEE emitidos no país. A análise permitiu identificar os fatores que fundamentaram as variações no volume emitido de GEE na economia brasileira, determinar os elementos estruturais que mais influenciaram as emissões de GEE em uma perspectiva setorial e evidenciar a participação indireta do setor transportes na emissão de GEE dos outros setores da economia.

A metodologia empregada consistiu na Análise de Decomposição Estrutural (SDA), a partir do modelo de insumo-produto. A literatura da SDA é ampla e inclui estudos que decompõem variáveis como produto total, valor agregado e demanda por mão-de-obra. Ademais, a SDA aplicada em questões de cunho ambiental pode ser utilizada para decompor mudanças nos fluxos físicos, como uso de energia, emissões de CO₂ e vários outros tipos de poluentes e recursos. A utilização da SDA, portanto, viabilizou a especificação detalhada das mudanças na estrutura econômica brasileira, distinguindo as características diretas, a influência indireta da demanda final e as mudanças nos níveis tecnológicos, a partir da emissão de GEE dos setores econômicos.

Os resultados da SDA permitiram identificar que o efeito intensidade, que indica a variação das emissões por unidade produzida em milhões de reais, constituiu a principal força da elevação das emissões de GEE no Brasil (37.464.538 tCO₂e), sendo o setor 'Transporte Terrestre' responsável por 65,88% do total do efeito. O efeito tamanho da população respondeu por um aumento de 31.844.526 tCO₂e, enquanto os efeitos de nível do PIB per capita e estrutura

da demanda final, ocasionaram as maiores reduções das emissões de poluentes, (-13.263.379 tCO_{2e}) e (-10.723.907 tCO_{2e}), respectivamente. Ainda, os efeitos de tecnologia apresentaram grande heterogeneidade entre as atividades econômicas analisadas, contudo, mostraram-se positivos para os setores de transportes, com exceção do efeito *L_{Aquaviário}*, de forma que foi possível inferir que as mudanças nas relações entre estes setores e o restante da economia, provocaram crescimento nas emissões de GEE no Brasil. Pode-se concluir, portanto, que a intensidade das emissões e as mudanças nas tecnologias de produção dos setores econômicos, aliadas aos aumentos causados pela população e ao nível da demanda final, contribuíram para o aumento das emissões de poluentes no país, entre os anos de 2010 e 2017.

A Análise de Decomposição Estrutural (SDA) realizada neste estudo, ao identificar os propulsores econômicos das emissões de gases de efeito estufa, pode orientar à formulação de políticas que visam à contenção da poluição e em uma perspectiva setorial, retoma a problemática do clima, continuamente negligenciada no Brasil, em função do desempenho dos setores ‘Transporte Terrestre’ e ‘Energético’. Cabe ressaltar a limitação proveniente do método utilizado: a SDA expressa a variação entre dois pontos no tempo (2010 e 2017), sem, contudo, apresentar a evolução dos acontecimentos entre estes anos. Entretanto, esta restrição não invalida os resultados obtidos.

É premente que os esforços sejam direcionados para redimensionar a matriz de transportes nacional, excessivamente dependente do modal rodoviário. Um desses esforços, seria a implantação e consolidação do sistema multimodal no país, já que a multimodalidade, isto é, o uso conjunto de dois ou mais modais de transporte, possibilitaria uma redução no impacto ambiental de toda a logística de transportes, devido a eficiência superior dos transportes aéreo e aquaviário, em termos de emissão de GEE. Ademais, incentivos devem ser propostos para: a) diversificar a matriz energética, de forma a ampliar o uso de fontes renováveis no país; b) implementar políticas de uso energético racional; c) tornar mais rigorosas as diretrizes acerca da eficiência energética e d) desenvolver o planejamento de médio a longo prazo do setor, de forma a reduzir o risco de escassez de energia no Brasil.

Como sugestões para futuras análises, uma possível decomposição estrutural em um âmbito regional permitiria identificar as especificidades setoriais para cada uma das Unidades Federativas do Brasil, o que possibilitaria à adoção de políticas de controle de emissões mais eficientes. Além disso, um estudo que abranja as emissões inerentes a cada um dos insumos e produtos dos setores, em especial, dos setores de transporte, permitiria um exame aprofundado das ligações entre os setores em questão e as emissões de gases de efeito estufa.

REFERÊNCIAS

- ANG, B. W. Multilevel decomposition of industrial energy consumption, **Energy Economics**, v. 17, p. 39-51, 1995.
- ARAÚJO, I. F.; JACKSON, R. W.; FERREIRA NETO, A. B.; PEROBELLI, F. S. European Union membership and CO₂ emissions: A structural decomposition analysis, **Structural Change and Economic Dynamics**, v. 55, p. 190-203, 2020.
- ARTAXO NETO, P. E. Dossiê Clima: Mudanças climáticas e o Brasil, **Revista USP**, São Paulo, n. 103, p. 8-12, nov, 2014.
- BAIOCCHI, G.; MINX, J. C. Understanding changes in the UK's CO₂ emissions: A global perspective, **Environmental Science & Technology**, v. 44, n. 4, p. 1177-1184, 2010.
- BARAT, J. O investimento em transporte como fator de desenvolvimento regional – Uma análise da expansão rodoviária no Brasil, **Revista Brasileira de Economia**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 3, p. 25-52, jul./set, 1969.
- BARBIERI, M. D.; FERREIRA, L. C; BARBI, F. Governando as mudanças climáticas: As estratégias políticas do Brasil e China, **Ideias**, v. 9, n. 2, p. 71-98, 2018.
- BRASIL. Ministério da Economia. **Sobre o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC)**. Disponível em: <<http://pac.gov.br/sobre-o-pac>>. Acesso em maio de 2020.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº 382, de 26 de dezembro de 2006. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 1, p. 131-137, 2 de janeiro de 2007.
- BRASIL. Resolução ANP nº 758, de 23 de novembro de 2018. Regulamenta a certificação da produção ou importação eficiente de biocombustíveis de que trata o art. 18 da Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, e o credenciamento de firmas inspetoras. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 54-63, 27 de novembro de 2018.
- BRIZGA, J.; FENG, KUI SHUANG.; HUBACEK, K. Drivers of greenhouse gas emissions in the Baltic States: A structural decomposition analysis, **Ecological Economics**, v. 98, p. 22-28, 2014.
- BRUNNÉE, J.; STRECK, C. The UNFCCC as a negotiation forum: towards common but more differentiated responsibilities, **Climate Policy**, v. 13, n. 5, p. 589-607, set, 2013.
- CAMPOS NETO, C. A. S. Planos e programas dos setores de transporte e energia elétrica no Brasil pós-2003. **Texto para discussão n. 2227**. Brasília: IPEA, ago, 2016.
- CANSINO, J. M.; ROMÁN, R.; ORDÓÑEZ, M. Main drivers of changes in CO₂ emissions in the Spanish economy: A structural decomposition analysis, **Energy Policy**, v. 89, p. 150-159, 2016.
- CARNEIRO, A. C. G. **Avaliação das mudanças recentes na matriz energética brasileira e nas emissões de CO₂ através do modelo insumo-produto**. 2010. f. Dissertação (Mestrado em Economia). Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa. 2010.
- CARVALHO, T. S.; PEROBELLI, F. S. Avaliação da intensidade de emissões de CO₂ setoriais e na estrutura de exportações: Um modelo inter-regional de insumo-produto São Paulo/restante do Brasil, **Economia Aplicada**, v. 13, n. 1, p. 99-124, 2009.

CARVALHO, T. S.; SANTIAGO, F. S.; PEROBELLI, F. S. Demographic change in Brazil and its impacts on CO₂ emissions, **Economic Systems Research**, 2020.

CASLER, S. D.; BLAIR, P. D. Economic structure, fuel combustion, and pollution emissions, **Ecological Economics**, v. 22, p. 19-27, 1997.

CASTRO, N. Mensuração das externalidades do transporte de carga brasileiro. **Journal of Transport Literature**, v. 7, n. 1, p. 163-181, jan, 2013.

CHEN, J.; SHI, Q.; SHEN, L.; HUANG, Y.; WU, Y. What makes the difference in construction carbon emissions between China and the USA? **Sustainable Cities and Society**, v. 44, 2018.

CLASSIFICAÇÃO NACIONAL DE ATIVIDADES ECONÔMICAS (CNAE). Disponível em <<https://concla.ibge.gov.br/>>. Acesso em agosto de 2020.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Anuário CNT do transporte: Estatísticas consolidadas 2019. Brasília: CNT, 2019.

COMMON, M. S.; SALMA, U. Accounting for changes in Australian carbon dioxide emissions. **Energy Economics**, v. 14, n. 3, p. 217-225, jul, 1992.

CORREA, V. H. C.; RAMOS, P. A precariedade do transporte rodoviário brasileiro para o escoamento da produção de soja do Centro-Oeste: situação e perspectivas, **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 48, n. 2, abr./jun, 2010.

DE HAAN, M. A structural decomposition analysis of pollution in the Netherlands, **Economic Systems Research**, v. 13, n. 2, p. 181-196, 2001.

DIETZENBACHER, E.; LOS, B. Structural decomposition techniques: Sense and sensitivity, **Economic Systems Research**, v. 10, n. 4, p. 307-324, 1998.

DOGAN, E.; SEKER, F. Determinants of CO₂ emissions in the European Union: The role of renewable and non-renewable energy, **Renewable Energy**, v. 94, p. 429-439, 2016.

EMPRESA ENERGÉTICA NACIONAL (EPE). **Balanco Energético Nacional (BEN) 2019: Ano base 2018**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>>. Acesso em abril de 2020.

EMPRESA ENERGÉTICA NACIONAL (EPE). **Balanco Energético Nacional (BEN) – Séries Históricas Completas**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes>>. Acesso em novembro de 2020.

EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO S/A (EMPLASA). **Sobre a Região Metropolitana de São Paulo - RMSP**. São Paulo, 2019. Disponível em: <<https://emplasa.sp.gov.br/RMSP>>. Acesso em dezembro de 2020.

FAN, J-L.; CAO, Z.; ZHANG, X.; WANG, J-D.; ZHANG, M. Comparative study on the influence of final use structure on carbon emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei region, **Science of the Total Environment**, v. 668, p. 271-282, 2019.

FERREIRA, P. C. G.; MALLIAGROS, T. G. **Investimentos, fontes de financiamento e evolução do setor de infraestrutura no Brasil: 1950-1996**. Rio de Janeiro: EPGE, 1999. (Ensaio Econômico, n 346).

FERREIRA NETO, A. B., CORRÊA, W. L. R., PEROBELLI, F. S. Consumo de energia e crescimento econômico: Uma análise do Brasil no período 1970-2009, **Análise Econômica**, Porto Alegre, n. 65, p. 181-204, mar, 2016.

FIGUEIREDO, H. L. **Mudanças estruturais na indústria brasileira: Uma análise do período 1995 a 2009**. 2015. 149 f. Dissertação (Mestrado em Economia). Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) – *campus* Sorocaba, Sorocaba. 2015.

FIGUEIREDO, H. L.; OLIVEIRA, M. A. S. Análise de decomposição estrutural para a economia brasileira entre 1995 e 2009, **Revista de Economia**, v. 41, n. 2, p. 31-56, mai./ago, 2015.

FIGUEIREDO, N. R. M.; ARAÚJO JÚNIOR, I. T.; PEROBELLI, F. S. Construção da matriz de insumo-produto híbrida para o estado de Pernambuco e avaliação da intensidade energética e de emissões de CO₂ setorial. **Banco do Nordeste**, v. 1, n. 1, p. 1-20, 2009.

FLEURY, P. **Logística no Brasil: Situação atual e transição para uma economia verde**. Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável (FBDS). 2012. Disponível em: < <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/15441>>. Acesso em abril de 2020.

FREITAS, L. F. S. **Impacto do consumo das famílias sobre as emissões de gases do efeito estufa no Brasil, entre 1995 e 2009**. 2015. 176 f. Tese (Doutorado em Economia). Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas. 2015.

FREITAS, L. F. S.; RIBEIRO, L. C. S.; SOUZA, K. B.; HEWINGS, G. J. D. The distribution effects of emissions taxation in Brazil and their implications for climate policy, **Energy Economics**, v. 59, p. 37-44, 2016.

GAZONATO, M. C. **Transmissão intersetorial dos ganhos de produtividade: Evidências para o Brasil no período 2000-2009**. 2016. 111 f. Dissertação (Mestrado em Economia). Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) – *campus* Sorocaba, Sorocaba. 2016.

GAZZONI, D. A. Balanço de emissões de CO₂ por biocombustíveis no Brasil: histórico e perspectivas, 2014. EMBRAPA 334, **EMBRAPA Soja**, 2014.

GUAN, D.; PETERS, G. P.; WEBER, C. L.; HUBACEK, K. Journey to world top emitter: An analysis of the driving forces of China's recent CO₂ emissions surge, **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 4, 2009.

GUILHOTO, J. J. M.; SONIS, M.; HEWINGS, G. J. D.; MARTINS, E. B. Índices de ligações e setores-chave na economia brasileira: 1959-80, **Pesquisa e Planejamento Econômico**, v. 24, n. 2, p. 287-314, 1994.

GUILHOTO, J. J. M. **Input-output analysis: Theory and foundations (Análise de insumo-produto: teoria e fundamentos)**. [Mimeo]. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011.

GUILHOTO, J. J. M., SESSO FILHO, U. A. Estimação da matriz de insumo-produto a partir de dados preliminares das Contas Nacionais, **Economia Aplicada**, v. 9, n. 2, p. 277-299, abr./jun, 2005.

GUILHOTO, J. J. M., SESSO FILHO, U. A. Estimação da matriz insumo-produto utilizando dados preliminares das contas nacionais: Aplicação e análise de indicadores econômicos para o Brasil em 2005, **Economia & Tecnologia. UFPR/TECPAR**, ano 6, v. 23, p. 53-62, out./dez, 2010.

GUO, C.; LIU, Y. Demand effects on CO₂ emission in China: A structural decomposition analysis (SDA). In: TALAMANTES; M. J. H., YAO, S. (org.). **Energy security and sustainable growth in China**. Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2014, p. 265-285. (Coleção The Nottingham China Policy Institute).

GUO, S.; HE, P.; BAYARAA, M.; LI, J. Greenhouse gas emissions embodied in the Mongolian economy and their driving forces, **Science of the Total Environment**, v. 714, 2020.

HELD, D.; ROGER, C. Three models of global climate governance: From Kyoto to Paris and beyond, **Global Policy**, v. 9, n. 4, p. 527-537, nov, 2018.

HILGEMBERG, E. M.; GUILHOTO, J. J. M. Uso de combustíveis e emissões de CO₂ no Brasil: um modelo inter-regional de insumo-produto, **Nova Economia**, Belo Horizonte, v. 16, n. 1, p. 49-99, 2006.

HOEGH-GULDBERG, O., JACOB, D., TAYLOR, M., BINDI, M., BROWN, S., CAMILLONI, I., DIEDHIOU, A.; DJALANTE, R., EBI, K. L., ENGELBRECHT, F., GUIOT, J., HIJIOKA, Y., MEHROTRA, S., PAYNE, A., SENEVIRATNE, S. I., THOMAS, A., WARREN, R., ZHOU, G. Impacts of 1.5 °C Global Warming on Natural and Human Systems. In: MASSON-DELMOTTE, V., ZHAI, P., PÖRTNER, H. O., ROBERTS, D., SKEA, J., SHUKLA, P. R., PIRANI, A., MOUFOUMA-OKIA, W., PÉAN, C., PIDCOCK, R., CONNORS, S., MATTHEWS, J. B. R., CHEN, Y., ZHOU, X., GOMIS, M. I., LONNOY, E., MAYCOCK, T., TIGNOR, M., WATERFIELD, T (org.). **Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emissions pathways in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.** In Press, p. 175-311., 2018.

HOEKSTRA, R.; VAN DE BERGH, J. C. J. M. Structural decomposition analysis of physical flows in the economy, **Environmental and Resource Economics**, v. 23, p. 357-378, 2002.

HOEKSTRA, R.; MICHEL, B.; SUH, S. The emission cost of international sourcing: Using structural decomposition analysis to calculate the contribution of international sourcing to CO₂ emission growth, **Economic Systems Research**, v. 28, n. 2, p. 151-167., 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estatísticas. Econômicas.** Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais.html>> Acesso em julho de 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estatísticas. Sociais.** Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao.html>> Acesso em setembro de 2020.

JACOBSEN, H. K. Energy demand, structural change and trade: A decomposition analysis of the Danish manufacturing industry, **Economic Systems Research**, v. 12, n. 3, p. 319-343, 2000.

KAGAWA, S.; INAMURA, H. A structural decomposition of energy consumption based on a hybrid rectangular input-output framework: Japan's case, **Economic Systems Research**, v. 13, n. 4, p. 339-363, 2001.

LEAL, R. A., ELY, R. A., UHR, J. G. Z., UHR, D. A. P. Ciclos econômicos e emissão de CO₂ no Brasil: Uma análise dinâmica para políticas ambientais ótimas, **Revista Brasileira de Economia**. Rio de Janeiro, v. 69, n. 1, p. 53-73, jan./mar., 2015.

LENZEN, M.; SCHAEFFER, R.; KARSTENSEN, J.; PETERS, G. P. Drivers of change in Brazil's carbon dioxide emissions, **Climatic Change**, v. 121, p. 815-824, 2013.

LENZEN, M. Structural analyses of energy use and carbon emissions – an overview, **Economic Systems Research**, v. 28, n. 2, p. 119-132, 2016.

- LEONTIEF, W. Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States, **The Review of Economics Statistics**, v. 18, n. 3, p. 105-125, ago., 1936.
- LI, J. S.; ZHOU, H. W.; MENG, J.; YANG, Q.; CHEN, B.; ZHANG, Y. Y. Carbon emissions and their drivers for a typical urban economy from multiple perspectives: A case analysis for Beijing city, **Applied Energy**, v. 226, p. 1076-1096, 2018.
- LIMA, G. F. C. A. A institucionalização das políticas e da gestão ambiental no Brasil: Avanços, obstáculos e contradições, **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, Curitiba, n. 23, p. 121-132, jan./jun., 2011.
- LIMA, L. C. L. **Contabilidade das emissões de GEE nacional: uma análise insumo-produto**. 2020. 64 f. Dissertação (Mestrado em Economia). Universidade de Brasília (UNB), Brasília, 2020.
- LIN, X.; POLENSKE, K. Input-output anatomy of China's energy use changes in the 1980s, **Economic Systems Research**, v. 7, n 1., p. 67-84, 1995.
- LIN, H. J.; YOO, S-H.; KWAK, S-J. Industrial CO₂ emissions from energy use in Korea: A structural decomposition analysis, **Energy Policy**, v. 37, p. 686-698, 2009.
- LLOP, M., TOL, R. S. J. Decomposition of sectoral greenhouse gas emissions: a subsystem input-output model for the Republic of Ireland, **Journal of Environmental Planning and Management**, v. 56, n. 9, 2013.
- MACHADO, G.; SCHAEFFER, R.; WORRELL, E. Energy and carbon embodied in the international trade of Brazil: an input-output approach, **Ecological Economics**, v. 39, p. 409-424, 2001.
- MAGALHÃES, A. S. **Economia de baixo carbono no Brasil: Alternativas de políticas e custo de redução de emissões de gases de efeito estufa**. 2013. 290 f. Tese (Doutorado em Economia). Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2013.
- MARCHETTI, D. S.; FERREIRA, T. T. Situação atual e perspectivas da infraestrutura de transportes e logística no Brasil. In: **BNDES 60 anos: Perspectivas setoriais**. Rio de Janeiro: Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social, p. 232-270, 2012.
- MARENCO, J. A.; ALVES, L. M. Crise hídrica em São Paulo em 2014: seca e desmatamento, **Geosp – Espaço e Tempo**, v. 9, n. 3, p. 485-494, 2016.
- MATTOS, L. B. R. **A importância do setor de transportes na emissão de gases do efeito estufa – o caso do município do Rio de Janeiro**. 2001. 179 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2001.
- MEADOWS, D. H.; MEADOWS, D. L.; RANDERS, J.; BEHRENS III, W. W. **The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind**. New York: Universe Books, 205p, 1972.
- MILLER, R. E.; BLAIR, P. D. **Input-output analysis: foundations and extensions**. Cambridge: Cambridge University Press, 750p, 2009.
- MINX, J. C.; BAIOCCHI, G.; PETERS, G. P.; WEBER, L. C.; GUAN, D.; HUBACEK, K. A "carbonizing dragon": China's fast-growing CO₂ emissions revisited, **Environmental Science & Technology**, v. 45, n. 21, 2011.

- MONTOYA, M. A.; PASQUAL, C. A.; LOPES, R. L.; GUILHOTO, J. J. M. Desagregação setorial do balanço energético nacional a partir dos dados da matriz insumo-produto: Uma avaliação metodológica, **Economia Aplicada**, v. 18, n. 3, p. 379-419, 2014.
- MONTOYA, M. A.; PASQUAL, C. A.; LOPES, R. L.; GUILHOTO, J. J. M. As relações intersetoriais do setor energético na economia brasileira: uma abordagem de insumo-produto, **Teoria e Evidência Econômica**, v. 21, n. 44, p. 36-75, jan./jun., 2015.
- MONTOYA, M. A.; PASQUAL, C. A. O uso setorial de energia renovável versus não renovável e as emissões de CO₂ na economia brasileira: Um modelo de insumo-produto híbrido para 53 setores, **Pesquisa e Planejamento Econômico**, v. 45, n. 2, p. 289-335, ago., 2015.
- MONTOYA, M. A.; PASQUAL, C. A.; LOPES, R. L.; GUILHOTO, J. J. M. Consumo de energia, emissões de CO₂ e a geração de renda e emprego no agronegócio brasileiro: Uma análise de insumo-produto, **Economia Aplicada**, v. 20, n. 4, p. 383-412, 2016.
- MONTOYA, M. A.; LOPES, R. L.; GUILHOTO, J. J. M. Dimensão econômica e ambiental do agronegócio brasileiro na década de 2000: Uma análise insumo-produto da renda, do consumo de energia e das emissões de CO₂ por fonte de energia, **Revista Brasileira de Estudos Regionais (RBERU)**, v. 11, n. 4, p. 557-577, 2017.
- MORAES, N. G. **Avaliação das tendências da demanda de energia no setor de transportes no Brasil**. 2005. 167 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2005.
- MORAIS, A. F. **Análise setorial das emissões de CO₂ no Brasil**. 2007. 103 f. Dissertação (Mestrado em Economia). Universidade Estadual de Maringá (UEM), Maringá, 2007.
- MORÁN, M. A. T.; GONZÁLEZ, P. R. Structural factors affecting land-transport CO₂ emissions: A European comparison, **Transportation Research Part D**, v. 12, p. 239-253, 2007.
- MUKHOPADHYAY, K.; CHAKRABORTY, D. India's energy consumption changes during 1973/4 to 1991/92, **Economic Systems Research**, v. 11, n. 4, p. 423-438, 1999.
- MUNKSGAARD, J.; PEDERSEN, K. A.; WIEN, M. Impact of household consumption on CO₂ emissions, **Energy Economics**, v. 22, n. 4, p. 423-440, 2000.
- NASTARI, P. M. Cana-de-açúcar: a safra 2017/2018, **Agroanalysis**, v. 37, n. 11, p. 18-19.
- NÚCLEO DE ECONOMIA REGIONAL E URBANA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (NEREUS). **Dados e Programas**. Disponível em <www.usp.br/nereus>. Acesso em abril de 2020.
- OLIVEIRA, M. A. S. **Aumento da oferta e redução de impostos nos serviços de infraestrutura na economia brasileira: Uma abordagem de equilíbrio geral**. 2006. 153 f. Tese (Doutorado em Economia Aplicada). Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, 2006.
- OLIVEIRA, M. M.; RIBEIRO, L. C. S.; CARVALHO, T. S. Decomposição estrutural das emissões de gases de efeito estufa dos países do BRIC, **Geosul**, Florianópolis, v. 35, n. 75, p. 506-532, mai./ago., 2020.
- OLIVEIRA, M. S. **Análise da intensidade de emissão de gases de efeito estufa na demanda final brasileira através do modelo de insumo-produto**. 2011. 78 f. Dissertação (Mestrado em Economia). Universidade de Brasília (UNB), Brasília, 2011.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Nações Unidas. **Relatory of the World Comission on Environment and Development: Our Common Future - (1987)**. Disponível em: <<https://sustainabledevelopment.un.org/milestones/wced>>. Acesso em novembro de 2020.

PERDIGÃO, C.; FAIÃO, T. F.; RODRIGUES, R. L.; ESTEVEZ, E. G. Z.; SESSO FILHO, U. A.; ZAPPAROLI, I. D. Decomposição estrutural das emissões de CO₂ do BRIC, **Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos (RBERU)**, vol. 11, n. 3, pp. 293-313, 2017.

PEROBELLI, F.S.; MATTOS, R. S.; FARIA, W. R. Interações energéticas entre o estado de Minas Gerais e o restante do Brasil: Uma análise inter-regional de insumo-produto, **Economia Aplicada**, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 113-130, jan./mar., 2007.

PEROBELLI, F. S.; FARIA, W. R.; VALE, V. A. The increase in Brazilian household income and its impact on CO₂ emissions: Evidence for 2003 and 2009 from input-output tables, **Energy Economics**, v. 52, p. 228-239, 2015.

POMPERMAYER, F. M. Transporte regional sustentável: Alavancas para redução das emissões de CO₂, **Radar: Tecnologia, Produção e Comércio Exterior**. IPEA. Brasília, n. 18, 2012.

RAMOS, R. L. O. Mudanças estruturais reais nas matrizes de insumo-produto Brasil: 1980/85. **Revista Política e Planejamento Econômico**, v. 26, n. 1, p. 93-118, 1996.

RHEE, H-C.; CHUNG, H-S. Change in CO₂ emission and its transmissions between Korea and Japan using international input-output analysis, **Ecological Economics**, v. 58, p. 788-800, 2006.

RODRIGUE, J-P. Transport, energy and environment. *In*: RODRIGUE, J-P. **The Geography of Transports Systems**. New York: Routledge, 2020.

SCHUSCHNY, A. R. **Tópicos sobre el modelo de insumo-producto: teoria y aplicaciones**. United Nations Publications, n. 37, 2005.

SESSO, P. P.; AMÂNCIO, V. S. F.; ZAPPAROLI, I. D.; SESSO FILHO, U. A. Structural decomposition of variations of carbon dioxide emissions for the United States, the European Union and BRIC, **Journal of Cleaner Production**, 2020.

SILVA, M. P. N.; PEROBELLI, F. S. 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**, v. 42, n. 2, p. 307-335, abr./jun., 2012.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GEE (SEEG) – Observatório do Clima. **Biblioteca**. Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas do Brasil (1970-2018), 2019. Disponível em <<http://seeg.eco.br/documentos-analiticos>>. Acesso em março de 2020.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GEE (SEEG) – Observatório do Clima, 2021. V8.0. **Base de dados**. Disponível em <<http://seeg.eco.br/download>>. Acesso em fevereiro de 2021.

SONIS, M.; HEWINGS, G. J. D.; GUO, J. Sources of structural changes in input-output systems: a field of influence approach, **Economic Systems Research**, v. 8, n. 1, 1996.

- SOUZA, A. M.; ZAPPAROLI, I. D.; SESSO FILHO, U. A.; BRENE, P. R. A. Estrutura produtiva do Brasil, Rússia, Índia e China (BRIC) e seus impactos nas emissões de dióxido de carbono (CO₂), **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 34, p. 25-48, 2015.
- SOUZA, K. B.; RIBEIRO, L. C. S.; PEROBELLI, F. S. Reducing Brazilian greenhouse gas emission: scenario simulations of targets and policies, **Economic System Research**, v. 28, n. 4, p. 482-496, 2016.
- SOUZA, M. C. O.; CORAZZA, R. I. Do Protocolo de Kyoto ao Acordo de Paris: Uma análise a partir das mudanças no regime climático global a partir do estudo da evolução de perfis de emissões de gases de efeito estufa, **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 42, p. 52-80, 2017.
- SOUZA, R. V.; PEROBELLI, F. S. Mudanças estruturais da economia mineira e do restante do Brasil: uma análise de insumo-produto para o período 1996-2003, **Nova Economia**, v. 19, n. 3, p. 407-441, set./dez., 2009.
- SU, B.; ANG, B. W.; LI, Y. Input-output and structural decomposition analysis of Singapore's carbon emissions, **Energy Policy**, v. 105, p. 484-492, 2017.
- SUELA, A. G. L. **Efeitos ambientais da implementação do Plano ABC no MATOPIBA: uma abordagem por insumo-produto**. 2019. 70 f. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada). Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, 2019.
- SYED, A. A. Changes in the structure of the Canadian economy (1961-1966): an input-output analysis. Statistics Canada, Structural Analysis Division, **Working Paper 77-01-10**, 1997.
- TEIXEIRA, M. D. J.; NOGUEIRA, J. M.; IMBROISI, D.; FARIA, A. M. M. Strategic sectors for greenhouse gas mitigation investment: assessment based upon the Brazil's input-output matrix, **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 25, n. 2, p. 261-283, 2020.
- TOLMASQUIM, M. T. Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil, **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 26, n. 74, p. 247-260, 2012.
- TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. As múltiplas dimensões da crise hídrica, **Revista USP**, n. 106, p. 21-30, jul./ago./set., 2015.
- VALE, V. A. **Comércio internacional e emissões: uma análise longitudinal de insumo-produto**. 2014. 156 f. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada). Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, 2014.
- WACHSMANN, U. **Mudanças no consumo de energia e nas emissões associadas de CO₂ no Brasil entre 1970 e 1996 – Uma análise de decomposição estrutural**. 2005. 215 f. Tese (Doutorado em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2005.
- WANG, Y.; ZHAO, HONGYAN.; LI, LIYING.; LIU, Z.; LIANG, S. Carbon dioxide emission drivers for a typical metropolis using input-output structural decomposition analysis, **Energy Policy**, v. 58, p. 312-318, 2013.
- WIER, M. Sources of changes in emissions from energy: A structural decomposition analysis, **Economic Systems Research**, v. 10, n. 2, p. 99-112, 1998.
- WILTING, H. C.; BIESIOT, W.; MOLL, H. C. Analyzing potentials for reducing the energy requirement of households in the Netherlands, **Economic Systems Research**, v. 11, n. 3, p. 233-244, 1999.

WOOD, R. Structural decomposition analysis for Australia's greenhouse gas emissions, **Energy Policy**, v. 37, p. 4943-4948, 2009.

XU, Y., DIETZENBACHER, E. A structural decomposition analysis of the emissions embodied in trade, **Ecological Economics**, v. 101, p. 10-20, 2014.

YOUNG, C. E. F. Industrial pollution and export-oriented policies in Brazil, **Revista Brasileira de Economia**, v. 52, n. 4, p. 543-562, out., 1998.

ZAPPAROLI, I. D., SOUZA, A. M., SESSO FILHO, U. A., BRENE, P. R. A, CÂMARA, M. R. G. Análise dos transbordamentos nas emissões de dióxido de carbono: Brasil, Rússia, Índia e China – BRIC, **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 49, n. 1, p. 149-164, jan./mar., 2018.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Setores das matrizes de insumo-produto do Brasil (2010 – 2017).

APÊNDICE B – Produtos das matrizes de insumo-produto do Brasil (2010 – 2017).

APÊNDICE C – Compatibilização dos setores do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) com as matrizes de insumo-produto para o Brasil de 2010 e 2017.

APÊNDICE D – Percentual de emissões de Gases de Efeito Estufa dos setores da economia brasileira, em 2010 e 2017.

APÊNDICE E.1 – Coeficientes de Impacto Ambiental (CIA) dos setores econômicos (2010).

APÊNDICE E.2 – Coeficientes de Impacto Ambiental (CIA) dos setores econômicos (2017).

APÊNDICE A – Setores das matrizes de insumo-produto do Brasil (2010 – 2017).

Setores	
1	Agricultura, inclusive o apoio à agricultura e a pós-colheita
2	Pecuária, inclusive o apoio à pecuária
3	Produção florestal; pesca e aquicultura
4	Extração de carvão mineral e de minerais não-metálicos
5	Extração de petróleo e gás, inclusive as atividades de apoio
6	Extração de minério de ferro, inclusive beneficiamentos e a aglomeração
7	Extração de minerais metálicos não-ferrosos, inclusive beneficiamentos
8	Abate e produtos de carne, inclusive os produtos do laticínio e da pesca
9	Fabricação e refino de açúcar
10	Outros produtos alimentares
11	Fabricação de bebidas
12	Fabricação de produtos do fumo
13	Fabricação de produtos têxteis
14	Confecção de artefatos do vestuário e acessórios
15	Fabricação de calçados e de artefatos de couro
16	Fabricação de produtos da madeira
17	Fabricação de celulose, papel e produtos de papel
18	Impressão e reprodução de gravações
19	Refino de petróleo e coquerias
20	Fabricação de biocombustíveis
21	Fabricação de químicos orgânicos e inorgânicos, resinas e elastômeros
22	Fabricação de defensivos, desinfetantes, tintas e químicos diversos
23	Fabricação de produtos de limpeza, cosméticos/perfumaria e higiene pessoal
24	Fabricação de produtos farmoquímicos e farmacêuticos
25	Fabricação de produtos de borracha e de material plástico
26	Fabricação de produtos de minerais não-metálicos
27	Produção de ferro-gusa/ferroligas, siderurgia e tubos de aço sem costura
28	Metalurgia de metais não-ferrosos e a fundição de metais
29	Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos
30	Fabricação de equipamentos de informática, produtos eletrônicos e ópticos
31	Fabricação de máquinas e equipamentos elétricos
32	Fabricação de máquinas e equipamentos mecânicos
33	Fabricação de automóveis, caminhões e ônibus, exceto peças
34	Fabricação de peças e acessórios para veículos automotores
35	Fabricação de outros equipamentos de transporte, exceto veículos automotores
36	Fabricação de móveis e de produtos de indústrias diversas
37	Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos
38	Energia elétrica, gás natural e outras utilidades
39	Água, esgoto e gestão de resíduos
40	Construção
41	Comércio e reparação de veículos automotores e motocicletas
42	Comércio por atacado e a varejo, exceto veículos automotores
43	Transporte terrestre
44	Transporte aquaviário

(continua)

45	Transporte aéreo
46	Armazenamento, atividades auxiliares dos transportes e correio
47	Alojamento
48	Alimentação
49	Edição e edição integrada à impressão
50	Atividades de televisão, rádio, cinema e gravação/edição de som e imagem
51	Telecomunicações
52	Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação
53	Intermediação financeira, seguros e previdência complementar
54	Atividades imobiliárias
55	Atividades jurídicas, contábeis, consultoria e sedes de empresas
56	Serviços de arquitetura, engenharia, testes/análises técnicas e P&D
57	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas
58	Aluguéis não-imobiliários e gestão de ativos de propriedade intelectual
59	Outras atividades administrativas e serviços complementares
60	Atividades de vigilância, segurança e investigação
61	Administração pública, defesa e seguridade social
62	Educação pública
63	Educação privada
64	Saúde pública
65	Saúde privada
66	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos
67	Organizações associativas e outros serviços pessoais
68	Serviços domésticos

Fonte: Elaboração própria com base em Guilhoto e Sesso Filho (2005, 2010).

APÊNDICE B – Produtos das matrizes de insumo-produto do Brasil (2010 – 2017).

Produtos	
1	Arroz, trigo e outros cereais
2	Milho em grão
3	Algodão herbáceo, outras fibras da lavoura temporária
4	Cana-de-açúcar
5	Soja em grão
6	Outros produtos e serviços da lavoura temporária
7	Laranja
8	Café em grão
9	Outros produtos da lavoura permanente
10	Bovinos e outros animais vivos, produtos. animal, caça e serv.
11	Leite de vaca e de outros animais
12	Suínos
13	Aves e ovos
14	Produtos da exploração florestal e da silvicultura
15	Pesca e aquicultura (peixe, crustáceos e moluscos)
16	Carvão mineral
17	Minerais não-metálicos
18	Petróleo, gás natural e serviços de apoio
19	Minério de ferro
20	Minerais metálicos não-ferrosos
21	Carne de bovinos e outros prod. de carne
22	Carne de suíno
23	Carne de aves
24	Pescado industrializado
25	Leite resfriado, esterilizado e pasteurizado
26	Outros produtos do laticínio
27	Açúcar
28	Conservas de frutas, legumes, outros vegetais e sucos de frutas
29	Óleos e gorduras vegetais e animais
30	Café beneficiado
31	Arroz beneficiado e produtos derivados do arroz
32	Produtos derivados do trigo, mandioca ou milho
33	Rações balanceadas para animais
34	Outros produtos alimentares
35	Bebidas
36	Produtos do fumo
37	Fios e fibras têxteis beneficiadas
38	Tecidos
39	Art. têxteis de uso doméstico e outros têxteis
40	Artigos do vestuário e acessórios
41	Calçados e artefatos de couro
42	Produtos de madeira, exclusive móveis
43	Celulose

(continua)

44	Papel, papelão, embalagens e artefatos de papel
45	Serviços de impressão e reprodução
46	Combustíveis para aviação
47	Gasoálcool
48	Naftas para petroquímica
49	Óleo combustível
50	Diesel - biodiesel
51	Outros produtos do refino do petróleo
52	Etanol e outros biocombustíveis
53	Produtos químicos inorgânicos
54	Aubos e fertilizantes
55	Produtos químicos orgânicos
56	Resinas, elastômeros e fibras artificiais e sintéticas
57	Defensivos agrícolas e desinfetantes domissanitários
58	Produtos químicos diversos
59	Tintas, vernizes, esmaltes e lacas
60	Perfumaria, sabões e artigos de limpeza
61	Produtos farmacêuticos
62	Artigos de borracha
63	Artigos de plástico
64	Cimento
65	Artefatos de cimento, gesso e semelhantes
66	Vidros, cerâmicos e outros prod. de minerais não-metálicos
67	Ferro-gusa e ferroligas
68	Semiacabados, laminados planos, longos e tubos de aço
69	Produtos da metalurgia de metais não-ferrosos
70	Peças fundidas de aço e de metais não ferrosos
71	Produtos de metal, excl. máquinas e equipamentos
72	Componentes eletrônicos
73	Máquinas para escritório e equipamentos de informática
74	Material eletrônico e equipamentos de comunicações
75	Equipamentos. de medida, teste e controle, ópticos e eletro médicos
76	Máquinas, aparelhos e materiais elétricos
77	Eletrdomésticos
78	Tratores e outras máquinas agrícolas
79	Máquinas para a extração mineral e a construção
80	Outras máquinas e equipamentos mecânicos
81	Automóveis, camionetas e utilitários
82	Caminhões e ônibus, incluindo cabines, carrocerias e reboques
83	Peças e acessórios para veículos automotores
84	Aeronaves, embarcações e outros equipamentos de transporte
85	Móveis
86	Produtos de indústrias diversas
87	Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos
88	Eletricidade, gás e outras utilidades
89	Água, esgoto, reciclagem e gestão de resíduos

(continua)

90	Edificações
91	Obras de infraestrutura
92	Serviços especializados para construção
93	Comércio e reparação de veículos
94	Comércio por atacado e a varejo, exceto veículos automotores
95	Transporte terrestre de carga
96	Transporte terrestre de passageiros
97	Transporte aquaviário
98	Transporte aéreo
99	Armazenamento e serviços auxiliares aos transportes
100	Correio e outros serviços de entrega
101	Serviços de alojamento em hotéis e similares
102	Serviços de alimentação
103	Livros, jornais e revistas
104	Serviços cinematográficos, música, rádio e televisão
105	Telecomunicações, TV por assinatura e outros serv. relacionados
106	Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação
107	Intermediação financeira, seguros e previdência complementar
108	Aluguel efetivo e serviços imobiliários
109	Aluguel imputado
110	Serviços jurídicos, contabilidade e consultoria
111	Pesquisa e desenvolvimento
112	Serviços de arquitetura e engenharia
113	Publicidade e outros serviços técnicos
114	Aluguéis não-imb. e gestão de ativos de propriedade intelectual
115	Condomínios e serviços para edifícios
116	Outros serviços administrativos
117	Serviços de vigilância, segurança e investigação
118	Serviços coletivos da administração pública
119	Serviços de previdência e assistência social
120	Educação pública
121	Educação privada
122	Saúde pública
123	Saúde privada
124	Serviços de artes, cultura, esporte e recreação
125	Organizações patronais, sindicais e outros serviços associativos
126	Manutenção de computadores, telefones e objetos domésticos
127	Serviços pessoais
128	Serviços domésticos

Fonte: Elaboração própria com base em Guilhoto e Sesso Filho (2005, 2010).

APÊNDICE C – Compatibilização dos setores do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) com as matrizes de insumo-produto para o Brasil de 2010 e 2017.

Agregação das matrizes de insumo-produto (68 x 68) → (16 x 16)	Agregação das matrizes (16 x 16) com os dados do SEEG
<p>1. Agropecuário Agricultura, inclusive o apoio à agricultura e a pós-colheita. Pecuária, inclusive o apoio à pecuária. Produção florestal; pesca e aquicultura.</p>	<p>1. Agropecuária Agropecuária.</p>
<p>2. Extrativa Mineral Extração de petróleo e gás, inclusive as atividades de apoio.</p>	<p>2. Extrativa Mineral Mineração e Pelotização.</p>
<p>3. Minerais Não Metálicos Extração de carvão mineral e de minerais não-metálicos. Fabricação de produtos de minerais não-metálicos.</p>	<p>3. Minerais Não Metálicos Cerâmica. Cimento.</p>
<p>4. Siderurgia Extração de minério de ferro, inclusive beneficiamentos e a aglomeração. Produção de ferro-gusa/ferroligas, siderurgia e tubos de aço sem costura.</p>	<p>4. Siderurgia Ferro Gusa e Aço. Ferro Ligas.</p>
<p>5. Metais Não Ferrosos e Outros Metais Extração de minerais metálicos não-ferrosos, inclusive beneficiamentos. Metalurgia de metais não-ferrosos e a fundição de metais.</p>	<p>5. Metais Não Ferrosos e Outros Metais Não Ferrosos e Outros da Metalurgia.</p>
<p>6. Papel e Celulose Fabricação de celulose, papel e produtos de papel.</p>	<p>6. Papel e Celulose Papel e Celulose.</p>
<p>7. Química Fabricação de químicos orgânicos e inorgânicos, resinas e elastômeros. Fabricação de defensivos, desinfetantes, tintas e químicos diversos. Fabricação de produtos de limpeza, cosméticos/perfumaria e higiene pessoal. Fabricação de produtos de borracha e de material plástico.</p>	<p>7. Química Química.</p>
<p>8. Têxtil Fabricação de produtos têxteis. Confecção de artefatos do vestuário e acessórios. Fabricação de calçados e de artefatos de couro.</p>	<p>8. Têxtil Têxtil.</p>
<p>9. Alimentos e Bebidas Fabricação e refino de açúcar. Outros produtos alimentares.</p>	<p>9. Alimentos e Bebidas Alimentos e Bebidas.</p>

(continua)

Fabricação de bebidas.
 Abate e produtos de carne, inclusive os produtos do laticínio e da pesca.
 Fabricação de produtos do fumo.

10. Comércio e Serviços

Educação privada.
 Água, esgoto e gestão de resíduos.
 Saúde privada.
 Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos.
 Comércio e reparação de veículos automotores e motocicletas.
 Comércio por atacado e a varejo, exceto veículos automotores.
 Atividades de televisão, rádio, cinema e gravação/edição de som e imagem.
 Telecomunicações.
 Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação.
 Intermediação financeira, seguros e previdência complementar.
 Atividades imobiliárias.
 Atividades jurídicas, contábeis, consultoria e sedes de empresas.
 Serviços de arquitetura, engenharia, testes/análises técnicas e P & D.
 Outras atividades profissionais, científicas e técnicas.
 Aluguéis não-imobiliários e gestão de ativos de propriedade intelectual.
 Outras atividades administrativas e serviços complementares.
 Atividades de vigilância, segurança e investigação.
 Atividades artísticas, criativas e de espetáculos.
 Organizações associativas e outros serviços pessoais.
 Serviços domésticos.
 Alojamento.
 Alimentação.
 Edição e edição integrada à impressão.
 Impressão e reprodução de gravações.
 Armazenamento, atividades auxiliares dos transportes e correio.

10. Comércio e Serviços

Comercial.

11. Administração Pública

Administração pública, defesa e seguridade social.
 Educação pública.
 Saúde pública.

11. Administração Pública

Público.

(continua)

<p>12. Outras Indústrias Construção. Fabricação de equipamentos de informática, produtos eletrônicos e ópticos. Fabricação de máquinas e equipamentos elétricos. Fabricação de máquinas e equipamentos mecânicos. Fabricação de automóveis, caminhões e ônibus, exceto peças. Fabricação de peças e acessórios para veículos automotores. Fabricação de outros equipamentos de transporte, exceto veículos automotores Fabricação de móveis e de produtos de indústrias diversas. Fabricação de produtos da madeira. Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos. Fabricação de produtos farmoquímicos e farmacêuticos.</p>	<p>12. Outras Indústrias Outras Indústrias.</p>
<p>13. Energético Refino de petróleo e coquearias. Fabricação de biocombustíveis. Energia elétrica, gás natural e outras utilidades.</p>	<p>13. Energético Produção de Combustíveis. Geração de Eletricidade (Serviço Público).</p>
<p>14. Transporte Terrestre Transporte terrestre.</p>	<p>14. Transporte Terrestre Transporte rodoviário. Transporte ferroviário.</p>
<p>15. Transporte Aquaviário Transporte aquaviário.</p>	<p>15. Transporte Aquaviário Transporte Hidroviário.</p>
<p>16. Transporte Aéreo Transporte aéreo.</p>	<p>16. Transporte Hidroviário Transporte Aéreo.</p>

Fonte: Elaboração própria, com base em Guilhoto e Sesso Filho (2005, 2010), Figueiredo *et al.* (2009), Montoya *et al.* (2014), Montoya e Pasqual (2015), Montoya *et al.* (2017) e Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE).

APÊNDICE D – Percentual de emissões de Gases de Efeito Estufa dos setores da economia brasileira, em 2010 e 2017.

Setor Econômico	Parcela de emissões de GEE em 2010	Parcela de emissões de GEE em 2017
Agropecuária	5,2%	5,0%
Extrativa Mineral	2,2%	1,4%
Minerais Não Metálicos	5,6%	4,4%
Siderurgia	1,9%	1,8%
Metais Não Ferrosos e Outros Metais	1,8%	1,5%
Papel e Celulose	1,4%	1,3%
Química	4,2%	3,8%
Têxtil	0,3%	0,2%
Alimentos e Bebidas	1,8%	1,5%
Comércio e Serviços	0,5%	0,5%
Administração Pública	0,4%	0,2%
Outras Indústrias	2,2%	1,5%
Energético	22,6%	26,4%
Transporte Terrestre	45,8%	47,0%
Transporte Aéreo	2,8%	2,5%
Transporte Aquaviário	1,3%	1,0%
Total	100,0%	100,0%

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG).

APÊNDICE E.1 – Coeficientes de Impacto Ambiental (CIA) dos setores econômicos (2010).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1. Agropecuária	45,45	0,28	0,60	0,57	0,45	2,47	0,79	2,36	13,28	0,47	0,34	0,45	1,95	0,50	0,37	0,36
2. Extrativa Mineral	0,86	63,21	1,42	1,20	1,39	1,23	1,17	0,54	0,72	0,29	0,20	0,54	10,04	2,00	0,84	0,98
3. Minerais Não Metálicos	3,10	2,06	199,83	3,50	2,40	1,75	3,95	0,90	2,25	0,67	0,52	9,67	1,46	0,95	0,49	0,56
4. Siderurgia	0,14	0,94	0,51	40,91	1,21	0,22	0,25	0,10	0,15	0,11	0,09	2,36	0,24	0,19	0,07	0,11
5. Metais Não Ferrosos e Outros Metais	0,17	0,34	0,37	1,94	98,26	0,59	0,51	0,16	0,26	0,19	0,10	2,13	0,14	0,18	0,10	0,13
6. Papel e Celulose	0,30	0,24	1,44	0,30	0,26	67,65	0,97	1,13	0,89	0,41	0,20	0,60	0,18	0,19	0,25	0,44
7. Química	5,72	1,73	4,83	1,62	1,68	5,13	48,73	3,62	3,22	0,64	0,38	2,86	1,01	1,28	1,54	0,46
8. Têxtil	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,03	0,03	7,15	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,04	0,01
9. Alimentos e Bebidas	0,45	0,09	0,13	0,11	0,10	0,22	0,23	0,32	9,96	0,17	0,12	0,09	0,27	0,10	0,10	0,09
10. Comércio e Serviços	0,07	0,16	0,16	0,18	0,16	0,17	0,13	0,13	0,14	0,49	0,09	0,13	0,10	0,11	0,19	0,19
11. Administração Pública	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,97	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
12. Outras Indústrias	0,13	0,45	0,16	0,38	0,37	0,17	0,16	0,15	0,17	0,16	0,16	5,61	0,19	0,33	0,09	0,17
13. Energético	14,01	6,61	21,00	16,89	19,82	14,90	15,86	7,74	11,06	4,56	2,95	7,69	170,89	33,72	14,09	16,38
14. Transporte Terrestre	16,95	25,68	32,49	38,27	25,04	31,32	28,93	20,49	35,48	10,15	5,26	21,05	16,34	506,05	10,69	14,75
15. Transporte Aéreo	0,34	3,07	0,89	0,82	0,75	0,95	0,88	0,66	0,67	1,42	0,61	0,96	0,93	0,64	265,16	1,88
16. Transporte Aquaviário	0,25	6,78	0,57	0,71	0,39	2,87	0,76	0,27	0,67	0,15	0,07	0,37	1,18	0,64	0,18	254,58
Total 2010	87,95	111,65	264,45	107,42	152,27	129,68	103,37	45,72	78,94	19,89	12,05	54,52	204,94	546,89	294,24	291,11

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG).

APÊNDICE E.2 – Coeficientes de Impacto Ambiental (CIA) dos setores econômicos (2017).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1. Agropecuário	39,77	0,32	0,54	0,53	0,47	2,22	0,69	2,03	12,69	0,50	0,27	0,42	2,08	0,56	0,48	0,33
2. Extrativa Mineral	0,48	39,79	0,89	0,68	0,89	0,65	0,67	0,28	0,48	0,19	0,12	0,32	6,11	1,32	0,91	0,54
3. Minerais Não Metálicos	3,08	2,04	210,88	2,62	2,18	1,49	3,73	0,79	2,63	0,74	0,50	10,17	1,66	0,99	0,58	0,50
4. Siderurgia	0,14	0,57	0,58	46,86	0,79	0,19	0,24	0,09	0,17	0,12	0,08	2,25	0,19	0,16	0,08	0,08
5. Metais Não Ferrosos e Outros Metais	0,16	0,30	0,38	1,97	102,32	0,49	0,49	0,13	0,28	0,17	0,08	1,90	0,15	0,17	0,09	0,10
6. Papel e Celulose	0,28	0,21	1,25	0,22	0,21	65,28	0,89	0,88	0,90	0,35	0,15	0,53	0,17	0,17	0,19	0,28
7. Química	6,90	2,20	4,70	1,45	1,68	4,51	52,60	3,31	4,00	0,68	0,35	2,93	1,32	1,46	1,38	0,41
8. Têxtil	0,01	0,01	0,02	0,00	0,01	0,02	0,02	5,50	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01
9. Alimentos e Bebidas	0,38	0,10	0,13	0,10	0,10	0,18	0,24	0,22	9,79	0,18	0,10	0,09	0,31	0,11	0,12	0,08
10. Comércio e Serviços	0,08	0,17	0,16	0,17	0,16	0,16	0,14	0,13	0,16	0,54	0,09	0,14	0,11	0,13	0,19	0,17
11. Administração Pública	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12. Outras Indústrias	0,11	0,34	0,14	0,34	0,40	0,14	0,14	0,12	0,18	0,15	0,14	5,48	0,19	0,29	0,09	0,13
13. Energético	15,88	11,39	24,84	20,15	26,41	15,63	17,67	8,62	14,87	6,32	3,48	9,29	214,58	45,69	31,52	18,82
14. Transporte Terrestre	19,51	34,08	37,12	40,37	29,91	34,00	34,42	22,89	44,40	12,83	6,69	23,88	23,43	592,33	13,01	14,40
15. Transporte Aéreo	0,32	4,01	0,83	0,65	0,69	0,77	0,86	0,59	0,70	1,21	0,51	0,87	1,10	0,65	248,87	1,53
16. Transporte Aquaviário	0,25	7,16	0,60	0,62	0,40	3,08	0,76	0,25	0,77	0,16	0,07	0,36	1,22	0,71	0,26	191,29
Total 2010	87,34	102,71	283,06	116,74	166,63	128,82	113,53	45,85	92,04	24,14	13,33	58,65	252,64	644,73	297,80	228,69

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG).