

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA E RELAÇÕES INTERNACIONAIS**

BRUNO CARBONARI ALVES

IMPACTOS DISTRIBUTIVOS DE UM IMPOSTO SOBRE EMISSÕES NO BRASIL

Porto Alegre

2022

BRUNO CARBONARI ALVES

IMPACTOS DISTRIBUTIVOS DE UM IMPOSTO SOBRE EMISSÕES NO BRASIL

Trabalho de conclusão submetido ao Curso de Graduação em Ciências Econômicas da Faculdade de Ciências Econômicas da UFRGS, como requisito parcial para obtenção do título Bacharel em Economia.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Morrone

Porto Alegre

2022

CIP - Catalogação na Publicação

Alves, Bruno
IMPACTOS DISTRIBUTIVOS DE UM IMPOSTO SOBRE EMISSÕES
NO BRASIL / Bruno Alves. -- 2022.
83 f.
Orientador: Henrique Morrone.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade
de Ciências Econômicas, Curso de Ciências Econômicas,
Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Imposto sobre emissões. 2. Insumo-produto
Ambiental. 3. Dividendo de Carbono. 4. Distribuição de
Renda. 5. Imposto de carbono. I. Morrone, Henrique,
orient. II. Título.

BRUNO CARBONARI ALVES

IMPACTOS DISTRIBUTIVOS DE UM IMPOSTO SOBRE EMISSÕES NO BRASIL

Trabalho de conclusão submetido ao Curso de Graduação em Ciências Econômicas da Faculdade de Ciências Econômicas da UFRGS, como requisito parcial para obtenção do título Bacharel em Economia.

Aprovada em: Porto Alegre, 12 de maio de 2022.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Henrique Morrone – Orientador

UFRGS

Prof. Dr. Eduardo Ernesto Filippi

UFRGS

Prof. Dr. Édson Talamini

UFRGS

RESUMO

O objetivo da presente monografia é avaliar, no contexto da economia brasileira em 2018, os impactos distributivos de um imposto sobre emissões de gases de efeito estufa, e o direcionamento das receitas do imposto a um dividendo de carbono. Para tanto, empregou-se uma análise de insumo-produto ambiental, combinando estimativas nacionais de emissões de gases de efeito estufa, matrizes de insumo-produto e a Pesquisa de Orçamentos Familiares de 2017-2018 (IBGE). A simulação de um imposto de 40 dólares estadunidenses por tonelada de CO₂e resulta em uma redução de 3,87% no produto e de 20,29% nas emissões. Identificou-se que o dispêndio dos grupos de renda mais baixa é mais intensivo em emissões, especialmente em função da maior participação de bens alimentícios nas compras dos domicílios pobres. Assim sendo, o tributo simulado é regressivo. Para mitigar-se esse efeito, simula-se um dividendo de carbono, uma medida que devolve as receitas do imposto à população por meio de transferências equivalentes. Enquanto o esquema de imposto e dividendo de emissões é, em geral, progressivo, apenas 38,31% da metade mais pobre da população é compensada integralmente, sugerindo que essas receitas podem ser empregadas mais adequadamente em programas de transferência de renda preexistentes.

Palavras-chave: Imposto sobre emissões. Imposto de carbono. Dividendo de Carbono. Insumo-produto ambiental. Distribuição de renda.

ABSTRACT

This study aims to assess the distributional impacts of a carbon tax and dividend scheme in the context of the Brazilian economy in 2018. For this purpose, an environmental input-output analysis is employed, combining emissions data, input-output tables and expenditure data from the “Pesquisa de Orçamentos Familiares 2017-2018”. The simulation of a tax of US\$40 per tonne of CO₂e results in a 3.87% reduction in GDP and a 20.29% reduction in emissions. Spending by low-income groups was identified as particularly emissions intensive, mainly due to the larger share of expenditure on food and beverages among the poorest individuals. Therefore, the tax was found to be regressive. To mitigate this effect, a carbon dividend is simulated, a policy whereby revenues from the emissions tax are distributed equally among the population through lump sum payments. Although the tax-and-dividend system is generally progressive, only 38.31% of the bottom half of the income distribution is fully compensated, suggesting that these revenues could be used more appropriately under more targeted income transfer programs.

Keywords: Emissions tax. Carbon Tax. Carbon dividend. Environmental Input-Output. Income distribution.

AGRADECIMENTOS

Pai e mãe, minha finalização desse curso só foi possível por meio de esforços e comprometimentos seus que começaram antes de meu nascimento. Agradeço por me apoiarem tanto até hoje, e quero que vocês celebrem essa conclusão como uma conquista de vocês. Amo vocês.

À minha irmã, Ellen, obrigado por ser minha inspiração, de tantas maneiras. Qualquer convívio contigo é um aprendizado, um apurar dos meus questionamentos, e um sustento pra alma. Conta comigo, viemos juntos para essa vida.

Ao meu amor, Rodrigo, com quem compartilhei todos os dias de escrita dessa monografia. Graças à deusa. Dia após dia, os contratempos, glórias e desesperos dessa jornada foram sentidos por ti como por mim. Obrigado por estar sempre ao meu lado, me apoiando com tanto carinho e tanta crença. Me sinto extremamente sortudo de ter te conhecido.

Aos meus Xebetos, Bruno e Rai, gente incrível, inteligente e carinhosa demais pra descrever. Obrigado por me motivarem tanto ao longo dos anos e dessa escrita. À Manuela, por todo o apoio psicológico ao longo dos últimos anos.

Aos meus brilhantes colegas, que tanto motivaram meu aprendizado. Ao professor Henrique, por toda a sua orientação extremamente pertinente, assídua e cheia de compreensão. Agradeço meus amigos e colegas do Diretório Acadêmico de Economia, Contabilidade e Atuariais (DAECA), por me permitirem participar de alguma maneira no combate ao desmonte das universidades públicas. E por fim, agradeço a todos que compõem e garantem a continuidade da UFRGS.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 ECONOMIA E AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	10
2.1 Impactos socioeconômicos das mudanças climáticas	11
2.2 Políticas de mitigação e o papel do Brasil.....	15
3 REVISÃO DA LITERATURA	18
3.1 Avaliação de emissões de gases de efeito estufa	18
3.2 Impostos sobre emissões	23
3.3 Impactos distributivos da precificação de emissões	27
4 METODOLOGIA	31
4.1 Bases de Dados.....	31
4.2 Metodologia	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1 Impactos sobre o produto e sobre emissões	45
5.2 Análise Distributiva	48
5.3 Dividendo de Carbono	54
5.4 Taxas alternativas.....	56
5.5 Resumo e implicações.....	58
6 CONCLUSÃO	60
REFERÊNCIAS	63
APÊNDICE A	72
APÊNDICE B	74
APÊNDICE C	78
APÊNDICE D	81
APÊNDICE E	84

1 INTRODUÇÃO

Uma imediata intensificação de esforços internacionais é necessária para que os efeitos mais catastróficos das mudanças climáticas sejam evitados. Medidas que impõem um custo pecuniário sobre emissões de gases de efeito estufa podem contribuir eficientemente para esse objetivo, mas especial atenção deve ser dada a questões de equidade e redistribuição de renda. Essas constatações estão presentes na segunda e terceira partes do Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (doravante, IPCC) – um corpo de especialistas reunido pela Organização das Nações Unidas para revisar a literatura acerca das mudanças climáticas (IPCC, 2022a; IPCC, 2022b).

A implementação de um imposto sobre emissões (também chamado de imposto de carbono) é uma maneira de impor-se um preço a emissões de gases de efeito estufa, sendo uma das políticas ambientais mais recomendadas por economistas (Tvinnerein e Mehling, 2018). No entanto, essa medida tende a causar aumentos no custo de vida, especialmente no que se refere a bens intensivos em emissões de gases de efeito estufa, e indivíduos mais pobres podem ser impactados desproporcionalmente – de modo que esse tributo é comumente identificado como regressivo (por exemplo, em Magalhães e Domingues, 2013; Fremstad e Paul, 2019; Moz-Christofolletti e Pereda, 2021). Considerando esses impactos distributivos, 3.623 economistas estadunidenses assinaram uma carta defendendo a implementação de um imposto sobre emissões em conjunto com um “dividendo de carbono” – ou a devolução das receitas do imposto em transferências equivalentes a toda a população – de modo que indivíduos mais pobres enfrentem um aumento líquido de capacidade aquisitiva (Climate Leadership Council, 2022). Pode-se referir às duas políticas, conjuntamente, com o termo *carbon fee and dividend* (ou imposto e dividendo de carbono, em tradução do autor).

O presente estudo tem por objetivo avaliar os impactos distributivos de um imposto de 40 dólares por tonelada de CO₂e (uma medida comumente utilizada para emissões de gases de efeito estufa), a ser aplicado sobre todas as emissões resultantes de atividades contabilizadas no produto interno bruto brasileiro de 2018, excluídas as emissões relativas ao uso da terra, mudança do uso da terra e florestas. Ademais, avaliar-se-á os impactos da utilização integral das receitas desse imposto em um sistema de dividendo de carbono, para o mesmo ano de referência. Esta análise pretende averiguar o efeito do imposto no montante

das emissões e na distribuição de renda pessoal. Além disso, pretende-se verificar o impacto da aplicação conjunta do imposto e do dividendo de carbono na distribuição de renda.

O objetivo primário do presente estudo é examinar os impactos distributivos da implementação de um imposto e dividendo de carbono no Brasil, em 2018. A este objetivo, são secundários: i) estimar o quanto um imposto de USD40/tCO₂e aumentaria os índices de preços de cada setor da matriz de insumo-produto, em função de suas emissões de gases de efeito estufa; ii) estimar, em termos absolutos e relativos (por unidade monetária), a quantidade de emissões de gases de efeito estufa associadas ao dispêndio de indivíduos de diferentes grupos de renda; iii) simular como um imposto sobre emissões aumentaria os custos por unidade de gases de efeito estufa no dispêndio domiciliar, avaliando a variação média no bem-estar de diferentes grupos de renda; iv) simular a redistribuição das receitas do imposto por meio de um dividendo de carbono, avaliando novamente as variações no bem-estar ao longo da distribuição de renda; e v) comparar a capacidade de dispêndio original dos grupos de renda às capacidades após o imposto e após o dividendo, explicando variações em termos das diferenças de padrões de consumo citadas no ponto ii.

O desenvolvimento da presente monografia conta com quatro capítulos. No capítulo dois, introduz-se a magnitude e a urgência da crise climática, na medida relevante para justificar ao leitor a relevância social da problemática abordada. Na primeira seção do capítulo dois, apresenta-se um resumo dos impactos socioeconômicos do aumento das temperaturas no Brasil. Em seguida, na seção 2.2, aborda-se o papel do Brasil no esforço internacional de mitigação da mudança climática, à luz de acordos internacionais e de conceitos da justiça ambiental.

O capítulo três consiste em uma revisão da literatura relevante à análise quantitativa proposta pelo presente estudo. A seção 3.1 apresenta os procedimentos pelos quais emissões de gases de efeito estufa são atribuídas a atividades econômicas específicas, revisando o desenvolvimento da literatura acerca das Análises de Ciclo de Vida, (em especial as metodologias que empregam matrizes de insumo-produto) e explorando algumas aplicações dessas metodologias para o Brasil. Na seção 3.2, são explorados os fundamentos teóricos e as aplicações contemporâneas de impostos sobre emissões de gases de efeito estufa. A seção 3.3 consiste na revisão de análises para o Brasil e outros países que empregam metodologias de insumo-produto para avaliar os impactos distributivos de um imposto sobre emissões e de diferentes usos das receitas desse imposto.

Em seguida, o quarto capítulo apresenta a metodologia empregada na análise quantitativa do presente estudo. A seção 4.1 apresenta as bases de dados empregadas nessa

análise – uma matriz de insumo-produto (NEREUS, 2020), estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa (MCTI, 2020), e os microdados da Pesquisa de Orçamentos Familiares 2017-2018 (IBGE, 2021). A expressão matemática da simulação do sistema de *carbon fee and dividend* é apresentada na seção 4.2.

O capítulo 5 apresenta e discute os resultados estimados. A seção 5.1 apresenta os impactos da simulação sobre o nível total de emissões e sobre indicadores associados à economia agregada e aos diferentes setores econômicos. Na seção 5.2, realiza-se a análise dos impactos distributivos do imposto sobre emissões, enquanto a seção 5.3 apresenta os resultados da simulação do dividendo de carbono. A seção 5.4 consiste em uma análise de sensibilidade, em que os resultados das seções 5.1 a 5.3 são reestimados sob impostos de diferentes taxas. A interpretação dos resultados e as implicações para o desenho de políticas públicas são apresentadas na seção 5.5.

Após o quinto capítulo, são apresentadas as considerações finais e as contribuições da presente monografia para a literatura acerca de impostos sobre emissões e desigualdade.

2 ECONOMIA E AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

O período mult centenário mais recente com temperaturas globais médias comparáveis às da última década ocorreu 125.000 anos atrás (IPCC, 2021). Através de centenas de simulações, essas temperaturas não podem ser explicadas sem considerar-se fatores antropogênicos (causados pela atividade humana), que já induziram um aquecimento global de 1,07°C desde 1850 (Emanuel, 2019). Assim sendo, a pressão de atividades humanas sobre o clima global é reconhecida por mais de 99% dos cientistas (Powell, 2019; Lynas et al., 2021).

Apesar da complexidade de prever-se acuradamente variações na temperatura global média, o fato científico básico que explica a maior parte das mudanças climáticas é relativamente simples: gases do efeito estufa como vapor d'água, metano, dióxido de carbono e diversos outros absorvem em diferentes intensidades a radiação infravermelha solar, e a emitem sobre a superfície da terra. Desde a revolução industrial, aumentos na queima de combustíveis fósseis, no desmatamento, na pecuária e em outras atividades fizeram com que a concentração desses gases na atmosfera atingisse níveis mais altos do que em qualquer período há pelo menos dois milhões de anos (IPCC, 2021).

Uma das mais evidentes consequências das mudanças climáticas é o aumento da frequência e severidade de eventos climáticos extremos como ondas de calor, secas, enchentes e incêndios florestais. Exemplos recentes no Brasil incluem o menor nível de chuvas em 91 anos (Diário do Comércio, 2021), a enchente histórica do Rio Negro (Globo, 2021), e as piores queimadas no cerrado em 10 anos (Folha de São Paulo, 2021), todos ocorridos em 2021.

Alguns desses impactos já são irreversíveis – outros ainda podem ser evitados ou amenizados. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, uma instituição de cooperação científica que periodicamente revisa a literatura sobre mudanças climáticas, constata que “qualquer atraso em uma ação global, coordenada e conjunta, levará a perda de uma breve janela, que se fecha rapidamente, para assegurar um futuro habitável” (IPCC, 2022a).

Além dessa breve introdução da emergência climática, o presente capítulo consistirá em duas seções. Na seção 2.1, apresenta-se as vulnerabilidades socioeconômicas aos efeitos da mudança climática no Brasil. Em seguida, na seção 2.2, são discutidas as estratégias de mitigação e os compromissos adotados pelo Brasil, com especial atenção ao tema da justiça climática e das responsabilidades atribuíveis a países em desenvolvimento e aos diferentes grupos socioeconômicos nesses países.

2.1 Impactos socioeconômicos das mudanças climáticas

Regiões urbanas e rurais enfrentam diferentes vulnerabilidades climáticas. Dada a permeabilidade reduzida do solo nas cidades, alguns dos principais desafios enfrentados são relacionados a mudanças nos regimes pluviométricos. Chuvas de 50 milímetros em um único dia, praticamente inéditas antes de 1950, já ocorrem duas a cinco vezes por ano na cidade de São Paulo. Assentamentos urbanos, em especial os precários e localizados em encostas, toraram-se mais suscetíveis a deslizamentos, o tipo de acidente natural mais letal no Brasil (Nobre et al., 2010). Em uma análise de indivíduos suscetíveis aos riscos combinados de deslizamentos, inundações e enxurradas em 479 municípios brasileiros, Saito et al. (2019) identificaram que 43% deles viviam em domicílios com renda per capita de até meio salário-mínimo, em comparação a 27% da população total dos mesmos municípios.

Características do ambiente urbano como a arborização reduzida e a densidade de prédios também tornam as cidades mais suscetíveis a ondas de calor extremas. Os mesmos fatores podem resultar no aumento de episódios de inversão térmica, que causam o

aprisionamento de uma camada de ar poluído próximo à superfície, agravando problemas de saúde respiratória. Ademais, a alta concentração de dióxido de carbono (doravante, CO₂) em ambientes internos afeta as capacidades cognitivas dos indivíduos, podendo ter impactos severos sobre a produtividade de setores econômicos dependentes do trabalho intelectual (Vehviläinen et al., 2016).

A população rural, que em 2010 correspondia a 15,6% da população brasileira total (IBGE, 2010), enfrenta desafios heterogêneos ao longo do território brasileiro, relacionados principalmente a mudanças em atividades agropecuárias. A região Sul pode ser beneficiada ao tornar-se mais propícia à produção de culturas tropicais como o café, que não poderia mais ser produzido nas regiões tradicionais de São Paulo e Minas Gerais (Assad et al., 2008). A região Nordeste, por outro lado, enfrentaria aumentos nas já elevadas temperaturas e riscos de estiagem, podendo sofrer quedas de produtividade de 100% em algumas culturas (Cirino et al., 2014). No agregado para o Brasil, o impacto projetado é negativo: quebras de safra poderão ocasionar um prejuízo de R\$14 bilhões em 2070 no Brasil (Assad et al., 2008), ou uma redução de até 26% na lucratividade agrícola até o fim do século (Féres, et al., 2011). Em todos os casos, a diminuição da previsibilidade climática e as mudanças nas culturas em cada região resultarão em custos de adaptação que podem ser particularmente prejudiciais a agricultores familiares e à produção para subsistência (Féres et al., 2009).

Efeitos rurais e urbanos das mudanças climáticas interagem de múltiplas maneiras. Quebras na produtividade agrícola afetam o abastecimento de alimentos em todas as regiões, expondo particularmente as camadas mais pobres à insegurança alimentar. Ademais, perturbações em indústrias dependentes de recursos naturais podem induzir taxas ainda maiores de migração rural para assentamentos urbanos precários altamente expostos a riscos sanitários, de deslizamentos e de pobreza. Destaca-se, por fim, que a produtividade não-agrícola também pode ser afetada de múltiplas maneiras: pela falha de partes da infraestrutura rural e urbana, pelo desabastecimento de hidrelétricas, pela já referida queda de capacidade cognitiva e pelo impacto negativo de mudanças climáticas em indicadores de saúde física e mental (IPCC, 2022a).

O bioma amazônico merece particular atenção. A Amazônia gera aproximadamente metade da sua própria chuva ao reciclar a umidade vinda de correntes atlânticas, regulando também o regime de chuvas em outras partes do Brasil, especialmente no Sul. Interações entre o aumento de temperaturas, desmatamento, e uso de queimadas para a formação de pastagens podem perturbar esse ciclo hidrológico a ponto de grande parte do bioma amazônico ser convertido em outros ecossistemas (como caatingas) ao atingir-se a marca de

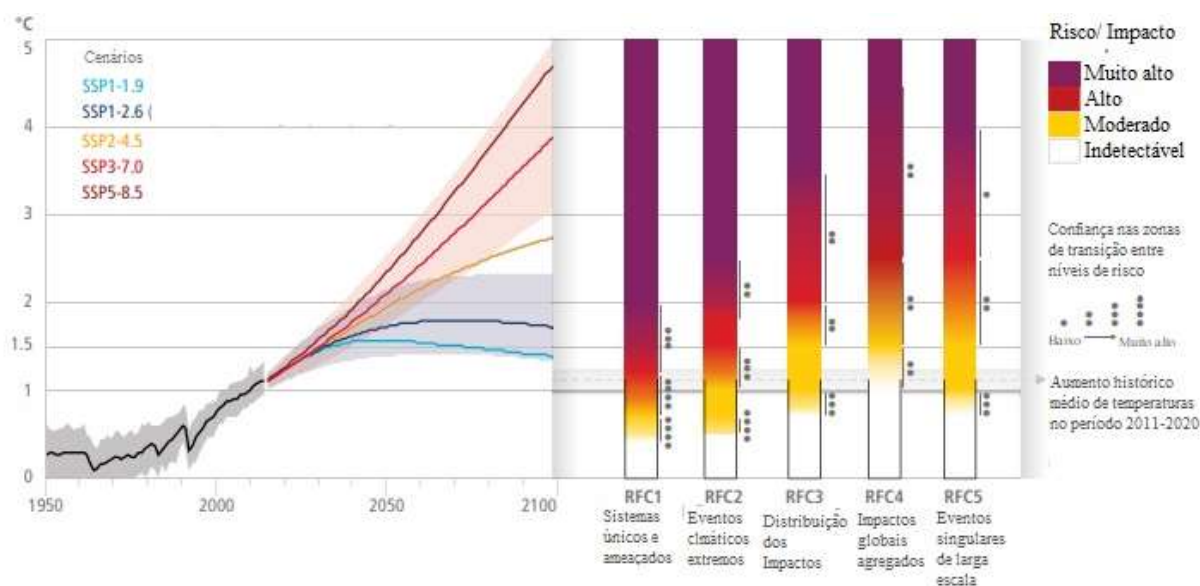
20% a 25% de desmatamento total da floresta - o que pode ocorrer em 10 a 15 anos, a taxas correntes de desmatamento (Nobre e Lovejoy, 2018). Além da desregulação dos ciclos hidrológicos, tal fenômeno seria acompanhado de massivas emissões de gases de efeito estufa, na medida em que o carbono capturado pela flora amazônica retornaria à atmosfera por meio de queimadas ou decomposição.

Reduções nesse e em outros biomas põem em risco serviços ecossistêmicos (os benefícios diretos e indiretos obtidos pela humanidade a partir dos ecossistemas), como o controle de patógenos, regulação do clima, limpeza das águas e provisão de recursos (Andrade e Romeiro, 2009), e perder-se-ia os benefícios futuros das quase 98% de espécies de plantas amazônicas cujas aplicações farmacológicas nunca foram estudadas (Elisabetsky e Shanley, 1994). Populações indígenas e tradicionais, cujas economias e culturas estão intimamente relacionadas a serviços ecossistêmicos, já estão altamente expostas a perdas na qualidade e quantidade da alimentação (IPCC, 2021).

Para uma melhor ilustração dos impactos de diferentes níveis de mudança climática sobre sistemas humanos e naturais, reproduz-se, na figura 1, um gráfico apresentado no sexto relatório de avaliação do IPCC (2022a). Na série histórica à esquerda, são representadas futuras trajetórias da temperatura superficial global média (em graus Celsius acima da média de 1850 a 1900), sob diferentes cenários. Nas barras à direita, representa-se os riscos e impactos associados a cada variação climática, caso pouca ou nenhuma atenção seja dada a medidas de adaptação, como aumento na capacidade hospitalar e adaptação de infraestrutura a enchentes¹.

¹ O Sexto Relatório de Avaliação – Segundo Grupo de Trabalhos (IPCC, 2022), apresenta também versões desses gráficos para regiões específicas como a África, Mediterrâneo e Ártico. No entanto, em função de incompletude da literatura, não foi apresentado um gráfico mais específico para uma região que inclui o Brasil. Não se pode simplesmente extrapolar esses resultados para o Brasil, mas impactos globais das mudanças climáticas também são relevantes para decisões domésticas acerca de políticas de redução em níveis de emissões.

Figura 1: Variação na temperatura superficial global média em relação à média histórica (°C), sob diferentes cenários, e impactos associados.



Fonte: Reproduzido do Sexto Relatório de Avaliação - Segundo Grupo de Trabalhos (IPCC, 2022a). Tradução do autor.

Os diferentes cenários analisados variam desde a manutenção na trajetória de emissões, sem novas políticas de mitigação (o cenário SSP5-8.5), até o cenário SSP1-1.9, em que emissões líquidas globais de gases de efeito estufa são zeradas até algum ponto próximo à metade do século corrente, o que requereria esforços maiores a cada ano em que as emissões globais continuam crescendo. Cada uma das barras na metade direita do gráfico representa um diferente motivo para preocupação (*reason for concern*, ou RFC, na sigla em inglês) - um grupo distinto de fatores de risco. O RFC1 representa sistemas únicos e ameaçados: sistemas naturais e humanos geograficamente restritos que já estão altamente expostos a riscos climáticos. Exemplos incluem populações indígenas, e locais de intensa biodiversidade como o bioma amazônico.

O RFC2 diz respeito a eventos climáticos extremos, e os subsequentes impactos sobre a saúde humana, formas de sustento econômico, infraestrutura, e a biodiversidade. Incluem-se as já citadas perdas agrícolas e desastres urbanos. Impactos que recaem desproporcionalmente sobre grupos específicos são agrupados no RFC3, e incluem grupos maiores do que os listados no RFC1, como pessoas em situação de pobreza absoluta e idosos. O RFC4 envolve impactos que podem ser agregados globalmente em uma única variável, como danos monetários, vidas afetadas ou espécies extintas. Finalmente, a

categoria 5 é reservada para eventos abruptos de larga escala, como o derretimento de geleiras, colapsos em certos ecossistemas. Nota-se como é reduzido o grau de confiança nas zonas de transição entre níveis de risco da RFC5 (ilustrado por pontos ao lado das barras), dada a dificuldade de se estimar precisamente os níveis de mudança climática que serviriam como gatilho para os eventos de larga escala.

A continuação da corrente trajetória de emissões implicaria em riscos muito altos em todas as cinco categorias, resultando em alta incidência de impactos severos e irreversíveis, com limites significativos à possibilidade de adaptação por parte de governos e indivíduos. Uma ideia expressa graficamente na Figura 1 é que os riscos e impactos das mudanças climáticas aumentam continuamente com cada fração de grau Celsius de aquecimento. Inversamente, fica entendido que cada política de redução de emissões de gases de efeito estufa tem algum grau de impacto socioeconômico positivo.

2.2 Políticas de mitigação e o papel do Brasil

Como os aumentos de temperatura causados por emissões de gases de efeito estufa não respeitam as fronteiras políticas das nações, a mudança climática é um problema que deve ser abordado internacionalmente. No entanto, existem argumentos significativos para a diferenciação de responsabilidades no combate às mudanças climáticas.

Primeiramente, acentua-se que diferentes países contribuíram historicamente para as mudanças climáticas em diferentes graus. Países desenvolvidos atingiram seus níveis contemporâneos de desenvolvimento fazendo uso de fontes de energia e processos industriais intensivos em emissões – o que é refletido nas emissões históricas totais dos diferentes países. Ademais, mundialmente, emissões tendem a crescer com a renda, mas menos que proporcionalmente (Chancel, 2020). Assim sendo, diversos países em desenvolvimento figuram entre os maiores emissores contemporâneos, mas são responsáveis por frações mínimas das emissões historicamente acumuladas. Por exemplo, enquanto o Brasil atualmente é o 12º país que mais emite gases de efeito estufa per capita (Crippa et al., 2021), o país não está entre os 30 maiores emissores, se consideradas emissões acumuladas desde 1850 (Gütschow et al., 2021).

Ademais, os países desenvolvidos que estão entre os principais emissores contemporâneos são também aqueles menos vulneráveis às consequências das mudanças climáticas (Chancel, 2020), e que, portanto, estão menos constrictos pela necessidade de investir em políticas de adaptação às mudanças climáticas, como ampliação dos sistemas de

saúde e proteção contra enchentes (IPCC, 2021). Países de elevada renda também enfrentam menos dilemas entre a mitigação de gases de efeito estufa e outros objetivos imprescindíveis, como a segurança alimentar e energética, e a erradicação da pobreza.

Dois conceitos desenvolvidos no âmbito do direito ambiental são úteis para a atribuição de responsabilidades no esforço internacional de combate às mudanças climáticas. O princípio do poluidor-pagador, estabelecido na Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) em 1972, dita que os causadores de danos ambientais devem ser os responsáveis pelos correspondentes custos (Luppi et al., 2012). Já o princípio de “Responsabilidades Comuns mas Diferenciadas e Respectivas Capacidades” (CBDR-RC), ratificado na Conferência Rio-92, destaca como países desenvolvidos devem incorrer em maiores obrigações no combate à mudança climática, em função de terem maior grau de emissões históricas de gases de efeito-estufa e maior capacidade de realizar *trade-offs* entre crescimento de curto-prazo e sustentabilidade de longo-prazo (Moraes, 2013).

No Protocolo de Quioto de 1997, países foram separados entre países inclusos no Anexo I (membros da OCDE e as chamadas “economias em transição”), e países não inclusos no Anexo I (grupo que inclui o Brasil) (Chancel, 2020). Apenas os países inclusos no Anexo I comprometeram-se a limites absolutos de emissões, sem obrigações análogas sendo adotadas pelos países não inclusos no Anexo I. Também se estabeleceram mecanismos para a transferência de tecnologias poupadoras de emissões dos países do Anexo I para os demais países.

No entanto, o Acordo de Paris, de 2015, reduz a importância dessa dicotomia rígida, favorecendo uma diferenciação gradativa, com maiores sutilezas, e maior distribuição de responsabilidades (Pauw *et al.*, 2019). Os governos federais dos países signatários foram responsabilizados por especificar as ações que tomariam para reduzir emissões, por meio de Contribuições Nacionalmente Determinadas não vinculativas (NDCs). A primeira NDC brasileira foi ratificada em 2016, e atualizações foram feitas em 2020 e 2022 (Brasil, 2022). A NDC mais recente prevê uma redução nas emissões líquidas brasileiras em 37% até 2025, e em 50% até 2030, ambas as metas em relação a valores de 2005. Nota-se que desde a publicação da NDC brasileira original, as emissões para o ano de referência (2005) foram revisadas para cima, tornando as NDCs mais recentes menos ambiciosas que a original, apesar de aumentos nas metas expressas em percentuais. Ademais, as metas não são consistentes com a ambição geral firmada no Acordo de Paris, de limitar-se o aumento da temperatura global média a significativamente menos 2°C em relação a níveis pré-industriais (Unterstell et al., 2022).

Alguns argumentos propostos para a intensificação do combate às mudanças climáticas aplicam-se igualmente a países com alto e baixo nível de emissões históricas. Alguns autores propõem que a redução de emissões pode ser entendida como uma questão de justiça intergeracional: ações de custo presente entre 1% e 2% do produto interno bruto global poupariam gerações futuras impactos equivalentes a 15% do produto global – alternativamente, a inação no presente aumenta os custos de adaptação e mitigação no futuro (Stern, 2007; Chancel, 2020).

Outro argumento emerge no contexto da teoria da valoração dos custos sociais das mudanças climáticas. De acordo com o influente *dismal theorem* (algo como “teorema sombrio”), análises de custo-benefício sobre a mitigação de mudanças climáticas são complicadas pela incerteza profunda e insuperável acerca de parâmetros como a sensibilidade de diversos sistemas a aumentos na temperatura e os pontos em que eventos climáticos singulares de larga escala são ativados (Weitzman, 2007). Não se pode negligenciar, na distribuição de possíveis cenários, o peso de cenários catastróficos, caracterizados por períodos plurianuais de redução no bem-estar per-capita. Simplificadamente, isso ocorre quando a probabilidade de eventos catastróficos decresce mais lentamente do que a intensidade desses eventos, criando estimativas dos custos futuros sem limite superior. A aplicabilidade desses resultados a políticas ambientais é controversa, mas o teorema é geralmente interpretado como uma recomendação para financiar-se a ciência que diminui incertezas e para adotar-se uma abordagem precaucional, aumentando os esforços de mitigação (Yohe e Tol, 2007).

Finalmente, a distinção entre países muito ou pouco responsáveis pelo aumento das temperaturas globais pode ser menos útil do que a distribuição individual de emissões, independentemente do país de origem dos indivíduos. Desde o Protocolo de Quioto, em 1997, o nível de renda médio dos países desenvolvidos e em desenvolvimento convergiu, enquanto aumentaram as desigualdades dentro dos países. Desse modo, desigualdades de renda entre e dentro dos países passaram a contribuir na mesma medida para as desigualdades globais de emissões contemporâneas de gases de efeito estufa (Chancel e Piketty, 2015). Enquanto a maior parte dos emissores de larga escala ainda se encontram nos países desenvolvidos (em especial os da América do Norte), algumas estimativas colocam o 1% mais rico no Brasil em níveis de emissões per capita maiores do que o valor médio nos Estados Unidos, o país com o maior nível de emissões per capita (Chancel, 2020). Assim sendo, políticas desenhadas para mitigar especificamente as emissões dos grupos mais ricos podem contribuir significativamente para a contenção do aumento de temperaturas sem

ampliar desigualdades ou prejudicar os indivíduos mais expostos a vulnerabilidades climáticas.

3 REVISÃO DA LITERATURA

O presente capítulo consiste na revisão de diferentes tópicos relevantes à quantificação dos impactos distributivos de um imposto sobre emissões. Na seção 3.1, aborda-se metodologias de insumo-produto desenvolvidas para quantificar-se emissões de gases de efeito estufa e associá-las a diferentes atividades econômicas. Em seguida, a seção 3.2 consiste em uma revisão dos fundamentos teóricos e das aplicações existentes de impostos sobre emissões. Finalmente, a seção 3.3 apresenta a literatura acerca dos impactos distributivos de um imposto sobre emissões.

3.1 Avaliação de emissões de gases de efeito estufa

Avaliações do impacto distributivo de um imposto sobre emissões de gases de efeito estufa necessitam uma estimativa prévia das emissões associadas às diferentes categorias de bens. Uma série de questões metodológicas e de definição apresentam-se, e servirão de objeto para essa seção, a fim de esclarecer exatamente o que será quantificado e justificar essa escolha. Ao fim, serão apresentadas estimativas das emissões associadas ao dispêndio das famílias brasileiras e de outros países.

Há uma questão inicial de escopo: ao longo das décadas de 1980 e 1990 estabeleceu-se o entendimento de que as emissões de gases do efeito estufa (e o impacto ecológico em sentido amplo) associados a um bem estão dispersos ao longo de diferentes estágios de sua cadeia produtiva, de seu uso, e de seu descarte (Guinée et al., 2011). Assim origina-se o conceito de Avaliação de Ciclo de Vida (doravante, também chamada de ACV), definido pela Organização Internacional para a Padronização (ISO) como a “compilação e avaliação dos insumos, produtos, e potenciais impactos ambientais do sistema de um produto, processo, ou serviço ao longo de seu ciclo de vida” (Arvanitoyannis, 2008).

Ainda que exista um padrão internacional relativo à transparência, à apresentação, e a princípios norteadores no desenho das Avaliações de Ciclo de Vida, não há uma metodologia única para sua condução (Guinée et al., 2011). Pode-se identificar ao menos

dois principais tipos de ACV: Análise de Produto (AP) e Insumo-Produto Ambiental (em inglês, *environmental input-output*, ou EIO). A Análise de produto é mais adequada ao nível micro - produtos e processos individuais (Minx e Wiedmann, 2007), e identifica os impactos do sistema em questão diretamente, preferencialmente com base nas ciências naturais (Finkbeiner, 2006). Por esses motivos, é considerada uma análise *bottom-up*, (ou de baixo para cima, dos insumos e processos individuais a níveis maiores), e permite a empresas melhor identificar potenciais *trade-offs* ou pontos no ciclo de vida de um produto mais aptos a modificações de alto custo-benefício. Para corresponder às ambições de avaliar os impactos ambientais de um produto do *from cradle to grave* – isto é, da produção dos inputs até o descarte - o sistema considerado deve ser compreensivo (Wiedmann et al., 2009). Seria insuficiente, por exemplo, considerar apenas o impacto ambiental da montagem de um veículo, ou apenas seu consumo de combustível à jusante. No entanto, existem casos nos quais as “fronteiras de sistema” são mais contenciosas (por exemplo, deve-se avaliar o impacto do transporte dos funcionários ao local de trabalho?), fazendo dessa delimitação necessariamente subjetiva e possivelmente conducente a uma dupla contagem à medida em que múltiplas análises de processo são agregadas para dar conta de sistemas maiores (Carnegie, 2008). Ademais, as análises de processo geralmente utilizam dados privados (dificultando a reprodução), acompanham altos custos (especialmente em trabalho especializado), e mesmo após a consideração de centenas de empresas na cadeia de valor de um determinado produto, tais estudos podem deixar de avaliar até 40% das emissões indiretas à montante em seu ciclo de vida (Wiedmann, 2009).

A análise de insumo-produto ambiental (doravante denominada de EIO) é mais adequada para escala maiores: combina médias de emissões setoriais e matrizes insumo-produto para calcular emissões no nível meso (setorial), macro e, com adaptações, no comércio internacional, sem as complicações de delimitação ou dupla contagem. A expressão algébrica da análise de ciclo de vida EIO será tratada ao abordarmos a metodologia deste trabalho, na seção 4.2.

Matrizes de insumo-produto fazem parte do Sistema de Contas Nacionais da ONU desde 1968, e múltiplos países passaram a divulgar estimativas das médias setoriais de emissões de gases de efeito estufa nas últimas décadas (Minx et al., 2009), fazendo das Avaliações de Ciclo de Vida - EIO muito menos intensivas em trabalho (após a divulgação desses dados oficiais) e mais fáceis de reproduzir que as análises de processo. No Brasil, o IBGE divulga as Tabelas de Recursos e Usos anualmente, e matrizes de insumo-produto, mais detalhadas, a cada cinco anos. O Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações

divulga estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil (por exemplo, MCTI, 2020) para cinco setores e 23 subsetores, por meio do Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE). Esses dados serão apresentados mais extensivamente na seção 4.1.

As análises de ciclo de vida EIO mantêm-se como um padrão amplamente empregado na avaliação de inventários nacionais de emissões de gases de efeito estufa (Wiedmann e Barret, 2009), e posteriormente, na seção 4.2, será possível apreciar como as Avaliações de Ciclo de Vida - EIO representam um paradigma na avaliação dos impactos distributivos de um imposto sobre emissões de carbono. No entanto, esse paradigma vem com suas próprias fraquezas. Há a necessidade de combinar estimativas de emissões com matrizes insumo-produto expressas em valores monetários, dificultando a interpretação dos resultados em termos de unidades físicas. Ademais, a aplicabilidade de estimativas de emissões feitas por EIO a produtos específicos é dependente em presunções de constância de preços e de padrões de impacto ambiental dentro de um mesmo setor, o que é uma limitação do método, especialmente em maiores níveis de agregação setorial. Ainda assim, Mathews et al. (2014) apontam que análises EIO podem servir como instrumento de triagem para organizações buscando avaliar o impacto ambiental de suas práticas.

A literatura sobre inventários nacionais de emissões de gases de efeito estufa e sua relação com a demanda final foi desenvolvida, durante as décadas finais do século XX, especialmente como um segmento da Análise de Ciclo de Vida (que pode considerar uma série de outros tipos de impactos ambientais, como a poluição do solo) (Wright, et al., 2011). No entanto, como demonstrado por Wiedmann e Minx (2008), a partir da virada do milênio o termo “*carbon footprint*” (“pegada de carbono, na tradução usual), já popular em mídias de massa, começa a aparecer em publicações científicas com uma frequência crescente. Originado do correlato “*ecological footprint*” (ou pegada ecológica, assim chamada por representar a área biologicamente necessária para atender as necessidades correntes de consumo humano), o termo não dispunha de definição inequívoca na literatura à época, mas denotava, de forma ampla, as emissões de determinados gases de efeito estufa associadas a determinada atividade, produto, ou entidade, e seu uso recorrente demonstrava um crescente interesse nessa subdisciplina das Avaliações de Ciclo de Vida.

Em Wiedmann e Minx (2008) é proposta a seguinte definição:

The carbon footprint is a measure of the exclusive total amount of carbon dioxide emissions that is directly and indirectly caused by an activity or is accumulated over the life stages of a product. (Wiedmann e Minx, 2008).²

A definição atende a um número de questões relevantes, como: inclusão unicamente de um gás para o qual há mais estimativas disponíveis, e que é condizente com o sentido literal do termo; a independência de conversões (por exemplo, para área, como na “pegada ecológica”) que podem criar divergências nas medições; e a consideração da possibilidade de dupla contagem (expressamente desaconselhada pelo adjetivo “exclusiva” na definição). No entanto, existem outras questões relevantes que são melhor abordadas na definição proposta em Wright, et al. (2011), qual seja:

A measure of the total amount of CO₂ and CH₄ emissions of a defined population, system or activity, considering all relevant sources, sinks and storage within the spatial and temporal boundary of the population system or activity of interest. Calculated as CO₂e using the relevant 100-year global warming potential (GWP100) (Wright et al., 2011)³.

A unidade de medida sugerida CO₂e (lê-se “carbono equivalente”) é utilizada para expressar com uma única cifra a contribuição de múltiplos gases ao aquecimento global, comparando-os em termos de potencial de aquecimento global em cem anos (*one-hundred-year global warming potential*, ou GWP100). O GWP100 de dado gás expressa quantas unidades de massa desse gás têm o mesmo potencial de absorção de calor ao longo de cem anos que uma unidade de massa de dióxido de carbono. Por definição, portanto, o CO₂ tem GWP100 = 1. Como o gás metano (CH₄) tem um potencial absorver 28 vezes mais calor do que uma mesma quantidade de CO₂ ao longo de cem anos, o metano tem GWP100 igual a 28, e uma tonelada métrica de CH₄ equivale a 28 tCO₂e (IPCC, 2014). Tabelas que permitem a comparação de múltiplos gases são fornecidas pelo IPCC desde 1995 (IPCC, 1995) - e, por convenção, os GWP apresentados nesse momento inicial ainda são utilizados amplamente,

² “A pegada de carbono é uma medida da quantidade total exclusiva das emissões de dióxido de carbono que são direta e indiretamente causadas por uma atividade, ou que são acumuladas ao longo do ciclo de vida de um produto.” (Wiedmann e Minx, 2008, em tradução livre).

³ “Uma medida da quantidade total de emissões de CO₂ e CH₄ de uma população, sistema ou atividade definida, considerando todas as fontes, sumidouros e armazenamentos dentro das fronteiras temporais e espaciais da população, sistema ou atividade de interesse. Calculada em CO₂ e usando o potencial de aquecimento global de 100 anos (GWP100) relevante.” (Wright et al., 2011, em tradução livre)

ainda que valores revisados estejam disponíveis (Williams et al., 2012). Os valores de 1995 são utilizados inclusive nas estimativas oficiais mais recentes para o Brasil (MCTI, 2020), que são apresentadas tanto em CO₂e quanto discriminadas por gás.

Freitas (2014) realiza uma análise de longo escopo temporal (1990-2010) para avaliar em que medida a expansão do consumo de massa no Brasil durante esse período conduziu a uma expansão do inventário nacional de emissões de gases de efeito estufa, e em que medida efeitos tecnológicos podem ter amenizado essa expansão. Para tanto, combina uma ACV-EIO com uma análise de decomposição estrutural, originalmente proposta por Leontief (1966) para distinguir entre efeitos originários de mudanças na estrutura da demanda final, em alterações das relações de interdependência setorial, e de mudanças no vetor de impactos ambientais (média de emissões por unidade monetária em cada setor). Para tanto, emprega a tríade Pesquisa de Orçamentos Familiares (POF), Tabela de Recursos e Usos (ambos divulgados pelo IBGE) e estimativas de emissões do MCTI - o mesmo conjunto de dados a ser empregado pelo presente estudo. O autor identifica um aumento de 204 MtCO₂e nas emissões totais da economia brasileira durante o período, apesar do efeito tecnológico ter agido no sentido de redução de intensidade de emissões. O aumento é explicado principalmente pelo aumento das exportações no setor agropecuário. Portanto, se torna relevante ao caso brasileiro o conceito de “balanças comerciais ambientais” – uma medida do impacto ambiental causado no Brasil em função do consumo em outros países (Munksgaard et al., 2008).

Magalhães e Domingues (2013) complementam a metodologia de análise de ciclo de vida com um modelo de equilíbrio geral computável chamado “BeGreen”, feito para a economia brasileira e capacitado para análises ambientais e energéticas. A análise emprega dados da matriz de insumo-produto do IBGE, o Balanço Energético Nacional e as estimativas de emissões do MCTI – todos para 2005 – e distingue entre emissões por uso de energia e emissões decorrentes da atividade econômica. Dentre esse último grupo, os resultados indicam que os setores mais poluentes são a Pecuária e Pesca, responsável por 52,7% das emissões por atividade econômica, e a Agricultura, fonte de 35,3% das emissões desse tipo.

Em da Silva Freitas et al., (2016), emissões são associadas a atividades econômicas empregando as estimativas do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações e a matriz de insumo-produto estimada por Guilhoto e Sesso Filho (NEREUS, 2020), ambos para o Brasil e ano-base 2009. Analisando os resultados, “Pecuária e pesca” e “Transportes” destacam-se como os maiores contribuintes para a acumulação de gases de efeito estufa na atmosfera.

Moz-Christofoletti e Pereda (2021) empregam um modelo insumo-produto híbrido baseado na Tabela de Recursos e Usos do IBGE de 2010 e dados do Balanço Energético Brasileiro para estimar um imposto sobre emissões relacionadas ao emprego de energia na produção de diversas categorias de bens. Cruzando esses dados com a POF de 2008-2009, as autoras encontraram uma pegada de carbono de 10,5tCO₂e por domicílio por ano, um pouco maior do que a estimativa do Banco Mundial (9,9 tCO₂e) e significativamente menor do que as emissões médias anuais por domicílio de países como a China (30 tCO₂e/domicílio), Alemanha (35.6 tCO₂e/domicílio), e Estados Unidos (66 tCO₂e/domicílio), como estimadas para o ano de 2014 pelo Banco Mundial (2022). Em ordem decrescente, alimentos e bebidas, transporte, e recreação e educação foram as três categorias de produtos que mais contribuíram para as emissões dos domicílios.

Múltiplos estudos das emissões brasileiras mantêm foco exclusivo sobre a produção de alimentos, analisando a agroindústria ou a pecuária especificamente. Montoya et al. (2020) empregam também uma matriz de insumo-produto híbrida, elaborada a partir da matriz de insumo-produto brasileira de 2009 estimada por Guilhoto e Sesso Filho (NEREUS, 2020) e do Balanço Energético Nacional do mesmo ano-base. Os autores estimam as emissões associadas ao consumo energético no agronegócio, destacando que o setor tem impacto ambiental maior que média da economia brasileira em termos de emissões totais, emissões por unidade monetária do produto, por trabalhador e por unidade de energia consumida – destacando, no entanto, que o uso da biomassa como fonte primária de energia do setor significa que parte dessas emissões são compensadas pelo processo de fotossíntese que ocorre durante o desenvolvimento das culturas. Bustamante et al. (2012) utilizam modelos de imagem por satélite e médias de emissões por tipo de pastagem para analisar emissões associadas à pecuária no período de 2003 a 2008. Encontra-se que o modelo extensivo de criação de gado em pastagens está ligado à elevada intensidade de emissões do setor – tanto por causa das queimadas para o estabelecimento e manutenção de pastagens, que resultaram na emissão de 4170 MtCO₂ só na Amazônia e no Cerrado durante o período, quanto por causa das emissões resultantes da fermentação entérica, um processo químico associado à digestão de alimentos por diversos animais de abate, que ocorre mais intensamente e lança mais metano na atmosfera durante a digestão de grama do que de grãos.

3.2 Impostos sobre emissões

Tendo-se revisado a literatura empírica e explorado alguns aspectos teóricos concernentes à quantificação de emissões, a presente seção apresenta os fundamentos teóricos dos impostos sobre emissões. Nesta seção é apresentada uma breve revisão da literatura internacional de impostos sobre emissões. Como os fundamentos teóricos e efeitos econômicos e ambientais de impostos sobre emissões são em grande parte aplicáveis a outras políticas que impõem um preço ao ato de emitir gases de efeito estufa, essas medidas serão tratadas conjuntamente.

A teoria econômica neoclássica analisa emissões de gases de efeito estufa sob o conceito de “externalidades”. Baumol e Oates (1988) definem que uma externalidade está presente quando uma variável real (não-monetária) afeta o bem-estar ou a produção de determinado agente, mas o valor da variável é decidido por outro agente. Pode-se formular um exemplo com gases do efeito estufa em mente: a empresa B minimiza seus custos realizando a queima de seus resíduos de maneira que emite muito metano (uma variável real), que por sua vez impacta negativamente o bem-estar do indivíduo A, via redução da qualidade do ar e disrupção do clima e de sistemas naturais e humanos.

Em modelos neoclássicos com indivíduos maximizadores de utilidade e firmas maximizadoras de lucro, externalidades produzem um equilíbrio que não adere à eficiência de Pareto, pois bens são produzidos de forma não-condizente com as preferências dos indivíduos. No entanto, a eficiência pode ser restaurada com apenas uma intervenção governamental, proposta por Arthur Cecil Pigou (1920) e posteriormente denominada de “imposto pigouviano”. A medida consiste na taxação dos “ofertantes” da externalidade, de modo a impor a eles custos equivalentes ao dano social marginal causado por suas práticas (Baumol e Oates, 1988).

Um imposto sobre emissões fundamenta-se teoricamente como um imposto pigouviano na seguinte maneira: agentes que causam a emissão de gases de efeito estufa consomem um bem-público (a qualidade do ar e a estabilidade climática) sem consideração pelos custos dessa escolha, e repassam esse ônus à sociedade em agregado. Se esses custos forem internalizados por meio de um tributo – isto é, se o custo for imposto aos agentes que tomam a decisão de emitir – o nível de emissões será reduzido a um ótimo social que equilibra os benefícios e custos causados pelas atividades econômicas emissoras (nota-se que, teoricamente, o nível de emissões ótimo pode ser negativo, implicando na retirada de gases de efeito estufa da atmosfera acompanhada de “taxação negativa”).

Assim sendo, especialistas têm proposto impostos sobre emissões (ou outras medidas que impõem preços sobre emissões) como a principal e mais eficiente política climática

disponível a governantes (Tvinnerein e Mehling, 2018). William Nordhaus, economista precursor dos *integrated assessment models*, ou a modelagem integrada de variáveis macroeconômicas e ambientais (Royal Swedish Academy of Sciences, 2018), expressa a importância da medida na seguinte maneira: “Em uma primeira aproximação, aumentar o preço de emissões é um passo necessário e suficiente para enfrentar o aquecimento global. O resto é, no melhor dos casos, simples retórica, e pode na verdade ser prejudicial e causar ineficiências econômicas” (Nordhaus, 2008; tradução do autor). De acordo com o relatório do segundo grupo de trabalhos do Painel Intergovernamental sobre a Mudança Climática (IPCC, 2021), não há nenhum cenário em que as metas do Acordo de Paris são cumpridas sem a ampla disseminação de mecanismos de precificação de emissões.

Nordhaus (2008) elenca quatro principais objetivos atingíveis ao impor-se um preço sobre emissões: i) sinalizar aos consumidores quais são os bens mais intensivos em emissões, unindo os objetivos do consumo sustentável e a maximização da utilidade individual; ii) sinalizar aos produtores quais são os insumos e processos produtivos mais poluentes, unindo a maximização de lucros à redução na intensidade de emissões da produção; iii) fornecer incentivos para o desenvolvimento de tecnologias e inovações que permitam formas de produção mais sustentáveis; iv) incorporar ao sistema de preços informações acerca de emissões associadas a atividades econômicas, minimizando o custo de informação necessário para realizar-se as três tarefas anteriores. Ademais, como os produtores e consumidores podem escolher entre reduzir suas emissões ou pagar o imposto, as reduções concentram-se em abatimentos menor impacto financeiro, minimizando o custo agregado da descarbonização (Magalhães e Domingues, 2013).

Alternativamente a um imposto, pode-se precificar emissões ao impor-se um limite às quantidades de gases de efeito-estufa que podem ser emitidas pelas empresas, e permitir que empresas que emitem menos do que seus totais permitidos vendam os direitos de emissões para empresas que considerem a compra desses direitos mais barata do que a redução de emissões. Nesse arranjo, denominado de sistema de comercialização de emissões, o mercado determina o preço das emissões. No entanto, esses sistemas não geram receitas ao governo como um imposto sobre emissões, e podem estar sujeitos à especulação e alta volatilidade de preços (Nordhaus, 2008).

Apesar de serem amplamente recomendados, impostos pigouvianos ideais são de difícil aplicação, por diversos motivos. Primeiramente, a estimação do custo social marginal de gases de efeito estufa é sujeita a múltiplas incertezas: é necessário estimar efeitos locais e mundiais de mudanças climáticas futuras; deve-se valorar tais impactos, realizar previsões

acerca de mudanças tecnológicas no futuro distante, e decidir com quais taxas de desconto determinar o valor presente desses impactos (Weisbach e Metcalf, 2009). Alternativamente a um imposto equivalente ao custo social marginal das emissões, pode-se estimar um preço ou taxa que limite emissões a um patamar pré-estabelecido. Stiglitz et al. (2017) estimam que a adesão à meta determinada no Acordo de Paris, de “conter o aquecimento global a significativamente menos de 2°C em relação a níveis pré-industriais” (UNFCCC, 2015) requer a precificação de emissões em ao menos 40 a 80 dólares estadunidenses (USD) por tonelada de CO₂e até 2020, e 50 a 100USD até 2030.

Outro fator que dificulta a aplicação do imposto pigouviano é a sua cobertura, ou a definição da base tributária do imposto. A autoridade responsável pela tributação precisa continuamente estimar as emissões atribuíveis aos contribuintes. Emissões relacionadas ao consumo de energia são geralmente as mais fáceis de se taxar, pois podem ser facilmente estimadas conhecendo-se o tipo e a quantidade de energia empregada. No entanto, é custoso estimar com precisão as emissões agrícolas e florestais, emissões originárias de processos industriais e emissões fugitivas (que ocorrem quando gases não são devidamente contidos e escapam para atmosfera, como vazamentos em gasodutos e em sistemas de refrigeração). No limite, a extensão da base tributária deve ser determinada no ponto em que os custos de execução e das estimativas relacionadas a uma expansão marginal na cobertura excedem a arrecadação e os benefícios sociais marginais (Weisbach e Metcalf, 2009).

Finalmente, impostos sobre emissões também são complicados politicamente. Existe uma visão estabelecida de que políticas públicas de mitigação de mudanças climáticas constituem um problema de ação coletiva: países ou firmas hesitam em tomar os primeiros passos e sofrer um aumento de custos, pois sofreriam reduções na competitividade em relação a outros agentes que continuam poluindo sem precificar emissões. Colocado de outra forma, existe um problema de *free-riding*, pois a melhor escolha para cada agente é colher os benefícios da estabilização do clima, deixando que outros enfrentem os custos da mitigação (Weitzman, 2017). No entanto, Aklin e Mildemberger (2020) recontam como diversas políticas climáticas têm sido adotadas unilateralmente, e que a opinião pública e o balanço doméstico de grupos a favor e contra medidas climáticas demonstram-se decisivos na aprovação ou rejeição de tais programas. Ademais, políticas de precificação de emissões até o momento tiveram impacto mínimo na competitividade de diferentes indústrias, exceto por algumas indústrias de bens intensivos em emissões expostas à competição internacional (Stiglitz et al., 2017).

Até o fim de 2021, 21.5% das emissões de gases de efeito estufa mundiais estavam cobertas por algum sistema de precificação de emissões (seja por um imposto, ou por um sistema de comercialização de emissões), em comparação a 15,1% em 2020 (o aumento se deu, em grande parte, pela introdução de um mercado de emissões na China em 2021). No entanto, apenas 3,76% das emissões mundiais estão sujeitas a um preço superior aos 40USD/tCO₂e necessários para a respeitar-se o limite de temperatura firmado no Acordo de Paris (Banco Mundial, 2022). No Brasil, a política RenovaBio serve como um sistema de comercialização de emissões de escopo reduzido: distribuidores de combustíveis devem substituir combustíveis fósseis por biocombustíveis em proporções predeterminadas, gerando créditos de descarbonização comercializáveis desde junho de 2020 (ICAP, 2022).

Na medida em que políticas de precificação de emissões (impostos ou sistemas de comercialização) são estabelecidas ao redor do mundo, torna-se possível avaliar a eficiência dessas medidas retrospectivamente. Em uma análise que engloba 35 países e o período de 1990 a 2016, Rafaty et al. (2020) encontram que a elasticidade-preço das emissões é significativamente menor do que comumente presume-se, e que políticas de precificação causaram uma redução de apenas 1% a 2,5% na taxa de crescimento de emissões. Os autores destacam que investimentos passados em infraestrutura ou em tecnologias intensas em emissões e de longa durabilidade dificultam a transição a formas mais sustentáveis de produção, revelando o aspecto evolucionário e *path dependent* da descarbonização. Como a contenção das mudanças climáticas a qualquer nível requer que emissões antrópicas de gases de efeito estufa sejam zeradas (e não apenas cresçam a taxas reduzidas), acentua-se que impostos sobre emissões devem ser entendidos como apenas um elemento no arsenal de políticas estabilizadoras do clima (Tvinnerem e Mehling, 2018).

3.3 Impactos distributivos da precificação de emissões

Mesmo atingindo-se a meta otimista de limitar o aquecimento global a 1,5°C em relação à temperatura global média pré-industrial, países enfrentariam riscos significativamente maiores do que enfrentam presentemente em termos de exposição a pobreza extrema, insegurança alimentar e hídrica, efeitos adversos de saúde e disputas violentas por recursos (IPCC, 2022a). Assim sendo, diversos pesquisadores ocuparam-se com a questão das interações entre desigualdade, pobreza, e políticas mitigadoras das mudanças climáticas. No caso de impostos sobre emissões, muita atenção é dada a quais

grupos pagariam pelo imposto, em última instância (por exemplo, Metcalf, 1999; Callan et al., 2009; Grainger e Kolstad, 2010; Cronin et al., 2019).

Percepções sobre os impactos que impostos sobre emissões exercem sobre indivíduos mais pobres também são um componente significativo da oposição popular a tais medidas (Carattini et al., 2018). O impacto de um imposto sobre emissões sobre o preço de combustíveis fósseis na França e a ausência de medidas que compensassem os mais pobres por essa oneração foram estopins para as manifestações em massa do movimento dos “coletes amarelos” (Douenne e Fabre, 2022) – que ilustraram a necessidade de alinhar os objetivos de desenvolvimento sustentável e de justiça social no refrão “fim do mundo, fim do mês – uma só luta”.

Magalhães e Domingues (2013) apontam quatro principais determinantes dos impactos distributivos de um imposto sobre emissões: i) diferenças nos padrões de consumos de diferentes grupos de renda; ii) a incidência do imposto – isto é, em que medida o valor do imposto impacta os rendimentos das empresas ou é repassado aos consumidores por meio de aumentos de preços; iii) a distribuição dos benefícios relacionados a mitigação das emissões; e iv) a maneira em que as receitas do imposto são empregadas – potencialmente, em medidas compensatórias do impacto do imposto sobre os mais pobres. Pode-se acrescentar ainda a cobertura do imposto – posto que diferentes grupos de renda gastam proporções diferentes de suas rendas em cada categoria de bens, impostos que incidam apenas sobre o transporte aéreo ou apenas sobre a cesta básica de alimentos, por exemplo, resultariam em impactos distributivos distintos.

Múltiplos estudos confirmam o entendimento de que impostos sobre emissões são regressivos – isto é, a taxa sobre os indivíduos mais pobres representa uma parcela maior de suas rendas do que a taxa sobre os mais ricos. Uma mesma causa para a regressividade é identificada em múltiplos países: indivíduos mais pobres gastam parcelas maiores de sua renda em bens energéticos (combustíveis e energia elétrica), que estão associados a um nível elevado de emissões por unidade monetária consumida, e, portanto, seriam taxados mais intensamente. Esse mesmo padrão é identificado nos Estados Unidos (Grainger e Kolstad, 2010; Fremstad e Paul, 2019), Dinamarca (Wier et al., 2005), Reino Unido (Feng et al., 2010) e Irlanda (Callan et al., 2009). Nota-se que os países nessa lista se encontram no hemisfério norte, e neles é comum o consumo de combustíveis fósseis para o aquecimento domiciliar durante o inverno. Nos países em desenvolvimento, grupos de menor renda gastam proporcionalmente mais em energia elétrica, mas o consumo de combustíveis fósseis é geralmente concentrado entre os mais ricos, sugerindo que impostos

de carbono podem ser menos regressivos do que nos países desenvolvidos (Wang et al., 2016).

Excepcionalmente, Cronin et al. (2019) encontram efeitos distributivos progressivos de um imposto sobre emissões de US\$25/mtCO₂ nos Estados Unidos, em função da indexação de programas de transferência estadunidenses ao preço de commodities. Ademais, ao incluir em seus modelos a redução de custos com saúde decorrentes da redução de emissões de CO₂e, e das subseqüentes melhorias locais da qualidade do ar, Li (2006) identifica resultados progressivos de um imposto de carbono hipotético para a Tailândia, ressaltando que, no longo-prazo, os efeitos positivos da mitigação das mudanças climáticas induzidos por impostos sobre emissões podem ser significativamente maiores do que os aumentos de custos no curto-prazo.

O efeito regressivo de um imposto sobre emissões foi identificado em algumas simulações para a economia brasileira. Magalhães e Domingues (2013) empregam um modelo com 10 famílias representativas dos decis da distribuição da renda domiciliar brasileira (estimadas com base na Pesquisa de Orçamentos Familiares 2008-2009), cujas reduções no consumo decorrentes do imposto são calculadas com consideração à capacidade de empresas de repassar o tributo aos consumidores e à capacidade das diferentes famílias de ajustarem seu consumo. Os resultados indicam que uma trajetória de impostos consistente com uma redução de 5% nas emissões até 2030 reduziria mais intensamente o consumo do segundo decil (em 2,32%) e menos intensamente o consumo do nono decil (em 1,71%), resultando em um aumento de 0,5% no coeficiente de Gini. O padrão regressivo resulta da menor participação dos serviços (um setor pouco intensivo em emissões) e maior participação de produtos agropecuários e alimentícios (intensos em emissões) no consumo dos mais pobres.

Também empregando um modelo com 10 domicílios representativos baseados nos decis de renda da POF 2008-2009, da Silva Freitas et al. (2016) simulam os impactos distributivos de um imposto de R\$50/tCO₂e. A variação no bem-estar é medida em termos da variação de renda necessária para compensar os indivíduos pela perda no poder de compra decorrente do imposto. A variação no bem-estar do decil mais pobre, proporcionalmente à renda deste decil, é de -3,09%, comparado a -1,18% para o decil mais rico. Novamente, diferenças em padrões de consumo explicam a regressividade do imposto, especialmente por meio da maior oneração de alimentos e transportes e de menores impactos sobre o setor de serviços.

Os impostos simulados por Moz-Christofoletti e Pereda (2021), de USD40/tCO₂e e USD80/tCO₂e e de incidência apenas sobre o uso de energia por domicílios e empresas, também impõem maiores perdas de bem-estar a famílias mais pobres. A variação no bem-estar é medida sob o conceito de “variação equivalente”, que expressa a quantidade máxima que indivíduos estariam dispostos a pagar para evitar o aumento de preços causado pelo imposto. Enquanto os domicílios de renda elevada são responsáveis por maior parte da redução de emissões, a variação equivalente para estes representa apenas 0,06% de sua renda, em comparação a 0,10% entre as famílias mais pobres. Essa discrepância é explicada pela menor elasticidade-preço do consumo de famílias pobres em bens intensivos em emissões, e pelo efeito indireto do imposto no preço de bens alimentícios e relativos à moradia (que compõem parte maior do orçamento dos decis mais baixos).

Por fim, ressalta-se que diversos dos estudos citados no presente capítulo propõem e simulam o direcionamento das receitas arrecadadas pelo imposto a medidas voltadas a compensar as famílias pelas perdas de bem-estar (especialmente no que diz respeito aos domicílios mais pobres). Fremstad e Paul (2019) analisam, para os Estados Unidos, três alternativas para o uso integral das receitas: financiar uma redução proporcional no imposto de renda sobre salários, reduzir contribuições ao sistema de seguridade social (que presentemente ocorrem por meio de deduções na folha de pagamentos das empresas, analogamente às coletas do Instituto Nacional do Seguro Social, o INSS), e um “dividendo de carbono” – isto é, uma devolução integral das receitas à toda a população, em parcelas equivalentes. A análise identifica que as duas primeiras medidas não seriam capazes de compensar o efeito regressivo do imposto sobre emissões, e que resultariam em alta variabilidade de impactos dentro de cada decil, posto que indivíduos no mesmo grupo de renda podem diferir significativamente em termos de situação empregatícia, e, portanto, nos benefícios auferidos de um corte de impostos sobre salários. Já a implementação conjunta do imposto sobre emissões e do dividendo (sistema chamado de *carbon fee-and-dividend*, ou taxa e dividendo de carbono, em tradução do livre) beneficia 84% da metade mais pobre da população. Como o dividendo compensa todos os indivíduos equivalentemente, em termos absolutos, os impactos redistributivos horizontais (isto é, dentro de cada decil) são menores em relação aos cortes em impostos.

Similarmente, Cronin et al. (2019) comparam para os Estados Unidos um dividendo de carbono, um aumento no valor das transferências de programas de distribuição pré-existentes, e uma redução em impostos sobre salários. Enquanto as três alternativas são consideradas progressivas em termos do impacto médio por decil de renda, a variabilidade

dentro dos resultados aumenta com cada uma das medidas compensatórias, e muitos dos indivíduos em cada decil enfrentam uma redução líquida na capacidade de consumo. Ademais, os resultados indicam que os 20% mais pobres da distribuição de renda poderiam ser compensados integralmente com o uso de apenas 11% das receitas totais.

No Brasil, Magalhães e Domingues (2013) simulam um cenário em que apenas a arrecadação sobre o uso de energia das famílias (apenas 5% da arrecadação total) é devolvida à população, por meio de subsídios ao consumo. Apesar da política reduzir os impactos macroeconômicos do imposto, os decis mais pobres continuam sendo os mais afetados. Moz-Christofolletti e Pereda (2021) apontam que a recente substituição do Bolsa Família pelo programa Renda Cidadã tem sido alvo de críticas pela falta de identificação de uma fonte de receitas que sustente a escala expandida da nova política, e que um imposto sobre emissões poderia ser direcionado a esse programa de transferência de rendas preexistente.

4 METODOLOGIA

O presente capítulo consistirá na apresentação dos dados e da metodologia utilizada no presente trabalho, a fim de possibilitar a reprodução da análise. Na seção 4.1 apresenta-se a matriz de insumo-produto empregada, os dados de emissões divulgados pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI, 2020), e a Pesquisa de Orçamentos Familiares 2017-2018 (IBGE, 2021). Na seção 4.2, apresenta-se a formulação matemática das simulações realizadas.

4.1 Bases de Dados

Dada a indisponibilidade de uma matriz de insumo-produto oficial completa para o ano de 2018, este estudo emprega a matriz de insumo-produto disponibilizada virtualmente pelo Núcleo de Economia Regional e Urbana da Universidade de São Paulo (NEREUS, 2020), que é estimada com base na metodologia proposta por Guilhoto e Sesso Filho, (2005). Os dados assim estimados demonstraram-se altamente correlacionados com os valores divulgados oficialmente pelo IBGE (Guilhoto e Sesso Filho, 2010), e são amplamente utilizados - o artigo que apresenta a metodologia é um dos mais citados no

campo da economia entre 1990 e 2010 (Faria, 2010). No entanto, as Tabelas de Recursos e Usos do IBGE, que servem de base para as estimativas, apresentam vieses de estimação que podem ser mantidos ao compor-se as matrizes de insumo-produto de Guilhoto e Sesso Filho. Metodologias alternativas para a estimação de matrizes de insumo-produto são propostas por Grijó e Bêni (2006), Alves-Passoni e Freitas (2010) e Morrone (2015).

A matriz de insumo-produto apresenta, em preços básicos a valores correntes de 2018, as transações intersetoriais, a demanda final, e os componentes do valor agregado de 68 setores em 2018. Atribuiu-se um número identificador de 1 a 68 a cada um dos setores, de modo a facilitar a referência a setores específicos ao longo do texto. O quadro 1, abaixo, representa a estrutura dos dados da matriz de insumo-produto, enquanto os setores, com seus nomes, números identificadores, demandas intermediárias, finais e totais estão listados no apêndice 1.

Quadro 1: Estrutura da matriz de insumo-produto

	Insumos aos setores				Produto intermediário	Demanda final	Produto total	
Produto dos setores	1	2	3	n				
1	Z_{11}	Z_{12}	Z_{13}	Z_{1n}	o_1	f_1	x_1	
2	Z_{21}	Z_{22}	Z_{23}	...	Z_{2n}	o_2	f_2	x_2
3	Z_{31}	Z_{32}	Z_{33}		Z_{3n}	o_3	f_3	x_3
		...						
n	Z_{n1}	Z_{n2}	Z_{n3}		Z_{nn}	o_n	f_n	x_n
Consumo intermediário	q_1	q_2	q_3		q_n			
Valor adicionado	v_1	v_2	v_3		v_n			
Output total	x_1	x_2	x_3		x_n			

Fonte: Reprodução de Mathews et al., 2014.

Os valores Z_{ij} representam o fornecimento de insumos do setor i ao setor j , e agregados constituem a matriz de transações intersetoriais Z . A soma das linhas da matriz Z resulta no vetor do produto intermediário o cujo i -ésimo elemento corresponde ao produto do setor i destinado a outros produtores de bens e serviços. Similarmente, o vetor do consumo intermediário q corresponde à soma das colunas da matriz Z , ou às quantias demandadas por cada setor e empregadas na sua própria produção. Cada elemento de f

indica quanto um setor produziu para vender diretamente aos consumidores, investidores e para exportação. A soma do produto intermediário o e da demanda final f resulta no vetor da produção bruta setorial, x .

A soma do consumo intermediário q e do o valor adicionado v também resulta no vetor da produção bruta x . A matriz disponibilizada pelo NEREUS (2020) elenca os elementos do valor agregado, como impostos, subsídios, remuneração do trabalho, contribuições sociais efetivas, excedente operacional bruto e o rendimento misto bruto. Para compor o vetor v somou-se a essas figuras a importação de produtos de cada setor, de modo a garantir a igualdade $x = o + f = q + v$, importante à metodologia descrita na próxima seção (4.2).

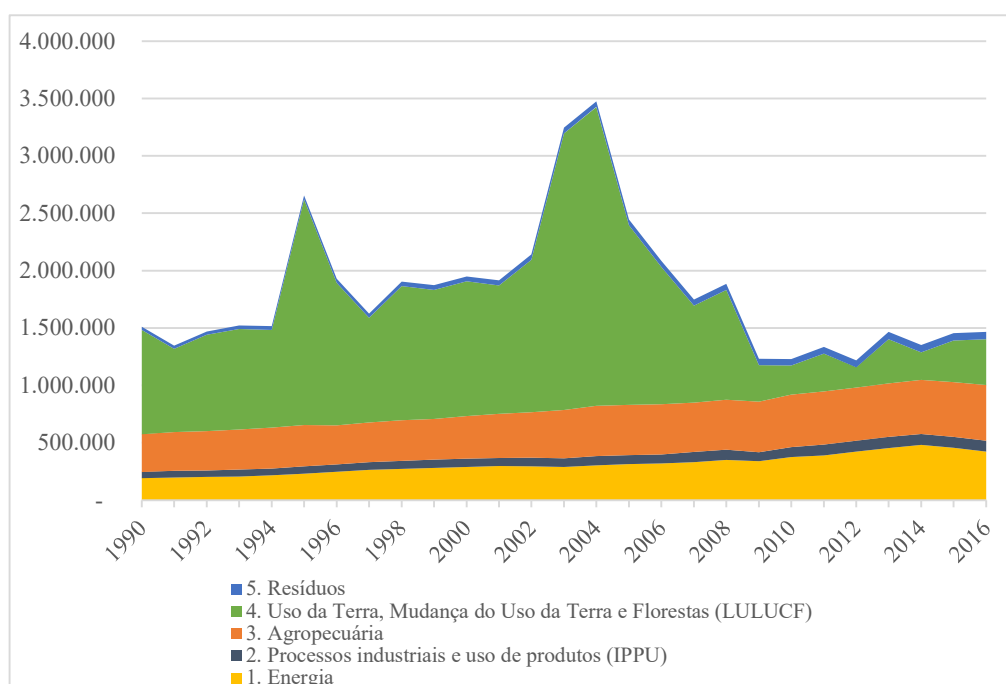
Os dados acerca das emissões foram tomados da quinta edição do relatório de Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa, do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI, 2020). Os relatórios são produzidos no âmbito da Política Nacional sobre Mudança do Clima, em concordância com a Lei Federal Nº 12.187/2009 (BRASIL, 2009) e com as diretrizes metodológicas descritas na Decisão 17/CP.8 da Convenção do Clima das Nações Unidas (UNFCCC, 2002).

O presente estudo emprega as estimativas de emissões para 2016, o ano mais recente para o qual se tem estimativas, e o mais próximo aos períodos de referência das outras bases de dados empregadas, a Pesquisa de Orçamentos Familiares 2017-2018 (IBGE, 2021) e a matriz de insumo-produto estimada para 2018 (NEREUS, 2020). A comparação entre os dados de diferentes anos requer uma presunção de estabilidade da estrutura produtiva no curto-prazo, uma hipótese bastante utilizada na literatura de insumo-produto. Os dados de emissões são apresentados em termos de carbono equivalente, empregando os GWP100 divulgados no *Second Assessment Report* (IPCC, 1995), sendo que o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) correspondem a 99,4% das emissões totais.

Os dados utilizados são os da abordagem setorial, ou *bottom-up*. Nesse caso, as emissões são estimadas a partir de dados de atividades econômicas ou transformações no uso da terra e as respectivas intensidades de emissões e outros parâmetros como a utilização de determinados recursos ou processos industriais (alternativamente, a metodologia *top-down* estima as emissões totais a partir de observações diretas da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera). As emissões de diferentes subsetores são agrupadas em cinco setores, dos quais quatro foram considerados neste estudo: energia, processos industriais e uso de produtos, agropecuária e resíduos.

Replicando a decisão observada em Magalhães e Domingues (2013) e em da Silva Freitas et al. (2016), não se incluiu as emissões do quinto setor - uso da terra, mudança do uso da terra e florestas (*land use, land use change and forestry* – LULUCF). Emissões desse tipo seguem uma dinâmica própria, e o relatório do MCTI os estima com base em fenômenos como queimadas de desmatamento, e não atividades-fim comparáveis aos setores da matriz de insumo-produto (MCTI, 2020). No entanto, é importante ressaltar que as emissões de LULUCF correspondem a 27,08% das emissões totais de 2016, sendo o Brasil o terceiro maior emissor nessa categoria em 2018, atrás apenas da Indonésia e da República Democrática do Congo (Banco Mundial, 2022). Abaixo, reproduz-se a série histórica de emissões de gases de efeito estufa disponibilizada pelo MCTI.

Figura 2: Emissões brasileiras de gases de efeito estufa por setor, em CO₂e



Fonte: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (2020).

Por fim, este estudo faz uso dos microdados da Pesquisa de Orçamentos Familiares (POF) 2017-2018, cuja versão mais recente foi publicada em 2021 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021). Os dados detalham o dispêndio de 178.431 indivíduos de 57.920 domicílios, divisíveis ainda em 58.039 unidades de consumo, e foram coletados no período de julho de 2017 até agosto de 2018.

Como os períodos de coleta de dados acerca de diferentes produtos nem sempre coincidem ou compreendem o mesmo número de dias, faz-se necessário deflacionar e

anualizar os dados. O IBGE fornece os valores das aquisições deflacionados para que correspondam a reais de 15 de janeiro de 2018, independentemente de qual momento entre julho de 2017 e agosto de 2018 as compras tenham sido registradas. Fatores de anualização são disponibilizados de modo a extrapolar os valores para que correspondam às aquisições de um ano – se um dado de dispêndio corresponde a um mês, por exemplo, o fator de anualização é igual a doze, e deve ser multiplicado pelo valor da compra. As despesas são categorizadas por unidade de consumo e produto, sendo que os produtos são agregados em categorias não-nomeadas chamadas “quadros”.

O presente estudo busca quantificar as emissões (estimadas pelo MCTI) associadas a diferentes setores da matriz de insumo-produto e produtos da Pesquisa de Orçamentos Familiares. No entanto, as três bases de dados agregam produtos e atividades econômicas de acordo com taxonomias diferentes, sem correspondências oficiais completas. Para garantir a comparabilidade das figuras, foi necessário elaborar, primeiramente, uma tabela de correspondências entre 54 subsetores do Inventário de Emissões e a matriz de insumo-produto (apêndice B) e, posteriormente, entre os segmentos da MIP e os quadros da POF (apêndice C). Para a primeira destas, baseou-se na classificação em da Silva Freitas et al. (2016), exceto quando as versões dos dados empregadas naquele estudo seguem taxonomias setoriais diferentes àquelas das estimativas de emissões de 2016 e da MIP de 2018.

4.2 Metodologia

Nessa seção apresentar-se-á como realizou-se a avaliação de ciclo de vida via análise de insumo-produto. A análise foi conduzida por meio da linguagem de programação estatística R. O *script* é de elaboração do autor, exceto pela leitura dos microdados do consumo, que foi realizada com o código disponibilizado pelo IBGE em anexo à POF 2017-2018 (IBGE, 2021), e alguns trechos tomados do anexo de Vale e Perobelli (2020).

Primeiramente, deve-se partir da compatibilização feita entre a matriz de insumo-produto e as estimativas de emissões, e atribuir um único nível de emissões para cada setor MIP. Seguindo a recomendação de da Silva Freitas et al. (2016), nos casos em que múltiplos setores MIP i correspondem a um único subsetor m das estimativas de emissões, as emissões do setor m foram atribuídas aos múltiplos setores MIP proporcionalmente ao produto total de cada um. Para dado par de setores i e m , calcula-se:

$$\hat{E}_{im} = e_m \left(\frac{x_i \theta_{im}}{\sum_{i=1}^{68} x_i \theta_{im}} \right) \quad 1)$$

Onde são:

\hat{E}_{im} – o nível de emissões associado ao setor MIP i em função de sua participação no setor de emissões m ;

x_i – produto total do i -ésimo setor MIP;

θ_{im} – variável binária, igual a um se os setor MIP i e o setor de emissões m estão compatibilizados no quadro do apêndice B; igual a zero caso o contrário;

e_m - o nível total de emissões do subsetor de emissões m , tomado diretamente dos dados do MCTI (2020);

O valor de \hat{E}_{im} , portanto, é igual a zero quando i e m são setores da MIP e das emissões sem correspondência (por exemplo, setor número 48 da MIP – Alimentação, e o setor de emissões 1.A.3 – Transporte). Caso exista correspondência, \hat{E}_{im} é uma parcela de e_m proporcional à porcentagem do produto do setor i dentre o produto agregado de todos setores MIP associados ao setor m . Por fim, existem os casos em que um setor MIP i corresponde a múltiplos setores de emissões m . O total de emissões associado ao setor da MIP i , \hat{e}_i , é dado pelo somatório das emissões que o setor i recebe de diferentes setores de emissões m .

$$\hat{e}_i = \sum_{m=1}^n \hat{E}_{im} \quad 2)$$

Essa metodologia garante que o somatório dos \hat{e}_i seja igual ao somatório dos e_m , as emissões de todos os subsetores das estimativas do MCTI incluídos nesta análise. Posteriormente, calcula-se a matriz de coeficientes técnicos, cujas colunas representam o valor de insumos requeridos por dado setor para produzir um real de produto:

$$A = Zx^{-1} \quad 3)$$

Com Z representando a matriz de insumos intermediários, e X o vetor do produto total de cada setor. Com a matriz de coeficientes técnicos, pode-se representar o vetor X como função da demanda final f pré-multiplicada pela matriz inversa de Leontief, onde I é a matriz identidade 68×68 , da seguinte maneira:

$$x = (I - A)^{-1} f \quad 4)$$

A matriz inversa de Leontief, $(I-A)^{-1}$, será doravante representada por L . Conforme Miller e Blair (2009), L representa o efeito multiplicador total de mudanças na demanda final: cada aumento requer a produção de mais bens intermediários, que, por sua vez, também induzem aumentos na produção. Esse processo ocorre recursivamente, cada vez com um efeito menor, de modo que a soma dos efeitos resulta em um valor finito que corresponde à variação acumulada no produto total após a mudança da demanda final.

Em seguida, calcula-se o vetor de coeficientes de emissão r , de dimensão 68×1 , em que cada elemento corresponde a \hat{e}_i / x_i - indicando as toneladas de CO_{2e} emitidas por unidade monetária de produção do setor da MIP. O vetor de intensidade de emissões ρ' (onde a apóstrofe representa a transposição do vetor) é calculado como:

$$\rho' = r' L \quad 5)$$

O vetor ρ também captura o efeito recursivo de variações na demanda final, desta vez sobre as emissões (da Silva Freitas et al., 2016). Nota-se que as emissões totais, \hat{e} , também podem ser calculadas pré-multiplicando a equação 4 pelo coeficiente de emissões r' , ou pós-multiplicando a equação 5 pela demanda final f , em ambos os casos igualando $r' L f$.

Em seguida, aplicar-se-á uma taxa de US\$40 por tonelada de emissões de CO_{2e} associada ao produto de cada setor. Utiliza-se aqui o modelo de preços de Leontief (1966), como descrito em Miller e Blair (2009), e empregado para fim similar em da Silva Freitas et al. (2016). Estrutura-se um vetor v de todos os componentes do produto, exclusas as compras intersetoriais (relevantemente, os impostos fazem parte do vetor v). O utilizaremos para representar o valor adicionado. A produção em unidades monetárias pode ser expressa, portanto, pela adição do total de insumos requerido por cada setor (obtido pela pré-

multiplicação da matriz Z pelo vetor unitário transposto i') mais o valor adicionado aos insumos por cada setor:

$$x' = i'Z + v' \quad (6)$$

Resolvendo a equação 3 ($A = Zx^{-1}$) para Z , demonstra-se que $Z = Ax$. A substituição na equação 6 resulta na seguinte expressão:

$$x' = iAx + v \quad (7)$$

A pós-multiplicação da equação 7 por x^{-1} resulta em:

$$i' = i'A + v' x^{-1} \quad (8)$$

Chamaremos $v'x^{-1}$ de v'_c , o valor agregado por unidade monetária do produto setorial. Trataremos o vetor do lado esquerdo da equação 8 como um índice de preços $p^{0'}$, unitário no momento anterior à aplicação do imposto. Pode-se reescrever a equação como segue:

$$p^{0'} = v'_c(I - A)^{-1} = v'_cL \quad (9)$$

Transpondo a equação 9, obtém-se:

$$p^0 = L'v_c \quad (10)$$

O imposto sobre emissões de gases de efeito estufa será aplicado a partir dessa formulação do modelo de preços de Leontief. Define-se φ , a taxa por tonelada de CO_2e . Em conformidade com Moz-Christofoletti e Pereda (2021) foi escolhido o valor de US\$40, que corresponde a R\$146,14 ao empregar-se a taxa de câmbio (compra) média entre as duas moedas em 2018 (IPEA, 2022). De acordo com estimativas da Comissão de Alto Nível

sobre Preços do Carbono (Stiglitz et al., 2017), este é o valor mínimo compatível com a meta definida no Acordo de Paris (UNFCCC, 2015) para conter o aumento da temperatura média global a significativamente menos de 2°C em relação a níveis pré-industriais. Define-se o vetor da arrecadação do imposto T' como:

$$T' = \varphi \rho' x \quad (11)$$

Dado $\tau = T'x^{-1}$, o vetor de preços após a aplicação do imposto p^1 é descrito por:

$$p^1 = L'(v_c + \tau) \quad (12)$$

A equação 12 representa o aumento do componente de impostos no vetor v_c (o valor adicionado por real de produção). Como trabalha-se sob a hipótese de que o imposto é coletado em cada etapa da produção, e que os produtores repassam os aumentos nos custos integralmente à jusante, o aumento do índice de preços de dado setor depende da tributação sobre seus fornecedores de insumos, sobre os fornecedores dos fornecedores, e assim sucessivamente. O termo L da equação 12 representa esse efeito.

Ademais, se substituirmos τ na equação 12 pelo termo equivalente $\varphi \rho'$, resultando em $p^1 = L'(v_c + \varphi \rho')$, percebe-se que a oneração de cada setor é diretamente relacionada com a taxa por tCO₂e determinada pelo governo φ e com ρ' , a intensidade de emissões total. Acentua-se que os setores com maiores níveis de emissões associadas, \hat{e}_i , não são necessariamente os setores de maior intensidade emissões. Ademais, como a intensidade de emissões inclui emissões à montante na cadeia de valor de um produto, um setor de nível de emissões \hat{e}_i baixo pode ter alta intensidade de emissões total e alta variação no índice de preços se seus fornecedores de insumos têm elevados coeficiente de emissões $r_i = \hat{e}_i / x_i$.

Tendo estabelecido o choque de impostos e seus desdobramentos sobre o nível de preços, passa-se a quantificar seus impactos. No modelo de preços de Leontief, as quantidades se ajustam aos preços. Como o valor monetário da produção é fixo, pressupõe-se:

$$x^1 p^1 = x^0 p^0 \quad (13)$$

Sendo x^0 o vetor da produção anterior à aplicação do imposto sobre, até aqui chamado de x , e x^1 é a produção calculada após o imposto, obtida ao isolar-se o termo na equação 13 (e removendo o termo p_i^0 , que é igual a um para todos i):

$$x_i^1 = \frac{x_i^0}{p_i^1} \quad 14)$$

Como todos os setores apresentam nível de emissões não-negativo, p_i^1 é maior ou igual a um para todos os setores i . Isso significa que o nível de preços agregado é maior após o imposto, e que a produção agregada reduz-se em função do imposto. Ademais, como o modelo de preços de Leontief presume funções de produção lineares, todos os insumos são reduzidos na mesma proporção que o produto. Assim sendo, a variação no produto do setor i , $\Delta x_i = \frac{x_i^1 - x_i^0}{x_i^0}$, é igual à variação em suas emissões, em seu número de ocupações e massa salarial, e em suas compras de insumos expressas na matriz Z .

A partir deste ponto, esta seção tratará do componente distributivo da análise realizada. Antes da aplicação do imposto sobre o dispêndio detalhado na Pesquisa de Orçamentos Familiares, faz-se necessário montar a distribuição de renda. Enquanto a POF fornece dados da renda disponível per-capita (IBGE, 2020), alguns estudos recentes que mensuram os impactos distributivos de um imposto sobre emissões empregam o dispêndio dos domicílios como proxy para o nível da renda domiciliar no longo prazo (Callan et al., 2009; Fremstad e Paul, 2018; Cronin et al., 2019). A escolha reflete a percepção de que os indivíduos podem sofrer flutuações de renda ano-a-ano que igualariam, por exemplo, pessoas em situação de pobreza prolongada com indivíduos que estão em educação em determinado ano e prestes a receber rendas elevadas. Contornando esse problema, Poterba (1989) sugere que análises do impacto distributivo de impostos empreguem o dispêndio como proxy para a renda, posto que, de acordo com a hipótese da renda permanente (Friedman, 2008), indivíduos suavizam seu dispêndio ano-a-ano de modo a garantir solvência enquanto minimizam as flutuações no nível de bem-estar material. Mesmo sendo uma proxy mais adequada para a renda permanente (ou renda de longo-prazo) do que a renda per capita, o dispêndio domiciliar também registra flutuações extemporâneas, como as diferenças causadas pela aquisição de bens duráveis em dado ano por uma família e em outro ano por outra família. Ademais, a capacidade de suavizar o consumo é reduzida entre

famílias mais pobres em função de restrições sobre o crédito, o que pode resultar em vieses de estimação (Lucinda e Favaro, 2018).

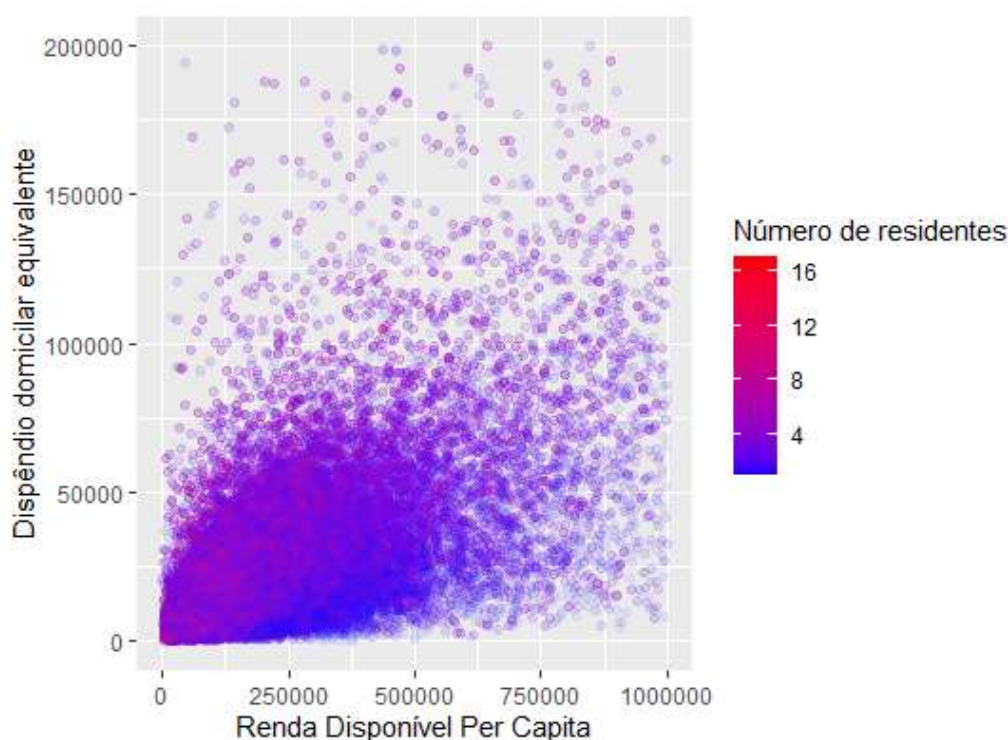
Dessa maneira, os domicílios são organizados do menor dispêndio ao maior. Para obter-se uma distribuição pessoal da renda, emprega-se o dispêndio domiciliar equivalente dos indivíduos I_k , como nas análises de Ribas (2005) e Fremstad e Paul (2019). Definindo h como o índice identificador dos domicílios, k como o identificador dos indivíduos, c_{qh} o consumo do domicílio h na categoria da POF q , e o número de residentes no domicílio como n_h , calcula-se:

$$I_k = \frac{\sum_{i=1}^{51}(c_{qh})}{\sqrt{n_h}}; k \in \text{domicílio } h \quad 15)$$

Diferentemente do dispêndio domiciliar per capita, o dispêndio domiciliar equivalente divide o dispêndio domiciliar pela raiz quadrada do número de residentes n_h . Essa escolha reflete a maneira em que os domicílios não precisam aumentar suas despesas linearmente com a adição de mais residentes para manter os níveis de bem-estar individuais, pois existem economias de escala familiares (Sette e Coelho, 2020). O dispêndio domiciliar equivalente presume, por exemplo, que domicílios com quatro residentes precisam apenas do dobro de espaço de moradia do que domicílios com apenas um residente (Fremstad e Paul, 2019). Vale ressaltar que escalas que atribuem pesos reduzidos a cada residente adicional (como a escala de raiz quadrada empregada na equação 15) tendem a resultar em menores estimativas para a pobreza entre crianças, e estimativas relativamente maiores para a pobreza entre idosos (que tendem a viver em domicílios menores). A escolha de escala, portanto, é baseada em julgamentos técnicos, mas também em julgamentos de valor (OECD, 2011).

Por fim, destaca-se que o dispêndio domiciliar equivalente, doravante também chamado de renda permanente, apresenta correlação de 0,60 com a renda disponível per capita anual diretamente tomada da Pesquisa de Orçamentos Familiares. Na figura 3, abaixo, apresenta-se a distribuição conjunta das duas variáveis, com o número de residentes no domicílio representado na escala de cores. Evidencia-se como para dado nível de renda disponível per capita, domicílios com maior número de habitantes tendem a apresentar maior dispêndio domiciliar equivalente, em função da escala de raiz quadrada citada acima.

Figura 3: Distribuição conjunta da renda disponível per capita e do dispêndio domiciliar equivalente.



Fonte: elaboração do autor com base na Pesquisa de Orçamentos Familiares 2017-2018 (IBGE, 2021)

Para simular os impactos do imposto sobre a distribuição pessoal da renda (empregando o dispêndio domiciliar equivalente como proxy para a renda permanente) deve-se calcular o índice de preços, o nível de emissões e a intensidade de emissões associadas às categorias de produtos (quadros, na nomenclatura do IBGE) da Pesquisa de Orçamentos Familiares 2017-2018 (IBGE, 2021). Esses valores foram calculados de forma análoga à atribuição de emissões das estimativas do MCTI aos setores da matriz de insumo-produto, processo descrito na equação 1. Os setores da matriz de insumo-produto foram compatibilizados com os quadros da POF na maneira descrita no apêndice C. A equação 16, abaixo, descreve como os índices de preços dos setores MIP i (p_i^1) são convertidos em índices de preços para os quadros da POF q (p_q^1). A conversão dos níveis de emissões e_i em níveis de emissões dos quadros e_q , ou das intensidades de emissões ρ_i em intensidades de emissões dos quadros ρ_q pode ser realizada ao substituir-se, no lado direito equação 16, p_i^1 por e_i ou ρ_i , respectivamente.

$$p_q^1 = \sum_i^n \left(\frac{p_i^1 x_i}{\sum_i^n x_i} \right); \forall i \in \Omega_q \quad 16)$$

Onde Ω_q é o conjunto composto por todos os i compatibilizados com o quadro q . Por exemplo, $\Omega_7 = \{19\text{- Refino de petróleo e coquearias, } 20\text{- Fabricação de biocombustíveis}\}$, como observável no apêndice C. Resumidamente, dentre todos i associados ao quadro q , toma-se a média dos p_i^1 s ponderada pelo produto de cada setor da matriz de insumo-produto.

Assim como no caso do produto agregado, os indivíduos não são capazes de manter seu nível de bem-estar material após o imposto e subsequente aumento nos índices de preços. Para avaliar-se o impacto do imposto sobre os indivíduos, calcula-se a variação de bem-estar (Δu_k) em termos de renda compensatória. Essa métrica equivale ao valor monetário necessário para compensar exatamente os indivíduos pelo poder de compra perdido, permitindo-os manter a quantidade consumida mesmo após o aumento de preços (da Silva Freitas et al., 2016). Definindo c_{qk} como o dispêndio do indivíduo k na categoria de produtos q , emprega-se a seguinte equação:

$$\Delta u_k = \frac{\sum_{q=1}^{51} (c_{qk} p_q^0) - \sum_{q=1}^{51} (c_{qk} p_q^1)}{I_k} \quad (17)$$

Por fim, simular-se-á uma política compensatória de eventuais efeitos regressivos do imposto chamada de dividendo de carbono, em que toda a arrecadação do imposto é devolvida à população em parcelas equivalentes (Fremstad e Paul, 2019, Cronin et al., 2019). Para obter o montante a ser redistribuído, calcula-se a arrecadação sobre os indivíduos na amostra da Pesquisa de Orçamentos Familiares T_{POF} . Como todo o imposto é repassado aos consumidores, T_{POF} pode ser calculada como a variação total no valor monetário do dispêndio após a aplicação do imposto e do novo nível de preços. Sendo c_{qh} o consumo do indivíduo h na categoria de produtos q , calcula-se:

$$T_{POF} = \sum_h \left(\sum_q c_{qh} p_q^1 - \sum_q c_{qh} p_q^0 \right) \quad (18)$$

O valor do dividendo é calculado simplesmente pela divisão de T_{POF} pelo número de indivíduos na amostra. A variação do bem-estar após a aplicação conjunta do imposto sobre emissões e do dividendo de carbono é obtida ao adicionar-se o valor do dividendo no numerador da equação 17. Para sumarizar os resultados, os indivíduos foram agrupados em

centis – isto é, cem grupos de tamanho equivalente em que cada membro do centil n é mais pobre (em termos de renda permanente) do que qualquer indivíduo no centil $n+1$.

Resumidamente, esta análise é um estudo de estática comparativa, em que são observados os impactos macroeconômicos, mesoeconômicos, e microeconômicos de um imposto sobre emissões. O imposto baseia-se na quantificação das emissões médias de gases de efeito estufa por setor, e é coletado em cada estágio da produção. Presume-se que cada produtor de bens intermediários e finais repassa o aumento de custos integralmente ao elo seguinte de sua cadeia de valor, processo que culmina em um aumento de preços ao consumidor final. A resposta comportamental ao aumento de preços ocorre por meio de redução nas quantidades consumidas, sendo mantido o valor monetário da demanda final e total.

Como presume-se que as funções de produção dos setores são lineares – isto é, empregam todos seus insumos em proporções constantes independentemente do nível de produção - cada setor reduz seu produto na mesma proporção com a qual reduz seu nível de emissões, suas compras de outros setores e sua massa salarial e número de ocupações. No entanto, essas igualdades não se verificam para a economia em agregado, posto que o tributo reduz a produção de diferentes setores em diferentes medidas. Como a tributação e a redução no produto de um setor são proporcionais à sua intensidade de emissões, espera-se que as emissões sejam reduzidas mais intensamente que o produto.

Posteriormente, os aumentos de preços dos setores da matriz de insumo-produto são convertidos em onerações nas diferentes categorias de produtos da Pesquisa de Orçamentos Familiares. Calcula-se como os diferentes segmentos da distribuição de renda contribuem para a emissão de gases de efeito estufa no Brasil, e como esses grupos seriam impactados pelo imposto sobre emissões. Por fim, redistribui-se os recursos arrecadados sobre os indivíduos da amostra da POF, simulando uma política de dividendo de carbono.

A metodologia proposta é limitada em algumas maneiras. Primeiramente, não se pode estimar efeitos dinâmicos como a atualização de funções de produção para reduzir a intensidade de emissões dos bens e serviços. Ademais, não se distingue entre os diferentes produtores de determinado setor, que podem variar significativamente em termos de função de produção e nível de emissões. Para minimizar esse problema, buscou-se usar a versão mais detalhada das taxonomias setoriais, sempre que possível.

Estudos que associam modelos de equilíbrio geral computável a matrizes insumo-produto do maior nível desagregação disponível podem capturar diversos efeitos omitidos nesta análise. Dentre eles, lista-se efeitos da redução da escala de produção sobre os preços,

efeitos da redução do produto sobre a renda do trabalho e lucros, mudanças técnicas e em padrões de investimento, e respostas comportamentais heterogêneas e mais detalhadas ao aumento dos preços. Ademais, diferentemente dos *integrated assessment models*, não se pode avaliar com a metodologia proposta nesta seção os impactos econômicos positivos das reduções no nível de emissões.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo são apresentados os principais resultados das simulações aplicadas à matriz de insumo-produto brasileira de 2018. Inicialmente, na seção 5.1, calcula-se o índice de preços de cada setor após a introdução do imposto de US\$40/tCO₂e, e explora-se os impactos dessa simulação sobre o produto e sobre as emissões. Em seguida, na seção 5.2, os resultados são desagregados ao longo da distribuição da renda, sendo que o dispêndio anual é empregado como proxy para renda média a longo-prazo (como em Poterba, 1989; Cronin et al., 2019; Fremstad e Paul, 2019). Os dados do dispêndio foram coletados no período de junho de 2017 a julho de 2018, e posteriormente anualizados (IBGE, 2018).

A seção 5.3 apresenta a simulação do direcionamento das receitas do imposto a um “dividendo de carbono” – um programa de transferência de rendas a toda a população. A seção 5.4 reproduz as simulações das seções 5.1 a 5.2 sob duas taxas diferentes por tonelada de CO₂e. Finalmente, a seção 5.5 sumariza os resultados do capítulo e explora suas implicações.

5.1 Impactos sobre o produto e sobre emissões

A Tabela 1 apresenta resultados da simulação sobre os dez setores mais poluentes da economia brasileira. São eles: pecuária (2), agricultura (1), transporte terrestre (43), produção de ferroligas (27), extração de petróleo e gás (5), fabricação de produtos de minerais não-metálicos (26), armazenamento e atividades auxiliares dos transportes e correio (46), água, esgoto e gestão de resíduos (39), refino de petróleo e coquearias (19), e energia elétrica, gás natural e outras utilidades (38). São apresentados os efeitos econômicos do imposto em termos de emissões em gigagramas de CO₂e, intensidade de emissões em Kg

de CO₂e/R\$, alteração de índice de preços e variações percentuais no produto, emissões e emprego. Valores para todos os 68 setores da matriz de insumo-produto estão detalhados no apêndice D.

Tabela 1: Impacto do imposto sobre os dez setores mais poluentes.

Setor MIP	Emissões (Gg de CO ₂ e)	Intensidade de emissões (Kg de CO ₂ e/R\$)	Índice de preços após tributação	Varição do produto, das emissões e do emprego (%)
2 - Pecuária, inclusive o apoio à	490.639	3,229	1,553	-35,59%
1 - Agricultura, inclusive o apoio à agricultura e a pós-colheita	163.736	0,411	1,087	-7,99%
43 - Transporte terrestre	87.708	0,220	1,068	-6,36%
27 - Produção de ferro-gusa/ferroligas, siderurgia e tubos de aço sem costura	43.528	0,290	1,083	-7,65%
5 - Extração de petróleo e gás, inclusive as atividades de apoio	40.655	0,180	1,048	-4,58%
26 - Fabricação de produtos de minerais não-metálicos	34.157	0,407	1,100	-9,11%
46 - Armazenamento, atividades auxiliares dos transportes e correio	30.535	0,220	1,047	-4,51%
39 - Água, esgoto e gestão de resíduos	27.141	0,330	1,063	-5,93%
19 - Refino de petróleo e coquerias	16.675	0,037	1,061	-5,73%
38 - Energia elétrica, gás natural e outras utilidades	12.041	0,037	1,027	-2,66%

Fonte: elaboração do autor com base na Matriz de Insumo-Produto para o ano de 2018 (NEREUS, 2022) e no Relatório das Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa (5ª edição) (MCTI, 2020).

A análise dos resultados demonstra a efetividade da intervenção em reduzir emissões de gases do efeito estufa. O imposto de US\$40/tCO₂e reduz as emissões totais (exclusas as emissões de LULUCF) em 20,29% ou 210.538,90 gigagramas de CO₂e, enquanto o produto total é reduzido em 3,87%, ou R\$464,67 bilhões. Como o modelo de preços de Leontief

presume funções de produção lineares (Miller e Blair, 2009), cada setor reduz sua produção na mesma proporção em que reduz suas emissões. A capacidade do imposto de causar uma redução nas emissões maior que a redução no produto resulta, portanto, de seu efeito reestruturante sobre a economia, com setores de maior intensidade de emissões sendo responsáveis pela maior parte da redução no produto e nas emissões.

O valor da arrecadação do imposto (T) é calculado como:

$$T' = \varphi \rho' x^1 \quad (19)$$

Sendo φ a taxa por tonelada de CO₂e em R\$, ρ o vetor das intensidades de emissão de cada setor da matriz de insumo-produto (em Kg CO₂e/ R\$) e x^1 o valor bruto setorial após o imposto.

A receita total obtida foi de R\$250,06 bilhões, a uma alíquota efetiva de 2,17% (considerando o produto total após a intervenção como a base tributável). Esse valor corresponde, por exemplo, a 52,22% da arrecadação do ICMS das Unidades Federativas em 2018 (CONFAZ, 2022). *Ceteris paribus*, um imposto dessa magnitude aumentaria significativamente a já elevada carga tributária da economia brasileira, de 33% (Moz-Christofoletti e Pereda, 2019), e se sobreporia a um sistema tributário complexo, aumentando ainda mais o custo de conformidade para o contribuinte e empresas (Menin Junior, 2014).

Juntos, os dez setores mais onerados são responsáveis por 95,58% da redução nas emissões e por 53,18% da redução no produto. São eles pecuária (2), abate e produtos de carne (8), fabricação de biocombustíveis (20), fabricação e refino de açúcar (9), fabricação de produtos de minerais não-metálicos (26), agricultura (1), outros produtos alimentares (10), produção de ferroligas (27), fabricação de produtos do fumo (12) e transporte terrestre (43).

O posicionamento da pecuária como a atividade mais poluente em termos absolutos e relativos é consistente com estudos anteriores (da Silva Freitas et al., 2016; Freitas, 2014). O setor emite cerca de 7,84 vezes mais quilogramas de CO₂e por real de produção do que qualquer outro, e, conseqüentemente, também enfrenta a maior oneração e redução no produto e nas emissões (35,59%). Outros setores, como Abate e produtos de carne (8) são menos diretamente intensos em emissões, porém são fortemente impactados pelo imposto por dependerem de insumos de setores de maior impacto ambiental.

Bustamante et al. (2012) estimaram que no período de 2003 a 2008 metade das emissões totais no Brasil estavam associadas a criação de gado, provenientes principalmente da deflorestação para o estabelecimento de pastagens, de queimadas agrícolas e da fermentação entérica bovina (um processo digestivo que resulta na emissão de metano, um gás de potencial de aquecimento global elevado). De acordo com a correspondência feita no presente estudo entre a MIP e o Inventário de Emissões (MCTI, 2020), 67,96% das emissões associadas à pecuária provém da fermentação entérica, também identificada como a principal fonte de emissões da pecuária em uma Análise de Ciclo de Vida via análise de produto realizada no Mato Grosso do Sul (Florindo et al., 2017). Emissões associadas à deflorestação para o estabelecimento de pastagens não estão inclusas na presente análise, mas Bustamante et al. (2012) apontam que no bioma amazônico elas superam as emissões por fermentação entérica.

Destaca-se que esses resultados são obtidos sob a presunção de funções de produção constantes e de manutenção do valor monetário do produto e do consumo das famílias. Não se pode derivar desses resultados, portanto, efeitos de longo-prazo como a mudança em decisões de investimento e o desenvolvimento e a adoção de tecnologias poupadoras de emissões, que provavelmente derivariam da mudança nos preços relativos. Esse estudo também não quantifica benefícios da redução de emissões, como o impacto positivo sobre a saúde dos indivíduos e a menor sujeição de sistemas agrícolas a eventos climáticos extremos. Assim sendo, os resultados devem ser interpretados como um limite inferior do impacto dessa política sobre o produto (Fremstad e Paul, 2019).

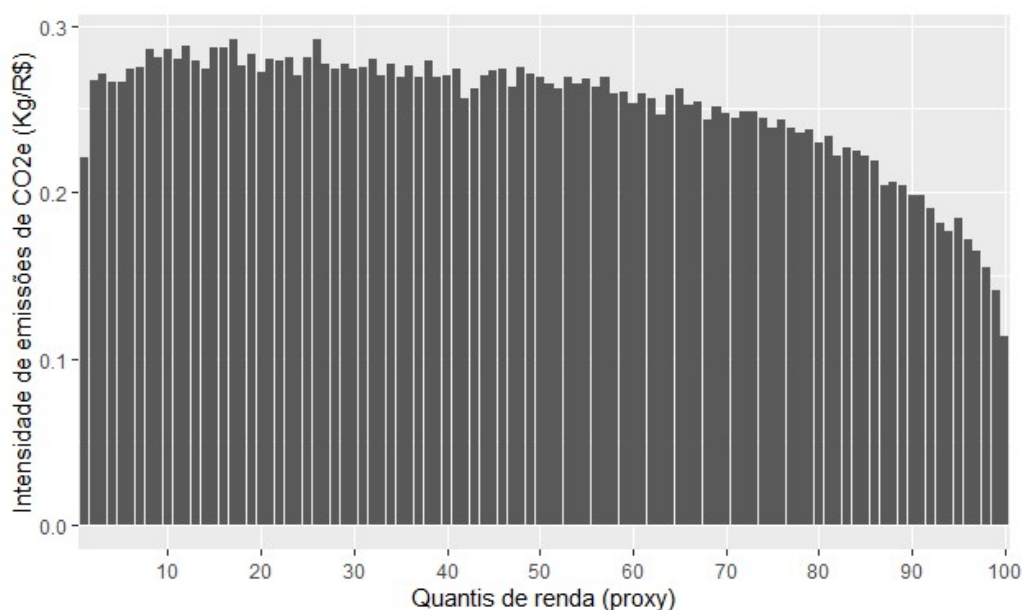
5.2 Análise Distributiva

Na presente seção, são apresentados os impactos do imposto de US\$40/tCO₂e em termos de alterações na distribuição pessoal de renda (utilizando o dispêndio domiciliar equivalente como proxy). Empregaram-se os microdados da Pesquisa de Orçamentos Familiares 2017-2018 (IBGE, 2021) para observar detalhadamente o impacto do imposto sobre o dispêndio das famílias. As emissões e os índices de preços calculados para os 68 setores da matriz de insumo-produto foram atribuídos às categorias de produtos da POF de acordo com o quadro no apêndice C.

A Figura 4 apresenta quantos quilogramas de CO₂e estão associados a um real de dispêndio de cada centil da distribuição de renda. A referida figura ilustra que essa razão, a intensidade de emissões, é menor nos centis mais altos e maior no resto da distribuição. No

entanto, esse valor não decresce monotonicamente ao longo da distribuição, e é, em média, menor nos primeiros dez centis do que no 11º ao 30º centil. Encontra-se que dispêndio do primeiro centil é 1,94 vezes mais intenso em emissões do que o dispêndio do centésimo centil.

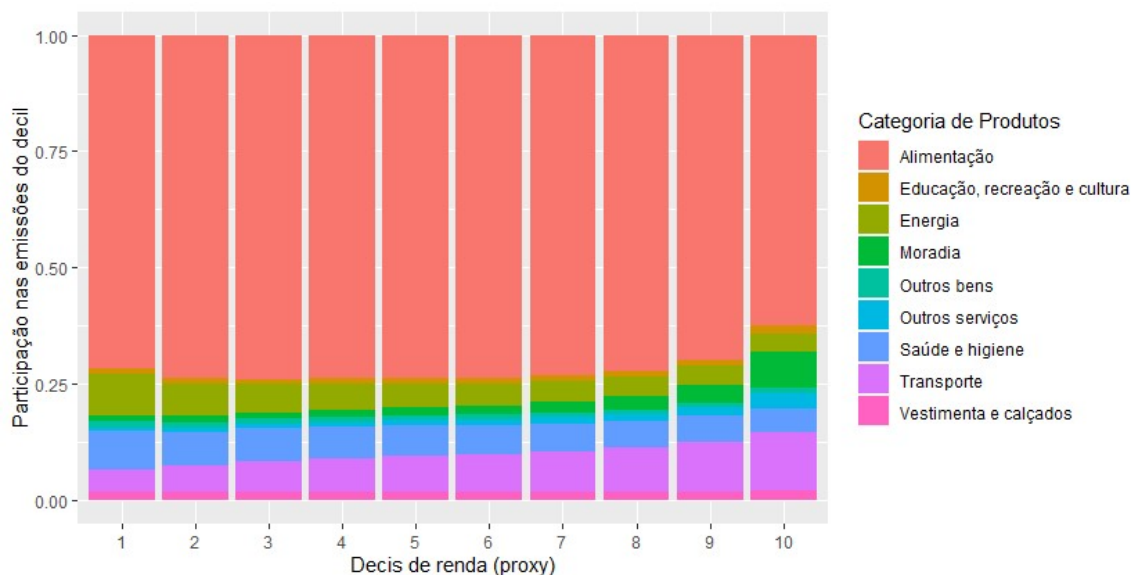
Figura 4: Intensidade de emissões do dispêndio ao longo a distribuição do dispêndio domiciliar equivalente (em kgCO₂e/R\$)



Fonte: elaboração do autor com base na Matriz de Insumo-Produto para o ano de 2018 (NEREUS, 2020), no Relatório das Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa (5ª edição) (MCTI, 2020), e na POF 2017-2018 (IBGE, 2021).

Dentre os dez setores mais afetados pelo imposto, cinco são relacionados à produção de alimentos, sendo eles pecuária agricultura (1), pecuária, (2), abate e produtos de carne (8), fabricação e refino de açúcar (9), e outros produtos alimentares (10). Ademais, encontra-se que em todos os decis da renda permanente, os produtos alimentares são responsáveis por ao menos 60% das emissões totais. Parte da discrepância na intensidade de emissões do dispêndio dos mais pobres e dos mais ricos pode ser explicada, portanto, pela maior participação dos alimentos no consumo dos segmentos mais baixos da distribuição de renda. Abaixo, a figura 5 ilustra o quanto cada categoria de bens contribui para as emissões totais de cada decil da renda permanente, enquanto a tabela 2 apresenta a participação dessas categorias no dispêndio total dos decis. As categorias de produtos são as mesmas utilizadas em Ghalwash (2007), Dorband et al. (2019) e Moz-Christofolletti e Pereda (2021), e correspondem aos quadros da POF de acordo com o quadro no apêndice C.

Figura 5: Participação de diferentes categorias de bens no dispêndio total dos decis de renda permanente.



Fonte: elaboração do autor com base na Matriz de Insumo-Produto para o ano de 2018 (NEREUS, 2020), no Relatório das Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa (5ª edição) (MCTI, 2020), e na POF 2017-2018 (IBGE, 2021).

Tabela 2: Participação de diferentes categorias de bens no dispêndio total dos decis da renda permanente.

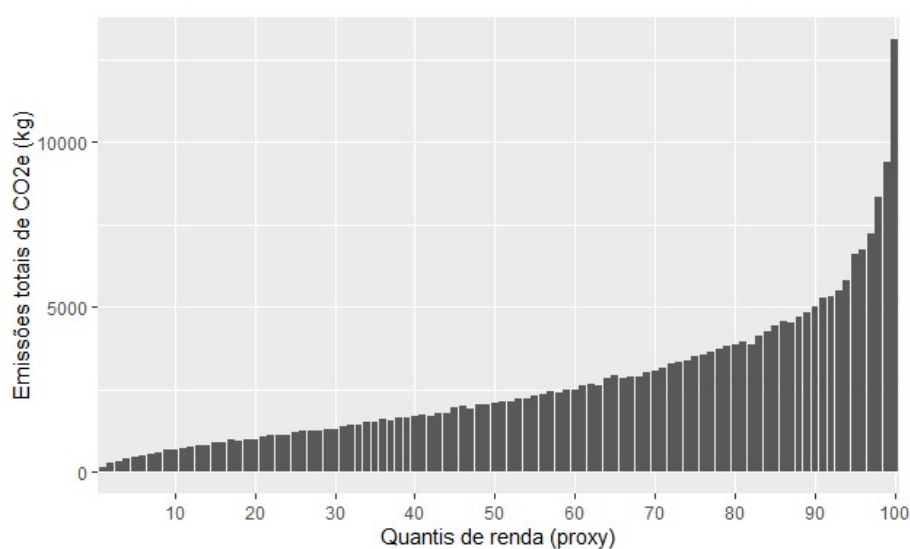
Categoria / Decil	Alimentação	Educação, recreação e cultura	Vestimenta e calçados	Transporte	Saúde e higiene	Energia	Moradia	Outros bens	Outros serviços
1	32,9%	5,7%	7,3%	6,1%	16,3%	17,0%	6,2%	1,8%	6,6%
2	32,1%	6,1%	7,5%	7,5%	15,2%	13,7%	7,6%	1,7%	8,6%
3	31,2%	6,2%	7,3%	9,0%	14,9%	11,7%	8,5%	1,4%	9,8%
4	30,3%	6,4%	7,1%	9,8%	14,7%	10,7%	9,4%	1,5%	10,2%
5	29,5%	6,4%	7,1%	10,7%	14,3%	9,6%	10,0%	1,3%	11,0%
6	28,7%	6,5%	7,0%	11,4%	13,6%	8,9%	10,7%	1,4%	11,8%
7	27,3%	6,7%	6,9%	12,1%	13,2%	8,1%	12,0%	1,3%	12,5%
8	25,7%	7,0%	6,6%	13,2%	12,6%	7,1%	13,2%	1,2%	13,4%
9	22,1%	7,4%	6,1%	13,6%	11,9%	6,2%	16,3%	1,1%	15,3%
10	14,2%	7,4%	4,7%	10,7%	9,8%	4,0%	26,3%	0,8%	22,1%
Média	27,4%	6,6%	6,8%	10,4%	13,7%	9,7%	12,0%	1,3%	12,1%
Média (metade mais pobre)	31,2%	6,1%	7,3%	8,6%	15,1%	12,5%	8,3%	1,5%	9,2%

Fonte: elaboração do autor com base na Matriz de Insumo-Produto para o ano de 2018 (NEREUS, 2022), no Relatório das Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa (5ª edição) (MCTI, 2020), e na POF 2017-2018 (IBGE, 2021).

Enquanto o gasto com bens alimentícios representa 32,9% do dispêndio total do primeiro decil, esse valor cai para 14,2% entre o decil mais rico. Despesas com carne bovina (associadas aos dois setores MIP mais onerados, a pecuária e o abate e produtos de carne) também representam parcelas maiores do dispêndio entre os mais pobres (Vaz e Hoffman, 2020). Por outro lado, cresce rapidamente ao longo da distribuição a participação de gastos com transporte, que são associados a setores da MIP bastante poluentes como o transporte terrestre (43) e transporte aéreo (43), o que pode explicar a intensidade de emissões excepcionalmente baixa no primeiro decil.

Apesar de, no agregado, ter-se identificado uma relação inversa entre renda e intensidade de emissões, esse padrão é mais do que compensado pelas diferenças de magnitude do dispêndio entre os mais ricos e mais pobres. Mesmo com a menor intensidade de emissões, os indivíduos no centésimo centil têm, em média, uma pegada de carbono 93,73 vezes maior do que aquela dos indivíduos no centil mais baixo da distribuição. Analisando a distribuição das emissões totais por indivíduo, ilustrada na Figura 2, encontra-se que as emissões dos 23,81% dos indivíduos mais ricos equivalem às emissões de todos os outros indivíduos remanescentes na amostra. Isso também significa que metade da arrecadação do imposto provém do dispêndio desse mesmo contingente no topo da distribuição.

Figura 6: Emissões totais (kg) – médias dos valores individuais por centil do dispêndio domiciliar equivalente.



Fonte: elaboração do autor com base na Matriz de Insumo-Produto para o ano de 2018 (NEREUS, 2020), no Relatório das Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa (5ª edição) (MCTI, 2020), e na POF 2017-2018 (IBGE, 2021).

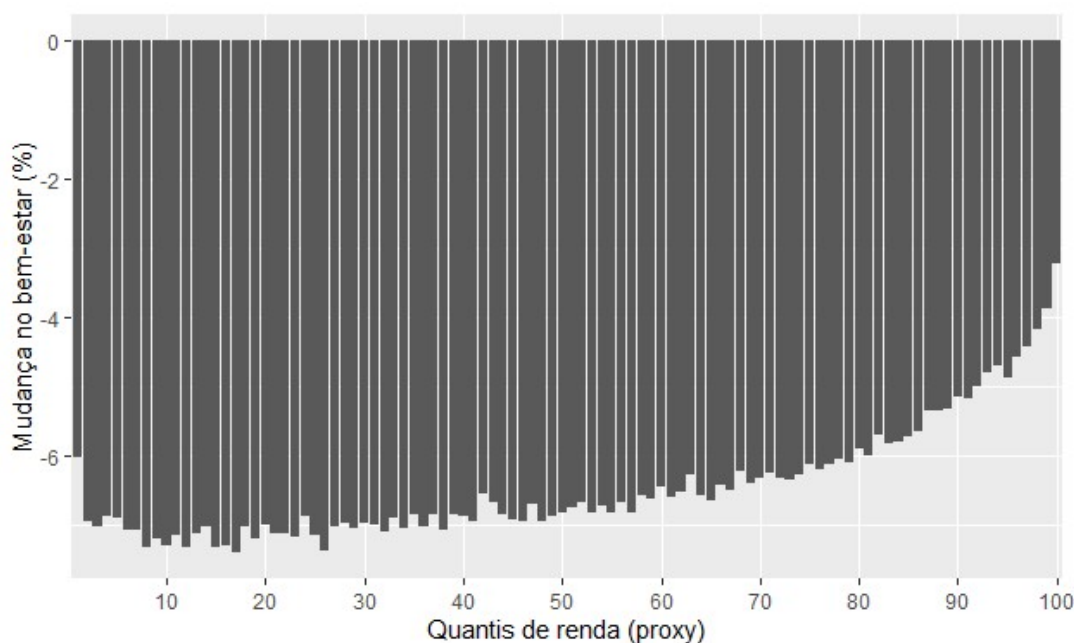
Como um real de dispêndio entre os indivíduos mais pobres está associado a mais emissões do que um real de dispêndio entre os mais ricos, os mais pobres pagam mais em impostos como proporção do seu dispêndio – isto é, o imposto demonstra-se altamente regressivo. A mudança no bem-estar do indivíduo k , Δv_k , foi medida pela variação no poder de compra dos indivíduos como proporção do dispêndio domiciliar equivalente I (proxy para a renda permanente, ou o nível de bem-estar no longo-prazo). A variável Δv_k representa a variação na renda necessária para compensar os indivíduos pela redução nas quantidades consumidas, e restaurar o nível de consumo anterior (da Silva Freitas et al., 2016). Sendo c_{qk} o dispêndio do indivíduo k no quadro POF q antes do imposto, p_q^0 o índice de preços unitário antes da tributação, e p_q^1 o índice de preços da categoria de produtos q após a tributação, calcula-se:

$$\Delta v_k = \frac{\sum_{q=1}^{51}(c_{qk}p_q^0) - \sum_{q=1}^{51}(c_{qk}p_q^1)}{I_k} \quad (2)$$

Sendo o dispêndio domiciliar equivalente $I_k = \frac{\sum_{q=1}^{51}(c_{qh}p_q^0)}{\sqrt{n_h}}$, c_{qh} o dispêndio em bens da categoria i do domicílio h ao qual o indivíduo pertence, e n_h é o número de habitantes no domicílio.

Os cinquenta centis na base da distribuição demonstraram reduções no bem-estar entre -6,35% e -3,11%; valores que ficam entre -1,32% e -1,28% para os dez centis mais ricos. As variações no bem-estar de todos os centis da distribuição estão ilustradas na Figura 3, a seguir. Observa-se que o impacto do imposto sobre o bem-estar é mais elevado, em média, no segundo e terceiro decis do que no primeiro decil, em concordância com o padrão previamente identificado da intensidade de emissões nesses grupos.

Figura 7: Mudança no bem-estar, medida por oneração do dispêndio em relação ao dispêndio domiciliar equivalente.



Fonte: elaboração do autor com base na Matriz de Insumo-Produto para o ano de 2018 (NEREUS, 2020), no Relatório das Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa (5ª edição) (MCTI, 2020), e na POF 2017-2018 (IBGE, 2021).

Recapitulando, o imposto aumenta o índice de preços de cada setor com base na intensidade de emissões do próprio setor e na intensidade de emissões dos setores que lhe fornecem insumos. Considera-se que os indivíduos ajustam seu consumo por meio de reduções nas quantidades, mantendo o valor nominal do dispêndio. Como os mais pobres gastam parte maior de suas rendas em setores intensivos em emissões, eles precisam reduzir seu consumo em proporção maior do que os mais ricos.

Esta análise está em concordância com estudos anteriores ao demonstrar que domicílios mais pobres gastam uma fração maior de suas rendas em categorias de produtos mais intensivas em emissões. Enquanto a literatura internacional frequentemente encontra esse efeito no contexto do consumo de bens energéticos (por exemplo, em Hasset et al., 2009; Grainger e Kolstad, 2010; Cronin et al., 2019), o setor da MIP de número 38 (Energia elétrica, gás natural e outras utilidades) é apenas o 38º mais onerado – refletindo a predominância das hidroelétricas e a menor intensidade de emissões da matriz energética brasileira (Moz-Christofoletti e Pereda, 2021). No Brasil, a regressividade do imposto é atribuída principalmente aos dispêndios em alimentação, como sugerido por da Silva Freitas et al. (2016) e Moz-Christofoletti e Pereda (2021).

Uma análise mais completa simularia o ajuste do consumo não apenas com base na manutenção de valores nominais, mas sim com base nas elasticidades-preço de diferentes categorias de produtos, para diferentes grupos de renda. Considerando os achados de Moz-

Christofoletti e Pereda (2021) para a POF de 2008-2009, indicando que o consumo de alimentos é pouco elástico, especialmente em setores de menor renda, as perdas no poder de compra seriam acompanhadas de aumento no valor monetário do dispêndio, causando reduções mais significativas no bem-estar e de forma ainda mais regressiva.

A redução na capacidade de aquisição de alimentos é um resultado particularmente prejudicial no contexto brasileiro. Os dados da POF 2017-2018 (IBGE, 2021) revelam que o país enfrentava à época uma prevalência de insegurança alimentar e nutricional de 36,1%, em comparação a 22,9% em 2013 – situação agravada ainda mais pela pandemia de Covid-19 (Souza et al., 2020). Seria necessária, portanto, a implementação de políticas mitigantes desse efeito sobre os mais pobres, tema a ser explorado na próxima seção.

5.3 Dividendo de Carbono

Esta seção analisa o impacto da aplicação do dividendo de carbono no contexto da economia brasileira de 2018. A política de dividendo de carbono consiste na distribuição integral da arrecadação do imposto em transferências equivalentes a todos os membros da população. Como discutido anteriormente, essa política neutraliza o impacto da política sobre as receitas do governo, e é coerente com a ideia de que a atmosfera é um bem público cujo direito de propriedade é compartilhado igualmente por todos os indivíduos (Fremstad e Paul, 2019).

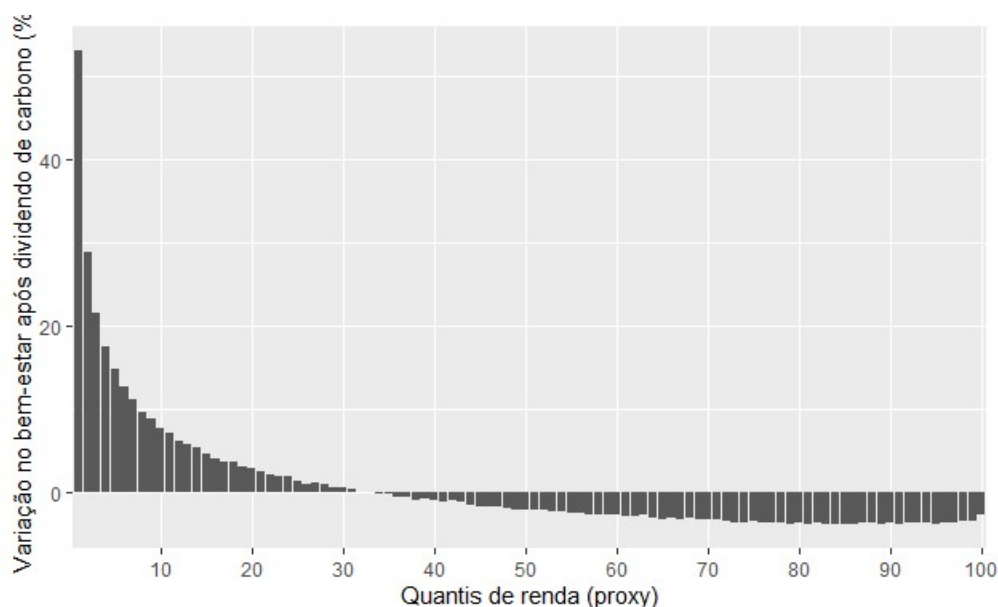
De modo a avaliar como o dividendo de carbono redistribui os recursos entre os indivíduos da amostra, foi calculada a arrecadação sobre o dispêndio compilado nos microdados da POF. Como os aumentos de custos causados pelo imposto são repassados integralmente aos consumidores, a arrecadação T sobre os indivíduos da POF pode ser calculada como a variação total nos preços de todas as compras na amostra. Sendo c_{ik}^1 o consumo de produtos do setor i pelo indivíduo k após o imposto, e as demais variáveis as mesmas da equação 20, calcula-se:

$$T = \sum_k \left(\sum_i c_{ik}^1 p_i^1 - \sum_i c_{ik}^0 p_i^0 \right) \quad (2)$$

Obtém-se uma arrecadação de R\$122,60 milhões, ou R\$687,08 para cada um dos 178.431 indivíduos na amostra. A variação no bem-estar após o dividendo é calculada como

na equação 20, com o acréscimo de R\$687,08 no numerador. A figura 8 ilustra os resultados para todos os centis de renda.

Figura 8: Variação percentual no bem-estar após a implementação do imposto sobre emissões e do dividendo.



Fonte: elaboração do autor com base na Matriz de Insumo-Produto para o ano de 2018 (NEREUS, 2020), no Relatório das Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa (5ª edição) (MCTI, 2020), e na POF 2017-2018 (IBGE, 2021).

O efeito combinado do imposto e do dividendo sobre o bem-estar é, em média, positivo do 1º ao 34º centil, e negativo para os centis subsequentes. Ao fim, 38,31% dos indivíduos são beneficiados pelas intervenções conjuntas, ou 68,71% da metade inferior da distribuição e 7,93% da metade superior. A variância entre centis é de 25,12 e a variância dentro dos centis é de 0,007, o que reflete que o efeito redistributivo vertical é muito maior do que os efeitos horizontais. Alternativamente, a metade mais pobre da distribuição poderia ser compensada exatamente empregando-se apenas 21,36% da arrecadação total.

Finalmente, análises para a economia estadunidense encontram que políticas alternativas ao dividendo, como reduções em outros impostos e ampliação de programas de transferência de renda preexistentes resultam em impactos altamente variáveis dentro de cada decil, falhando em compensar boa parcela das pessoas nos decis mais pobres (Cronin et al., 2019; Fremstad e Paul, 2019).

5.4 Taxas alternativas

Para avaliar o quanto os resultados dependem da taxa sobre tCO₂e escolhida, e possibilitar mais comparações com a literatura, realizou-se uma análise de sensibilidade consistindo na observação do impacto da política sob duas outras taxas: R\$50 e US\$80. A primeira dessas foi empregada em da Silva Freitas et al. (2016), com base na estimativa de Magalhães e Domingues (2013) do preço necessário para causar uma redução de 5% nas emissões até 2030, em relação ao cenário-base; o segundo valor, equivalente a R\$292,29 em 2018, é o limite superior da estimativa de Stiglitz et al. (2017) do preço consistente com o alvo de manter o aquecimento global “significativamente abaixo de 2°C”, ratificado no Acordo de Paris (UNFCCC, 2015). Lembra-se que o valor de US\$40, empregado até este ponto do estudo, é o limite inferior dessa mesma estimativa.

A tabela 3 resume os efeitos macroeconômicos do imposto sob as três taxas por tCO₂e consideradas, apresentando, para cada uma delas, a arrecadação, a alíquota efetiva, o valor do dividendo, a variação no produto e a variação nas emissões correspondentes.

Encontra-se uma redução de 8,76% nas emissões a R\$50/tCO₂e, mais do que o estimado por Magalhães em Domingues (2013). As reduções a US\$40 e US\$80 ficam aquém dos 55% estabelecidos no Acordo de Paris (UNFCCC, 2015) – o que é esperado, dado que as estimativas de Stiglitz et al. (2017) consideram um cronograma de aumento de taxas, e simulam efeitos de segunda ordem como avanços tecnológicos.

Tabela 3: Indicadores associados ao imposto sobre emissões, a diferentes taxas.

Taxa por tCO ₂ e	Arrecadação	Alíquota efetiva	Valor do dividendo	Variação no Produto	Variação nas Emissões
R\$ 50	R\$95,51 bi	0,08%	R\$235,06	-1,45%	-8,76%
US\$40 (R\$146,14)	R\$250,06 bi	2,17%	R\$687,08	-3,87%	-20,29%
US\$80 (R\$292,29)	R\$441,92 bi	3,95%	R\$1374,15	-6,96%	-31,28%

Fonte: elaboração do autor com base na Matriz de Insumo-Produto para 2018 (NEREUS, 2022), no Relatório das Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa (5ª edição) (MCTI, 2020), e na POF 2017-2018 (IBGE, 2021).

Em seguida, analisaram-se efeitos distributivos sob as três taxas. O sentido da variação no bem-estar de cada indivíduo é independente da taxa, mas as magnitudes dos efeitos variam significativamente. Assim sendo, sob as três taxas, 68,70% dos indivíduos na

amostra (ou 38,31% da metade mais pobre) são beneficiados pelas políticas conjuntas. Também fica claro que quanto maior a taxa por tCO_{2e}, mais se faz necessária a política compensatória. Mediu-se a variância dentro e entre os centis em cada um dos cenários, confirmando que o efeito redistributivo vertical é atingido sem discriminar fortemente pessoas de um mesmo nível de renda.

Tabela 4: Avaliação dos impactos distributivos de taxas de carbono alternativas.

Taxa por tCO _{2e} \ Decil	Variação no bem-estar após imposto			Variação no bem-estar após dividendo			Parcela beneficiada após dividendo
	R\$ 50	US\$40 (R\$146,14)	US\$80 (R\$292,29)	R\$ 50	US\$40 (R\$146,14)	US\$80 (R\$292,29)	R\$50/US\$40/US\$80
1	-2,39%	-6,99%	-13,97%	6,94%	20,28%	40,56%	99,88%
2	-2,46%	-7,20%	-14,39%	1,61%	4,71%	9,42%	90,13%
3	-2,43%	-7,09%	-14,18%	0,51%	1,50%	2,99%	69,49%
4	-2,38%	-6,96%	-13,93%	-0,09%	-0,28%	-0,55%	50,16%
5	-2,34%	-6,84%	-13,67%	-0,51%	-1,49%	-2,98%	33,85%
6	-2,29%	-6,70%	-13,41%	-0,82%	-2,39%	-4,77%	21,03%
7	-2,21%	-6,46%	-12,92%	-1,03%	-3,01%	-6,03%	11,63%
8	-2,11%	-6,17%	-12,35%	-1,20%	-3,50%	-6,99%	5,17%
9	-1,91%	-5,59%	-11,18%	-1,26%	-3,67%	-7,35%	1,45%
10	-1,54%	-4,49%	-8,98%	-1,19%	-3,47%	-6,95%	0,35%
Média	-2,21%	-6,45%	-12,90%	0,30%	0,87%	1,74%	38,31%
Média (metade mais pobre)	-2,42%	-7,01%	-14,03%	2,24%	4,94%	9,89%	68,70%

Fonte: elaboração do autor com base na Matriz de Insumo-Produto para 2018 (NEREUS, 2022), no Relatório das Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa (5ª edição) (MCTI, 2020), e na POF 2017-2018 (IBGE, 2021).

Tabela 5: Variância do efeito do dividendo entre e dentro dos centis.

Variância	R\$ 50	US\$40	US\$80
Entre centis	1,66	14,20	56,82
Dentro dos centis	0,00	0,01	0,02

Fonte: elaboração do autor.

Impactos da redução da produção sobre os empregos e renda do trabalho não são capturados nesta análise. No entanto, pode-se esperar que esses efeitos aumentariam a variabilidade dos resultados dentro dos centis, posto que indivíduos empregados em setores mais onerados sofreriam maiores reduções na renda do que os demais indivíduos no mesmo centil.

5.5 Resumo e implicações

Neste capítulo, demonstrou-se a eficiência e a inequidade do imposto sobre emissões, seja adotada a taxa de R\$50, US\$40, ou US\$80. Em qualquer um dos cenários, o imposto induz uma redução nas emissões ao menos 4,5 vezes maior do que a correspondente redução no produto, efetivamente tornando a economia brasileira menos intensiva em emissões. O tributo induz tais resultados ao onerar setores intensivos em emissões mais significativamente, de modo que reduz a participação de atividades poluentes no produto interno bruto agregado.

Analizou-se como as interações entre o imposto e os diferentes padrões de consumo observados ao longo da distribuição de renda resultam em um efeito regressivo. Enquanto os 12,81% indivíduos mais ricos na amostra da POF são responsáveis por metade das emissões e da arrecadação totais, a maior intensidade de emissões do consumo dos mais pobres faz com que esse grupo enfrente uma carga tributária maior em relação à sua renda. A maior intensidade de emissões do dispêndio dos mais pobres é em boa parte explicada pela maior participação dos alimentos em suas cestas de consumo, posto que setores relacionados à produção de alimentos, como a pecuária e a agricultura, estão entre os mais poluentes. Como o sentido das redistribuições causadas pelo imposto é essencialmente determinado pelas diferenças nos padrões de consumo entre indivíduos, a regressividade do imposto manteve-se sob qualquer uma das taxas avaliadas, mudando apenas a magnitude dos efeitos.

Finalmente, demonstrou-se que um dividendo de carbono resulta em variações positivas no bem-estar para 68,70% da metade mais pobre da distribuição. No caso do tributo de US\$80/tCO₂e, o valor mais alto considerado, o aumento no bem-estar do primeiro decil atinge 40,56%, enquanto o decil mais rico enfrenta uma redução relativamente pequena no bem-estar, de 6,95%. O dividendo de carbono apresenta-se, portanto, como uma maneira efetiva de compensar o efeito regressivo do imposto sobre emissões, simultaneamente neutralizando o impacto do imposto sobre as receitas do governo. O quadro 2, abaixo resume brevemente o sentido das variações em diversas variáveis que ocorrem como resultado do imposto sobre emissões e do dividendo. O impacto do dividendo sobre emissões e o produto não foi explorado neste estudo.

Quadro 2: Resumo do impacto do Imposto sobre emissões e do Dividendo de carbono sobre variáveis selecionadas.

Imposto sobre emissões	Dividendo de carbono
-------------------------------	-----------------------------

Produto	↓	-
Emissões	↓	-
Bem-estar	↓	↓
Bem-estar (média da metade mais pobre)	↑	↓

Fonte: elaboração do autor.

O imposto aqui considerado é aplicado sobre todas as emissões descritas no inventário de emissões do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicação (MCTI, 2020) (exclusas as emissões associadas ao uso da terra) e sobre todos os setores da matriz de insumo-produto. Como a distribuição dos impactos do imposto está fortemente relacionada a diferenças no padrão de consumo de alimentos dos diferentes grupos de renda, pode-se antecipar que impostos desenhados com uma cobertura menor (abrangendo apenas alguns setores específicos, por exemplo) difeririam significativamente do imposto aqui considerado em termos de impacto macroeconômico, mesoeconômico e distributivo.

Salvo desconhecimento do autor, ainda não foram realizadas análises comparativas de diferentes usos das arrecadações do imposto para a economia brasileira. A literatura internacional lista alternativas como reduções em impostos sobre folhas de pagamento e pensões, restituições integrais do imposto pago pelos consumidores e a ampliação da cobertura ou do valor das transferências de programas de distribuição de renda preexistentes (Fremstad e Paul, 2019; Cronin et al., 2019). Uma política de restituição do imposto pago por cada indivíduo compensaria exatamente a variação no bem-estar de todos, contornando o problema da variação negativa no bem-estar de 31,30% da metade mais pobre da população encontrada no caso do dividendo de carbono. No entanto, tal política direcionaria mais recursos aos mais ricos do que aos mais pobres. Alternativamente, os recursos poderiam ser direcionados integralmente aos mais pobres via programas condicionais de transferência de renda.

Às opções listadas acima, pode-se acrescentar políticas voltadas a reduzir ainda mais as emissões, como programas de incentivo à eletrificação (para substituir o uso de combustíveis fósseis) e o compromisso perante o Acordo de Paris de obter 23% da energia brasileira de fontes renováveis não-hidroelétricas (Brasil, 2022). Ao comparar-se tais medidas com políticas compensatórias dos efeitos distributivos do imposto sobre emissões,

poder-se-ia desenvolver um entendimento dos *trade-offs* entre equidade e eficiência no combate às mudanças climáticas.

6 CONCLUSÃO

A presente monografia pretendeu avaliar os impactos distributivos de um imposto sobre emissões e de um dividendo de carbono na economia brasileira para o ano de 2018. Para tanto, foram utilizados os dados do dispêndio das famílias obtidos da Pesquisa de Orçamentos Familiares 2017-2018 (IBGE, 2021) e uma análise de insumo-produto expandida com dados sobre emissões.

Para atingir-se esse objetivo primário, diversos objetivos secundários foram alcançados. Primeiramente, estimou-se as emissões de gases de efeito estufa associadas aos setores da matriz de insumo-produto, e os correspondentes aumentos nos índices de preços em função do imposto sobre emissões. Encontrou-se que o tributo de USD40/tCO₂e provoca aumento de preços, uma redução de emissões de 20,29% ou 210.538,90 gigagramas de CO₂e, e uma redução no produto de 3,87%, ou R\$464,67 bilhões. Identificou-se elevada concentração de emissões em poucos setores, de modo que 95,58% das reduções de emissões causadas pelo imposto ocorrem em função da resposta de apenas dez dos 68 setores da matriz de insumo-produto, em especial nos setores da agricultura (1), pecuária (2) e abate e produtos de carne (8). As atividades de serviços são menos afetadas, sendo usualmente consideradas não-poluentes na literatura.

Em seguida, as estimativas de emissões foram compatibilizadas com os dados de dispêndio das famílias. Observou-se que o dispêndio dos grupos de menor renda são mais intensos em emissões de gases de efeito estufa, especialmente no segundo e terceiro decis da distribuição. O principal fator explicativo dessa intensidade de emissões acentuada é a maior participação do consumo de alimentos e bebidas no dispêndio dos grupos de renda mais baixa. Em termos absolutos, no entanto, metade das emissões totais podem ser atribuídas aos indivíduos nos 23,81% superiores da distribuição de renda.

Em seguida, simulou-se como o imposto sobre emissões induziria uma redução no dispêndio dos diferentes grupos de renda. Estimando a renda compensatória necessária para retornar os indivíduos a seus níveis de dispêndio originais, o impacto médio sobre toda a amostra foi uma redução de bem-estar de 6,45%, ou uma redução de 7,01% para a metade

mais pobre da amostra. Portanto, o imposto demonstrou um efeito regressivo na distribuição de renda da população.

As simulações do dividendo de carbono indicaram uma variação positiva de bem-estar, na média, para os indivíduos do primeiro ao terceiro decil da distribuição de renda. O dividendo compensa a regressividade do imposto sobre emissões na medida em que impacta a metade mais pobre da distribuição favoravelmente em relação à metade mais rica. No entanto, apenas 38,31% da metade mais pobre da amostra apresentou variações positivas de bem-estar em função do sistema de *carbon fee and dividend*.

Salvo desconhecimento do autor, o presente estudo é o primeiro a estimar os efeitos distributivos de um imposto sobre emissões utilizando matrizes de insumo-produto e a Pesquisa de Orçamentos Familiares 2017-2018 – outros estudos similares existem apenas para a POF de 2008-2009 (Magalhães e Domingues, 2013; da Silva et al., 2016; Moz-Christofoletti e Pereda, 2021). A análise realizada contribui para a literatura em diversos pontos. O detalhamento das emissões relacionadas aos diferentes setores econômicos e ao consumo dos diferentes grupos de renda contribui para o entendimento da economia política de uma transição para uma economia de baixo carbono, especialmente ao considerar uma variedade de fontes e tipos de gases de efeito estufa (não apenas CO₂, ou apenas emissões do uso de energia, por exemplo). A avaliação dos impactos distributivos do imposto sobre emissões permite um melhor entendimento de um dos mais importantes instrumentos de mitigação de emissões, e a análise do dividendo de carbono expande a literatura acerca de medidas de mitigação dos efeitos regressivos de tributos ambientais no Brasil.

Conforme abordado anteriormente, a metodologia empregada permite apenas uma análise de estática comparativa, não capturando efeitos dinâmicos. Estudos futuros podem incluir respostas comportamentais baseadas na elasticidade-preço do consumo de diferentes bens, considerações mais verossímeis sobre a capacidade das empresas de repassarem os aumentos de custos aos consumidores, os efeitos do imposto sobre a renda do trabalho e lucros, mudanças técnicas e alterações em padrões de investimentos, potencialmente antecipando a dificuldade dos impostos sobre emissões de causar transformações em circunstâncias marcadas por investimentos de longo-prazo em infraestrutura e tecnologias intensivas em emissões.

Ademais, propõe-se que análises futuras explorem usos alternativos das receitas do imposto sobre emissões, em especial medidas com o potencial de compensar uma parcela maior da metade inferior da distribuição, como expansões em programas de transferência de renda preexistentes. Dada a vulnerabilidade desproporcional das camadas mais pobres a

riscos climáticos, é importante que qualquer proposta de imposto leve em consideração questões distributivas e de equidade.

REFERÊNCIAS

- AKLIN, Michaël; MILDENBERGER, Matto. Prisoners of the Wrong Dilemma: Why Distributive Conflict, Not Collective Action, Characterizes the Politics of Climate Change. **Global Environmental Politics**, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 4–27, 2020.
- ALVES-PASSONI, Patieene; FREITAS, Fabio. **Estimação de Matrizes Insumo-Produto anuais para o Brasil no Sistema de Contas Nacionais Referência 2010**. [S. l.: s. n.], 2020.
- AMBEC, Stefan; EHLERS, Lars. Regulation via the Polluter-pays Principle. **The Economic Journal**, [s. l.], v. 126, n. 593, p. 884–906, 2016.
- ANDRADE, Daniel Caixeta; ROMEIRO, Ademar Ribeiro. Serviços ecossistêmicos e sua importância para o sistema econômico e o bem-estar humano. [s. l.], **IE/UNICAMP** n. 155, p. 45, 2009.
- APÓS A MAIOR CHEIA DA HISTÓRIA, NÍVEL DO RIO NEGRO BAIXA E FICA EM 30 METROS EM MANAUS. *Em*: **GLOBO**. Disponível em: <https://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2021/06/25/apos-a-maior-cheia-da-historia-nivel-do-rio-negro-baixa-e-fica-em-30-metros-em-manaus.ghtml>. Acesso em: 22 abr. 2022.
- ARI, Izzet; SARI, Ramazan. Differentiation of developed and developing countries for the Paris Agreement. **Energy Strategy Reviews**, [s. l.], v. 18, p. 175–182, 2017.
- ARVANITOYANNIS, Ioannis S. ISO 14040: Life Cycle Assessment (LCA) – Principles and Guidelines. *Em*: WASTE MANAGEMENT FOR THE FOOD INDUSTRIES. [S. l.]: Elsevier, 2008. p. 97–132. *E-book*. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123736543500067>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- ASSAD, E. et al. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. Brasília: Embaixada Britânica, 2008
- BANCO MUNDIAL. **State and Trends of Carbon Pricing 2021**. Washington, DC: World Bank, 2021. Serial. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35620>. Acesso em: 29 mar. 2022.
- BANCO MUNDIAL. CO2 emissions. *In*: BANCO MUNDIAL. **The World Bank**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC>. Acesso em: 21 abr. 2022.
- BAUMOL, William J.; OATES, Wallace E. **The Theory of Environmental Policy**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1988. *E-book*. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/theory-of-environmental-policy/E8FE3C8AB6D8D6982E5B65CC95FA1478>. Acesso em: 14 abr. 2022.
- BRASIL. **Lei nº N° 12.187, de 29 de dezembro de 2009**. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. Brasília, 29 dez. 2009.

BRASIL EXPERIMENTA A MAIOR CRISE HÍDRICA EM 91 ANOS. *Em: DIÁRIO DO COMÉRCIO*. 16 out. 2021. Disponível em: <https://diariodocomercio.com.br/economia/brasil-experimenta-a-maior-crise-hidrica-em-91-anos/>. Acesso em: 22 abr. 2022

BUSTAMANTE, Mercedes M. C. *et al.* Estimating greenhouse gas emissions from cattle raising in Brazil. *Climatic Change*, [s. l.], v. 115, n. 3, p. 559–577, 2012.

CARNEGIE MELLON UNIVERSITY. A Primer on LCA: Economic Input-Output Life Cycle Assessment. *In: CARNEGIE MELLON UNIVERSITY. Economic Input-Output Life Cycle Assessment*. [S. l.], 2008. Disponível em: http://www.eiolca.net/Method/LCA_Primer.html. Acesso em: 18 abr. 2022.

CALLAN, Tim *et al.* The distributional implications of a carbon tax in Ireland. *Energy Policy*, [s. l.], v. 37, n. 2, p. 407–412, 2009.

CARATTINI, Stefano; CARVALHO, Maria; FANKHAUSER, Sam. Overcoming public resistance to carbon taxes. *WIREs Climate Change*, [s. l.], v. 9, n. 5, p. e531, 2018.

Carbon Tax: A Lifetime and Regional Analysis. *The Energy Journal*, [s. l.], v. Volume 30, n. Number 2, p. 155–178, 2009.

CHANCEL, Lucas. **Unsustainable inequalities: social justice and the environment**. Cambridge, Massachusetts: The Belknap Press of Harvard University Press, 2020.

CHANCEL, Lucas; PIKETTY, Thomas. Carbon and inequality: From Kyoto to Paris. [s. l.], 2015. Disponível em: <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.3536.0082>. Acesso em: 1 maio 2022.

CIRINO, Paulo *et al.* UMA ANÁLISE DO IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA DA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL **An analysis of the impact of climate change on agricultural productivity of Northeast of Brazil**. [s. l.], 2014.

CLIMATE LEADERSHIP COUNCIL. Economists' Statement on Carbon Dividends: The Largest Public Statement of Economists in History. *In: CLIMATE LEADERSHIP COUNCIL. Climate Leadership Council*. Washington, DC, 28 abr. 2022. Disponível em: <https://clcouncil.org/economists-statement/>. Acesso em: 28 abr. 2022.

CONFAZ. Boletim de Arrecadação dos Tributos Estaduais: - Dados históricos de 1997 a novembro de 2021 - Portal Brasileiro de Dados Abertos. *In: DADOS.GOV. Portal Brasileiro de Dados Aberto*. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://dados.gov.br/dataset/boletim-de-arrecadacao-dos-tributos-estaduais/resource/48f9698b-fa39-4337-82ca-df5c0b02d866>. Acesso em: 23 abr. 2022.

CRIPPA, M *et al.* **GHG emissions of all world: 2021 report**. 2021. *E-book*. Disponível em: https://op.europa.eu/publication/manifestation_identifier/PUB_KJNA30831ENN. Acesso em: 24 abr. 2022.

CRONIN, Julie Anne; FULLERTON, Don; SEXTON, Steven. Vertical and Horizontal Redistributions from a Carbon Tax and Rebate. **Journal of the Association of Environmental and Resource Economists**, [s. l.], v. 6, n. S1, p. S169–S208, 2019.

CRONIN, Julie Anne; FULLERTON, Don; SEXTON, Steven. Vertical and Horizontal Redistributions from a Carbon Tax and Rebate. **Journal of the Association of Environmental and Resource Economists**, [s. l.], v. 6, n. S1, p. S169–S208, 2019.

DA SILVA FREITAS, Lucio Flavio *et al.* The distributional effects of emissions taxation in Brazil and their implications for climate policy. **Energy Economics**, [s. l.], v. 59, p. 37–44, 2016.

DA SILVA FREITAS, Lucio Flavio *et al.* The distributional effects of emissions taxation in Brazil and their implications for climate policy. **Energy Economics**, [s. l.], v. 59, p. 37–44, 2016.

DORBAND, Ira Irina *et al.* Poverty and distributional effects of carbon pricing in low- and middle-income countries – A global comparative analysis. **World Development**, [s. l.], v. 115, p. 246–257, 2019.

DOUENNE, Thomas; FABRE, Adrien. Yellow Vests, Pessimistic Beliefs, and Carbon Tax Aversion. **American Economic Journal: Economic Policy**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 81–110, 2022.

ELISABETSKY, Elaine; SHANLEY, Patricia. Ethnopharmacology in the Brazilian Amazon. **Pharmacology & Therapeutics**, [s. l.], v. 64, n. 2, p. 201–214, 1994.

EMANUEL, Kerry A. **What we know about climate change**. 2^a ed. Cambridge, Mass: MIT Press, 2012.

FARIA, João Ricardo. Most Cited Articles Published in Brazilian Journals of Economics: Google Scholar Rankings. **Economia**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 1–25, 2010.

FENG, Kuishuang *et al.* Distributional Effects of Climate Change Taxation: The Case of the UK. **Environmental Science & Technology**, [s. l.], v. 44, n. 10, p. 3670–3676, 2010.

FÉRRRES, José; REIS, Eustáquio; SPERANZA, Juliana Simões. Impacto das mudanças climáticas no setor agrícola brasileiro. In: SEROA DA MOTTA, Ronaldo *et al.*, (ed.). **Mudança do Clima no Brasil**: aspectos econômicos, sociais e regulatórios. [S. l.]: IPEA, 2011. cap. 16, p. 301-311.

FINKBEINER, Matthias *et al.* The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 and ISO 14044. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 80–85, 2006.

FLORINDO, Thiago José *et al.* Carbon footprint and Life Cycle Costing of beef cattle in the Brazilian midwest. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 147, p. 119–129, 2017.

FREITAS, Lucio Flávio da Silva. PADRÃO DE CONSUMO E PRESSÃO AMBIENTAL NO BRASIL. **Revista de Economia Contemporânea**, [s. l.], v. 18, n. 1, 2014. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-98482014000100100. Acesso em: 22 fev. 2021.

FREMSTAD, Anders; PAUL, Mark. The Impact of a Carbon Tax on Inequality. **Ecological Economics**, [s. l.], v. 163, n. C, p. 88–97, 2019.

FRIEDMAN, Milton. **A theory of the consumption function**. Reprint, 1. pbk. printed. Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 2008. (National Bureau of economic research general series, v. 63).

GHALWASH, Tarek. Energy taxes as a signaling device: An empirical analysis of consumer preferences. **Energy Policy**, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 29–38, 2007.

GRAINGER, Corbett A.; KOLSTAD, Charles D. Who Pays a Price on Carbon?. **Environmental and Resource Economics**, [s. l.], v. 46, n. 3, p. 359–376, 2010.
GRIJÓ, Eduardo; BÊRNI, Duilio de Avila. METODOLOGIA COMPLETA PARA A ESTIMATIVA DE MATRIZES DE INSUMO-PRODUTO. [s. l.], v. 14, n. 26, p. 34, 2006.

GUILHOTO, Joaquim José Martins; SESSO FILHO, Umberto Antonio. Estimacão da matriz insumo-produto utilizando dados preliminares das contas nacionais: aplicacão e análise de indicadores econômicos para o Brasil em 2005. **Revista Economia & Tecnologia**, [s. l.], v. 6, n. 4, 2010. Disponível em: <http://revistas.ufpr.br/ret/article/view/26912>. Acesso em: 1 set. 2021.

GUILHOTO, Joaquim; SESSO FILHO, U. A. Estimacão da Matriz Insumo-Produto Utilizando Dados Preliminares das Contas Nacionais: Aplicaco e Análise de Indicadores Econmicos para o Brasil em 2005 (Using Data from the System of National Accounts to Estimate Input-Output Matrices: An Application Using Brazilian Data for 2005). Rochester, NY: **Social Science Research Network**, 2010. SSRN Scholarly Paper. Disponível em: <https://papers.ssrn.com/abstract=1836495>. Acesso em: 29 mar. 2022.

GUINÉE, Jeroen B. *et al.* Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future [†]. **Environmental Science & Technology**, [s. l.], v. 45, n. 1, p. 90–96, 2011.

GÜTSCHOW, Johannes *et al.* The PRIMAP-hist national historical emissions time series. **Earth System Science Data**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 571–603, 2016.

HASSETT, Kevin; MATHUR, Aparna; METCALF, Gilbert. The Incidence of a U.S. HILGEMBERG, Emerson Martins; GUILHOTO, Joaquim J. M. Uso de combustíveis e emissões de CO2 no Brasil: um modelo inter-regional de insumo-produto. **Nova Economia**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 49–99, 2006.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa de Orçamentos Familiares 2017-2018**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA: **Censo Demográfico : 2010 : características da população e dos domicílios : resultados do universo**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

ICAP. **Brazil | International Carbon Action Partnership**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://icapcarbonaction.com/en/ets/brazil>. Acesso em: 17 abr. 2022.

INTEGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth**

Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2021.

INTEGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Geneva: IPCC, 2022a.

INTEGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Geneva: IPCC, 2022b.

INTEGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **IPCC Second Assessment Report.** Geneva: IPCC, 1995. Disponível em: <https://archive.ipcc.ch/pdf/climate-changes-1995/ipcc-2nd-assessment/2nd-assessment-en.pdf>. Acesso em: 1 abr. 2021.

IPEA. Taxa de câmbio - R\$/ US\$ - comercial - compra - média. *In*: IPEA. **Ipeadata.** [S. l.], 1 maio 2022. Disponível em: <http://www.ipeadata.gov.br/Default.aspx>. Acesso em: 23 abr. 2022.

LEONTIEF, Wassily. **Input-output economics.** New York: Oxford University Press, 1966.

LI, Jennifer C. A multi-period analysis of a carbon tax including local health feedback: an application to Thailand. **Environment and Development Economics**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 317–342, 2006.

LOVEJOY, Thomas E.; NOBRE, Carlos. Amazon Tipping Point. **Science Advances**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 2340, 2018.

LUCINDA, Claudio Ribeiro; DE FREITAS OLIVEIRA FAVARO, Juliana. Permanent income hypothesis in emerging markets: Some Brazilian evidence. **Economia**, [s. l.], v. 19, n. 3, p. 395–403, 2018.

LUPPI, Barbara; PARISI, Francesco; RAJAGOPALAN, Shruti. The rise and fall of the polluter-pays principle in developing countries. **International Review of Law and Economics**, [s. l.], v. 32, n. 1, The Economics of Efficiency and the Judicial System, p. 135–144, 2012.

LYNAS, Mark; HOULTON, Benjamin Z.; PERRY, Simon. Greater than 99% consensus on human caused climate change in the peer-reviewed scientific literature. **Environmental Research Letters**, [s. l.], v. 16, n. 11, p. 114005, 2021.

MACHADO, Giovani; SCHAEFFER, Roberto; WORRELL, Ernst. Energy and carbon embodied in the international trade of Brazil: an input–output approach. **Ecological Economics**, [s. l.], v. 39, n. 3, p. 409–424, 2001.

MAGALHÃES, Aline; DOMINGUES, Edson. **Economia de baixo carbono no Brasil: alternativas de políticas e custos de redução de emissões de gases de efeito estufa.**

Textos para Discussão Cedeplar-UFMG: Textos para Discussão Cedeplar-UFMG: Cedeplar, Universidade Federal de Minas Gerais, 2013. Disponível em: <https://ideias.repec.org/p/cdp/texdis/td491.html>. Acesso em: 15 mar. 2022.

MATTHEWS, H. Scott; HENRICKSON, Chris T.; MATTHEWS, Deanna H. **Life Cycle Assessment: Quantitative Approaches For Decisions That Matter**. [S. l.: s. n.], 2014. Disponível em: <https://www.lcatextbook.com/>. Acesso em: 22 abr. 2022.

MENIN JUNIOR, Romeu Felix. A REFORMA TRIBUTÁRIA BRASILEIRA: UMA ANÁLISE PRINCÍPIOLÓGICA DAS PROPOSTAS DE REFORMA DO SISTEMA TRIBUTÁRIO BRASILEIRO. **Processus Multidisciplinar** [s. l.], 2021. Disponível em: <https://zenodo.org/record/4847501>. Acesso em: 1 maio 2022.

METCALF, Gilbert. A Distributional Analysis of Green Tax Reforms. **National Tax Journal**, [s. l.], v. 52, n. 4, p. 655–682, 1999.

MEYER, Lukas H.; ROSER, Dominic. Climate justice and historical emissions. **Critical Review of International Social and Political Philosophy**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 229–253, 2010.

MILLER, Ronald E; BLAIR, Peter D. **Input–Output Analysis: Foundations and Extensions**, Second Edition. [s. l.], p. 784. 2009.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES (MCTI). **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa**. Brasília, ed. 5, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee>. Acesso em: 27 abr. 2022.

MINX, J.C. *et al.* INPUT–OUTPUT ANALYSIS AND CARBON FOOTPRINTING: AN OVERVIEW OF APPLICATIONS. **Economic Systems Research**, [s. l.], v. 21, n. 3, p. 187–216, 2009.

MORAES, Orozimbo José de. **Economia Ambiental: Instrumentos econômicos para o desenvolvimento sustentável**. 2. Ed. São Paulo: Ed. Centauro, 2013. 224 p.

MONTOYA, Marco Antonio; PASQUAL, Cássia Aparecida; LOPES, Ricardo Luis. Consumo de energia, emissões de co2 e a geração de renda e emprego no agronegócio brasileiro: uma análise insumo–produto | **Economia Aplicada**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/ecoa/article/view/125143>. Acesso em: 10 ago. 2021.

MORRONE, Henrique. FORMAL AND INFORMAL SECTORS IN A SOCIAL ACCOUNTING MATRIX FOR BRAZIL. **Análise Econômica**, [s. l.], v. 33, n. 64, 2015. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/AnaliseEconomico/article/view/45005>. Acesso em: 20 abr. 2022.

MOZ-CHRISTOFOLETTI, Maria Alice; PEREDA, Paula Carvalho. Winners and losers: the distributional impacts of a carbon tax in Brazil. **Ecological Economics**, [s. l.], v. 183, p. 106945, 2021.

MUNKSGAARD, Jesper *et al.* Using Input-Output Analysis to Measure the Environmental Pressure of Consumption at Different Spatial Levels. **Journal of Industrial Ecology**, [s. l.], v. 9, n. 1–2, p. 169–185, 2008.

NEREUS. Dados e Programas. *In*: NEREUS. **NEREUS: Núcleo de Economia Regional e Urbana da Universidade de São Paulo**. São Paulo, 2020. Disponível em: <http://www.usp.br/nereus/?fontes=dados-nereus>. Acesso em: 21 abr. 2022.

NOBRE, C. A.; YOUNG, A. F.; SALDIVA, P.; MARENGO, J. A.; NOBRE, A. D.; ALVES JR., S.; SILVA, G. C. M. da; LOMBARDO, M. **Vulnerabilidades das Megacidades Brasileiras às Mudanças Climáticas: Região Metropolitana de São Paulo**. INPE; UNICAMP; USP; IPT; UNESP- Rio Claro, jun. 2010.

NORDHAUS, William D. **A question of balance: weighing the options on global warming policies**. New Haven: Yale University Press, 2008.

NURDIANTO, Ditya A.; RESOSUDARMO, Budy P. The Economy-wide Impact of a Uniform Carbon Tax in ASEAN. **Journal of Southeast Asian Economies (JSEAE)**, [s. l.], v. 33, n. 1, p. 1–22, 2016.

PAUW, Pieter; MBEVA, Kennedy; VAN ASSELT, Harro. Subtle differentiation of countries' responsibilities under the Paris Agreement. **Palgrave Communications**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 1–7, 2019.

OECD. Nota técnica. **What are equivalence scales?**, [S. l.], 2011. Disponível em: <https://www.oecd.org/els/soc/OECD-Note-EquivalenceScales.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2022.

PIGOU, A.C. **The Economics of Welfare**. Macmillan, Londres, 1920.

POTERBA, James. **Lifetime Incidence and the Distributional Burden of Excise Taxes**. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research, 1989. Disponível em: <http://www.nber.org/papers/w2833.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2021.

POWELL, James. Scientists Reach 100% Consensus on Anthropogenic Global Warming. **Bulletin of Science, Technology & Society**, [s. l.], v. 37, n. 4, p. 183–184, 2019.

QUEIMADAS NO CERRADO SÃO AS PIORES DESDE 2012. **Folha de São Paulo**, São Paulo, p. 1-2, 9 set. 2021. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/ambiente/2021/09/queimadas-no-cerrado-sao-as-piores-desde-2012.shtml>. Acesso em: 22 abr. 2022.

RAFATY, Ryan; DOLPHIN, Geoffroy; PRETIS, Felix. **Carbon pricing and the elasticity of CO2 emissions**. [S. l.]: Energy Policy Research Group, University of Cambridge, 2020. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/resrep30490>. Acesso em: 13 abr. 2022.

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. **NATIONALLY DETERMINED CONTRIBUTION (NDC)**, Brasília, 21 mar. 2022. Disponível em: <https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Brazil%20First/Updated%20-%20First%20NDC%20-%20%20FINAL%20-%20PDF.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2022.

RIBAS, Rafael. Determinantes do risco de pobreza urbana no Brasil durante a década de 90. [s. l.], 2005.

ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES. Press Release. **The 2018 Prize in Economic Sciences**, Estocolmo, 8 out. 2018. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/economic-sciences/2018/press-release/>. Acesso em: 1 maio 2022.

SAITO, Silvia Midori *et al.* População urbana exposta aos riscos de deslizamentos, inundações e enxurradas no Brasil. **Sociedade & Natureza**, [s. l.], v. 31, 2019. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/sociedadennatureza/article/view/46320>. Acesso em: 1 maio 2022.

SEROA DA MOTTA, Ronaldo (org.). **Mudança do clima no Brasil: aspectos econômicos, sociais e regulatórios**. Brasília: Ipea, 2011.

SETTE, Ana Beatriz; COELHO, Alexandre. Padrão de consumo de arranjos domiciliares brasileiros em 2008/2009. **Revista Brasileira de Estudos de População**, [s. l.], v. 37, p. 1–36, 2020.

SOUZA, Bruna Fernanda do Nascimento Jacinto de *et al.* (In)segurança alimentar no Brasil no pré e pós pandemia da COVID-19: reflexões e perspectivas. **InterAmerican Journal of Medicine and Health**, [s. l.], v. 4, 2021a. Disponível em: <https://iajmh.com/iajmh/article/view/160>. Acesso em: 12 mar. 2022.

STERN, N. H. **The economics of climate change the Stern Review**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.

STIGLITZ, Joseph E. *et al.* Report of the High-Level Commission on Carbon Prices. [s. l.], p. 1–61, 2017.

TVINNEREIM, Endre; MEHLING, Michael. Carbon pricing and deep decarbonisation. **Energy Policy**, [s. l.], v. 121, p. 185–189, 2018.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION FOR CLIMATE CHANGE (UNFCCC). Decisão. **17/CP.8**, [S. l.], 2002. Disponível em: https://unfccc.int/files/meetings/workshops/other_meetings/application/pdf/dec17-cp.pdf. Acesso em: 1 maio 2022.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). Acordo. **Acordo de Paris**, [S. l.], 12 dez. 2015.

UNTERSTELL, Natalie *et al.* NDC do Brasil: Avaliação da atualização submetida à UNFCCC em 2022. **Nota Técnica**. Rio de Janeiro, Brasil. TALANOA, 2022. Disponível em: www.institutotalanoa.org/documentos. Acesso em: 1 abr. 2021.

VALE, Vinícius A; PEROBELLI, Fernando S. Análise de Insumo-Produto. [s. l.], p. 132, 2020.

- VAZ, Daniela Verzola; HOFFMANN, Rodolfo. Elasticidade-renda e concentração das despesas com alimentos no Brasil: uma análise dos dados das POF de 2002-2003, 2008-2009 e 2017-2018. **Revista de Economia**, [s. l.], v. 41, n. 75, 2020a. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/economia/article/view/70940>. Acesso em: 10 mar. 2022.
- VEHVILÄINEN, Tommi *et al.* High indoor CO₂ concentrations in an office environment increases the transcutaneous CO₂ level and sleepiness during cognitive work. **Journal of Occupational and Environmental Hygiene**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 19–29, 2016.
- WANG, Qian *et al.* Distributional effects of carbon taxation. **Applied Energy**, [s. l.], v. 184, p. 1123–1131, 2016.
- WEISBACH, David A.; METCALF, Gilbert E. The Design of a Carbon Tax. **SSRN Electronic Journal**, [s. l.], 2009. Disponível em: <http://www.ssrn.com/abstract=1327260>. Acesso em: 14 abr. 2022.
- WEITZMAN, Martin L. On a World Climate Assembly and the Social Cost of Carbon. **Economica**, [s. l.], v. 84, n. 336, p. 559–586, 2017.
- WEITZMAN, Martin. **Role of Uncertainty in the Economics of Catastrophic Climate Change**. Rochester, NY: Social Science Research Network, 2007. SSRN Scholarly Paper. Disponível em: <https://papers.ssrn.com/abstract=992873>. Acesso em: 25 abr. 2022.
- WIEDMANN, Thomas. EDITORIAL: CARBON FOOTPRINT AND INPUT–OUTPUT ANALYSIS – AN INTRODUCTION. **Economic Systems Research**, [s. l.], v. 21, n. 3, p. 175–186, 2009.
- WIEDMANN, Thomas; BARRETT, John; LENZEN, Manfred. Companies on the Scale: Comparing and Benchmarking the Footprints of Businesses. [s. l.], 2007.
- WIEDMANN, Thomas; JAN MINX. A Definition of Carbon Footprint. **CC Pertsova, Ecological Economics Research Trends**, [s. l.], v. 2, p. 55–65, 2008.
- WIER, Mette *et al.* Are CO₂ taxes regressive? Evidence from the Danish experience. **Ecological Economics**, [s. l.], v. 52, n. 2, p. 239–251, 2005.
- WILLIAMS, Ian *et al.* A beginner’s guide to carbon footprinting. **Carbon Management**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 55–67, 2012.
- WILLIAMS, Robertson *et al.* The Initial Incidence of a Carbon Tax Across Income Groups. **National Tax Journal**, [s. l.], v. 68, n. 1, p. 195–214, 2015.
- WRIGHT, Laurence A; KEMP, Simon; WILLIAMS, Ian. ‘Carbon footprinting’: towards a universally accepted definition. **Carbon Management**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 61–72, 2011.
- YOHE, Gary; TOL, Richard. **PRECAUTION AND A DISMAL THEOREM: IMPLICATIONS FOR CLIMATE POLICY AND CLIMATE RESEARCH**. [S. l.]: Research unit Sustainability and Global Change, Hamburg University, 2007. Working Paper. Disponível em: <https://econpapers.repec.org/paper/sgcwpaper/145.htm>. Acesso em: 25 abr. 2022.

APÊNDICE A: Produto intermediário e total (mi R\$), demanda final (mi R\$), emissões associadas (GgCO₂e) e índice de preços após imposto dos setores da MIP.

ID	Nome do setor	Produto Intermediário	Demanda Final	Produto total	Emissões associadas (t)	Índice de Preços após o tributo (p^t)
1	Agricultura, inclusive o apoio à agricultura e a pós-colheita	180926,42	217110,58	398037,00	163735,54	1,087
2	Pecuária, inclusive o apoio à pecuária	101821,57	50137,43	151959,00	490639,15	1,553
3	Produção florestal; pesca e aquicultura	15970,31	21899,69	37870,00	1023,30	1,022
4	Extração de carvão mineral e de minerais não-metálicos	18508,78	1502,22	20011,00	3995,68	1,055
5	Extração de petróleo e gás, inclusive as atividades de apoio	133389,82	92548,18	225938,00	40654,54	1,048
6	Extração de minério de ferro, inclusive beneficiamentos e a aglomeração	19012,13	73313,87	92326,00	3974,80	1,027
7	Extração de minerais metálicos não-ferrosos, inclusive beneficiamentos	8348,01	9924,99	18273,00	786,69	1,032
8	Abate e produtos de carne, inclusive os produtos do laticínio e da pesca	55760,35	236645,65	292406,00	1553,29	1,373
9	Fabricação e refino de açúcar	18266,03	33288,97	51555,00	273,86	1,105
10	Outros produtos alimentares	103651,13	221291,87	324943,00	1726,13	1,085
11	Fabricação de bebidas	34822,87	43721,13	78544,00	417,23	1,037
12	Fabricação de produtos do fumo	377,85	15316,15	15694,00	83,37	1,074
13	Fabricação de produtos têxteis	32230,23	22562,77	54793,00	430,18	1,044
14	Confecção de artefatos do vestuário e acessórios	6018,39	60413,61	66432,00	521,56	1,025
15	Fabricação de calçados e de artefatos de couro	4819,25	39028,75	43848,00	344,25	1,040
16	Fabricação de produtos da madeira	21496,67	11190,33	32687,00	58,18	1,031
17	Fabricação de celulose, papel e produtos de papel	60286,65	49308,35	109595,00	4189,50	1,036
18	Impressão e reprodução de gravações	20302,50	1030,50	21333,00	815,50	1,021
19	Refino de petróleo e coquerias	313249,42	134251,58	447501,00	16675,05	1,061
20	Fabricação de biocombustíveis	24543,17	30093,83	54637,00	8652,21	1,120
21	Fabricação de químicos orgânicos e inorgânicos, resinas e elastômeros	155632,66	23873,34	179506,00	11756,87	1,041
22	Fabricação de defensivos, desinfestantes, tintas e químicos diversos	73021,69	15286,31	88308,00	5613,42	1,039
23	Fabricação de produtos de limpeza, cosméticos/perfumaria e higiene pessoal	10764,23	39411,77	50176,00	3189,51	1,061
24	Fabricação de produtos farmacêuticos e farmacêuticos	21079,53	55164,47	76244,00	4846,56	1,028
25	Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	94589,15	26627,85	121217,00	215,74	1,028
26	Fabricação de produtos de minerais não-metálicos	72715,13	11172,87	83888,00	34156,68	1,100
27	Produção de ferro-gusa/ferroligas, siderurgia e tubos de aço sem costura	92065,94	57999,06	150065,00	43528,00	1,083
28	Metalurgia de metais não-ferrosos e a fundição de metais	45006,51	28141,49	73148,00	7731,00	1,051

ID	Nome do setor	Produto Intermediário	Demanda Final	Produto total	Emissões associadas (€)	Índice de Preços após o tributo (p^j)
29	Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos	76935,62	25018,38	101954,00	181,46	1,045
30	Fabricação de equipamentos de informática, produtos eletrônicos e ópticos	31378,09	72165,91	103544,00	184,29	1,013
31	Fabricação de máquinas e equipamentos elétricos	40117,44	39827,56	79945,00	142,29	1,030
32	Fabricação de máquinas e equipamentos mecânicos	40650,20	88662,80	129313,00	230,15	1,028
33	Fabricação de automóveis, caminhões e ônibus, exceto peças	9320,00	178595,00	187915,00	3649,49	1,036
34	Fabricação de peças e acessórios para veículos automotores	86781,57	19210,43	105992,00	2058,46	1,036
35	Fabricação de outros equipamentos de transporte, exceto veículos automotores	2160,27	39652,73	41813,00	812,05	1,020
36	Fabricação de móveis e de produtos de indústrias diversas	19396,40	55838,60	75235,00	133,90	1,023
37	Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos	65272,21	14695,79	79968,00	61,57	1,020
38	Energia elétrica, gás natural e outras utilidades	220973,33	102165,67	323139,00	12041,00	1,027
39	Água, esgoto e gestão de resíduos	48077,75	34142,25	82220,00	27141,00	1,063
40	Construção	109100,61	442972,39	552073,00	0,00	1,035
41	Comércio e reparação de veículos automotores e motocicletas	54634,73	120458,27	175093,00	134,81	1,013
42	Comércio por atacado e a varejo, exceto veículos automotores	472806,86	647772,14	1120579,00	862,77	1,015
43	Transporte terrestre	264377,93	134435,07	398813,00	87708,35	1,068
44	Transporte aquaviário	15090,69	7951,31	23042,00	5067,48	1,058
45	Transporte aéreo	26638,55	18168,45	44807,00	9854,11	1,061
46	Armazenamento, atividades auxiliares dos transportes e correio	95151,02	43692,98	138844,00	30535,06	1,047
47	Alojamento	14751,18	13035,82	27787,00	21,39	1,037
48	Alimentação	40481,33	236456,67	276938,00	1684,34	1,063
49	Edição e edição integrada à impressão	8853,79	9049,21	17903,00	13,78	1,013
50	Atividades de televisão, rádio, cinema e gravação/edição de som e imagem	41342,71	2531,29	43874,00	33,78	1,011
51	Telecomunicações	65194,24	101684,76	166879,00	128,49	1,009
52	Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação	83372,36	84037,64	167410,00	128,90	1,005
53	Intermediação financeira, seguros e previdência complementar	347272,48	301736,52	649009,00	499,70	1,005
54	Atividades imobiliárias	90369,89	549382,11	639752,00	492,57	1,002
55	Atividades jurídicas, contábeis, consultoria e sedes de empresas	196578,15	32034,85	228613,00	176,02	1,006
56	Serviços de arquitetura, engenharia, testes/análises técnicas e P & D	33217,47	29673,53	62891,00	48,42	1,009
57	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas	99721,19	5098,81	104820,00	80,70	1,010
58	Aluguéis não-imobiliários e gestão de ativos de propriedade intelectual	39500,72	8978,28	48479,00	37,33	1,010
59	Outras atividades administrativas e serviços complementares	202741,31	58973,69	261715,00	201,50	1,010

ID	Nome do setor	Produto Intermediário	Demanda Final	Produto total	Emissões associadas (€)	Índice de Preços após o tributo (p')
60	Atividades de vigilância, segurança e investigação	42574,64	521,36	43096,00	33,18	1,004
61	Administração pública, defesa e seguridade social	27118,66	831645,34	858764,00	661,19	1,009
62	Educação pública	1494,40	349600,60	351095,00	270,32	1,007
63	Educação privada	16052,37	127384,63	143437,00	110,44	1,008
64	Saúde pública	418,14	202297,86	202716,00	156,08	1,015
65	Saúde privada	36021,26	266851,74	302873,00	466,39	1,012
66	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos	7324,18	33041,82	40366,00	31,08	1,009
67	Organizações associativas e outros serviços pessoais	28545,01	143373,99	171919,00	132,37	1,021
68	Serviços domésticos	0,00	74451,00	74451,00	0,00	1,000

Fonte: Elaboração do autor, com base na Matriz de Insumo-Produto para 2018 (NEREUS, 2020), e no inventário de emissões (MCTI, 2020)

APÊNDICE B: Compatibilização entre os setores do Inventário de Emissões (MCTI, 2020) e da matriz de insumo-produto (NEREUS, 2020)

Setor do Inventário de Emissões	Setor da Matriz de Insumo-Produto
Indústrias de Energia	19 - Refino de petróleo e coquerias
	20 - Fabricação de biocombustíveis
	38 - Energia elétrica, gás natural e outras utilidades
	5 - Extração de petróleo e gás, inclusive as atividades de apoio
Ferro e aço	27 - Produção de ferro-gusa/ferroligas, siderurgia e tubos de aço sem costura
Metais não ferrosos	28 - Metalurgia de metais não-ferrosos e a fundição de metais
Produtos químicos	21 - Fabricação de químicos orgânicos e inorgânicos, resinas e elastômeros
	22 - Fabricação de defensivos, desinfestantes, tintas e químicos diversos
	23 - Fabricação de produtos de limpeza, cosméticos/perfumaria e higiene pessoal
	24 - Fabricação de produtos farmoquímicos e farmacêuticos
	20 - Fabricação de biocombustíveis
Celulose, papel e impressão	17 - Fabricação de celulose, papel e produtos de papel
	18 - Impressão e reprodução de gravações
Processamento de alimentos, bebidas e tabaco	48 - Alimentação
	11 - Fabricação de bebidas
	12 - Fabricação de produtos do fumo

Setor do Inventário de Emissões	Setor da Matriz de Insumo-Produto
	8 - Abate e produtos de carne, inclusive os produtos do laticínio e da pesca
	9 - Fabricação e refino de açúcar
	10 - Outros produtos alimentares
Minerais não metálicos	26 - Fabricação de produtos de minerais não-metálicos
Equipamentos de transporte	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
Mineração (exceto combustíveis) e extração	4 - Extração de carvão mineral e de minerais não-metálicos
	6 - Extração de minério de ferro, inclusive beneficiamentos e a aglomeração
	7 - Extração de minerais metálicos não-ferrosos, inclusive beneficiamentos
Têxtil e couro	13 - Fabricação de produtos têxteis
	14 - Confeção de artefatos do vestuário e acessórios
	15 - Fabricação de calçados e de artefatos de couro
Transporte	46 - Armazenamento, atividades auxiliares dos transportes e correio
	43 - Transporte terrestre
	44 - Transporte aquaviário
	45 - Transporte aéreo
Comercial / institucional	53 - Intermediação financeira, seguros e previdência complementar
	52 - Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação
	54 - Atividades imobiliárias
	48 - Alimentação
	47 - Alojamento
	61 - Administração pública, defesa e seguridade social
	62 - Educação pública
	63 - Educação privada
	64 - Saúde pública
65 - Saúde privada	
	37 - Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos

Setor do Inventário de Emissões	Setor da Matriz de Insumo-Produto
	41 - Comércio e reparação de veículos automotores e motocicletas
	42 - Comércio por atacado e a varejo, exceto veículos automotores
	49 - Edição e edição integrada à impressão
	50 - Atividades de televisão, rádio, cinema e gravação/edição de som e imagem
	51 - Telecomunicações
	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
	65 - Saúde privada
	66 - Atividades artísticas, criativas e de espetáculos
	67 - Organizações associativas e outros serviços pessoais
Residencial	5 - Extração de petróleo e gás, inclusive as atividades de apoio
	20 - Fabricação de biocombustíveis
	4 - Extração de carvão mineral e de minerais não-metálicos
Agricultura / silvicultura / pesca / piscicultura	1 - Agricultura, inclusive o apoio à agricultura e a pós-colheita
	2 - Pecuária, inclusive o apoio à pecuária
	3 - Produção florestal; pesca e aquicultura
Não Especificado	16 - Fabricação de produtos da madeira
	25 - Fabricação de produtos de borracha e de material plástico
	29 - Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos
	30 - Fabricação de equipamentos de informática, produtos eletrônicos e ópticos

Setor do Inventário de Emissões	Setor da Matriz de Insumo-Produto
	31 - Fabricação de máquinas e equipamentos elétricos
	32 - Fabricação de máquinas e equipamentos mecânicos
	36 - Fabricação de móveis e de produtos de indústrias diversas
Combustíveis sólidos	4 - Extração de carvão mineral e de minerais não-metálicos
Petróleo e Gás Natural	5 - Extração de petróleo e gás, inclusive as atividades de apoio
Indústria Mineral	26 - Fabricação de produtos de minerais não-metálicos
Indústria Química	21 - Fabricação de químicos orgânicos e inorgânicos, resinas e elastômeros
	22 - Fabricação de defensivos, desinfestantes, tintas e químicos diversos
	23 - Fabricação de produtos de limpeza, cosméticos/perfumaria e higiene pessoal
	24 - Fabricação de produtos farmoquímicos e farmacêuticos
Produção de ferro e aço	27 - Produção de ferro-gusa/ferroligas, siderurgia e tubos de aço sem costura
Produção de ferroligas	
Produção de alumínio	28 - Metalurgia de metais não-ferrosos e a fundição de metais
Produção de magnésio	
Produtos Não Energéticos de Combustíveis e Solventes	26 - Fabricação de produtos de minerais não-metálicos
	21 - Fabricação de químicos orgânicos e inorgânicos, resinas e elastômeros
Fermentação Entérica	2 - Pecuária, inclusive o apoio à pecuária
Manejo de Dejetos Animais	
Cultivo de Arroz	1 - Agricultura, inclusive o apoio à agricultura e a pós-colheita
Solos Manejados	
Fertilizantes sintéticos	
Adbos orgânicos	
Deposição de dejetos em pastagem	2 - Pecuária, inclusive o apoio à pecuária
Bovinos	
Bovinos de corte	
Bovino de leite	
Suínos	
Outros animais	
Resíduos agrícolas	1 - Agricultura, inclusive o apoio à

Setor do Inventário de Emissões	Setor da Matriz de Insumo-Produto
Soja	agricultura e a pós-colheita
Milho	
Cana-de-açúcar	
Arroz	
Outras culturas temporárias	
Feijão	
Mandioca	
Trigo	
Pastagens	2 - Pecuária, inclusive o apoio à pecuária
Mineralização de N associada a perda de C do solo	1 - Agricultura, inclusive o apoio à agricultura e a pós-colheita
Manejo de solos orgânicos	
Queima de resíduos agrícolas	
Calagem	
Aplicação de Ureia	39 - Água, esgoto e gestão de resíduos
Disposição de Resíduos Sólidos	
Tratamento Biológico de Resíduos Sólidos	
Incineração e Queima a Céu Aberto de Resíduos Sólidos	

APÊNDICE C: Compatibilização entre os setores da matriz de insumo-produto (NEREUS, 2020) e os quadros da Pesquisa de Orçamentos Familiares 2017-2018 (IBGE, 2021)

ID	Setor da Matriz de Insumo-Produto	Quadro da POF (ou código do produto)	Grupo para apresentação de resultados
1	Agricultura, inclusive o apoio à agricultura e a pós-colheita	63;24	1
2	Pecuária, inclusive o apoio à pecuária	63;24	1
3	Produção florestal; pesca e aquicultura	63;24	1
4	Extração de carvão mineral e de minerais não-metálicos	O	6
5	Extração de petróleo e gás, inclusive as atividades de apoio	2301401 a 2301701	6
6	Extração de minério de ferro, inclusive beneficiamentos e a aglomeração	O	8

ID	Setor da Matriz de Insumo-Produto	Quadro da POF (ou código do produto)	Grupo para apresentação de resultados
7	Extração de minerais metálicos não-ferrosos, inclusive beneficiamentos	O	8
8	Abate e produtos de carne, inclusive os produtos do laticínio e da pesca	63;24	1
9	Fabricação e refino de açúcar	63;24	1
10	Outros produtos alimentares	63;24	1
11	Fabricação de bebidas	63;24	1
12	Fabricação de produtos do fumo	21	2
13	Fabricação de produtos têxteis	37	3
14	Confecção de artefatos do vestuário e acessórios	34;35;36;46;31	3
15	Fabricação de calçados e de artefatos de couro	38	3
16	Fabricação de produtos da madeira	11	8
17	Fabricação de celulose, papel e produtos de papel	32	8
18	Impressão e reprodução de gravações	32	7
19	Refino de petróleo e coquerias	7	6
20	Fabricação de biocombustíveis	7	6
21	Fabricação de químicos orgânicos e inorgânicos, resinas e elastômeros	18	8
22	Fabricação de defensivos, desinfestantes, tintas e químicos diversos		8
23	Fabricação de produtos de limpeza, cosméticos/perfumaria e higiene pessoal	30	5
24	Fabricação de produtos farmoquímicos e farmacêuticos	29	5
25	Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	O	8
26	Fabricação de produtos de minerais não-metálicos	O	8
27	Produção de ferro-gusa/ferroligas, siderurgia e tubos de aço sem costura	O	8
28	Metalurgia de metais não-ferrosos e a fundição de metais	O	8
29	Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos	8	8
30	Fabricação de equipamentos de informática, produtos eletrônicos e ópticos	15	7
31	Fabricação de máquinas e equipamentos elétricos	15	7
32	Fabricação de máquinas e equipamentos mecânicos	15	9

ID	Setor da Matriz de Insumo-Produto	Quadro da POF (ou código do produto)	Grupo para apresentação de resultados
33	Fabricação de automóveis, caminhões e ônibus, exceto peças	51	4
34	Fabricação de peças e acessórios para veículos automotores	51	4
35	Fabricação de outros equipamentos de transporte, exceto veículos automotores	51	4
36	Fabricação de móveis e de produtos de indústrias diversas	17;18	7
37	Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos	9	7
38	Energia elétrica, gás natural e outras utilidades	6	6
39	Água, esgoto e gestão de resíduos	6	7
40	Construção	8;11	7
41	Comércio e reparação de veículos automotores e motocicletas	51;33	4
42	Comércio por atacado e a varejo, exceto veículos automotores	S	9
43	Transporte terrestre	23	4
44	Transporte aquaviário	23	4
45	Transporte aéreo	23	4
46	Armazenamento, atividades auxiliares dos transportes e correio	25	4
47	Alojamento	41	7
48	Alimentação	63;24	1
49	Edição e edição integrada à impressão	27	9
50	Atividades de televisão, rádio, cinema e gravação/edição de som e imagem	44	9
51	Telecomunicações	44	9
52	Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação	S	9
53	Intermediação financeira, seguros e previdência complementar	26	9
54	Atividades imobiliárias	10;47	7
55	Atividades jurídicas, contábeis, consultoria e sedes de empresas	40	9
56	Serviços de arquitetura, engenharia, testes/análises técnicas e P & D	40	7
57	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas	40	9

ID	Setor da Matriz de Insumo-Produto	Quadro da POF (ou código do produto)	Grupo para apresentação de resultados
58	Aluguéis não-imobiliários e gestão de ativos de propriedade intelectual	S	9
59	Outras atividades administrativas e serviços complementares	S	9
60	Atividades de vigilância, segurança e investigação	40	7
61	Administração pública, defesa e seguridade social	12	9
62	Educação pública	49	2
63	Educação privada	49	2
64	Saúde pública	42	5
65	Saúde privada	42	5
66	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos	28	2
67	Organizações associativas e outros serviços pessoais	48	7
68	Serviços domésticos	19	7

APÊNDICE D – Impactos setoriais do Imposto de USD40/tCO_{2e}: Emissões de gases de efeito estufa (gigagramas de CO_{2e}), Intensidade de emissões (Kg de CO_{2e}/R\$), índice de preços após tributação, e variação do produto, das emissões e do emprego (%)

ID	Setor MIP	Emissões (Gg de CO_{2e})	Intensidade de emissões (Kg de CO_{2e}/R\$)	Índice de preços após tributação	Variação do produto, das emissões e do emprego (%)
1	Agricultura, inclusive o apoio à agricultura e a pós-colheita	163.735,54	0,411	1,087	-7,99%
2	Pecuária, inclusive o apoio à pecuária	490.639,15	3,229	1,553	-35,59%
3	Produção florestal; pesca e aquicultura	1.023,30	0,027	1,022	-2,16%
4	Extração de carvão mineral e de minerais não-metálicos	3.995,68	0,200	1,055	-5,17%
5	Extração de petróleo e gás, inclusive as atividades de apoio	40.654,54	0,180	1,048	-4,58%
6	Extração de minério de ferro, inclusive beneficiamentos e a aglomeração	3.974,80	0,043	1,027	-2,63%
7	Extração de minerais metálicos não-ferrosos, inclusive beneficiamentos	786,69	0,043	1,032	-3,08%

ID	Setor MIP	Emissões (Gg de CO₂e)	Intensidade de emissões (Kg de CO₂e/R\$)	Índice de preços após tributação	Variação do produto, das emissões e do emprego (%)
8	Abate e produtos de carne, inclusive os produtos do laticínio e da pesca	1.553,29	0,005	1,373	-27,15%
9	Fabricação e refino de açúcar	273,86	0,005	1,105	-9,54%
10	Outros produtos alimentares	1.726,13	0,005	1,085	-7,84%
11	Fabricação de bebidas	417,23	0,005	1,037	-3,59%
12	Fabricação de produtos do fumo	83,37	0,005	1,074	-6,87%
13	Fabricação de produtos têxteis	430,18	0,008	1,044	-4,23%
14	Confecção de artefatos do vestuário e acessórios	521,56	0,008	1,025	-2,47%
15	Fabricação de calçados e de artefatos de couro	344,25	0,008	1,040	-3,88%
16	Fabricação de produtos da madeira	58,18	0,002	1,031	-2,96%
17	Fabricação de celulose, papel e produtos de papel	4.189,50	0,038	1,036	-3,51%
18	Impressão e reprodução de gravações	815,50	0,038	1,021	-2,10%
19	Refino de petróleo e coquerias	16.675,05	0,037	1,061	-5,73%
20	Fabricação de biocombustíveis	8.652,21	0,158	1,120	-10,73%
21	Fabricação de químicos orgânicos e inorgânicos, resinas e elastômeros	11.756,87	0,065	1,041	-3,94%
22	Fabricação de defensivos, desinfetantes, tintas e químicos diversos	5.613,42	0,064	1,039	-3,76%
23	Fabricação de produtos de limpeza, cosméticos/perfumaria e higiene pessoal	3.189,51	0,064	1,061	-5,78%
24	Fabricação de produtos farmoquímicos e farmacêuticos	4.846,56	0,064	1,028	-2,70%
25	Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	215,74	0,002	1,028	-2,73%
26	Fabricação de produtos de minerais não-metálicos	34.156,68	0,407	1,100	-9,11%
27	Produção de ferro-gusa/ferroligas, siderurgia e tubos de aço sem costura	43.528,00	0,290	1,083	-7,65%
28	Metalurgia de metais não-ferrosos e a fundição de metais	7.731,00	0,106	1,051	-4,84%
29	Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos	181,46	0,002	1,045	-4,31%
30	Fabricação de equipamentos de informática, produtos eletrônicos e ópticos	184,29	0,002	1,013	-1,30%
31	Fabricação de máquinas e equipamentos elétricos	142,29	0,002	1,030	-2,89%
32	Fabricação de máquinas e equipamentos mecânicos	230,15	0,002	1,028	-2,73%
33	Fabricação de automóveis, caminhões e ônibus, exceto peças	3.649,49	0,019	1,036	-3,51%

ID	Setor MIP	Emissões (Gg de CO₂e)	Intensidade de emissões (Kg de CO₂e/RS)	Índice de preços após tributação	Variação do produto, das emissões e do emprego (%)
34	Fabricação de peças e acessórios para veículos automotores	2.058,46	0,019	1,036	-3,52%
35	Fabricação de outros equipamentos de transporte, exceto veículos automotores	812,05	0,019	1,020	-1,98%
36	Fabricação de móveis e de produtos de indústrias diversas	133,90	0,002	1,023	-2,22%
37	Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos	61,57	0,001	1,020	-1,92%
38	Energia elétrica, gás natural e outras utilidades	12.041,00	0,037	1,027	-2,66%
39	Água, esgoto e gestão de resíduos	27.141,00	0,330	1,063	-5,93%
40	Construção	-	0,000	1,035	-3,40%
41	Comércio e reparação de veículos automotores e motocicletas	134,81	0,001	1,013	-1,27%
42	Comércio por atacado e a varejo, exceto veículos automotores	862,77	0,001	1,015	-1,53%
43	Transporte terrestre	87.708,35	0,220	1,068	-6,36%
44	Transporte aquaviário	5.067,48	0,220	1,058	-5,45%
45	Transporte aéreo	9.854,11	0,220	1,061	-5,72%
46	Armazenamento, atividades auxiliares dos transportes e correio	30.535,06	0,220	1,047	-4,51%
47	Alojamento	21,39	0,001	1,037	-3,58%
48	Alimentação	1.684,34	0,006	1,063	-5,89%
49	Edição e edição integrada à impressão	13,78	0,001	1,013	-1,29%
50	Atividades de televisão, rádio, cinema e gravação/edição de som e imagem	33,78	0,001	1,011	-1,05%
51	Telecomunicações	128,49	0,001	1,009	-0,93%
52	Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação	128,90	0,001	1,005	-0,52%
53	Intermediação financeira, seguros e previdência complementar	499,70	0,001	1,005	-0,49%
54	Atividades imobiliárias	492,57	0,001	1,002	-0,20%
55	Atividades jurídicas, contábeis, consultoria e sedes de empresas	176,02	0,001	1,006	-0,62%
56	Serviços de arquitetura, engenharia, testes/análises técnicas e P & D	48,42	0,001	1,009	-0,88%
57	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas	80,70	0,001	1,010	-1,00%
58	Aluguéis não-imobiliários e gestão de ativos de propriedade intelectual	37,33	0,001	1,010	-0,96%
59	Outras atividades administrativas e serviços complementares	201,50	0,001	1,010	-1,04%
60	Atividades de vigilância, segurança e investigação	33,18	0,001	1,004	-0,41%

ID	Setor MIP	Emissões (Gg de CO₂e)	Intensidade de emissões (Kg de CO₂e/R\$)	Índice de preços após tributação	Variação do produto, das emissões e do emprego (%)
61	Administração pública, defesa e seguridade social	661,19	0,001	1,009	-0,94%
62	Educação pública	270,32	0,001	1,007	-0,71%
63	Educação privada	110,44	0,001	1,008	-0,79%
64	Saúde pública	156,08	0,001	1,015	-1,44%
65	Saúde privada	466,39	0,002	1,012	-1,19%
66	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos	31,08	0,001	1,009	-0,85%
67	Organizações associativas e outros serviços pessoais	132,37	0,001	1,021	-2,01%
68	Serviços domésticos	-	0,000	1,000	0,00%

Fonte: elaboração do autor com base na Matriz de Insumo-Produto para o ano de 2018 (NEREUS, 2022) e no Relatório das Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa (5ª edição) (MCTI, 2020).

APÊNDICE E – *Link* de acesso ao código R e bases de dados.

<https://github.com/b-carbonari/TCC---Imposto-sobre-emiss-es>