

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA
MESTRADO EM ECONOMIA**

FRANCIELE APARECIDA CECATO

REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CO_2 : SUBSÍDIO OU TRIBUTO?

PONTA GROSSA

2024

FRANCIELE APARECIDA CECATO

REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CO_2 : SUBSÍDIO OU TRIBUTO?

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Economia, no Programa de Pós-Graduação em Economia, Setor de Ciências Sociais Aplicadas, da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Celso José Costa Júnior

PONTA GROSSA

2024

C387 Cecato, Franciele Aparecida
Redução da emissão de CO_2 : subsídio ou tributo? / Franciele Aparecida
Cecato. Ponta Grossa, 2024.
46 f.

Dissertação (Mestrado em Economia - Área de Concentração: Economia),
Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Celso José Costa Júnior.

1. Mudanças climáticas. 2. Dsge. 3. Políticas fiscais. I. Costa Júnior, Celso
José. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Economia. III.T.

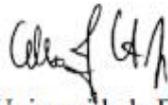
CDD: 330

FRANCIELE APARECIDA CECATO

REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CO2 SUBSÍDIO OU TRIBUTOS?

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Economia, da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora:

Ponta Grossa, 28 de março de 2024



Celso José Costa Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa



Diogo de Prince Mendonça - Universidade Federal de São Paulo

GARCIA CINTADO
ALEJANDRO
CAYETANO -
28733550H

Firmado digitalmente por
GARCIA CINTADO
ALEJANDRO CAYETANO -
28733550H
Fecha: 2024.04.02 18:11:23
+02'00'

Alejandro Cayetano Garcia Cintado - Universidade Pablo de Olavide/ Universidade Estadual de Ponta Grossa

AGRADECIMENTOS

Segundo o dicionário, agradecer significa compensar de maneira equivalente. Entretanto, escrever essas palavras em apenas uma única página não é uma maneira equivalente para agradecer a todos que me apoiaram durante essa caminhada, porém vou me esforçar.

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais, Atilio e Sandra, por todos os ensinamentos que levo pela vida, e pelo amor incondicional; sei que não importa quão longe eu esteja sempre estão comigo. Meu pai sendo meu anjo da guarda me olhando do céu, e minha mãe, aqui do meu lado, não me deixando desistir, acreditando mais em mim do que eu mesma. Eles me ensinaram que a fé é algo maravilhoso quando podemos vivenciá-la em nosso dia-a-dia e apesar das dificuldades da vida, é preciso amar a Deus pois Ele sempre está conosco.

À minha irmã Gisele e meu sobrinho Emanuel, por me amarem e suportarem todas as crises. Obrigada por sempre repetir que eu sou capaz de fazer as coisas quando eu sempre acho que não vou conseguir.

À minha amiga Rafaela e à minha prima Andréa, por estarem sempre ao meu lado, por escutarem as mesmas reclamações e histórias, mas mesmo assim terem paciência de ouvir uma vez mais. E a todos os amigos queridos que seria impossível nomear aqui, mas que me apoiam, que rezam, que torcem por mim e, mesmo de longe, estão sempre comigo.

Gostaria de agradecer também aos meus queridos professores do Departamento de Administração. Ao professor Osvaldo Malta Callegari, por ter dado o primeiro empurrão ao mestrado, pelas parcerias em artigos e demais trabalhos realizados, mas principalmente pela amizade construída ao longo desses anos. E ao professor Cesar Eduardo Abud Limas, pelos conselhos ofertados durante várias conversas entre as aulas e pela dedicação e amizade que tem com os alunos.

Aos meus queridos professores e funcionários do Departamento de Economia, pela acolhida, pela paciência e dedicação ao ensinar, por entenderem as dificuldades dos alunos e se esforçarem na tarefa de ensinar.

Aos meus queridos colegas de mestrado, uma turma pequena que teve desafios enormes, pessoais e acadêmicos, enfrentados durante este período.

Ao meu professor e orientador Celso José Costa Júnior, pela paciência comigo durante todo o processo de orientação, pelos conselhos e principalmente por acreditar que eu conseguiria desenvolver este trabalho. Espero que no futuro eu possa ser para os meus alunos o mesmo porto seguro que encontrei durante esse tempo. Muito obrigada!

Agradeço também à UEPG, uma instituição pela qual tenho um carinho muito especial, desde a minha graduação e agora com a finalização do meu mestrado. Acredito que a educação transforma a sociedade, e a universidade é um dos pilares para essa transformação.

À CAPES, pela bolsa recebida durante o período inicial do mestrado.

Muito obrigado a todos que contribuíram para essa conquista.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo analisar o impacto da aplicação de um imposto com características punitivas e do subsídio com a finalidade de incentivo sobre as emissões de carbono na economia, utilizando o modelo dinâmico estocástico de equilíbrio geral (DSGE) para a economia brasileira com dados anuais de 2001 a 2020. Os resultados mostram que a adoção dessas políticas fiscais é eficiente para a melhoria da qualidade ambiental e para as variáveis macroeconômicas. Dessa forma, torna-se vantajosa a aplicação dessas políticas.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas, DSGE, Políticas Fiscais

ABSTRACT

This work aims to analyze the impact of applying a tax with punitive characteristics and a subsidy with the purpose of incentive on carbon emissions in the economy, using the dynamic stochastic general equilibrium model (DSGE) for the Brazilian economy with annual data. from 2001 to 2020. The results show that the adoption of these fiscal policies is efficient for improving environmental quality and macroeconomic variables, thus making the application of these policies advantageous.

Keywords: Climate Change, DSGE, Fiscal Policies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Países que apresentam Imposto sobre Carbono.	14
Figura 2 – Evolução das variáveis observáveis – 2001 a 2020.	26
Figura 3 – Priori e Posteriori do modelo.	30
Figura 4 – Choque de produtividade.	31
Figura 5 – Choque nos gastos dos governos para o tratamento da poluição.	33
Figura 6 – Choque no preço do insumo verde. Fonte: elaborado pelo autor, 2023.	34
Figura 7 – Choque no subsídio para redução da emissão de CO_2	35
Figura 8 – Choque no imposto sobre a emissão de CO_2	36
Figura 9 – Séries temporais não observáveis geradas pelo modelo.	37
Figura 10 – Decomposição dos choques para a emissão de CO_2	39
Figura 11 – Decomposição dos choques para o insumo de qualidade ambiental superior, S.	39
Figura 12 – Decomposição dos choques para a qualidade ambiental.	40

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Emissão de <i>CO2</i> per capita do Brasil.....	11
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis observáveis do modelo.....	26
Tabela 2 – Parâmetros calibrados.....	28
Tabela 3– Distribuição posteriori do modelo.	29
Tabela 4 – Correlação entre as variáveis e os choques.....	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1	Imposto sobre as emissões de carbono	13
2.2	Subsídio sobre as emissões de carbono	15
2.3	Consumo e Desenvolvimento Sustentável	16
2.4	Modelos aplicados às questões ambientais	17
2.4.1	Modelo DSGE	18
3	MODELO	21
3.1	Família	21
3.2	Firmas	22
3.3	Governo	24
3.4	Setor Ambiental	25
4	ANÁLISE EMPÍRICA	26
4.1	Tratamento dos dados	26
4.2	Calibragem	27
4.3	Estimação	28
4.4	Resultados	30
4.4.1	Choque de produtividade	31
4.4.2	Choque nos gastos dos governos para o tratamento da poluição	32
4.4.3	Choque no preço do insumo verde	33
4.4.4	Choque no subsídio para redução da emissão de CO_2	34
4.4.5	Choque no imposto sobre a emissão de CO_2	35
4.4.6	Comportamento das séries não observáveis e correlação entre variáveis	36
4.4.7	Decomposição dos choques	38
5	CONCLUSÕES	41
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

A alteração climática é um dos grandes desafios que a humanidade precisará enfrentar nas próximas décadas. E essas mudanças repentinas do clima afetarão de maneira considerável a forma de consumo atual. Além disso, é necessário satisfazer as necessidades da população atual e futura. Com efeito, as atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis, a produção de energia, o desmatamento, as atividades industriais e o uso da terra são responsáveis pela emissão exacerbada de Gases do Efeito Estufa (GEE) na atmosfera (Molion, 2008).

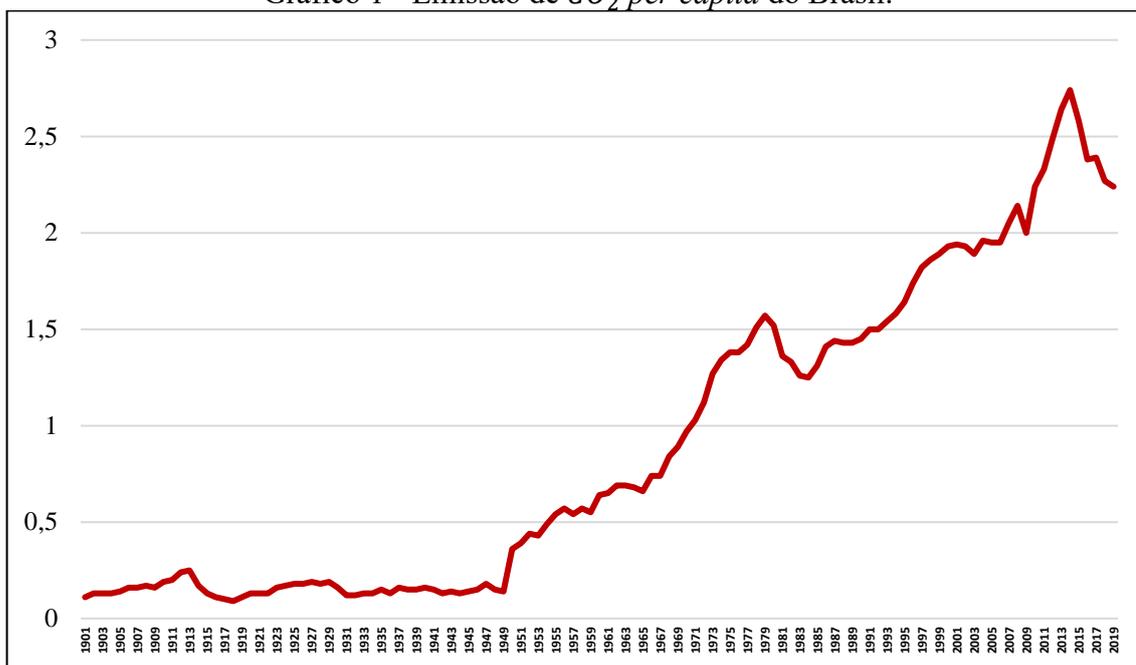
Considerando essas alterações climáticas e as consequências, este trabalho busca analisar o impacto da aplicação de um imposto com características punitivas e também de um subsídio com a finalidade de incentivo sobre as emissões de carbono na economia, utilizando um modelo dinâmico estocástico de equilíbrio geral (DSGE) para a economia brasileira.

Dado que as mudanças climáticas causam diversas alterações no clima, desencadeando problemas para a humanidade, Tirole (2020) apresenta alguns desses impactos: ilhas e cidades litorâneas serão afetadas pelo aumento no nível dos oceanos; instabilidade climática; períodos de intensas chuvas e secas extremas que afetarão as colheitas. Os prejuízos serão econômicos e geopolíticos resultando em ondas de migrações. Além disso, estudos publicados pelo Painel Intergovernamental sobre mudanças climáticas – IPCC (2018) – apontam outros riscos que estão relacionados a essa temática: riscos à saúde; dificuldade de promover meios de subsistência; falta de segurança alimentar e problemas com o abastecimento de água. Esses efeitos são causados por um aumento na temperatura média global de 1,5°C e se amplificam com um aumento de 2°C.

Os efeitos causados pelas mudanças climáticas podem impactar também o Sistema Financeiro Nacional (SFN). O Banco Central do Brasil divulgou, por meio do Relatório de Riscos e Oportunidades Sociais, Ambientais e Climáticas, quais eventos poderão ser observados. Entre eles, é possível citar: secas severas que podem causar incêndios, enchentes e temperaturas extremas que podem causar um alto risco na manutenção da estabilidade do SFN, devido ao aumento da inadimplência e diminuição dos valores dos ativos que pertencem às operações de crédito. Dessa forma, os preços relativos são afetados por esses choques climáticos, podendo assim modificar a demanda pela moeda, o valor dos bens físicos e, por fim, podem apresentar custos financeiros altos para a toda a sociedade (Banco Central do Brasil, 2022).

Todos esses desastres são causados pela emissão de CO_2 (dióxido de carbono), associada diretamente ao efeito estufa. Dentre os países que mais emitem GEE, estão: China, Estados Unidos e Índia. Esses países juntos são responsáveis pela emissão de 42,6% das emissões globais; já o Brasil é o sétimo nesse ranking (Friedrich, Ge e Pickens, 2023). Entre os setores que mais poluem no Brasil está o setor agropecuário, que em 2022 bateu novo recorde de emissão, um aumento de 3,02% em relação ao ano anterior. Considerando essas emissões por estados, Mato Grosso é responsável por 15% das emissões dentro desse setor (SEEG, 2023).

Analisando as emissões do Brasil ao longo dos anos, no gráfico 1, é visível a evolução das emissões provenientes de combustíveis fósseis de 1901 a 2019 no Brasil.

Gráfico 1 - Emissão de CO_2 per capita do Brasil.

Fonte: Adaptado de *Our World in Data* com base no *Global Carbon Project* (2022).

Trabalhos empíricos demonstram que o aumento no nível da atividade econômica contribui com o aumento de emissões de GEE; assim, é possível apontar uma relação entre PIB e CO_2 . Conforme o trabalho apresentado por Evangelista et al. (2020), que buscou identificar a relação entre PIB e a emissão de CO_2 nos países sul-americanos, os resultados demonstram que as atividades produtivas geram externalidades negativas para as futuras gerações pela incapacidade de os recursos ambientais se renovarem. Resumindo, o aumento no nível da atividade econômica afeta negativamente o meio ambiente.

Há um grande debate sobre as reduções de poluentes e a resposta no PIB, ou seja, a discussão envolve o *trade-off* entre crescimento econômico e desenvolvimento sustentável. Vários estudos buscam analisar meios e alternativas que possam contribuir para a redução das emissões sem prejudicar o crescimento econômico. Nessa perspectiva, apresentam planos de ações que reduzem as emissões por meio da Contribuição Determinada Nacionalmente (NDC, acrônimo em inglês). E o Brasil comprometeu-se em reduzir as emissões de GEE em 37% até 2025 e de 43% até 2030 em comparação com os níveis de emissões estimados para 2005 (Brasil, 2021).

Outra alternativa ao combate de emissão de dióxido de carbono é a migração do uso de energia não renovável (como petróleo, carvão e gás natural) para fontes de energia renováveis, visto serem consideradas inesgotáveis como a hídrica, a solar, a eólica, a biomassa, a geotérmica e a oceânica (EPE, 2023).

Também, a aplicação de uma política fiscal eficaz pode contribuir para a redução das emissões de gases poluentes. A taxação, por meio de um imposto aos poluidores e de subsídio aos não poluidores (sistema *feebate*), torna-se uma oportunidade de gestão da redução da emissão de CO_2 pelo ministério de finanças (FMI, 2019).

Dentre os estudos sobre essa temática, Li e Peng (2020) realizaram um estudo com foco na economia chinesa. Os resultados apresentados mostram que as duas alternativas (imposto e subsídio) apresentam reduções nas emissões de carbono e, assim sendo, melhoram a qualidade do ambiente, porém a resposta na variável econômica é diferente em cada uma das alternativas.

Outro estudo de grande impacto foi realizado por Nordhaus (1993), cujo modelo foi desenvolvido para apontar abordagens diferenciadas para a resolução das alterações climáticas, e assinala que o imposto com alíquota moderada sobre as emissões é uma alternativa eficiente.

Jorgenson e Wilcoxon (1993) mostram que o efeito de um imposto sobre as emissões de CO_2 , nos Estados Unidos, resulta em um aumento nos custos de energia elétrica e, dessa forma, impacta no produto nacional de forma negativa. No entanto, isso pode ser evitado se as receitas fiscais forem aplicadas para a redução nas taxas marginais de imposto nos demais setores.

Portanto, torna-se necessário compreender como a aplicação de um imposto sobre as emissões e de um subsídio com um propósito de redução dos gases poluentes podem auxiliar no desenvolvimento de políticas adequadas que promovam uma redução efetiva e significativa nas mudanças climáticas a longo prazo.

Os resultados deste trabalho apontam que as alternativas testadas da adoção de um imposto e do subsídio são ferramentas eficazes que beneficiam a parte econômica e também a parte ambiental, as duas alternativas conseguem atender aos objetivos de mitigação de poluentes. Sendo assim, é possível perceber que existem vantagens para adoção de tais políticas.

O trabalho está organizado da seguinte forma: esta primeira sessão engloba a introdução; na segunda, são discutidos os pontos do referencial teórico sobre imposto e subsídios na emissão de CO_2 , os conceitos de consumo e o desenvolvimento sustentável e os modelos aplicados a questões ambientais; na terceira sessão, são apresentados os procedimentos metodológicos com a explanação do modelo e, na quarta sessão, são discutidos os resultados. Por fim, são apresentadas as considerações finais.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Imposto sobre as emissões de carbono

A preocupação crescente por alternativas viáveis que tragam resultados satisfatórios na mitigação das emissões de gases poluentes tem levado os países a buscarem outras alternativas. Entre elas está a legislação do mercado de carbono, porém para isso é necessária a regulamentação e as definições da precificação desse item. Dentre as ferramentas e técnicas utilizadas para a precificação, pode-se citar a troca de Reduções Certificadas de Emissões, o imposto sobre as emissões de carbono e o financiamento a projetos denominados “limpos” (Vital, 2018).

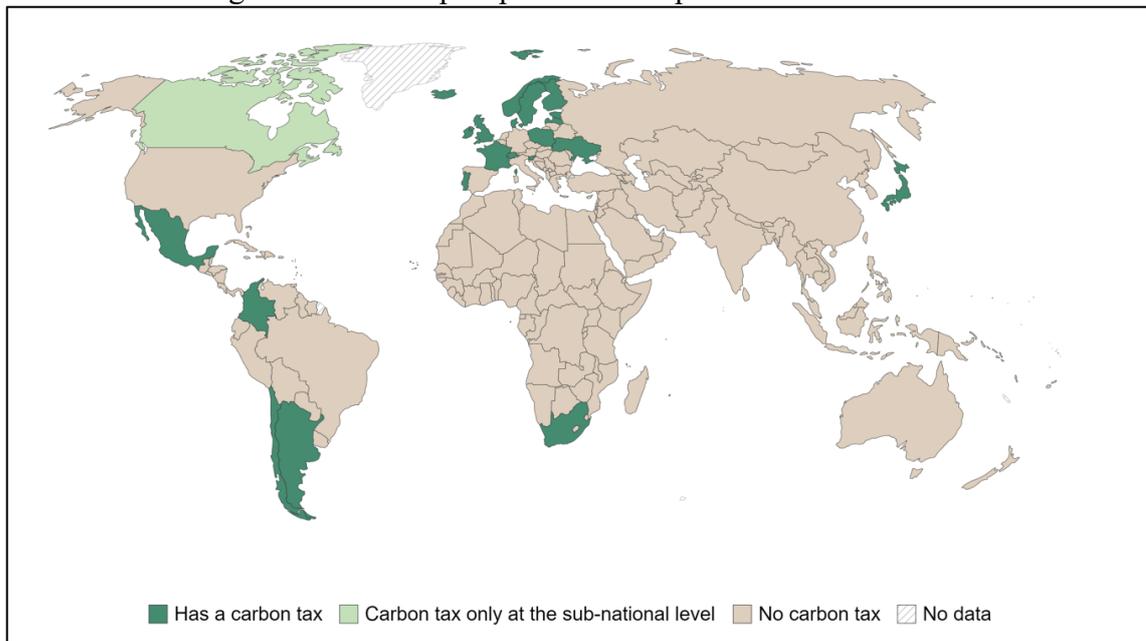
O preço é um dos instrumentos tradicionais para regular as externalidades como as resultantes das alterações climáticas; dessa forma, o governo é capaz de ajustar as externalidades negativas causadas pela emissão de GEE por meio da tributação. O preço aplicado nas emissões de carbono parte do pressuposto do poluidor pagador, e busca diminuir as emissões de carbono como um reflexo dos custos dos produtos e serviços. Podendo ser vista como um preço negativo (implícito ou explícito), essa precificação pode ser aplicada em um único setor ou de forma genérica para a economia, dependendo da agência reguladora (EPE, 2020).

Pela ótica da regulação Pigouviana, que defende que o imposto na forma punitiva, faz com que os agentes internalizem os efeitos externos que influenciam as decisões de consumo ou produção (Pigou, 1920). Reconhece-se a definição de imposto de carbono como o preço pago pelas emissões de carbono, considerando uma métrica, como exemplo US\$/tonelada de CO_2 (World Bank, 2016).

Esse instrumento de precificação por meio de um tributo é uma das alternativas mais fáceis de aplicabilidade, porém sua implementação, neste caso, pode enfrentar grandes desafios. O primeiro deles é a resistência política com a criação de um novo tributo, ressaltando assim a transparência e a comunicação adequada a esse instrumento fiscal. Além disso, os gastos com as receitas oriundas desse tributo devem ser utilizados para atender às questões de preservação ambiental, caso contrário poderia trazer dúvidas ao processo (EPE, 2020). Devido a essas questões de vantagens e desvantagens, os países devem escolher quais as formas mais adequadas de implementação viáveis.

Considerando o ano base de 2020, apenas 11,4% dos países (23 países) possuíam um imposto sobre o carbono. É possível verificar essa informação na figura 1 abaixo:

Figura 1 – Países que apresentam Imposto sobre Carbono.



Fonte: *Our World In Data* com base Dolphin e Xiahou - Banco de dados mundiais de precificação de carbono (2023).

Entende-se imposto nessa análise como um instrumento fiscal sobre as emissões de carbono se pelo menos um setor o tiver implementado no país (Our World in Data, 2023). Esse modelo de imposto que incide sobre cada tonelada emitida teve origem na década de 1990, nos seguintes países: Finlândia, Noruega, Dinamarca, Eslováquia, Polônia e Suécia. Já alguns países da América do Sul, como Chile e Colômbia, passaram a ter um imposto a partir de 2017 e a Argentina em 2018. Um dos últimos países a implementar essa forma de tributação foi a África do Sul em 2019.

Diversas pesquisas disponíveis procuram estudar qual o reflexo na economia, seja no consumo das famílias, ou das firmas e no próprio meio ambiente quando da aplicação de um imposto sobre as emissões de CO_2 . Dentre esses estudos, uma análise realizada por Lanz et al. (2018) procura, por meio da regulação Pigouviana, analisar o comportamento para além das repostas padronizadas que estão associadas aos preços relativos. Essa pesquisa busca quantificar a magnitude dos efeitos do comportamento por meio de um experimento sobre escolhas reais dos consumidores.

Com os resultados, os autores apontam que, ao fornecer informações sobre carbono na produção de determinados produtos, promove-se uma mudança para produtos considerados mais limpos, mostrando assim que existe uma preferência dos consumidores pelo bem público. Outro ponto analisado no estudo é que as crenças prévias dos consumidores podem ser influenciadas por crenças diferentes da realidade e o imposto pode influenciar na atualização das crenças dos consumidores, sendo um incentivo monetário que pode contribuir para a redução do esforço.

Outro estudo realizado por Leal et al (2015) analisa como as políticas ambientais respondem aos ciclos econômicos, através de um modelo RBC, que resultam em externalidades de poluição. Como principais resultados apresentados está a adoção de políticas restritivas justificadas por um custo de mitigação de emissões de carbono menor que os valores de poluição no país. Com uma política de mitigação pró-cíclica com um choque de produtividade,

tanto o imposto como o teto de emissões aumentam em períodos de expansão da economia e diminui em períodos de crise.

O trabalho de Chang (2020) apresenta como objetivo comparar as taxas ótimas de imposto sobre o carbono em ambientes não cooperativos e cooperativos, com vários choques econômicos. Examina também como um acordo ambiental internacional poderia contribuir para mitigar a degradação do ambiente com diferentes choques. Como resultados, o cenário não cooperativo apresenta uma taxa ideal de imposto que aumenta menos em resposta a uma produtividade total dos fatores positivas no país de origem e tem uma diminuição em resposta ao choque positivo nos preços da energia. A cooperação dos países não traduz em um choque de emissões menores.

2.2 Subsídio sobre as emissões de carbono

Além da política fiscal de implementação de um imposto que trabalha com o objetivo de punir a cadeia produtiva pelas emissões de GEE, outra alternativa é a adoção do método de subsídio que apoia ações com a produção mais limpa. A participação do governo na disponibilização de instrumentos que incentivem o processo de produção nacional para uma economia de baixo carbono é uma ferramenta essencial para redução das emissões.

As ações governamentais possuem diversas ferramentas que buscam formas de corrigir as falhas do mercado como: intervenções, fiscalizações, investimentos públicos e regulamentações e também incentivos à inovação. Essas ferramentas, em especial as intervenções, têm por finalidade a correção dos preços dos recursos, de forma a prevenir a escassez no futuro. Elas também criam incentivos que direcionam os corretos investimentos em inovação, capital humano, conhecimento e pesquisas que promovem o desenvolvimento (Meneguim, 2023). Dessa maneira, o subsídio funciona como uma ferramenta de incentivo que busca a redução das emissões.

Na aplicação de incentivos econômicos, é preciso analisar a legislação e quais objetivos se pretende alcançar, pois, com a diminuição da carga tributária para um determinado setor, outro setor terá aumento nos tributos. Na área ambiental, pode-se ter uma redução nos produtos de produção limpa e aumento da carga tributária para produtos de altas taxas de emissão de poluentes (Trigo e Vianna, 2015). Essas iniciativas buscam o equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e a preservação do ambiente.

Dentre os diversos trabalhos apresentados na área, temos o estudo realizado por Argentiero et al. (2018), cujo objetivo era avaliar a eficácia de uma estratégia abrangente para fontes de energia renováveis, aplicando o modelo DSGE, para a zona do Euro. O estudo apresenta um imposto para o carbono que irá financiar a política de fontes de energia renovável, sendo modelado em duas variantes: variante “A” um subsídio de incentivo à tecnologia ao capital do conhecimento, e a variante “B” um subsídio ao preço que impulsiona a procura. Comparando a relação de custo-eficácia dos incentivos à tecnologia e de atração da procura, os resultados do estudo demonstraram que a aplicação de uma política ambiental com base nos incentivos à tecnologia apresenta melhores efeitos dinâmicos do que as medidas de atração da procura, baseada em uma política de subsídios de melhor valor monetário.

Os autores Xu et al. (2020) consideraram que, em um ambiente com dois produtores e dois varejistas vendendo produtos exclusivos. Os produtos são classificados como bens substitutos. Os consumidores são subsidiados pelo governo quando compram produtos da cadeia produtiva com baixa produção de poluente (carbono); em caso contrário, impõem um

imposto. Os resultados apresentados por intermédio da análise de jogos tripartites mostram uma interação horizontal entre produtores e varejo. Outro ponto é que, com a intervenção do governo, nenhum dos tipos de interação horizontal tem efeito no bem-estar social. Apesar de a integração horizontal possibilitar alterações nos níveis ótimos de subsídio e de impostos, não apresenta efeito nas procuras de equilíbrio para os dois produtos.

2.3 Consumo e Desenvolvimento Sustentável

Diante desse processo de consumo influenciado por diversos fatores, é necessário o entendimento de que as atitudes humanas impactam no meio ambiente, e que essas ações podem causar a destruição da vida no planeta das próximas gerações; isso é fundamental para a consciência do consumo sustentável. Segundo a definição apresentada pelo Ministério do Meio Ambiente (2023), o consumo sustentável considera a seleção dos produtos que levam em conta menores quantidades de recursos naturais no processo produtivo, sendo de fácil reaproveitamento ou reciclagem. O consumo sustentável avalia se as escolhas de compra serão conscientes e responsáveis, compreendendo que nosso consumo trará consequências ambientais e sociais, sejam elas positivas ou negativas.

O consumidor tem um papel mais ativo no consumo sustentável, visto que possui uma racionalidade fundamentada em princípios éticos nas dimensões social e ambiental. Esse consumidor procura ter mais acesso à informação da cadeia produtiva de bens e serviços prestados e, durante a decisão de consumo, levará em conta os aspectos ecológicos envolvidos, avaliando e refletindo sobre os custos sociais e os impactos ambientais (Cruz, 2016).

O consumo sustentável apresenta vantagens não apenas aos consumidores, mas também às empresas, como a redução das implicações no âmbito social, comunitário, econômico e social, a redução dos custos devido à economia dos recursos e o estímulo à inovação. Com a desestimulação do desperdício, as empresas preocupam-se com o desenvolvimento de soluções com melhor qualidade e mais duráveis. Além dessas vantagens, a empresa passa a pensar em uma gama de práticas com o objetivo de impactar positivamente a comunidade. E isso promove outros benefícios à organização: a geração de novas oportunidades de negócio, o aumento da visibilidade da marca, o desenvolvimento de uma imagem positiva no mercado de atuação, a adoção de uma conduta regeneradora para com o meio ambiente, a redução dos custos e a elevação das receitas (SEBRAE, 2023).

A preocupação com a maneira como se consome e o que se deixará para as gerações futuras foi discutido pela ECO 92 (RIO 92), uma conferência em âmbito internacional organizada pelas Nações Unidas, na cidade do Rio de Janeiro, em junho de 1992. Esse evento reuniu 178 países que puderam discutir sobre questões ambientais e as primeiras noções de desenvolvimento sustentável (Seno, 2023). Conforme definição apresentada pelo Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS), o desenvolvimento sustentável é eficaz para suprir as necessidades da geração atual e futura, pois foca na qualidade ao invés de quantidade, com a aplicação de matéria prima provenientes de fontes limpas e verdes e também a aplicação de ferramentas que ajudam na mitigação e na compensação e a aplicação da reutilização e reciclagem durante todo o processo (CEBDS, 2023).

Buscando alternativas de promover o Desenvolvimento Sustentável no âmbito internacional no ano de 2015, os países membros da ONU (Organização das Nações Unidas) adotaram os objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), por meio do documento Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, que

propõe ações para acabar com a pobreza, proteção do planeta e garantir até 2030 que as pessoas possam usufruir de paz e prosperidade. Todos os 17 objetivos estão integrados, já que uma ação realizada em determinada área afeta as demais; destaca-se também que o desenvolvimento deve proporcionar o equilíbrio entre sustentabilidade social, econômica e ambiental (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento [PNUD], 2023).

Dentre os objetivos assumidos, podem-se destacar dois associados diretamente ao consumo e desenvolvimento sustentável:

1. Objetivo 11 - CIDADES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS: Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis.
2. Objetivo 12 – CONSUMO E PRODUÇÃO RESPONSÁVEL: Garantir padrões sustentáveis de consumo e produção (ONU, 2023).

Com a elaboração desses objetivos, torna-se necessário o acompanhamento e a evolução de cada um deles para o atingimento da meta até 2030. Dessa forma, cada objetivo apresenta inúmeros objetivos secundários e vários indicadores que devem ser medidos e acompanhados.

2.4 Modelos aplicados às questões ambientais

As mudanças climáticas trazem grandes desafios justamente por apresentar uma complexidade e níveis de vulnerabilidade nos sistemas sociais, econômicos e ecológicos. Vale ressaltar que as respostas possíveis a essas alterações do clima sofrem restrições de capital financeiro e humano; sendo assim, é inevitável planejamento em planos de adaptação (PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS, 1998).

Conforme citado por Moraes e Ferreira Filho (2013), os estudos iniciais sobre mudanças climáticas foram realizados por Jorgenson e Wilcoxon (1990) e Nordhaus (1992; 1993; 1994). Nesses estudos, as políticas adotadas são para a resolução do problema de acumulação de gases do efeito estufa. Porém esses trabalhos apresentavam um atraso nas medidas inibidoras das emissões dos gases e, por consequência, uma estabilização das emissões. Contudo, essas pesquisas contribuíram ao apontar os custos econômicos com as opções nas restrições das emissões, era necessário o desenvolvimento de ações mais complexas e uma revisão das tecnologias aplicadas.

Outros estudos realizados na década de 1990 apresentam outra relação econômica e ambiental: a Curva Ambiental de Kuznets (CAK), uma metodologia que estuda a relação entre as emissões e a renda no formato de U invertido. Em um nível inicial, o crescimento econômico, a renda e as emissões apresentam uma relação direta. Com o passar do tempo e o aumento da renda, as emissões passam a apresentar uma trajetória contrária, neste caso decrescente; esse movimento ocorre, pois, com um nível maior de renda, as pessoas passam a buscar um crescimento que está associado a uma menor degradação do meio ambiente (Ávila e Diniz, 2015). Após as pesquisas iniciais, a partir da década de 1990, essa técnica foi aplicada a inúmeros poluentes diferentes, devido à crescente disponibilização de bancos de dados. Outro ponto que pode ser destacado é a crítica apresentada por De Bruyn (2000). O autor aponta que as estimações realizadas por essa técnica são sensíveis ao tipo de poluente que está sendo analisado, o ponto de inflexão e os coeficientes são sensíveis à forma e ao tipo de modelo adotado na análise.

Com a evolução dos modelos inicialmente aplicados, passou-se a utilizar a metodologia de Equilíbrio Geral Computável (CGE). Nesse modelo é apresentada uma visão

microeconômica por meio de uma percepção de política de mitigação que trata das questões econômicas e ambientais.

Considerando o modelo com a percepção microeconômica, está a Análise de Avaliação Integrada (IAM), que engloba os modelos de Equilíbrio Geral Computável (CGE). Essa metodologia vem sendo aplicada nos estudos ambientais e, com integração das áreas de estudo em ciências naturais e sócias, procura resolver as questões de mudanças climáticas que envolve a geofísica e a economia. Essa abordagem IAM incorpora em seus estudos o conhecimento de várias áreas em uma única estrutura, conectando diferentes setores para o desenvolvimento de sistemas mais complexos (Nordhaus, 2013).

Passando dos aspectos microeconômicos para as análises macroeconômicas, alguns trabalhos passaram a utilizar os modelos DSGE (Equilíbrio Geral Dinâmico Estocástico). Essa técnica supera alguns pontos de limitação da estrutura anterior do modelo CGE. Dentre essas vantagens, a capacidade de serem dinâmicos e recursivos, dessa forma permitindo incorporar ao modelo as expectativas racionais e também a adequação à Crítica de Lucas (Leal, 2014).

O modelo DSGE é um modelo microfundamentado, que considera os consumidores e as firmas (empresas) sujeitos às restrições físicas e financeiras, sendo considerado um horizonte de tempo infinito. Desse modo, testa a sensibilidade da economia com relação a diversos choques, por meio da mecanismos que facilitam a calibração e a previsão de elementos agregados (De Souza, 2016). Para melhor entendimento e discussão dos elementos primordiais que cada modelo considera, a próxima seção tratará de modelos pontuais, ressaltando as contribuições de cada um.

2.4.1 Modelo DSGE

Na década de 1980, houve um grande avanço tecnológico que possibilitou a aplicação do modelo DSGE, método advindo dos estudos dos modelos RBC, de equilíbrio geral e possui uma base teórica microfundamentada. Para os autores Villaverde e Quintana (2020), esse modelo prioriza uma descrição transparente de todos os pontos que podem ser destacados no modelo, como: preferências, tecnologia, informações pertinentes dos agentes, análises das consequências dinâmicas causadas pelos choques estocásticos, atenção às interações de equilíbrio geral, relevâncias de primeira ordem da avaliação quantitativa das propriedades, incluindo também o ajuste dos dados e uma avaliação quantitativa de suas implicações. Como se pode ver, esse modelo macroeconômico apresenta diversos elementos, conforme citado anteriormente, e isso torna possível testar a sensibilidade da economia quanto aos choques por meio de uma calibração, e também uma previsão dos elementos agregados (De Souza, 2016).

O uso dessa metodologia atualmente é muito amplo e diversificado, podendo incluir preços totalmente flexíveis ou com rigidezes nominais, família representativa com famílias e empresas heterogêneas, outros modelos com agentes de vida infinita e com aqueles que vivem finitamente, existem modelos com mercados financeiros ou com fricções financeiras e mercados incompletos (Villaverde e Quintana, 2020), além de outras aplicações. Atualmente as questões climáticas passaram a dominar as discussões e alguns estudiosos buscam entender os impactos para a economia e a sociedade, com a aplicação da metodologia do DSGE, por possuir efeitos dinâmicos, que permitem incluir as políticas ambientais e, dessa forma, a construção de simulações que incluem incertezas e diversos choques ao mesmo tempo (Farmer et al, 2015).

Para a análise de questões climáticas, podem-se utilizar duas temáticas aplicadas ao DSGE: os modelos de RBC e a aplicação em um formato dos Novos Keynesiano (NK) com alguma forma de rigidez nominal. Nesse primeiro modelo (RBC), temos um agente

representativo que irá otimizar: consumo, lazer e investimento. Tem-se a empresa também representativa que otimiza: insumos, capital e trabalho, os ciclos são gerados por choques exógenos e contínuos à produtividade total dos fatores. Com isso, os choques reais afetam os retornos desses fatores de produção e dos preços no equilíbrio geral, e os consumidores e as empresas dão uma resposta racional para as mudanças cíclicas (Heutel e Fischer, 2013). Dentre os trabalhos de relevância nessa área, é possível citar: Angelopoulos et al. (2010), Fischer e Springborn (2011), Heutel (2012) e Fried et al. (2013), e cada um desses trabalhos incluiu a poluição, que foi modelada de forma diferente.

Mais recentemente outros estudos foram realizados com base na temática das questões climáticas. Dentre os trabalhos publicados, Chan e Zhao (2019) analisam a importância das fricções financeiras nas emissões de CO_2 para os Estados Unidos, por meio da aplicação de um modelo DSGE ambiental, que incluiu as fricções financeiras e choques de risco. Os principais resultados são que os mercados financeiros impactam de forma significativa e não linear as emissões de CO_2 ; além disso, as fricções financeiras duplicam as mudanças das emissões quando existem choques positivos no fator total de produtividade. Da mesma forma, nas despesas do governo, os choques de riscos geram ações contrafactuais que replicam os movimentos de crescimento das emissões, os choques de risco contribuem para o crescimento das emissões, atingindo um pico de 50% após cada evento de recessão. Convém evidenciar que a resposta ótima para um imposto sobre o carbono depende principalmente da regra de Taylor.

O relatório *Perspectivas Econômicas Regionais: América Latina e Caribe (2021)*, divulgado pelo FMI, aplicou também a metodologia DSGE. No estudo é considerada a natureza estocástica dos choques de desastres naturais, permitindo assim choques extremos, esse modelo inclui uma série de fricções reais e financeiras que se assemelham às dos países do Caribe e da América Central. No modelo estão incluídas as famílias, firmas, governo e setor externo, os desastres naturais são exógenos, a política fiscal está ancorada na regra da dívida e não segue o processo de otimização. Entre os resultados de destaque no relatório sobre as medidas de mitigação que podem contribuir para as metas climáticas dessa região, estão as contribuições nacionalmente determinadas (NDC), que incluem cinco medidas: a eliminação gradual dos subsídios aos combustíveis fósseis, aumento do imposto sobre o carbono e a adoção do sistema *feebate*, sistemas de negociação de emissões, adoção de regulações mais favoráveis ao meio ambiente e maiores investimentos em pesquisas e desenvolvimento de projetos mais limpos (FMI, 2021).

Com a aplicação de um formato baseado na estrutura dos NK, Galí (2015) discorre sobre o modelo adotado por essa metodologia: competição monopolística. Sendo assim, os preços e salários serão fixados pelos agentes econômicos provados que buscam a maximização dos seus objetivos, rigidez nominal, estando as empresas sujeitas a restrições relacionadas ao ajuste dos preços dos bens e os trabalhadores sujeitos à rigidez dos salários. Finalmente, a não neutralidade de curto prazo da política monetária, devido à rigidez nominal adotada, é resultado das taxas de juros nominais que sofreram mudanças de curto prazo não sendo compensadas por uma inflação esperada. O resultado é uma variação da taxa de juro real, causando mudanças no consumo e no investimento e por consequência na produção dos empregos pelas firmas. Em longo prazo, os preços e salários irão se ajustar e voltam para o equilíbrio.

Em um estudo aplicado por Valli e Carvalho (2010), essa metodologia modela a política fiscal. Buscando a meta para o saldo primário que resulta na estabilização entre dívida e PIB para a economia aberta, as empresas empregam tanto o capital público como o privado na produção de bens. Considerando o modelo aplicado por Coenen et. al. (2008) e Christoffel et. al. (2008), calibrando esse modelo que foi aplicado inicialmente para o NAWN (Modelo Amplo

de Área do BCE) europeu para o Brasil, foram analisadas as implicações das políticas monetária e fiscal através da metodologia do DSGE. Os principais resultados e contribuições relevantes desse estudo são: (i) demonstrar que, em um cenário de expansão, um choque no excedente primário não equivale a um choque no consumo público, devido ao fato de o primeiro choque ser obtido por uma combinação de corte no consumo e no investimento do governo; ii) existe um impacto distinto na dinâmica do modelo derivado de cada um dos choques fiscais (superávit primário, governo investimento e transferências governamentais).

O modelo a ser desenvolvido neste trabalho segue uma abordagem baseada no trabalho de Li e Peng (2020), no qual, por meio do modelo desenvolvido para a China, o objetivo foi explorar os impactos resultantes da aplicação de um imposto e do subsídio sobre o carbono; esses impactos são apresentados na economia e no meio ambiente por meio da metodologia DSGE. Entre os principais resultados apresentados, estão: (i) tanto o imposto como a política adotada do subsídio contribuem para aumento dos esforços de redução pelas firmas, que reduzem as emissões em curto prazo e garantem uma melhora na qualidade ambiental em longo prazo; (ii) o imposto responde ao choque nas variáveis econômicas, diminuindo a produção, o consumo, o trabalho e fatores de produção verde e o subsídio responde ao choque de forma a aumentar essas variáveis econômicas e (iii) com a variação das taxas de imposto ou subsídio, há apenas pequenas flutuações nas variáveis econômicas e ambiental, mas não mudam a direção do impacto gerado.

No trabalho que será aqui desenvolvido são incorporadas questões da realidade brasileira, buscando avaliar qual dessas políticas (imposto ou subsídio) pode proporcionar equilíbrio, desenvolvimento econômico e a melhoria do ambiente para o Brasil.

3 MODELO

A pesquisa aqui proposta busca investigar o impacto econômico e ambiental do imposto sobre o carbono e da redução das emissões de carbono por i do subsídio, para o Brasil, entre o período de 2001 a 2020. Por intermédio da utilização de um modelo DSGE, será avaliado o comportamento das variáveis macroeconômicas durante os choques de produtividade, os gastos do governo para o tratamento da poluição, o preço do insumo verde, o subsídio e o imposto sobre as emissões.

A estrutura desse modelo é composta pelos seguintes setores: família, firma, governo e setor ambiental.

A família que está disponibilizando o trabalho e o capital para as empresas, possuem retorno do capital aplicado e o salário como renda, toma as decisões de consumo, trabalho e capital e busca maximizar a sua utilidade considerando a sua restrição orçamentária. A empresa adiciona a tecnologia, o capital, o trabalho, e os insumos de qualidade ambiental e qualidade ambiental superior¹, tendo custo de redução de emissão de carbono, imposto sobre as emissões de carbono para o governo, subsídios para a redução de emissão de carbono para maximizar o lucro. O governo busca equilibrar as suas contas e satisfazer a sua restrição orçamentária. E por fim o setor ambiental é impactado pela qualidade ambiental, afetada pela emissão de CO_2 e pelo gasto do governo no controle do meio ambiente.

O modelo retratado apresenta famílias e firmas representativas e que compõem a economia; de forma intertemporalmente as famílias decidem entre o consumo presente e futuro, podendo assim poupar adquirindo bens de capital. As famílias ofertam trabalho L , e capital K , recebendo das firmas salários (W) e retorno pelo uso do capital (R^K). As empresas (firmas) utilizam esses insumos na produção de bens, as firmas pagam os impostos pela emissão de gás carbônico (CO_2), e recebem os subsídios do governo como incentivo pela diminuição das emissões de CO_2 .

Este estudo utilizou como base o trabalho desenvolvido pelos autores Li e Peng (2020), conforme apresentado anteriormente. Porém, o estudo aqui retratado levou em consideração alguns elementos que o diferencia do estudo base (apresentado durante a descrição de cada setor do modelo).

3.1 Família

Há um *continuum* de famílias indexadas por $j \in [0,1]$. Essa família representativa maximiza a sua utilidade intertemporal, escolhendo consumo, poupança e lazer:

$$Max_{(C_t, L_t, K_t)} E_t \sum_{t=0}^{\infty} \beta \left[\frac{\bar{C}_t^{1-\sigma}}{1-\sigma} - \frac{L_t^{1+\varphi}}{1+\varphi} \right] \quad (3.1)$$

¹ Entende-se neste trabalho como insumos de qualidade ambiental superior, as matérias primas geradas por um processo de produção em que haja o manejo sustentável, o respeito aos critérios de cuidado com o meio ambiente e social e a garantia da renovação natural do ecossistema. Pode-se citar como exemplo: o manejo sustentável de florestas, a eliminação de produtos tóxicos, a diminuição de resíduos gerados na produção, o uso de material reciclável entre outras iniciativas. (SEBRAE, 2013).

com

$$\bar{C}_t = \left[\theta^{\frac{1}{\mu}} C_t^{\frac{\mu-1}{\mu}} + (1-\theta)^{\frac{1}{\mu}} Q_t^{\frac{\mu-1}{\mu}} \right]^{\frac{\mu}{\mu-1}} \quad (3.2)$$

A família está sujeita à restrição orçamentária

$$C_t + I_t = R_t^k K_t + W_t L_t - T_t \quad (3.3)$$

com a lei de movimento de capital

$$K_{t+1} = (1 - \delta) K_t + I_t \quad (3.4)$$

onde, E_t é o operador de expectativas, β é o fator de desconto intertemporal, σ é o parâmetro de aversão ao risco relativo e φ é a desutilização marginal do trabalho, $\delta \in (0,1)$ é a taxa de depreciação do capital, θ é a participação do bem de qualidade ambiental normal no consumo agregado, e μ a elasticidade de substituição entre o bem de qualidade ambiental normal e de qualidade ambiental superior. K é o estoque de capital, cuja remuneração é R^k , L é a quantidade de horas trabalhadas com nível de salários W , I é o bem de investimento, T é um imposto *lump-sum*, \bar{C}_t é o consumo agregado da família – composto por consumo de bens de qualidade ambiental normal C , e a qualidade ambiental superior, Q_t – envolve questões que estão relacionadas com características da qualidade da água, do ar, espaços abertos disponíveis, e os impactos causados pelos efeitos visuais nas área construídas que podem afetar a saúde física e mental das populações (EEA, 1997). Em outras palavras, a qualidade ambiental é o conjunto de fatores que envolve o uso dos recursos naturais de forma adequada ligado à qualidade de vida, pois existe uma interação e equilíbrio entre o meio ambiente e as atividades humanas (Machado, 1997).

Em relação ao trabalho proposto por Li e Peng (2020), o estudo aqui desenvolvido considera a qualidade ambiental dentro do consumo agregado da família; assim sendo, a família pode escolher por um bem de qualidade ambiental normal e um bem de qualidade ambiental superior. Além desse ponto, é incorporado à restrição orçamentária um imposto *lump-sum*, que contribui para o equilíbrio orçamentário do governo.

Dessa forma, o problema das famílias possui as seguintes condições de primeira ordem:

$$C_t^\sigma \left(\frac{1}{\theta} \frac{C_t}{\bar{C}_t} \right)^{\frac{1}{\mu}} L_t^\varphi = W_t \quad (3.5)$$

e

$$\frac{L_t^\varphi}{W_t} = \beta E_t \left\{ \left(\frac{L_{t+1}^\varphi}{W_{t+1}} \right) [(1 - \delta) + R_{t+1}^k] \right\} \quad (3.6)$$

As equações (3.5) e (3.6) representam a oferta de trabalho e a equação de Euler, respectivamente.

3.2 Firms

As firmas buscam maximizar o seu lucro, em uma estrutura de concorrência perfeita, escolhendo o insumo capital de qualidade ambiental normal, K , o insumo capital de qualidade ambiental superior, S , o insumo trabalho, L , o esforço de redução da emissão de CO_2 , ER . Esse esforço incorre em custos para a firma, ERC ; além disso, as firmas podem receber incentivos do governo para a promoção de uma produção mais limpa, para isso recebe um subsídio, SUB . Por fim, a firma poderá ser punida pela emissão exacerbada de poluentes (X) por intermédio de um imposto aqui representado pela alíquota τ .

$$Max_{(K_t, L_t, ER_t, S_t)} Y_t - W_t L_t - R_t^K K_t - P_t^S S_t - ERC_t + SUB_t - \tau_t X_t \quad (3.7)$$

sujeita à seguinte tecnologia

$$Y_t = A_t Q_t \bar{K}_t^\alpha L_t^{1-\alpha} \quad (3.8)$$

com,

$$\bar{K}_t = \left[\xi^{\frac{1}{\gamma}} K_t^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} + (1-\xi)^{\frac{1}{\gamma}} S_t^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (3.9)$$

onde, Y_t é a produção da empresa, \bar{K}_t é o insumo capital agregado, α e $1 - \alpha$ representam as participações dos insumos capital e trabalho na produção, respectivamente. Diferentemente do procedimento adotado por Li e Peng (2020), o insumo de qualidade ambiental superior está incorporado dentro do insumo agregado da firma, e o bem de qualidade ambiental superior afeta a função de produção.

Fica definido ξ como a participação do capital de qualidade ambiental normal no estoque de capital agregado e γ a elasticidade de substituição entre os capitais de qualidade normal e superior. Por fim, A_t é o nível de tecnologia da firma, com a seguinte lei de movimento:

$$\ln A_t = \rho_A \ln A_{t-1} + \varepsilon_{A,t} \quad (3.10)$$

onde ρ_A é o componente autorregressivo desse choque e $\varepsilon_{A,t} \sim N(0, \sigma_A)$.

Com objetivo de mitigar as emissões de CO_2 das firmas, o governo oferece um subsídio proporcional ao esforço de redução das emissões de CO_2 . Esse comportamento é descrito pela seguinte regra:

$$SUB_t = \psi_t \kappa ER_t Y_t \quad (3.11)$$

onde SUB_t é o subsídio oferecido às firmas pelo governo, ψ_t é a alíquota desse subsídio, κ representa o coeficiente de emissão de carbono por unidade de produto e ER_t é o esforço praticado pelas firmas para a redução das emissões de CO_2 . A emissão de CO_2 no processo produtivo pode ser representada pela variável X_t , descrita como:

$$X_t = \kappa Y_t (1 - ER_t) \quad (3.12)$$

Também existe um custo de redução das emissões de CO_2 , ERC_t ,

$$ERC_t = \chi_1 ER_t^{\chi_2} Y_t \quad (3.13)$$

onde o parâmetro $\chi_1 > 0$ é um padrão de escala, e $\chi_2 > 1$ determina a elasticidade do custo de redução das emissões de CO_2 em relação ao esforço desse comportamento. Com $\chi_2 > 1$, o custo de abatimento é convexo, portanto o abatimento marginal é crescente no esforço de redução. Isso serve como incentivo para a firma no esforço de redução ao longo de vários períodos.

Por fim, assume-se que o mercado de produção de insumos de qualidade ambiental superior é exógeno. Nesse caso, houve a opção pela escolha de um insumo exógeno sem perda de generalidades. Assim, o seu preço é representado por:

$$\ln P_t^S = \rho_{PS} \ln P_{t-1}^S + \varepsilon_{PS,t} \quad (3.14)$$

onde ρ_{PS} é um componente autorregressivo desse choque e $\varepsilon_{PS,t} \sim N(0, \sigma_A)$.

Portanto, esse problema da firma leva às seguintes condições de primeira ordem:

$$L_t = (1 - \alpha) \frac{Y_t}{w_t} \quad (3.15)$$

$$K_t = \xi \left(\frac{\alpha Y_t}{R_t^k} \right)^\gamma \bar{K}_t^{1-\gamma} \quad (3.16)$$

$$S_t = (1 - \xi) \left(\frac{\alpha Y_t}{P_t^S} \right)^\gamma \bar{K}_t^{1-\gamma} \quad (3.17)$$

$$ER_t = \left[\frac{\kappa(\tau_t + \psi_t)}{\chi_1 \chi_2} \right]^{\frac{1}{\chi_2 - 1}} \quad (3.18)$$

3.3 Governo

O governo deste modelo tem um comportamento de manter o equilíbrio fiscal em cada período, uma vez que não pode financiar gastos por emissão de dívida nem por emissão de moeda. Por um lado, o governo tributa as emissões de CO_2 com o objetivo de aumentar o custo da produção poluente. Por outro lado, oferece um subsídio às firmas que buscam reduzir as emissões de CO_2 . Assim, o equilíbrio orçamentário do governo é:

$$\tau_t X_t + T_t = SUB_t + G_t \quad (3.19)$$

onde G_t representa os gastos dos governos para o tratamento da poluição. Essas políticas fiscais seguem a mesma lei de movimento:

$$\ln G_t = \rho_G \ln G_t + \varepsilon_{G,t} \quad (3.20)$$

$$\ln \tau_t = \rho_\tau \ln \tau_{t-1} + \varepsilon_{\tau,t} \quad (3.21)$$

$$\ln\psi_t = \rho_\psi \ln\psi_{t-1} + \varepsilon_{\psi,t} \quad (3.22)$$

onde ρ_G , ρ_τ e ρ_ψ são os componentes autorregressivos desses choques e $\varepsilon_{G,t} \sim N(0, \sigma_G)$, $\varepsilon_{\tau,t} \sim N(0, \sigma_\tau)$ e $\varepsilon_{\psi,t} \sim N(0, \sigma_\psi)$.

3.4 Setor Ambiental

Neste modelo, a qualidade ambiental está diretamente relacionada com as emissões de CO_2 das firmas e com o tratamento ambiental do governo, representada pela seguinte relação:

$$Q_t = \rho_Q Q_{t-1} + (1 - \rho_Q) (\kappa_X X_t + \kappa_G G_{t-1}) \quad (3.23)$$

onde ρ_Q é o parâmetro de suavização nas alterações na qualidade do meio ambiente, $\kappa_X < 0$ e $\kappa_G > 0$ são os parâmetros de sensibilidade da qualidade ambiental em relação à emissão de CO_2 e em relação ao gasto público no tratamento do meio ambiente, respectivamente.

4 ANÁLISE EMPÍRICA

4.1 Tratamento dos dados

A base de dados usada no modelo é composta por dados anuais de 2001 até 2020 e estão descritas na tabela 1. Quando necessário, os dados foram tratados para retirar as tendências e as sazonalidades das séries – por meio do algoritmo X12-ARIMA e da diferença dos logaritmos, respectivamente.

Tabela 1 – Variáveis observáveis do modelo.

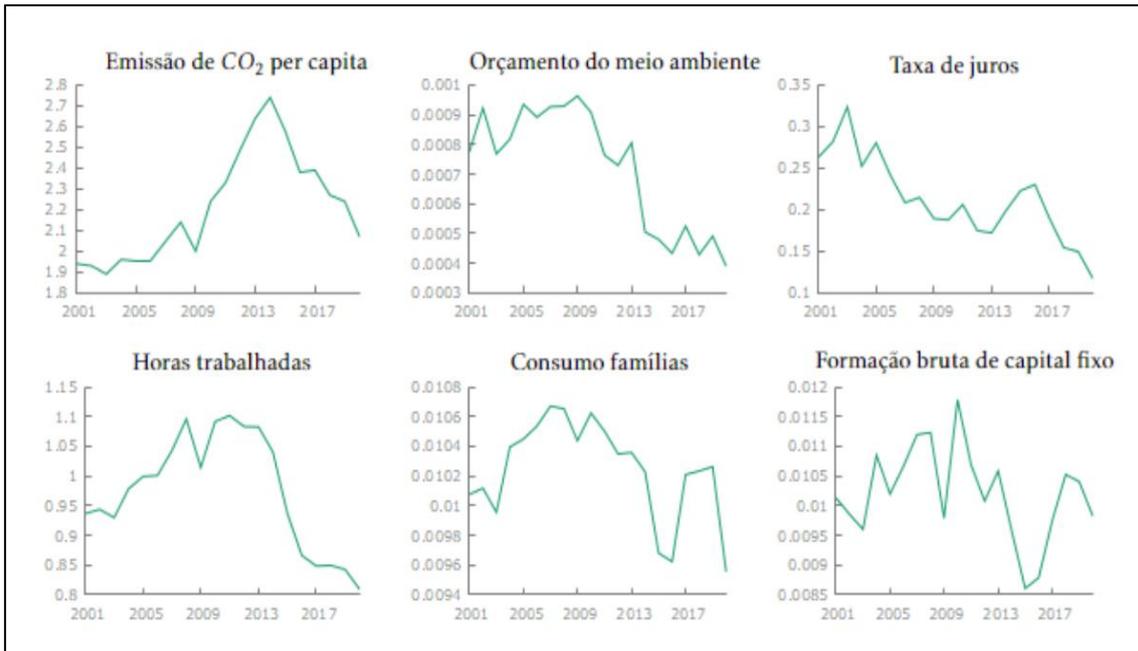
Séries	Fonte
Emissões de CO_2 <i>per capita</i>	<i>Our World in Data</i> com base
Orçamento do Meio Ambiente – em proporção do PIB	SIOP
Taxa de juros – Over/Selic – acumulada no mês – (% a.a.)	Bacen/Boletim/M. Finan
Horas trabalhadas – indústria – índice dessazonalizado (média 2006 = 100)	CNI
Consumo famílias – variação real anual – (% a.a.)	IBGE/SCN Anual
Formação bruta de capital fixo – variação real anual – (% a.a.)	IBGE/SCN Anual

Fonte: elaborado pelo autor, 2023.

É possível analisar a evolução das variáveis observáveis do modelo durante o período citado de acordo com a figura 2. Dentre as variáveis apresentadas, pode-se verificar a queda acentuada do orçamento do meio ambiente, entre o período de 2016 a 2019, em que o orçamento do ministério apresentava média de R\$ 811 milhões em 2020, e o valor passou para R\$ 562 milhões, e R\$ 534 milhões no ano seguinte. Como exemplo, os recursos disponíveis ao IBAMA sofreram uma redução de 40,4% no ICMBio (Agência Câmara de Notícias, 2020).

A política ambiental de um país é baseada no esforço de todos os setores econômicos, envolvendo a União, os Estados e os Municípios, além do setor privado e da sociedade. No entanto, todo o desempenho da política ambiental depende dos recursos arrecadados pelo Estado; a propósito, os cortes de recursos realizados a partir de 2014 levaram à indisponibilidade de ações voltadas à preservação do meio ambiente e ao combate ao desmatamento (Freitas et al., 2022).

Figura 2 – Evolução das variáveis observáveis – 2001 a 2020.



Fonte: elaborado pelo autor, 2023.

4.2 Calibragem

Os parâmetros do modelo foram obtidos a partir de dois procedimentos diferentes. Na primeira abordagem, usou-se a calibração por meio da utilização das contas nacionais e de valores de outros trabalhos. Na segunda abordagem, foi aplicada a técnica de estimação bayesiana. A tabela 2 apresenta os valores de cada parâmetro após a calibração.

Os valores dos parâmetros $\frac{C_{SS}}{Y_{SS}}$ e $\frac{I_{SS}}{Y_{SS}}$, fatores de participação do consumo e investimento no produto, respectivamente, foram calibrados com base nas informações dos Sistema de Contas Nacionais.

Para os parâmetros que representam o coeficiente de emissão de carbono por unidade de produto (κ), e coeficientes escala de elasticidade de abatimento e de esforço de redução da emissão de CO_2 (χ_1 e χ_2), respectivamente, optou-se pela estratégia empírica de calibração dos parâmetros, de acordo com Li e Peng (2020).

σ é o parâmetro de aversão ao risco relativo, sendo calibrado a partir do trabalho de Galí (2008). O autor demonstra em seu estudo que, se o valor de $\sigma < 1$, existe um domínio do efeito de substituição na oferta de trabalho, que é derivado de um salário real mais alto em relação ao efeito negativo decorrente de uma menor utilidade marginal do consumo. Assim sendo, há um aumento do emprego, sendo o inverso verdadeiro quando $\sigma > 1$. Ao considerar $\sigma = 1$ o emprego persiste de forma inalterada diante da tecnologia empregada.

Tabela 2 – Parâmetros calibrados.

Parâmetro	Valor	Fonte
$\frac{C_{SS}}{Y_{SS}}$	0,82	IBGE/SCN Anual
$\frac{I_{SS}}{Y_{SS}}$	$1 - \frac{C_{SS}}{Y_{SS}} = 0,18$	IBGE/SCN Anual
κ	0,16	Li e Peng (2020)
χ_1	0,2	Li e Peng (2020)
χ_2	1,8	Li e Peng (2020)
σ	1	Galí (2008)
φ	1	Galí (2008)
α	0,39	Kanczuk (2002)

Fonte: elaborado pelo autor, 2023.

Outro parâmetro que também foi calibrado com base no mesmo autor foi φ . Neste estudo, $\varphi = 1$ representa que o custo marginal de uma unidade adicional de trabalho é igual ao benefício marginal.

O trabalho de Kanczuk (2002) foi utilizado para calibrar o parâmetro α .

4.3 Estimação

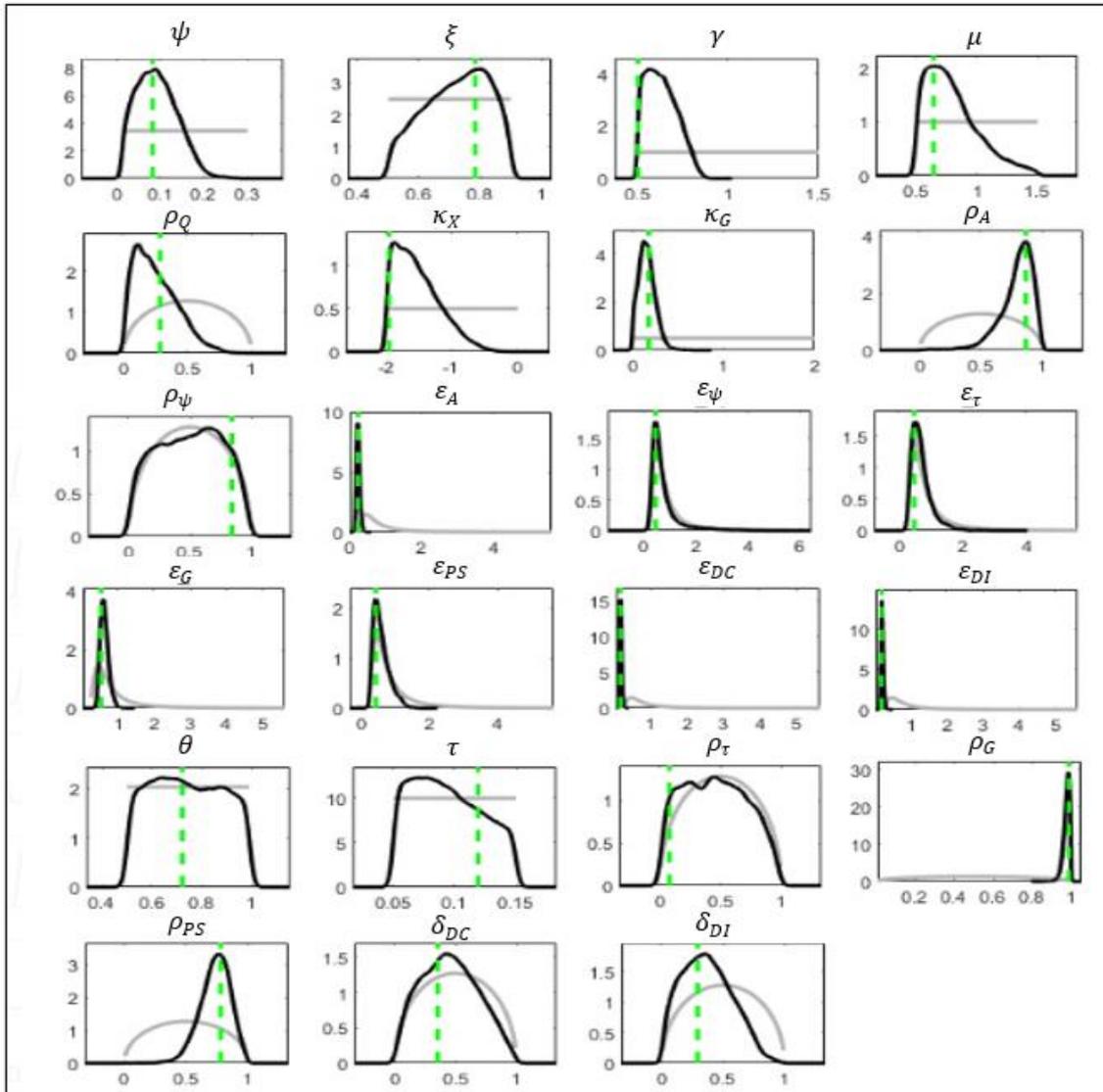
Dada a distribuição prior dos parâmetros, foi estimada a distribuição posterior, usando um processo de cadeia de Markov por meio do algoritmo Metropolis-Hastings com 1.000.000 iterações, um valor de escala de 0,1 e 2 cadeias paralelas. A tabela 3 e a figura 5 apresentam as distribuições *prior* e *posterior* de cada um dos parâmetros estimados.

Analisando a tabela 3 e a figura 3, pode-se verificar que os resultados apresentados da estimação foram satisfatórios, pois a distribuição posterior de todos os parâmetros ficou próxima a uma distribuição normal.

Tabela 3– Distribuição *posteriori* do modelo.

<i>Parâmetro</i>	<i>Média priori</i>	<i>Média posterior</i>	<i>90% Intervalo</i>		<i>Priori</i>	<i>pstdev</i>
Parâmetros Estruturais						
θ	0,745	0,7410	0,5232	0,9573	unif	0,1415
τ_{SS}	0,100	0,0944	0,0500	0,1349	unif	0,0289
ψ_{SS}	0,155	0,0911	0,0133	0,1565	unif	0,0837
ξ	0,700	0,7208	0,5663	0,8924	unif	0,1155
γ	1,000	0,6322	0,5001	0,7519	unif	0,2887
μ	1,000	0,7988	0,5000	1,1071	unif	0,2887
ρ_Q	0,500	0,2527	0,0109	0,4926	beta	0,2500
κ_X	-1,000	-1,5261	-2,000	-1,0358	unif	0,5774
κ_G	1,000	0,1588	0,0003	0,2755	unif	0,5774
Parâmetros autorregressivos						
ρ_A	0,500	0,7874	0,5987	0,9821	beta	0,2500
ρ_ψ	0,500	0,4949	0,0741	0,8872	beta	0,2500
ρ_τ	0,500	0,4576	0,0289	0,8279	beta	0,2500
ρ_G	0,500	0,9754	0,9536	0,9984	beta	0,2500
ρ_{PS}	0,500	0,7340	0,5390	0,9281	beta	0,2500
δ_{DC}	0,500	0,4537	0,0735	0,8136	beta	0,2500
δ_{DI}	0,500	0,3696	0,0369	0,6745	beta	0,2500
Desvios padrão						
ε_A	1,000	0,2425	0,1666	0,3154	invg	Inf
ε_ψ	1,000	0,7484	0,2171	1,3600	invg	Inf
ε_τ	1,000	0,6972	0,2727	1,1201	invg	Inf
ε_G	1,000	0,6272	0,4471	0,8048	invg	Inf
ε_{PS}	1,000	0,5984	0,2711	0,9509	invg	Inf
ε_{DC}	1,000	0,1768	0,1323	0,2174	invg	Inf
ε_{DI}	1,000	0,1987	0,1476	0,2471	invg	Inf

Fonte: elaborado pelo autor, 2023.

Figura 3 – *Priori e Posteriori* do modelo.

Fonte: elaborado pelo autor, 2023.

É importante destacar que foi aplicado um teste para analisar a identificação dos parâmetros estimados, ou seja, avaliar se a estimação dos parâmetros fundamentais propostos pelo modelo realmente apresenta uma relação com o processo de geração dos dados. Assim, aplicou-se o teste de identificação proposto por Iskrev (2010), que realiza simulações de Monte Carlo sob os parâmetros; dadas as distribuições *priori*, avalia o grau de identificação dos parâmetros estimados por meio da matriz de identificação dos dados. Após a aplicação desse teste, verificou-se que todos os parâmetros são identificados.

4.4 Resultados

Serão apresentados, nesta seção, os gráficos de impulso-resposta (IRF) dos choques das seguintes variáveis: A_t produtividade, G_t gastos dos governos para o tratamento da poluição, P_t^S preço do insumo verde, ψ_t subsídio para redução da emissão de CO_2 e τ_t imposto sobre a

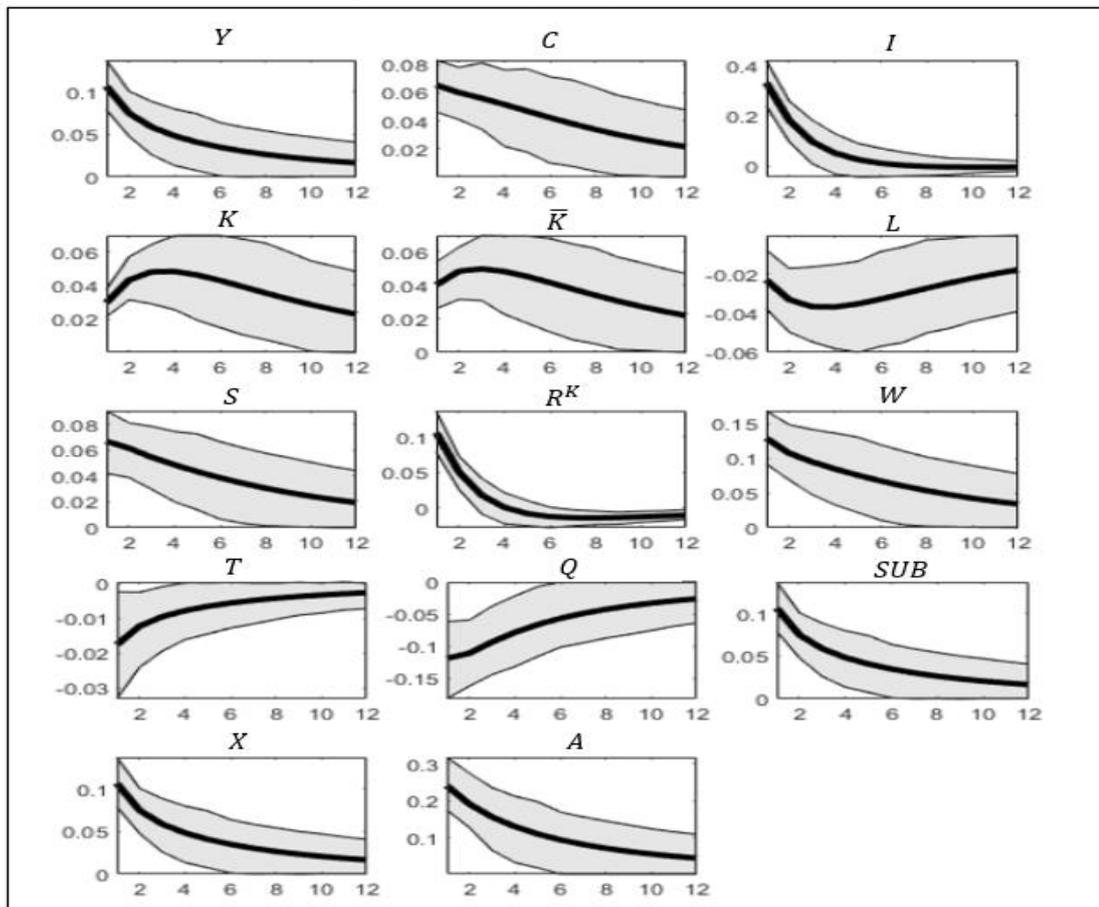
emissão de CO_2 . Para cada choque é considerado o valor de um desvio padrão obtido na estimação.

4.4.1 Choque de produtividade

Na figura 4, são apresentados os resultados do choque de produtividade. Convém ressaltar que, se o choque for positivo, a economia se torna mais produtiva em relação ao estado estacionário. Assim sendo, o aumento nas produtividades marginais dos insumos demanda mais capital e mais trabalho. Logo, o capital inicialmente aumenta em 4%; após os períodos iniciais, retorna ao estado original. A quantidade de horas trabalhadas apresenta uma redução de 2%, inicialmente. Esse movimento é causado pelo efeito renda: tendo os trabalhadores as suas necessidades atendidas, buscam por mais tempo de lazer.

O resultado na produção é um aumento de 10% afetando o consumo e o investimento também de forma positiva. Considerando o intervalo de confiança, esse choque durou 6 períodos aproximadamente.

Figura 4 – Choque de produtividade.



Fonte: elaborado pelo autor, 2023.

Esse movimento de melhora também é percebido nos insumos de capital de qualidade ambiental superior, visto que as firmas buscam aumentar o uso desse tipo de insumo na produção como forma de compensação pelo aumento da poluição. Essa resposta ao choque de

produtividade é um resultado esperado e discutido pela literatura, como se pode verificar nos trabalhos de Annicchiarico e Di Dio (2015) e Annicchiarico e Diluiso (2019).

Com o aumento da produção, os poluentes emitidos durante o processo produtivo também respondem de forma positiva: aumento de 10%; considerando o intervalo de confiança, esse choque também durou 6 períodos.

Este resultado – da relação entre PIB e CO_2 – era esperado, pois Leal et al. (2015) obtiveram que, no Brasil, a relação entre essas variáveis indica uma elasticidade ≈ 1 , ou seja, a expansão das emissões segue uma tendência semelhante à da produção

Com esse aumento de poluentes na atmosfera, a qualidade ambiental responde de forma negativa e depois retorna ao seu estado inicial. A propósito, essa resposta pode ser causada pelo fato de o modelo não apresentar rigidez e devido ao intervalo de confiança estar muito amplo. Por outro lado, o aumento de receitas, em função da maior produção, por meio do imposto sobre o poluente, o governo busca uma “devolução” pela diminuição da carga tributária através do imposto *lump-sum*.

4.4.2 Choque nos gastos dos governos para o tratamento da poluição

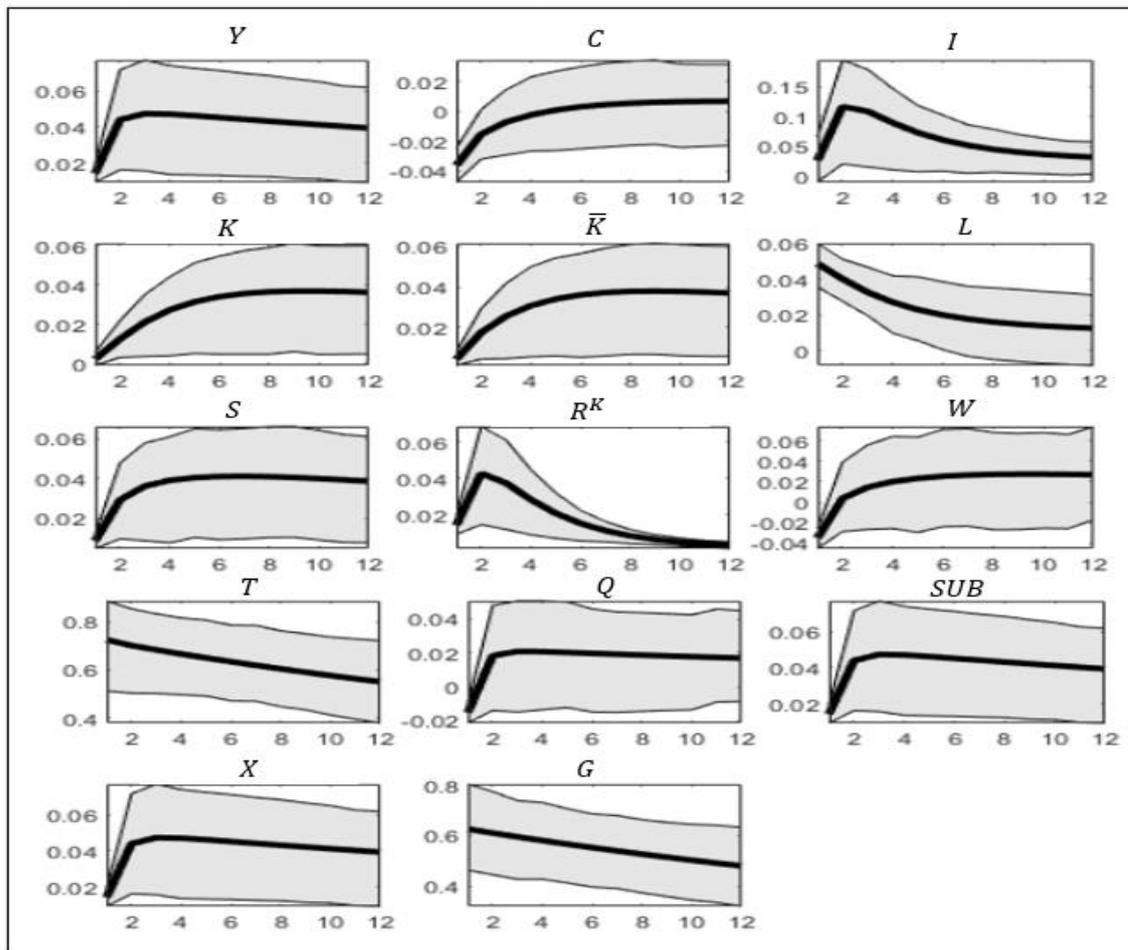
Dado que o tratamento da poluição realizado pelo governo pode considerar diversos pontos de atuação como manter políticas que envolvam o controle das emissões, a migração para fontes de energia renovável, a redução do desmatamento, a conservação da floresta, o controle dos resíduos sólidos, entre outros, o governo pode investir em tecnologias limpas, e desenvolver projetos de pesquisa voltados à infraestrutura ambiental. Sendo assim, foi constatado um choque positivo de gastos do governo para tratamento da poluição (figura 5).

Inicialmente temos uma melhora na qualidade ambiental que perdura para os próximos períodos. É possível perceber que há um aumento médio persistente de 4% no produto, contudo, dado o intervalo de confiança, isso é muito incerto. Portanto, não é possível afirmar que a qualidade ambiental melhora com esse gasto do governo.

Já o aumento do produto leva a um movimento positivo das variáveis K , \bar{K}_t , R^K e S . As firmas buscam investir em recursos para aumentar a produção sem prejudicar o meio ambiente, porém o nível de salários responde de forma negativa, com uma queda de quase 4%. Dessa forma, o efeito renda leva os trabalhadores a ofertar mais trabalho.

Para manter as condições de equilíbrio, o governo deve aumentar o imposto *lump-sum*, reduzindo o consumo. Desse modo, essa política não se mostra efetiva na mitigação dos poluentes, pois não é possível confirmar a melhora na qualidade ambiental.

Figura 5 – Choque nos gastos dos governos para o tratamento da poluição.



Fonte: elaborado pelo autor, 2023.

4.4.3 Choque no preço do insumo verde

A próxima análise será referente ao choque no preço do insumo verde, conforme a figura 6. Com o choque positivo nessa variável, o produto responde de forma negativa e fica mais acentuado nos 2 primeiros períodos, com uma queda de quase 2%, retornando ao estado inicial durante os próximos períodos, ou seja, como esperado, o poluente responde da mesma forma e na mesma proporção. A produção menor diminui a demanda pelo insumo capital, diminuindo o retorno sobre esse insumo. Mas, dado o efeito renda, as famílias aumentam a oferta de trabalho, mesmo com a queda nos salários.

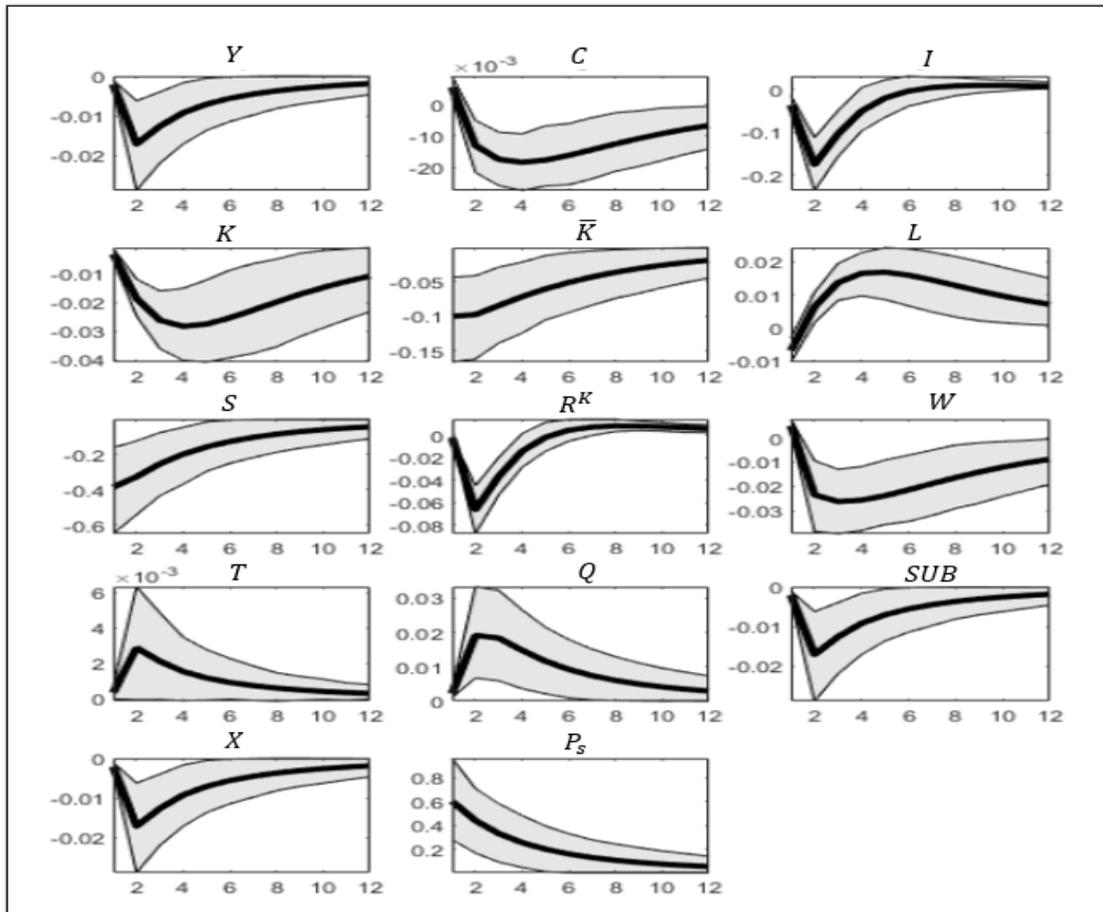
A qualidade ambiental é afetada positivamente pela queda no produto, sendo mais forte nos dois primeiros períodos e retornando ao estado inicial depois de 12 trimestres.

Como as firmas não investem em insumos de qualidade ambiental superior pelo aumento do preço e devido à queda de produção, as empresas não investem em alternativas mais adequadas ao meio ambiente e, por sua vez, o governo passa a diminuir os subsídios ofertados nos dois primeiros períodos.

Esse choque no insumo verde também não é apresentado pelos autores Li e Peng (2020). No entanto, este estudo demonstra que uma política econômica de redução no preço do insumo

verde voltada para diminuição da emissão de poluentes não seria efetiva, pois estaria estimulando a queda do produto, fato que leva ao aumento das emissões de poluentes e à diminuição da qualidade ambiental.

Figura 6 – Choque no preço do insumo verde.



Fonte: elaborado pelo autor, 2023.

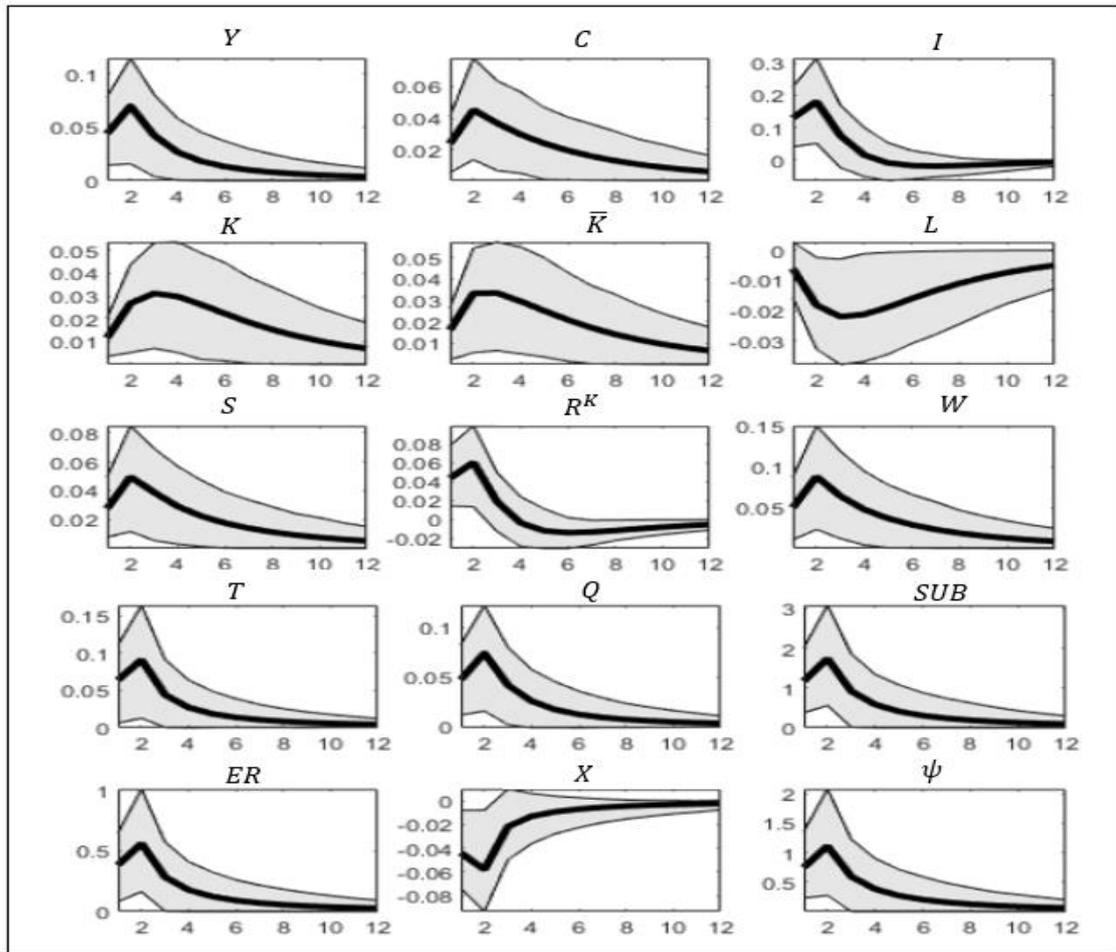
4.4.4 Choque no subsídio para redução da emissão de CO_2

A figura 7 demonstra os impactos do choque no subsídio para redução da emissão de CO_2 . O aumento na alíquota do subsídio faz com que as firmas aumentem o esforço na redução de poluentes, buscando meios que reduzam as emissões do poluente e resultem em uma melhora na qualidade ambiental futura. Com a adoção dessa política, pôde-se verificar um aumento na produção de 5%, inicialmente; considerando o intervalo de confiança, esse choque perdura até o quarto período. Ao analisar a dimensão do choque, nota-se que a proporção é de oito vezes maior sobre o parâmetro inicial; convém ressaltar que se optou por esse valor de choque, pois foi o erro-padrão obtido na estimação, mesmo os resultados estando aparentemente exagerados.

Os investimentos e o consumo também respondem de maneira positiva, apesar do aumento no imposto *lump-sum* necessário para custear o maior subsídio. Em comparação ao choque de gasto do governo no tratamento ambiental, essa política econômica é mais efetiva, pois há queda na emissão de poluentes sem prejuízo à atividade econômica e refletindo, assim, um aumento na qualidade ambiental. Esse resultado é compartilhado por Li e Peng (2020) em

estudos que demonstram que essa política de subsídio resulta em benefícios econômicos e ambientais satisfatórios.

Figura 7 – Choque no subsídio para redução da emissão de CO_2 .



Fonte: elaborado pelo autor, 2023.

4.4.5 Choque no imposto sobre a emissão de CO_2 .

São apresentados, a partir deste ponto, os resultados do comportamento dinâmico das variáveis do choque no imposto sobre as emissões do poluente, conforme a figura 8.

Um aumento na alíquota de imposto sobre as emissões leva a uma resposta positiva das variáveis ER , Y , Q e SUB , demonstrando que esse aumento produz uma elevação nos esforços das firmas na redução de emissões de CO_2 . Aqui também se optou pelo valor de choque obtido na estimação, mesmo sendo sete vezes maior do que o valor inicial da alíquota do imposto.

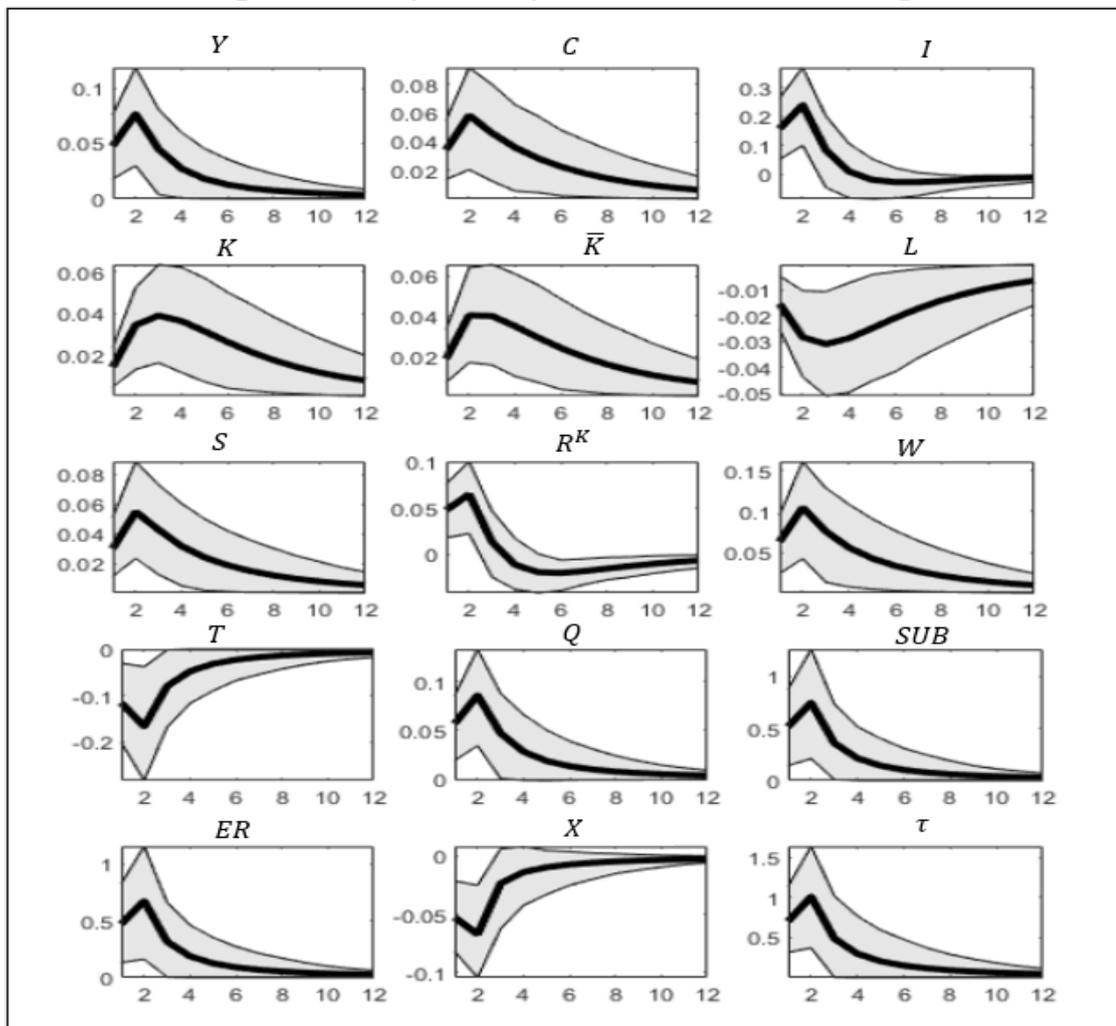
Esse choque leva a uma melhora na atividade econômica, uma resposta positiva no produto inicialmente, em 5%, perdurando até o quarto período conforme o intervalo de confiança. O efeito renda também está presente nesse choque, pois há uma queda na oferta de trabalho, apesar do aumento no nível dos salários.

Resumindo, a adoção do imposto sobre o carbono é uma alternativa eficaz que beneficia tanto a parte econômica quanto a ambiental. Assim, tanto o subsídio quanto o imposto conseguem atender ao objetivo de mitigar a emissão de poluentes. Isso corrobora com Katircioglu e Katircioglu (2018), para a realidade da Turquia onde, em longo prazo, a política

fiscal converge para uma relação de equilíbrio entre o desenvolvimento fiscal e o nível de emissão de carbono, ou seja, as políticas fiscais são eficazes quando adotadas para a redução dos níveis de poluição.

Porém, o resultado aqui encontrado diverge da realidade apresentada pelos autores Li e Peng (2020), para a China. A análise feita por eles indica que a qualidade ambiental melhora de forma significativa, porém, a adoção do imposto leva a uma queda da produção, do consumo, da mão de obra e do fator de produção verde. Logo a aplicação dessa política para a realidade chinesa não apresenta ganhos efetivos na área econômica, apenas na área ambiental. Um dos possíveis motivos é que as firmas dispõem maior esforço para a redução das emissões, visando a pagar menos impostos sobre as emissões.

Figura 8 – Choque no imposto sobre a emissão de CO_2 .



Fonte: elaborado pelo autor, 2023.

4.4.6 Comportamento das séries não observáveis e correlação entre variáveis

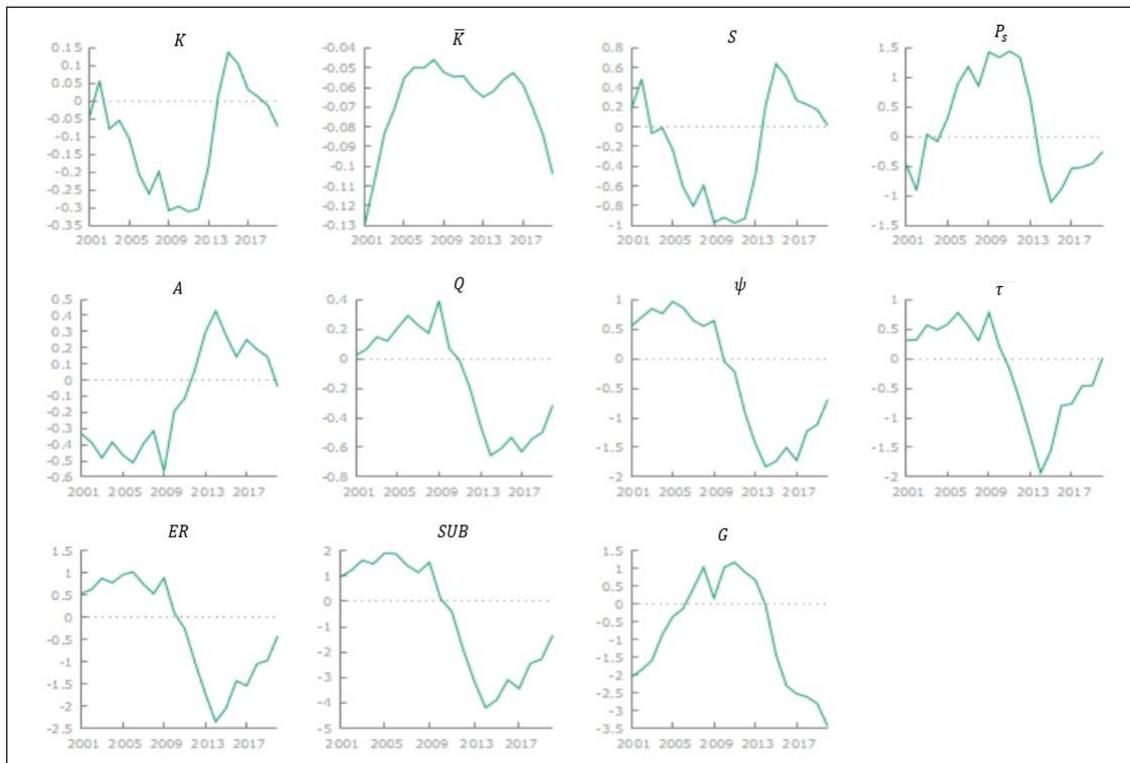
Após as análises dos choques, é possível verificar o comportamento das séries não-observáveis geradas pelo modelo (figura 9). Sendo a qualidade ambiental (Q), influenciada pelo poluente X e pelos gastos do governo G , verificamos que essa variável sofre uma queda acentuada em 2009 e não retorna aos níveis iniciais. Nesse mesmo período, houve um movimento ascendente do poluente X , que atingiu o pico em 2014. Os gastos do governo, entre

2009 e 2012, sofre um pequeno aumento, porém, a partir de 2013, os valores de investimentos do Estado para tratamento da poluição sofrem uma queda evidente. Como consequência, a qualidade ambiental sofre grande impacto, pois os mecanismos e ferramentas que poderiam auxiliar na mitigação das emissões também sofreram reduções, comprometendo a atingimento das metas de redução desses poluentes.

Pode-se citar também os movimentos dos insumos utilizados pelas firmas (K e S) como pró-cíclicas. O movimento do insumo de qualidade ambiental superior é impactado pelo preço desse insumo que, de 2001 a 2012, sofre com aumentos, reduzindo a partir desse último ano, elevando a sua demanda.

Essa análise destaca a importância de ações coordenadas em várias frentes para buscar o atingimento de metas que contribuam para a melhoria da economia e do meio ambiente de forma equilibrada e satisfatória para a sociedade.

Figura 9 – Séries temporais não observáveis geradas pelo modelo.



Fonte: elaborado pelo autor, 2023.

Conforme a tabela 4, podem-se observar os coeficientes de correlação entre as variáveis S , X e Q com os choques do modelo, usando as observações de 2001 – 2020 5% valor crítico (bilateral) = 0.4438.

Pode-se verificar uma relação alta e positiva do choque de produtividade com o poluente (X), conforme apresentado na literatura. Assim, a qualidade ambiental é impactada de forma negativa devido ao aumento do poluente.

Tabela 4 – Correlação entre as variáveis e os choques.

	S	X	Q
A	0,4076	0,9083	-0,9659
P_S	-0,9987	-0,1196	0,6162

ψ	-0,4042	-0,8898	0,9626
τ	-0,4037	-0,9496	0,9017
G	-0,8052	0,1734	0,4591

Fonte: elaborado pelo autor, 2023.

Em relação ao choque no preço do insumo verde, conforme o esperado, o insumo tem uma redução e os poluentes também são impactados negativamente devido ao custo maior do insumo, já a qualidade ambiental tem uma relação positiva com esse choque.

O choque do subsídio tem uma correlação negativa com as emissões de CO_2 , e uma correlação positiva com a qualidade ambiental.

O resultado apresentado pela correlação dos gastos do governo para tratamento da poluição com o insumo de qualidade ambiental superior é um movimento contrário do encontrado nas IRF. Na correlação, é apresentado um efeito maior e negativo, e isso pode ocorrer devido à substituição de custos, quando as firmas escolhem investir menos nesse tipo de insumo como uma compensação pelos custos adicionais pagos pelas regulamentações de tratamento da poluição. Esse é um efeito secundário que ocorre no S. No resultado apresentado na IRF, esse tipo de insumo apresenta uma resposta positiva e, nesse caso, o S é influenciado pelo aumento do produto. Com esse choque, temos ainda um efeito positivo nos poluentes, já que as ações não são voltadas à mitigação do poluente, mas sim à melhora da qualidade ambiental. Sendo assim, a resposta da variável Q é positiva.

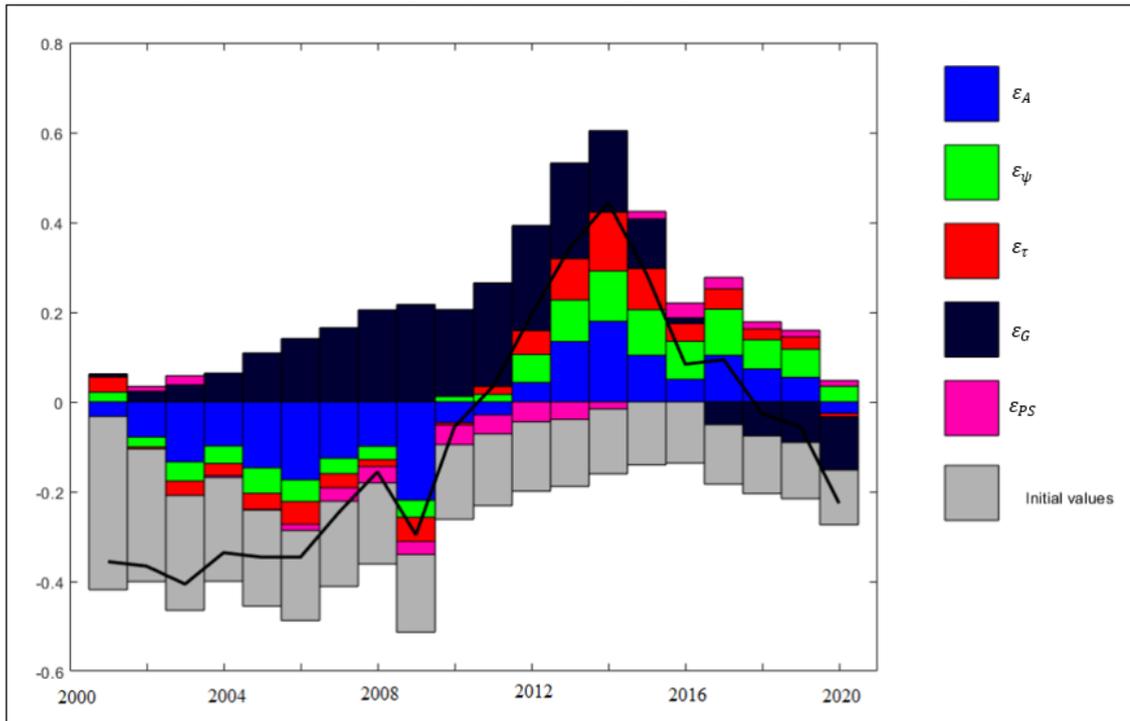
Em síntese, essas correlações reforçam os resultados encontrados na análise das funções impulso resposta, pois demonstram que as iniciativas de subsídio e imposto contribuem para a melhora da qualidade ambiental e na redução da emissão de poluente, sendo possível trabalhar de forma a atender as metas estipuladas pelo país.

4.4.7 Decomposição dos choques

As figuras 10, 11 e 12 apresentam as decomposições dos choques para a emissão de CO_2 , para o insumo de qualidade ambiental superior e para a qualidade ambiental, respectivamente.

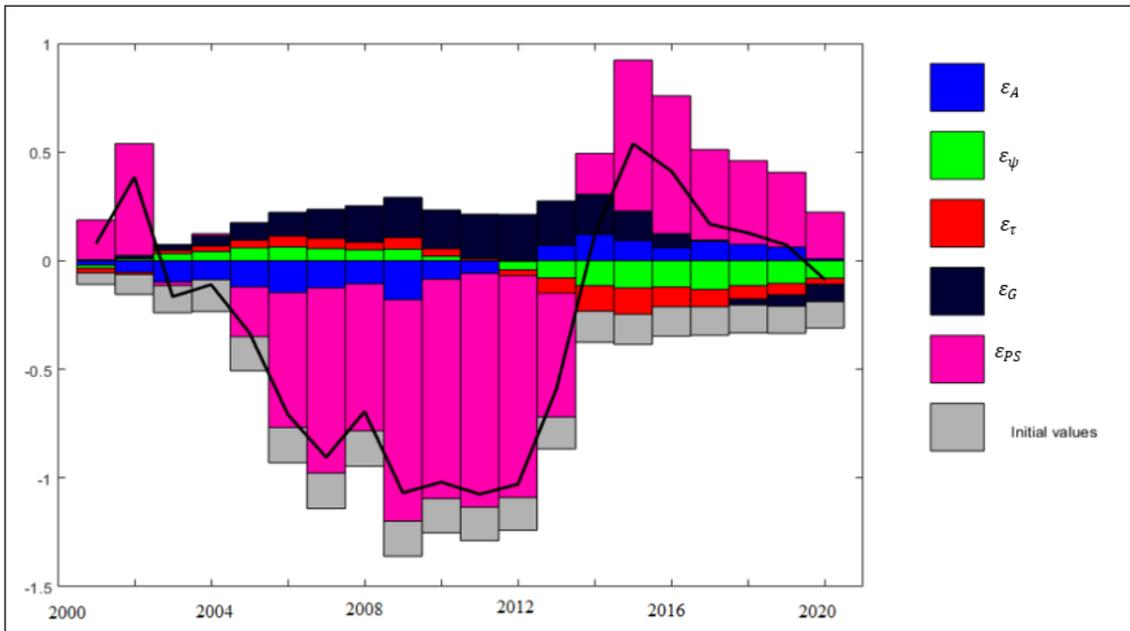
Na figura 10, podemos verificar a grande influência da produtividade na emissão de CO_2 . Em menores proporções, as alíquotas de imposto e subsídio influenciam também as emissões. O insumo de qualidade ambiental superior (figura 11) sofre a influência basicamente do preço desse insumo, que apresenta alta até 2002 e, a partir desse momento, demonstra uma influência negativa que perdura até 2014, quando volta a ter um aumento, e uma nova queda em 2020. Já a qualidade ambiental é influenciada principalmente por três variáveis: produtividade, alíquotas do imposto e do subsídio, demonstrando assim que aplicação de políticas sobre essas alíquotas pode ser uma alternativa adequada para a melhora da qualidade ambiental.

Figura 10 – Decomposição dos choques para a emissão de CO_2 .



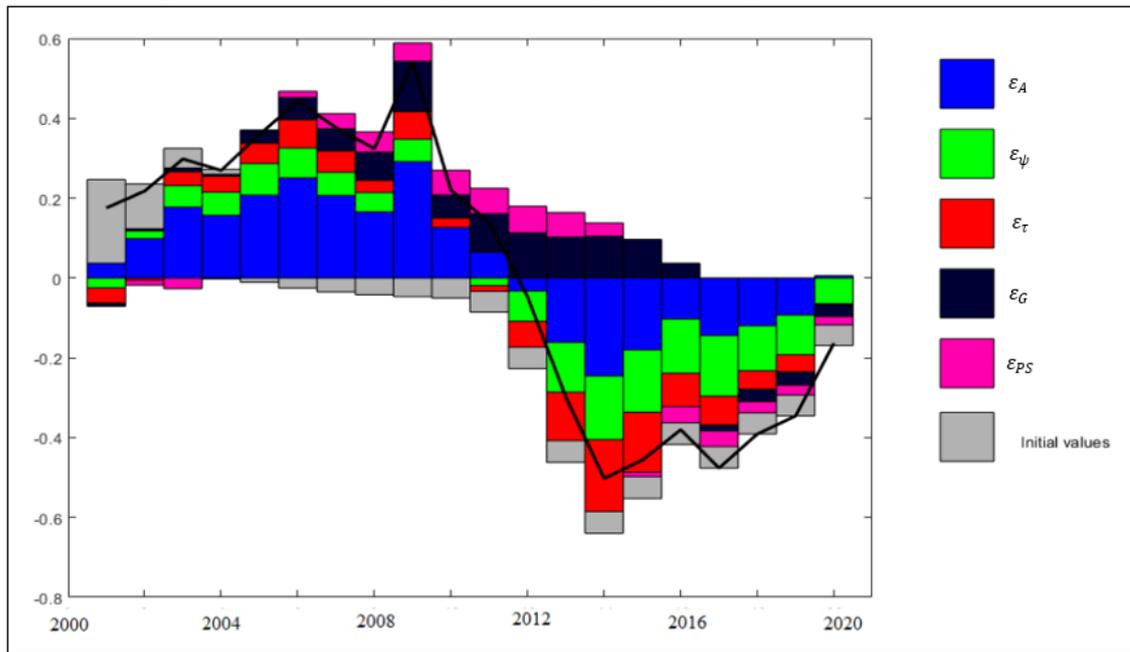
Fonte: elaborado pelo autor, 2023.

Figura 11 – Decomposição dos choques para o insumo de qualidade ambiental superior, S.



Fonte: elaborado pelo autor, 2023.

Figura 12 – Decomposição dos choques para a qualidade ambiental.



Fonte: elaborado pelo autor, 2023.

5 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi estudar os impactos da política fiscal na macroeconomia com a aplicação de um imposto punitivo e de um subsídio que beneficie as firmas de forma a mitigar as emissões de dióxido de carbono, a partir de um modelo DSGE com uma economia fechada com governo e o setor ambiental.

A presente pesquisa levantou relações importantes entre o poluente e algumas variáveis, tais como: não é possível afirmar o impacto dos gastos do governo no tratamento da poluição, na melhora da qualidade ambiental. Além disso, apesar da qualidade ambiental apresentar uma resposta positiva, a política de redução do insumo verde não é efetiva, pois dessa forma estimula a produção e aumenta as emissões.

Por outro lado, as políticas adotadas de imposto e de subsídio apresentam-se como alternativas que podem contribuir para a melhora na qualidade ambiental e para a economia, tornando-se alternativas adequadas para o país.

Os resultados demonstraram que a adoção de um imposto atende aos critérios econômicos e ambientais, e corroboram com estudos já divulgados por Chang (2019) e Economides e Xepapadeas (2018), que demonstram os benefícios da aplicação de um imposto sobre as emissões de poluentes. Porém, ao contrário do estudo aplicado por Li e Peng (2020), em que as políticas aplicadas por meio do imposto não se mostraram uma alternativa viável pois atendem somente aos critérios ambientais e não econômicos.

A aplicação de um subsídio torna-se apropriado aos países que buscam uma economia de baixo carbono, conforme reforça Gouvello (2010), pois é um incentivo econômico e poderá contribuir por meio de capital para novas tecnologias de baixo carbono. Com base no estudo de Li e Peng (2020), o subsídio é uma alternativa viável, já que contribuiu com o aumento da qualidade ambiental e também dos critérios econômicos.

Os resultados, apresentados nas funções de impulso resposta, são confirmados pela análise das correlações, ou seja, a qualidade ambiental tem correlação positiva com subsídio e imposto, e negativa com a produtividade.

Portanto, o grande desafio das economias é proporcionar o crescimento econômico e a preservação do meio ambiente. Por meio das ferramentas aplicadas neste estudo, foi possível verificar que as alternativas propostas são adequadas e satisfatórias na busca desse equilíbrio. Além disso, essas alternativas são caminhos para o atingimento das metas proposta pelo Brasil de redução das emissões de CO_2 até 2030.

Considerando o cenário atual e a importância sobre as questões climáticas e os impactos na economia, este modelo de estudo torna-se essencial, pois busca fornecer elementos mais robustos para o suporte de políticas públicas que consideram os estudos ambientais e econômicos por meio de uma modelagem macroeconômica.

Para futuros trabalhos, sugere-se a aplicação de um modelo de economia aberta, visto que as mudanças climáticas e os seus impactos são fenômenos globais e afetam todos os países.

REFERÊNCIAS

- ANGELOPOULOS, K.; ECONOMIDES, G; PHILIPPOPOULOS, A. What is the best environmental policy? Taxes, permits and rules under economic and environmental uncertainty. **CESifo**, n. 2980, 2010. Disponível em: <https://ideas.repec.org/p/bog/wpaper/119.html#author-abstract>. Acesso em 12 out 2023.
- ANNICCHIARICO, B.; DI DIO, F. Environmental policy and macroeconomic dynamics in a new keynesian model. **Journal of Environmental Economics and Management**. v. 69, p. 1–21 jan. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0095069614000850>. Acesso em 12 out 2023.
- ANNICCHIARICO, B, DILUISO, F, International Transmission of the Business Cycle and Environmental Policy, **CEIS Research**. Tor Vergata University. v. 58, n.423 dez. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0928765519300740>. Acesso em 12 out 2023.
- ANTUNES, D.J.N. O Brasil dos anos 90: um balanço. **Leituras de Economia Política**, Campinas, v.9, p. 63-89, dez. 2001.
- ARGENTIERO, A; BOLLINO, C.A; MICHELI, S; ZOPOUNIDIS, C. Renewable energy sources policies in a Bayesian DSGE model, **Renewable Energy**, ISSN 0960-1481, v.120, p. 60-68 maio 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148117312612>. Acesso em 14 out. 2023
- ÁVILA, E.S; DINIZ, E.M. Evidências sobre curva ambiental de Kuznets e convergência das emissões. **Estud. Econ**. v.45, n.1 mar 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0101-4161201545197ese>. Acesso em 10 nov. 2023.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. Relatório de Riscos e Oportunidades Sociais, Ambientais e Climáticas. **Banco Central do Brasil**. v 2, dez 2022. Disponível em: https://www.bcb.gov.br/content/publicacoes/relatorio-risco-opportunidade/relatorio_de_riscos_e_opportunidades_sociais_ambientais_e_climaticas_2022.pdf. Acesso em 10 nov. 2023.
- BRASIL. Acordo de Paris. **Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações**. 2021 Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-ndc/acordo-de-paris>>. Acesso em: 14 dez. 2022.
- BRASIL. O Brasil e o meio ambiente. **Ministério das Relações Exteriores**. 2022a. Disponível em: <<https://www.gov.br/mre/pt-br/assuntos/desenvolvimento-sustentavel-e-meio-ambiente/desenvolvimento-sustentavel/o-brasil-e-o-meio-ambiente>>. Acesso em: 19 set. 2023.
- CASTRO, M. R. D. et al. Samba: Stochastic analytical model with a bayesian approach. **Brazilian Review of Econometrics**, v. 35, n. 2, p. 103–170, março 2015.
- CEBDS. Desenvolvimento Sustentável: o que é e objetivos. **Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: < <https://cebds.org/desenvolvimento-sustentavel-o-que-e-e-objetivos/>>. Acesso em: 10 out. 2023.
- CHAN, Y. T; ZHAO, H. How do credit market frictions affect carbon cycles? an estimated DSGE model approach. **MPRA Paper No. 106987**. 2019. Disponível em: <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/106987/>. Acesso em: 10 out. 2023.
- CHANG, Y.T. Collaborative optimal carbon tax rate under economic and energy price shocks: A dynamic stochastic general equilibrium model approach. **Journal of Cleaner Production**, v.256, n.120452, mai 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620304996>. Acesso em: 10 out. 2023.
- CHRISTOFFEL, K., COENEN, G., WARNE, A.. The New Area-Wide Model of the Euro area: a micro-founded open-economy model for forecasting and policy analysis. **ECB Working**. n. 944 out 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/23525629_The_New_Area-Wide_Model_of_the_Euro_Area_A_Micro-Founded_Open-Economy_Model_for_Forecasting_and_Policy_Analysis. Acesso em: 10 out. 2023.

- COENEN, G., McADAM, P., STRAUB, R.. Tax reform and labour-market performance in the Euro area: a simulation-based analysis using the New Area-Wide Model. **Journal of Economic Dynamics and Control**. v.32. n.8, p.2543-2583 ago 2008.
- CRUZ, I.S. Consumo sustentável e ambiente: o papel do Estado e das políticas públicas na inculcação de disposições ambientalistas. Sociologia, **Revista da Faculdade de Letras da Universidade do Porto**, Vol. XXXII, p. 33 – 60 set. 2016
- DE BRUYN, S. M. **Economic Growth and the Environment Dordrecht**: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- DE SOUZA, M.C..**As implicações da Política Monetária no Mercado de Trabalho Brasileiro**. Juiz de Fora. 66 p. Dissertação (Mestrado em Economia) – Universidade Federal de Juiz de Fora. 2016.
- DE MORAES, G. I.; FERREIRA FILHO, J. B. de S. Brasil, Mudanças Climáticas e Economia: o que há estabelecido? **Planejamento e Políticas Públicas**, n. 41, 2022.
- ECONOMIDES, G, XEPAPADEAS, A. Monetary Policy under Climate Change. **CESifo Working Paper Category 7: Monetary Policy and International Finance**. no. 7021 abr 2018. Disponível em: https://www.cesifo.org/DocDL/cesifo1_wp7021.pdf. Acesso em: 10 out. 2023.
- EEA, European Environmental Agency. Glossary of Environment Statistics – Environmental Terminology and Discovery Service (ETDS). EIONET, **Environment Information and Observation Network**. European Union, 1997.
- EPE. Precificação de Carbono: Riscos e Oportunidade para o Brasil. **Empresa de Pesquisa Energética**. Nota Técnica. 2020.
- EPE. Fontes de Energia. **Empresa de Pesquisa Energética**. 2023.
- EVANGELISTA, I.R; CASTELAS, L.I.M; COSTA, R.F.R; IRFFI, G.D. A Relação entre emissão de CO2 e PIB per capita: análise para os países Sul-americanos no período de 1980 a 2009. **Revista de Economia**, v.41, n.74, p.1-22, 2020. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/economia/article/view/63671/40241>. Acesso em: 8 out. 2023.
- FARMER, J; HEPBURN, C; MEALY, P; TEYTELBOYN, A. A Third Wave in the Economics of Climate Change. **Environmental and Resource Economics**. V. 62. p. 329-357 out 2015. Disponível em: <https://www.deepdyve.com/lp/springer-journal/a-third-wave-in-the-economics-of-climate-change-zCIEx8GcJf?key=springer>. Acesso em: 5 jan. 2024.
- FISCHER, C.; SPRINGBORN, M. Emissions targets and the real business cycle: Intensity targets versus caps or taxes. **Journal of Environmental Economics and Management**, v.62, p. 352–366 nov 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0095069611000969>. Acesso em: 5 jan. 2024.
- FMI. Fiscal policies for Paris climate strategies: From principle top ratice. **Internacional Monetary Fund**.n. 2019/010, p. 1-109 mai 2019.
- FMI. Perspectivas Economicas: As Américas - Um longo e sinuoso caminho até a recuperação. **International Monetary Fund**, out. 2021.
- FRIED, S.; JOHNSON, J; MORRIS, S. D. Environmental policy and short run macroeconomic tradeoffs. **University of California**, 2013.
- FRIEDRICH, J; GE, M; PICKENS, A. A trajetória dos 10 maiores emissores de carbono desde o Acordo de Paris em gráficos interativos. **WRI BRASIL**, 2023. Disponível em:<<https://www.wribrasil.org.br/noticias/trajetoria-dos-10-maiores-emissores-de-carbono-desde-o-acordo-de-paris-em-graficos>>. Acesso em: 25 nov. 2023.
- FREITAS, C.R; CARVALHO, R.A; OVIEDO, A. Financiamento da Gestão Ambiental no Brasil: Uma avaliação a partir do Orçamento Público Federal (2005-2022). **Instituto Socioambiental**. 2022.
- GALÍ, J. Monetary Policy, Inflation, and the Business Cycle: An Introduction to the New Keynesian Framework. **Princeton University Press**, Princeton. 2008.

GALÍ, J. Monetary policy, inflation, and the business cycle: an introduction to the new Keynesian framework and its applications. **Princeton University Press**, 2015.

GOUVELLO, C. Estudo de Baixo Carbono para o Brasil. O Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento. **Banco Mundial**. 2010.

HEUTEL, G. How should environmental policy respond to business cycles? Optimal policy under persistent productivity shocks. **Review of Economic Dynamics**, v. 15, n. 2, p.244–264 abr 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1094202511000238>. Acesso em: 5 jan. 2024.

HEUTEL, G.; FISCHER, C. Environmental macroeconomics: environmental policy, business cycles, and directed technical change. **ECON Publications**. v.5, p. 197-210 fev 2013. Disponível em: https://scholarworks.gsu.edu/econ_facpub/16/?utm_source=scholarworks.gsu.edu%2Fecon_facpub%2F16&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages. Acesso em: 24 nov. 2023

IPEA. Brasil em Desenvolvimento: Estado, planejamento e políticas públicas. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**. 210 p. 3 v.; Brasília: Ipea, 2010.

Iskrev, N. How much do we learn from the estimation of DSGE models? A case study of identification issues in a New Keynesian Business Cycle Model. **Mimeo**, University of Michigan. 2010

JORGENSON, D.W; WILCOXEN. Environmental Regulation and U.S. Economic Growth. **RAND Journal of Economics**, 21, 314-340. 1990.

JORGENSON, D.W; WILCOXEN, P. J. Reducing US carbon emissions: an econometric general equilibrium assessment, **Resource and Energy Economics**, v 15, Issue 1, Pages 7-25, ISSN 0928-7655, 1993.

IPCC. Aquecimento global de 1,5°C: Relatório especial do IPCC sobre os impactos do aquecimento global de 1,5°C acima dos níveis pré-industriais no contexto do reforço da resposta às alterações climáticas, do desenvolvimento sustentável e dos esforços para erradicar a pobreza. **Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas**. Cambridge: Cambridge University Press. 2018.

LANZ, B; WURLOD, J-D; PANZONE, L; SWANSON, T. The behavioral effect of Pigovian regulation: Evidence from a field experiment, **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 87, p.190-205, jan 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0095069617304102>. Acesso em: 10 jan 2024.

LEAL, R.A. **Ciclos Econômicos e Emissão de CO2 no Brasil: Uma Análise Dinâmica para Políticas Ambientais Ótimas**. 53 p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) - Universidade Federal de Pelotas. 2014.

LEAL, R.A; ELY, R.A; UHR, J.G.Z; UHR, D.A.P. Ciclos Econômicos e Emissão de CO2 no Brasil: Uma Análise Dinâmica para Políticas Ambientais Ótimas. **RBE Rio de Janeiro** v. 69 n. 1, p. 53–73 Jan-Mar 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbe/a/dF7jDMFz6g6QCZN74bGK3Xx/>. Acesso em: 20 jan 2024.

LI, Haoran; PENG, Wei. Carbon Tax, Subsidy, and Emission Reduction: Analysis Based on DSGE Model. **Complexity**, vol. 2020, p. 1-10 dez 2020.

KANCZUK, F. Juros reais e ciclos reais brasileiros. **Revista Brasileira de Economia**,v. 56, n. 2, 2002.

KATIRCIOGLU, S.; KATIRCIOGLU, S. Testing the role of fiscal policy in the environmental degradation: the case of turkey. **Environmental Science and Pollution Research**. V.25 n. 6, p. 5616–5630 dez 2018.

MACHADO, L.M.C.P. Qualidade ambiental: indicadores quantitativos e perceptivos. **Indicadores Ambientais**. Sorocaba: [s.n.], 1997.

MENEGUIN, F. B. Incentivos e Financiamento para o Desenvolvimento Sustentável. **Senado Federal**. 2023.

MMA. Consumo Sustentável. **Ministério do Meio Ambiente**. 2023. Disponível em:< <https://antigo.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/producao-e-consumo-sustentavel/conceitos/consumo-sustentavel.html>>. Acesso em: 06 out. 2023.

MOLION, L.C.B. Aquecimento global: uma visão crítica. **Revista brasileira de climatologia**. v. 3, p. 1-18 ago. 2008.

NORDHAUS, W.D. The 'DICE' Model: Background and Structure of a Dynamic Integrated Climate-Economy Model of the Economics of Global Warming. Cowles Foundation Discussion Papers 1009, Cowles Foundation for **Research in Economics**, Yale University. 1992.

NORDHAUS, W.D. Rolling the 'DICE': an optimal transition path for controlling greenhouse gases, **Resource and Energy Economics**, v. 15, p. 27-50, mar 1993.

NORDHAUS, W.D. Managing the Commons: The Economics of Climate Change, Cambridge, MA, **The MIT Press**, ISBN 0-262-140551-1, 1994.

NORDHAUS, W.D. A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change. **Journal of Economic Literature**. Vol. XLV, September, pp. 686–702. 2007.

NORDHAUS, W.D. Integrated Economic and Climate Modeling. Handbook of Computable General Equilibrium Modeling. Handbook of Computable General Equilibrium Modeling SET, Vols. 1A and 1B. [S.l.]: **Elsevier**, v.1. p. 1069–1131, 2013.

OLIVEIRA, J.C. Frente detalha queda no orçamento ambiental e busca soluções para reverter o rombo. **Câmara dos Deputados**. 2020, Ponta Grossa, 14 dez. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/703644-frente-detalha-queda-no-orcamento-ambiental-e-buscasolucoes-para-reverteveem%20quadro%20ca%C3%B3tico%20das,Ambiente%20em%202020%>. Acesso em 14 dez. 2023.

ONU. Sustainable development goals. Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais - Desenvolvimento sustentável. **Organização das Nações Humanas**. 2023. Disponível em: < <https://sdgs.un.org/goals>>. Acesso em 10 de outubro de 2023.

OUR WORLD IN DATA BASED ON THE GLOBAL.Per capita CO₂ emissions. **Global Carbon Project**. 2022. Disponível em: < <https://ourworldindata.org/grapher/co-emissions-per-capita?tab=chart&time=1970.latest&country=~BRA>>. Acesso em: 06 jan. 2023.

OUR WORLD IN DATA. Which countries have a carbon tax? **Global Carbon Project**. 2023. Disponível em: < <https://ourworldindata.org/grapher/carbon-tax-instruments?time=latest>>. Acesso em: 20 de setembro de 2023.

PIGOU, A. A Economia do Bem-Estar: Londres: **Macmillan and Co**. 1920.

PINDYCK, R.S. The climate policy dilemma. **Review of Environmental Economics and Policy**, v.7, n.2, p. 219-237, 2013.

PNUD. O que são os ODS? **Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento**. 2023. Disponível em: < <https://www.undp.org/pt/brazil/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel>>. Acesso em: 10 out. 2023.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE E INSTITUTO DE ESTUDOS AMBIENTAIS. Manual de Métodos para Avaliação do Impacto das Mudanças Climáticas e Estratégias de Adaptação. **Programa das Nações Unidas**. 1998.

SEBRAE. O que é um produto sustentável? **Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas**. 2013 Disponível em: < <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/o-que-e-um-produto-sustentavel,5775438af1c92410VgnVCM100000b272010aRCRD>>. Acesso em: 12 fev. 2024.

SEBRAE. Consumo sustentável: a evolução dos comportamentos na sociedade. **Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas**. 2023. Disponível em: < <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/ufs/pe/artigos/consumo-sustentavel-a-evolucao-dos-comportamentos-na-sociedade,948377d1c2826810VgnVCM1000001b00320aRCRD>>. Acesso em: 06 out. 2023.

SEEG. Análise das emissões brasileiras de Gases Efeito Estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970-2021. **Sistema de Estimativas Emissões e Remoções de Gases Efeito Estufa**. Observatório do Clima, 2023. Disponível em: <<https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2023/03/SEEG-10-anos-v4.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2023.

- SILVA, J. G.; GURGEL, C. A. Impactos Econômicos de Cenários de Políticas Climáticas para o Brasil. **Pesquisa e Planejamento Econômico**, v. 42, n. 1, p. 93–135, abr. 2012.
- SENO, Pedro. Conferência ECO-92. Editoria: Hoje na História. **Universidade de São Paulo**. São Paulo: SP. 2023
- TIROLE, Jean. Economia do Bem Comum; Tradução André Telles; revisão teórica Renato Gomes, Alípio Ferreira Cantisani. 1 ed. Rio de Janeiro: **Zahar**, 2020.
- TRIGO, A. M.; VIANNA, E. C. A Importância dos incentivos econômicos no processo de licenciamento ambiental. **R. gest. sust. ambient.**, Florianópolis, v. 3, n. 2, p. 296 – 314. out.2014/mar.2015.
- VALLI, M; CARVALHO, F.A. Fiscal and Monetary policy interaction: a simulation based analysis of a two-country New Keynesian DSGE model with heterogeneous households. **Banco Central do Brasil**. 2010.
- VILLAVERDE, J.F; QUINTANA, P. A. G. Estimando Modelos DSGE: Avanços Recentes e Desafios Futuros ", **Annual Review of Economics**, vol 13(1), páginas 229-252. 2020.
- VITAL, M. H. F. Aquecimento global: acordos internacionais, emissões de CO2 e o surgimento dos mercados de carbono no mundo. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 48 , p. [167]-244, set. 2018.
- XU, C; WANG, C; HUANG, R. Impacts of horizontal integration on social welfare under the interaction of carbon tax and green subsidies, **International Journal of Production Economics**, Volume 222, 107506, ISSN 0925-5273, 2020.
- WORLD BANK. State and Trends of Carbon Pricing. Ecofys and Vivid Economics. **World Bank**, Washington, DC. 2016.
- WENDLER, S. A. **A macroeconomia da fiscalização do desmatamento**. 2021. Dissertação (Mestrado em Economia) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2021.