Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

A hipótese da Curva Ambiental de Kuznets para o transporte de soja no Brasil

Everton Lima Costa

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Economia Aplicada

Piracicaba
2022

Everton Lima Costa
Bacharel em Ciências Econômicas

A hipótese da Curva Ambiental de Kuznets para o transporte de soja no Brasil

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador
Prof. Dr. **JOSÉ VICENTE CAIXETA FILHO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Economia Aplicada

Piracicaba
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Costa, Everton Lima
A hipótese da Curva Ambiental de Kuznets para o transporte de soja no Brasil / Everton Lima Costa - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2022.
143 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Emissões de CO_2 2. Agrologística 3 .Soja 4. Dados em painel I. Título

"...As camélias da segunda abolição

As camélias da segunda abolição

Cadê elas?

Somos assim, capoeiras das ruas do Rio

Será sem fim o sofrer do povo do Brasil

Nele, em mim, vive o refrão

As camélias da segunda abolição virão!"

"As camélias do Quilombo do Leblon" - Gilberto Gil e Caetano Veloso

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente à minha família, pelo apoio em todos as decisões tomadas. Para minha mãe Daciene, ao meu pai, Luis e ao meu irmão Alisson.

Ao Prof. Dr. José Vicente Caixeta-Filho, pela disposição na orientação desse trabalho e pela confiança no meu trabalho.

À Universidade de São Paulo, pela oportunidade de uma ótima formação e a todos os contribuintes do estado de São Paulo, principais responsáveis pelo financiamento da instituição, e que mesmo eventualmente não sabendo detalhadamente a grandeza dos trabalhos de pesquisa realizados, possuem um motivo de grande orgulho.

Ao Grupo Esalq-Log, pelas oportunidades e conhecimentos adquiridos ao longo de todo o trabalho. Estendo um agradecimento especial aos colegas Abner Matheus João e Fernando Vinícius da Rocha, por todo o auxílio e solicitude ao longo da realização desse trabalho e de tantos outros. Além de agradecer nominalmente a Rodrigo de Moraes Santos, Fernando Bastiani e Thiago Péra. Agradeço ainda a Carolina Vicente, pela revisão realizada.

A todos os docentes e colaboradores do Departamento de Economia, Administração e Sociologia, da ESALQ e do Serviço de Apoio a Pós Graduação (SAPG), e a todos os colegas do Programa de Pós Graduação em Economia Aplicada e a todos os demais colaboradores pertencentes a Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Viva a Gloriosa!

Agradeço também ao Prof. Dr. José Eduardo Holler Branco, a Prof. Dra. Daniela Bacchi Bartholomeu e a Prof. Dr. Lilian Maluf de Lima, membros da comissão avaliadora, tanto de defesa quanto no exame de qualificação, pela valiosa contribuição para o aprimoramento do trabalho.

Por fim, agradeço a todos os familiares e amigos que não foram nominalmente mencionados, mas que certamente foram muito importantes.

A todos, paz e bem.

Bendigamos ao Senhor: Graças a Deus!

SUMÁRIO

RESUMO 6
ABSTRACT 7
LISTA DE FIGURAS 8
LISTA DE TABELAS 9
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS 10
1. INTRODUÇÃO 13
2. REVISÃO DE LITERATURA 17
2.1. O agronegócio e o complexo soja no Brasil 17
2.1.1. Desempenho do agronegócio, boom das commodities e efeito China 17
2.1.2. A importância do complexo soja para o Brasil 20
2.2. A Logística da Soja 26
2.2.1. Políticas públicas e promoção do rodoviarismo 26
2.2.2. Logística de exportação da soja 28
2.3. A Questão Ambiental 35
2.3.1. Acordos ambientais internacionais 35
2.3.2. Políticas ambientais recentes no Brasil 40
2.3.3. As questões ambientais no setor de transportes 42
2.4. A Curva Ambiental de Kuznets 46
2.4.1. Da desigualdade à questão ambiental 46
2.4.2. Aplicações da Curva de Kuznets no mundo 50
2.4.3. Análise da Curva Ambiental de Kuznets para o Brasil 53
3. MATERIAIS E MÉTODOS 59
3.1. Modelo econométrico 61
3.2. Modelo de otimização: problema de transporte 68
3.3. Cálculo das emissões 77
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 81
4.1. Modelo matemático 81
4.2. Análise das variáveis 87
4.3. Modelo econométrico 95
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 109
REFERÊNCIAS 112
APÊNDICES 127

RESUMO

A hipótese da Curva Ambiental de Kuznets para o transporte de soja no Brasil

A cadeia da soja é uma das mais relevantes atividades econômicas do Brasil, consolidada como a principal componente da pauta de exportações nacional na primeira década do século XXI, com o boom das commodities. Frente a isso e destacando a importância da logística para o segmento, tanto para a promoção de competitividade quanto de impactos ambientais, o objetivo desse trabalho é a validação da Curva Ambiental de Kuznets, relação entre degradação ambiental e renda, para o transporte de soja no Brasil no período de 2002, após o ingresso da China na Organização Mundial do Comércio, até 2017. Para isso, foram realizadas estimações de dados em painel de efeitos fixos e dinâmicos, por *system* GMM, tendo como variável dependente as emissões de dióxido de carbono (CO_2) oriundas do transporte de soja, elaborada por meio da determinação dos fluxos de transporte através de modelo matemático para minimização de custos e de fatores de emissão de CO_2 para os modais de transporte. Os resultados apontam para a validação do formato em "N" para a Curva Ambiental de Kuznets no transporte, evidenciando que o desempenho econômico é insuficiente no longo prazo para a mitigação das emissões e que o aumento da produção é fator determinante para o seu crescimento. Isso permite indicar que aumentos do investimento em intermodalidade e a incorporação de tecnologias menos dependentes de combustíveis fósseis no transporte rodoviário devem ser prioridades na formulação de políticas públicas, visando aumentar a produtividade das operações de transporte e reduzir os danos ambientais.

Palavras–chave: Emissões de CO_2, Agrologística, Soja, Dados em painel

ABSTRACT

The Environmental Kuznets Curve hypothesis for soybean transportation in Brazil

The soybean production chain is one of the most relevant economic activities in Brazil, consolidated as the main component of the national export basket in the first decade of the 21st century, with the commodities boom. Thus, and highlighting the importance of logistics for the segment in promoting competitiveness and environmental impacts, the objective of this work is to validate the Environmental Kuznets Curve hypothesis, relationship between environmental degradation and income, for the transportation of soy in Brazil in the period of 2002, after China's entry into the World Trade Organization, until 2017. For this, estimations were made using data in a fixed effects panel and dynamic models of panel data estimated by the GMM system, having as a dependent variable the emissions of carbon dioxide (CO_2) from soy transportation, elaborated through the determination of transport flows through a mathematical model to minimize costs and CO_2 emission factors for transport modes. The results allow the validation of the "N" shaped Environmental Kuznets Curve in transport, showing that the economic performance is insufficient to mitigate emissions in the long term and that the increase in production is a determining factor for its growth. This makes it possible to indicate that increases in investment in intermodal transport and the incorporation of new technologies less dependent on fossil fuels in road transport must be priorities in the formulation of public policies, aiming at increasing the productivity of transport operations and reducing environmental damage.

Keywords: CO_2 emissions, Agrologistics, Soybeans, Panel data

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais importadores de soja do Brasil em 2019 19
Figura 2 - Evolução mensal do preço de commodities (1980-2019) 19
Figura 3 - Produção de soja nos principais estados produtores entre 1978 e 2018..... 23
Figura 4 - Produção e exportação de soja, em toneladas (1997-2018) 24
Figura 5 - Principais portos, terminais hidroviários e terminais ferroviários do Brasil..... 30
Figura 6 - Participação por porto nas exportações de soja em 1999, 2009 e 2019 32
Figura 7 - Investimento em infraestrutura no Brasil (2010 - 2019). 33
Figura 8 - Principais países emissões de CO_2 (1992-2014).....**Erro! Indicador não definido.**
Figura 9 - Emissões de CO_2 e CO_{2e} no Brasil (1970-2018)..... 40
Figura 10 - Share dos setores nas emissões de CO_2 em 1998, 2008 e 2018 41
Figura 11 - Condições das rodovias no Brasil 45
Figura 12 - Formatos genéricos da EKC..... 48
Figura 13 - Passos metodológicos..... 60
Figura 14 - Fluxos de transportes considerados no modelo matemático 69
Figura 15 - Produção de soja e emissão de CO_2 no transporte (2002 -2017) 83
Figura 16 - Movimentação de soja pelos portos de Santos, Paranaguá e São Luís 84
Figura 17 - Emissões de CO_2 por tonelada de soja transportada (2002-2017) 85
Figura 18 - PIB da soja (2002 -2017) 88
Figura 19 - Evolução percentual do IDH das microrregiões (2002 -2017) 91
Figura 20 - Área colhida e produtividade da soja (2002 - 2017) 93
Figura 21 - Investimento público em rodovias (2002 -2017) 95
Figura 22 - Quantidade de microrregiões classificadas de acordo com a fase da EKC..... 102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aplicações da Curva Ambiental de Kuznets 56
Tabela 2 - Variáveis utilizadas no modelo econométrico e sinais esperados 65
Tabela 3 - Índices e conjuntos do modelo matemático 70
Tabela 4 - Corredores de transporte considerados para a estimação dos valores de fretes 74
Tabela 5. Especificações dos implementos rodoviários considerados 78
Tabela 6 - Transporte e emissão de CO_2 no transporte de soja por corredor (2002-2017) 82
Tabela 7 - Hinterlândia dos portos exportadores de soja 86
Tabela 8 - Estatísticas descritivas das variáveis do modelo 96
Tabela 9 - Testes de dependência seccional e raiz unitária 97
Tabela 10 - Resultados - Modelos de efeitos fixos 98
Tabela 11 - Resultados - System GMM 101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABDIB - Associação Brasileira da Infraestrutura e Indústrias de Base

ABIEC - Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carne

ABIOVE - Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais

ABPA - Associação Brasileira de Proteína Animal

ADF - *Augmented Dickey-Fuller*

AMG - *Augmented Mean Group*

ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores

ANTAQ - Agência Nacional de Transportes Aquaviários

ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres

ARDL - *Autoregressive Distributed Lags*

BRICS - Brasil, Rússia, Índica, China e África do Sul

CADF - *Cointegrated Augmented Dickey-Fuller*

CBOT - *Chicago Board of Trade*

CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada

CNA - Confederação Nacional da Agricultura

CNT - Confederação Nacional dos Transportes

CO_2 - Dióxido de Carbono

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

COP - Conferências das Partes

CQNUMC - Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas

CS-ADRL - *Cross-sectionally Augmented Distributed Lag*

DICE - *Dynamic Integrated Model of Climate and the Economy*

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagens

DOLS - *Dynamic Ordinary Least Square*

EA - Efeito Aleatórios

EF - Efeitos Fixos

EKC - *Environmental Kuznets Curve*

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Agropecuária

ESALQ - LOG - Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial

FGV - Fundação Getúlio Vargas

FIRJAN - Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro

FMI - Fundo Monetário Internacional

FMOLS - *Fully Modified Ordinary Least Square*

FTL - Ferrovia Transnordestina

GEE - Gases do Efeito Estufa

GMM - *Generalized Method of Moments*

GSCM - *Generalized Synthetic Control Method*

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICMS - Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

IDH - Índice de Desenvolvimento Humano

IGP - DI - Índice Geral de Preços – Disponibilidade Interna

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

IPS - Teste de Im-Shin-Pesaram

LLC - Teste de Levin-Lin-Chu

MATOPIBA - Maranhão, Tocantins, Pará e Bahia

MDL - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

ME - Ministério da Economia

MQO - Mínimos Quadrados Ordinários

NAFTA - *North American Free Trade Agreement*

NDC - *Nationally Determined Contributions*

Nox - Óxidos de Nitrogênio

OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

OMC - Organização Mundial do Comércio

ONTL - Observatório Nacional de Logística e Transportes

ONU – Organização das Nações Unidas

PAC - Programa de Aceleração do Crescimento

PAM - Produção Agrícola Municipal

PIB - Produto Interno Bruto

PIL - Programa de Investimento em Logística

PNE - Programa Nacional de Energia

PNMC - Política Nacional de Mudança Climática

PNTL - Programa Nacional de Transportes e Logística

PPE - Produção Pecuária Municipal

PROCONVE - Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores

PSI - Processo de Substituição de Importações

RAIS - Relação Anual de Informações Sociais

SCR - *Selective Catalityc Reduction*

SECEX - Secretaria de Comércio Exterior

SEM - *Spatial Error Model*

SIFRECA - Sistema de Informações de Fretes

SLM - *Spatial Lag Model*

STIRPAT - *STochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology"*

TSLA - Transnordestina Logística S/A

TSLS - *Two-Stage least squares*

UNDP - *United Nations Development Programme*

VBP - Valor Bruto de Produção

INTRODUÇÃO

Os problemas relacionados à degradação ambiental, especificamente os decorrentes de ações antropogênicas, ou seja, resultantes da ação humana, estão entre as principais preocupações dos formuladores de políticas públicas e das organizações, de acordo com Marcovitch (2006), por serem um dos principais riscos a continuidade da espécie humana, bem como para biomas e ecossistemas.

Dentre as principais formas de atuação do homem que geram impactos ambientais, estão o desmatamento direto, o extrativismo ilegal e a ocupação de áreas de forma não responsável para aumento da produção agrícola, como de acordo com Fearnside (2016) é decorrente na ocupação da Amazônia brasileira e uso de fontes naturais não renováveis, mais destacadamente o carvão mineral e os combustíveis fósseis, como principais fontes de energia, segundo Liu *et al.* (2007)

Frente aos perigos iminentes causados pelo avanço acelerado da degradação ambiental e pelos impactos diretos ao clima do planeta, é que se justificam os esforços das Nações Unidas (ONU) e de diversas organizações não governamentais na disseminação de iniciativas, políticas, convenções e acordos que promovam o desenvolvimento sustentável.

Grande parte dessa atuação humana ambientalmente nociva decorre da necessidade de sobrevivência e da ação econômica de mercado, com elevação da produção ou modificação da estrutura produtiva vigente e da importância, evidenciada por Havranek, Horvath e Zeynalov (2016) do uso dos recursos naturais para o crescimento econômico.

Essa é a constatação que embasa os postulados da Curva Ambiental de Kuznets (*Environmental Kuznets Curve* – EKC), descoberta no trabalho seminal de Grossman e Krueger (1991), que preconiza que as medidas de degradação ambiental possuem direta relação com a renda, aumentando nos períodos iniciais de crescimento do produto e regredindo com a estabilização da renda, dando origem a curvas com o formato de “U-Invertido” ou, após esse estágio, sofrendo um novo aumento, com curvas em formato de “N”.

As análises que buscam a validação das hipóteses da EKC, predominantemente, buscam a verificação dos formatos das curvas em níveis globais, com dados agregados de países. No entanto, alguns setores se mostram extremamente importantes para a economia e indutores de externalidades ambientais negativas que justificam uma análise especifica. Para o Brasil, um setor economicamente importante, que possui uma cadeia organizada com

potencial de intensificação dos problemas ambientais e climáticos é o setor agrícola, especificamente nesse trabalho, a produção de soja.

A soja é a mais importante cultura agrícola comercial do Brasil. Essa importância é reforçada por ser o principal produto da pauta de exportações do país em um desempenho capitaneado pela demanda da China, principal importador da oleaginosa nacional, principalmente após o ingresso do país asiático, em 2002, na Organização Mundial do Comércio (OMC), como reforçam Escher e Wilkinson (2019).

Os recordes de produção consecutivos indicam quão produtiva e tecnológica é a cadeia agrícola da soja brasileira, sendo o processo logístico encarado como um dos principais pontos de estrangulamento de competitividade econômica do segmento, principalmente o transporte, conforme apontam Correa e Ramos (2010), elo no qual os investimentos não acompanham o ritmo e o volume dos aplicados no segmento de "dentro da porteira".

Além do problema relacionado aos custos, as características do Brasil potencializam os impactos ambientais da atividade de transporte. Uma vez que o país possui grandes dimensões, com grandes distâncias dos principais polos produtores das estruturas de escoamento (Aguilar, Shikida e Lobo, 2018) e há um predomínio na utilização do modal rodoviário, movido a combustível fóssil, o elo de transporte desponta como importante causador de degradação ambiental da cadeia logística da soja.

Nesse sentido, frente a importância da cadeia da soja, dos impactos positivos do setor em relação à economia e negativos em relação ao meio ambiente, principalmente em decorrência das operações de transporte pelo elevado consumo de combustível, o objetivo geral desse trabalho é verificar a validade da hipótese dos formato em "U-Invertido" ou "N" da Curva Ambiental de Kuznets (EKC) para as emissões de dióxido de carbono (CO_2) oriundas do transporte de soja, com origem nos 2275 municípios produtores da oleaginosa em 2017, para o período de 2002 a 2017.

A principal hipótese é a validação do formato em "U-Invertido" da EKC para os municípios brasileiros no transporte de soja e a não validação do formato em "N". Acredita-se que para o setor de transporte de soja, houve um aumento das emissões no início do período de análise em decorrência de um aumento da produção, motivada pelo aumento da exportação chinesa e por um uso intenso do modal rodoviário para o escoamento dessa produção.

No entanto, com o aumento da renda e percepção da importância desse setor para os municípios, e pela necessidade de mitigação dos custos e das externalidades negativas oriundas dessa forma de escoamento, houve uma elevação dos investimentos em infraestrutura e a criação de maiores possibilidades de escoamento por meio da intermodalidade. Assim, com a temporal evolução da renda, há uma diminuição das emissões de CO_2 no transporte. Como esses investimentos são crescentes, acredita-se que a hipótese do formato em "N", que sugere uma nova inflexão ascendente na curva, não se sustenta.

De maneira específica, esse trabalho objetiva ainda i.: Apresentar relevantes informações para a caracterização do setor produtor de soja, com ênfase em seus impactos para a economia e para o meio ambiente por meio do transporte; ii.: Caracterizar o sistema logístico de transporte de soja no Brasil por meio rodoviário e intermodal, iii.: Realizar uma síntese dos esforços globais na busca por modelos de desenvolvimento sustentáveis, elencando um histórico dos principais encontros internacionais sobre o clima e objetivos dos principais acordos globais, iv.: Apresentar os postulados da EKC, estudos e metodologias mais utilizados e v.: Realizar estudo por meio da combinação de modelos econométricos, com o suporte de modelo matemático e programação linear na construção de uma *proxy* fidedigna para variável dependente.

Além dessa introdução, este trabalho é composto por mais cinco capítulos. Na sequência, o referencial teórico apresenta uma ampla caracterização sobre o setor sojicultor, seus impactos econômicos e ambientais, e introduz os problemas ambientais oriundos do transporte, os acordos em nível internacional buscando a resolução dos problemas ambientais globais da economia, além de introduzir o conceito, hipóteses e aplicações da Curva Ambiental de Kuznets.

O terceiro capítulo apresenta o método utilizado descrevendo o uso de modelos econométricos de dados em painel, tanto estáticos quanto dinâmicos, para análise das relações da EKC. Apresenta também o modelo matemático de otimização para minimização dos custos de transporte, que conduzirá a quantidade movimentada e a consequente formação da variável de emissão de CO_2. A variável se dá através do consumo estimado de combustível para o transporte rodoviário e pelo uso de fatores de emissão específicos para o transporte intermodal.

No quarto capítulo são apresentados os resultados, abordando discussões sobre a variável dependente, breve análise das variáveis e resultados dos modelos econométricos. Por fim, no capítulo cinco são realizadas as considerações finais.

1. REVISÃO DE LITERATURA

1.1. O agronegócio e o complexo soja no Brasil

1.1.1. Desempenho do agronegócio, boom das commodities e efeito China

A década iniciada em 2010 se mostrou como uma das mais desafiantes para a economia brasileira. Essa, iniciou-se indicando aparente ciclo virtuoso, no entanto, descompassos governamentais na política econômica, seguida de grave crise fiscal e concomitantemente política, fizeram com que os anos "10" do século XXI já sejam considerados, assim como a década de 1980, marcada pela Crise da Dívida, como uma década perdida. Isso porque, conforme aponta Carvalho (2018), o país, que viveu a esperança de um mini "milagre", passou ao caos econômico caracterizado pelo aumento da desigualdade e do desemprego.

O período foi marcado por uma recessão de dois anos consecutivos, com decréscimo no Produto Interno Bruto (PIB), de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020a) de 3,55% e 3,31% em 2015 e 2016, respectivamente. No entanto, em contraste com esse desempenho, o agronegócio tornou-se o principal sustentador da economia. O PIB setorial apresentou crescimento de 3,94% e de 7,54% nesses anos, o que mesmo com a queda de 5,52 e 0,01% nos anos seguintes sustentou o crescimento médio de 1,2% na década. O segmento representou, por meio das suas atividades conjuntas de insumo, agropecuária, indústria e serviços, 21,1% do PIB nacional em 2019, conforme dados da Confederação Nacional da Agricultura (CNA) e Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA, 2020).

Esses resultados foram alavancados, predominantemente, nos primeiros anos do século XXI pelo que, de acordo com Manzi (2016), foi denominado "*boom* das commodities", o qual consistiu em uma repentina elevação no preço dos produtos agrícolas e minerais, que possibilitou aos países considerados anteriormente de subdesenvolvidos e especializados na produção de produtos primários a alavancarem a renda nacional por meio do comércio internacional.

O *boom das commodities* decorreu principalmente pela atuação da China no comércio global, tornando-se o segundo maior exportador mundial de produtos primários. Isso ocorreu motivado pelo aproveitamento do potencial interno do país, a partir de fatores, expostos por

Kaplinsky e Messner (2008), como sendo resultantes da combinação entre industrialização crescente e grande população, em uma trajetória recorrente nos países asiáticos emergentes, como na Índia.

Para Medeiros e Cintra (2015), o processo de industrialização tornou o país asiático um forte produtor no ramo de construção civil, bem como no maior produtor de automóveis e veículos. Mesmo sendo a China um grande produtor de *commodities* agrícolas e minerais, o aumento do consumo interno foi superior à capacidade de produção, acarretando assim em uma forte demanda por importações.

Dessa forma, de acordo com os autores, pode-se classificar que esse movimento chinês impôs aos países da América do Sul, principalmente após o ingresso do país asiático na Organização Mundial do Comércio (OMC) em 2002, fenômenos como: efeito demanda para os principais produtos exportados pelos parceiros comerciais, sendo os principais a soja brasileira e argentina, o minério de ferro do Brasil e o cobre do Chile; e o efeito estrutura, esse setorial, decorrente da rivalidade produtiva entre bens exportados pela China e pelos países agroexportadores industrialmente mais dinâmicos, fenômeno esse mais evidente no México, o qual por possuir uma menor dependência das renda pela agroexportação e sim pela exportação de produtos industriais aos Estados Unidos, concorre com a China pela participação no mercado estadunidense. Só para o mercado da soja, a China é a principal parceira comercial do Brasil, conforme ilustra a Figura 1.

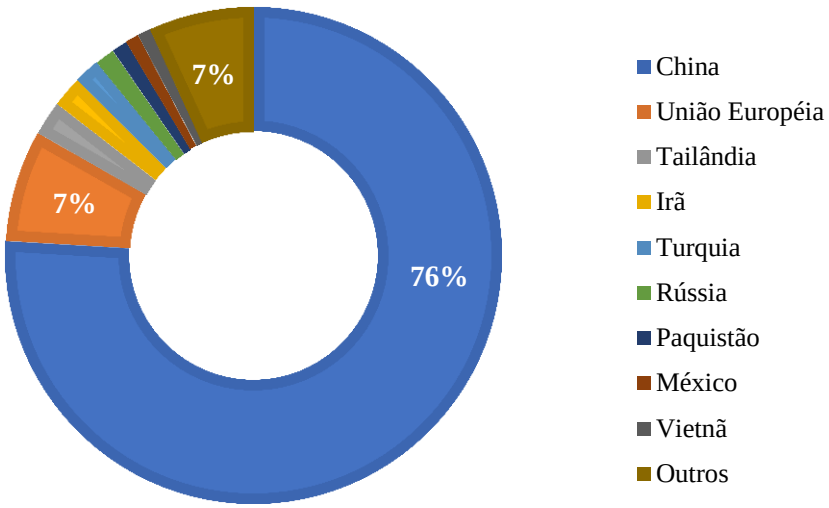


Figura 1 - Principais importadores de soja do Brasil em 2019

Fonte: Elaboração própria com dados da Secretaria do Comércio Exterior (Secex, 2020).

Medeiros e Cintra (2015) ainda apontam que, mesmo com as perdas à economia global decorrentes dos efeitos da crise global de 2008, os preços das principais *commodities* voltaram a crescer de maneira nominal em 2010, sendo o período de flutuação dos preços e posterior estabilização observado a partir de 2013, situação ilustrada na Figura 2.

.

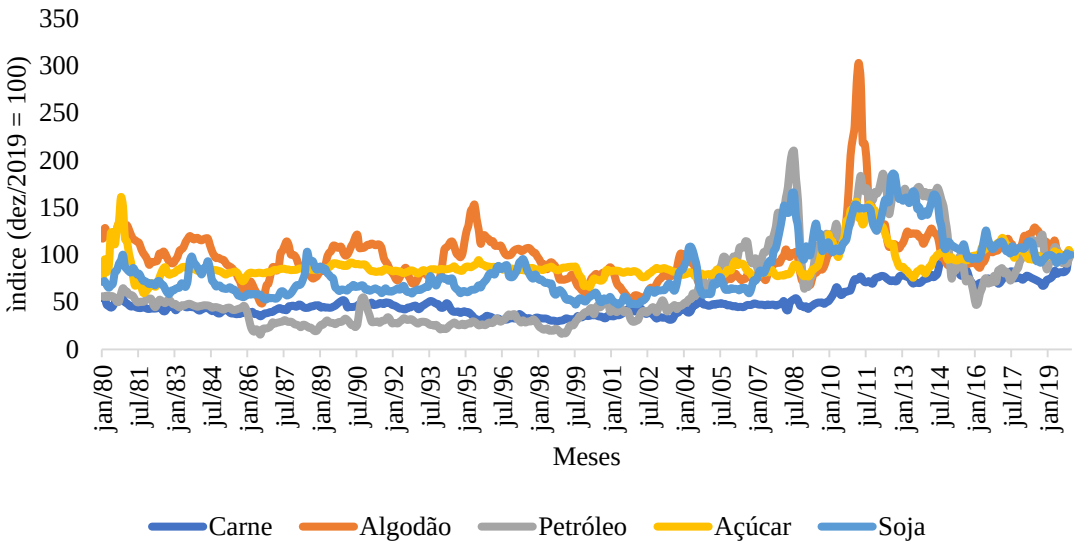


Figura 2 - Evolução mensal do preço de commodities (1980-2019)

Fonte: Elaboração própria com dados do Fundo Monetário Internacional (FMI, 2020).

Costa, Garred e Pessoa (2016) apontam em estudo sobre os eventuais favorecidos pelo "*boom* das *commodities*", que no Brasil, o efeito demanda chinês propiciou que as maiores regiões produtoras dos gêneros exportados obtivessem melhorias de renda, salários e condições sociais, podendo o Brasil ser considerado um dos vencedores nesse episódio.

1.1.2. A importância do complexo soja para o Brasil

A soja, destacadamente, é o produto mais importante para o agronegócio brasileiro, uma vez que é o principal produto exportado do país.

O mercado da oleaginosa, mesmo a brasileira, é fortemente controlado pela ação de diversas empresas transnacionais para a o fornecimento de tecnologias de produção na forma de insumos, sendo as principais delas a Monsanto, a DuPont e a Syngenta (a primeira, recentemente, incorporada à Bayer), que controlam 55% do mercado de soja mundial. Além desse segmento, 76% do mercado de agroquímicos é concentrado na atuação de três empresas, a saber: Bayer, BASF e Dow Chemical, conforme apontam Oliveira e Schneider (2016).

Além dessa concentração nos elementos principais de produção, a comercialização e o processamento estão condicionados predominantemente às operações de quatro grandes empresas: ADM, Bunge, Cargill e Louis Dreyfus. Essas controlam 80% da comercialização mundial do produto. Apenas para a América do Sul, as quatro gigantes detêm 50% da capacidade de esmagamento e são responsáveis por 85% das exportações, reforçam Oliveira e Schneider (2016).

A importância do mercado internacional frente ao complexo soja brasileiro se reflete também na formação dos preços do produto, uma vez que sendo essa uma *commodity* cuja produção global é pulverizada, o principal indicador de preços seguido é determinado pela *Chicago Board of Trade* (CBOT).

A introdução da soja no Brasil ocorreu, de acordo com Bonetti (1981), pelos imigrantes japoneses, não sendo inicialmente parte da dieta da maioria da população. A *priori*, os principais polos produtores da oleaginosa se localizaram em São Paulo e Paraná. A expansão da produção ocorreu em meados do século XX, a partir das iniciativas do governo de Getúlio Vargas de promover uma maior inserção produtiva no oeste brasileiro, dando à agricultura comercial papel de conferir estabilidade, renda e segurança alimentar aos migrantes internos, bem como aumentar a oferta de alimentos como integrante do processo de substituição de importações (PSI).

Oliveira e Schneider (2016) ainda indicam que apenas após o Golpe Militar de 1964 houve uma intensificação na produção agrícola no Centro-Oeste e no Norte do Brasil, por intervenção do general Golbery do Couto e Silva, que considerava importante o uso da agricultura para a ocupação dessas regiões, evitando assim a possibilidade de revoltas rurais de cunho comunista.

A produção sojicultora cresceu em mais de dez vezes no período de 1954 a 1969. Entretanto, o produto ainda não era o mais importante do agronegócio nacional. No mundo, mais destacadamente nos Estados Unidos, a soja passou a ser um dos principais produtos da pauta de exportação apenas na década de 1960, após a descoberta anos atrás de que serviria como importante fonte proteica, bem como para a manutenção de dietas equilibradas na pecuária.

O impulso determinante para a produção de soja no Brasil ocorreu com as manobras geopolíticas durante a Guerra Fria, conforme indica Oliveira (2016), pelas quais os Estados

Unidos se tornaram, no começo da década de 1970, um dos principais exportadores de soja para a sua principal adversária, União Soviética (URSS). Nos períodos de estiagem, os estoques soviéticos ficavam comprometidos, o que somado à crescente demanda alimentar na Europa e no Japão (dada a recuperação populacional no período de pós guerra), indicou uma superioridade comercial dos Estados Unidos. Com o intuito de deter a Guerra Fria, o governo estadunidense impôs embargos à exportação de soja, de modo que Japão e Europa foram obrigados a buscar o comércio com produtores emergentes de soja no Brasil e na Argentina.

O desenvolvimento da produção no Cerrado foi favorecido pelas pesquisas realizadas pela nascente Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), a partir de estudos relevantes sobre acidez do solo e disponibilidade de nutrientes.

Diversos outros motivos podem ser considerados essenciais para o avanço na produção no Brasil. Siqueira (2004) elenca que, a partir da década de 1980, a integração com a pecuária fica evidente, seja para o fornecimento de alimentação ao gado, bem como pelo fato de a cultura possibilitar mecanização total. Além dessas razões, Bacha (2018) destaca a formação de cooperativas, assim como de diversas políticas do governo federal para a aquisição de máquinas, construção de estruturas de armazenagem, políticas de preços mínimos e de seguro agrícola.

Particularidades do Centro-Oeste possibilitaram largo avanço da produção, como a disponibilidade de abundantes áreas a menores custos, bem como características homogêneas de clima (com um equilibrado regime de chuvas), de topografia (pelas características de planalto) e de fertilidade do solo.

Os grandes resultados da cultura induziram um movimento de deslocamento da fronteira agrícola em direção ao Norte e o Nordeste. Dessa forma, conforme verificam Freitas e Mendonça (2016), por meio de indicadores de análise regional, o crescimento no uso da terra para a agricultura brasileira entre 1994 e 2013 foi de 1,76%. No entanto, considerando apenas a cultura da oleaginosa, esse aumento foi de 5,06%.

Assim como é explicitado pela Figura 3, que aponta o avanço da produção no Brasil ao longo das últimas cinco décadas, há na década de 1990 aumento da produção no Mato Grosso e a partir de 2000, a produção caminha em direção ao eixo Centro-Noroeste do Brasil, ou mais precisamente para a região denominada MATOPIBA, a qual engloba os estados do Maranhão, Tocantins, Pará e Bahia, sendo esse último o de maior destaque no cultivo.

A produção agrícola nesses estados se concentra em grãos e o crescimento foi possibilitado, de acordo com Bolfe *et al*. (2016), pelas características de Cerrado presentes na região, explorada mais facilmente pela mecanização e ocupação de áreas anteriormente desmatadas que se transformaram em pastagens naturais.

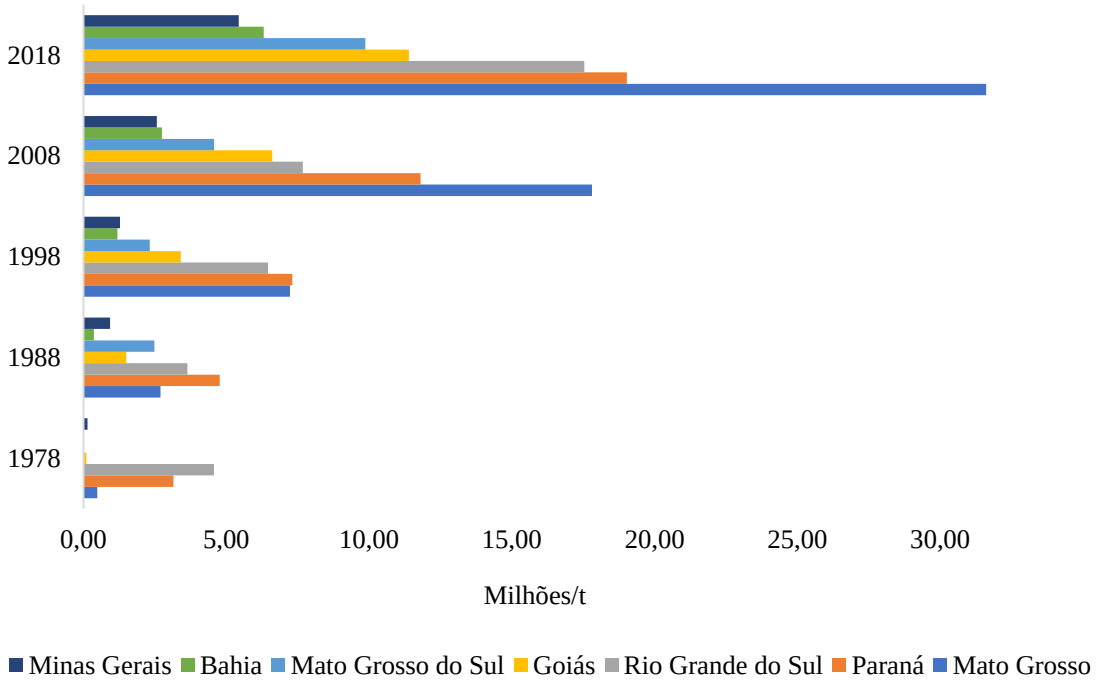


Figura 3 - Produção de soja nos principais estados produtores entre 1978 e 2018

Fonte: Elaboração própria com dados do IBGE (2020b)

O avanço da produção possibilitou o crescimento da capacidade industrial das empresas integrantes do complexo agroindustrial da soja, como por exemplo as indústrias destinadas ao esmagamento, refino e derivados, as quais passaram, a partir da década de 1980 (frente à expansão da fronteira agrícola para o Cerrado), a serem adquiridas por grupos internacionais. Sediyama *et al*. (2013) indicam que as operações de esmagamento de tais empresas são baseadas principalmente em mitigação dos custos de produção, e ganho de escala, para assim se manterem líderes em custo, além de busca por diversificação e segmentação para os derivados da soja. Os autores apontam ainda que a partir de começo do

século XX, as operações nesse segmento passaram a ser concentradas pelas poucas empresas que o controlavam; além disso, passaram a diversificar as operações, por meio de subsidiárias, que produziam insumos essenciais para a produção agrícola, como defensivos e fertilizantes.

Toda a cadeia, assim, apresenta grandes impactos para a economia do Brasil. A análise do setor, realizada por Montoya *et al*. (2019), indica que, no período de 2000 até 2014, a participação da cadeia no PIB passou de 1,4% para 2,6%.

Além disso, ao longo desse período, considerando os principais segmentos para a análise da renda, o segmento de insumos apresentou elevação de ganhos de 7,09%, segundo Montoya *et al*. (2019), em relação ao período anterior, apontando assim que ocorreram pesados investimentos no setor no período analisado.

A produção agrícola apresentou, em termos de ganhos, taxas positivas de 8,6%, representando, em 2014, 39% do PIB setorial. Notadamente esse desempenho foi possibilitado tanto pelo crescente consumo interno, principalmente para a pecuária, assim como por motivos anteriormente abordados, como a crescente demanda externa, potencializada no período posterior à entrada da China na OMC. Ao longo desse período, a produção de soja apresentou recordes, como a superprodução na safra de 2018, com 117,8 milhões de toneladas (IBGE, 2020b), bem como o substancial aumento das exportações, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Produção e exportação de soja, em toneladas (1997-2018)

Fonte: Elaboração própria com dados do IBGE (2020b) e Secex (2020)

Ao longo do período analisado, o setor agroindustrial do complexo soja, composto por esmagadoras, refinadoras e produtoras de derivados de óleo, apresentou crescimento médio de 4,6% ao ano. No entanto, em relação ao PIB setorial, esse segmento é o que apresentou a maior redução global (9,20% em 2014 e 16,1% em 2005), sendo umas das justificativas apontadas por Montoya *et al*. (2019) para isso a alavancagem do segmento de serviços, os quais cresceram 9% ao longo do período, considerando os serviços de comercialização, transportes e outros relacionados.

Para os empregos gerados pela cadeia como um todo, o segmento de aumento mais representativo foi o de serviços, com acréscimo de 8% em relação a 2000. O setor, em 2014, empregou 3.758 milhões de pessoas. Merece destaque o fato de que muito em função da mecanização no campo, observa-se uma elevação de apenas 1,6% do emprego na produção de soja no campo.

Além desses determinantes, de caráter geopolítico, a atuação governamental foi importante no fortalecimento do complexo soja por meio de determinações institucionais. Um dos principais exemplos disso, segundo Silva e Gonçalves (2019), foi a promulgação da Lei Complementar 87, de 13 de setembro de 1996 , denominada vulgarmente por Lei Kandir, em virtude da proposta original ter sido apresentada pelo deputado Antônio Kandir. Essa, tratou de instituir uma renúncia fiscal, uma vez que com o intuito de aumentar a competitividade dos produtos nacionais para o mercado externo, tratou de isentar desses produtos o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS).

Assim, a Lei Complementar, que inclui os bens para exportação como livres da cobrança do ICMS, contrariando o explicitado inicialmente pela Constituição Federal de 1988, tornara-se de fato uma medida, aliada com os objetivos políticos do então governo do presidente Fernando Henrique Cardoso, de incentivo ao comércio exterior por meio da formação de um mercado seguindo a clássica hipótese de especialização ricardiana. Silva e Gonçalves (2019) indicam que os resultados de curto prazo mostraram uma alteração na participação de produtos agrícolas na pauta de exportação nacional.

Além disso, a evolução da plantação da oleaginosa, bem como de outros produtos do agronegócio, decorre de diversos programas de incentivos governamentais, materializados principalmente na forma de crédito rural. Gasques, Bacchi e Bastos (2017) apontam que, desde 1985, diversos programas e ações foram voltados ao incentivo da atividade agropecuária, tais como mecanismos de garantia de preço por meio da formação de estoques

até a disponibilização de empréstimos, por meio de bancos públicos, para o custeio e investimento em máquinas e equipamentos agrícolas. Gasques, Bacchi e Bastos (2017) indicam, que o crédito rural é um dos principais indutores do grande desempenho do agronegócio brasileiro e que os impactos de um aumento de 1% no montante gasto com crédito rural são de respectivamente de 0,4%, 0,19% e 0,18%, para o Valor Bruto da Produção, PIB do agronegócio e Produtividade Total dos Fatores (PTF).

1.2. A Logística da Soja

1.2.1. Políticas públicas e promoção do rodoviarismo

A movimentação desse grande volume de produção do complexo soja e dos demais complexos agroindustriais do Brasil é realizada predominantemente por meio do modal rodoviário, o qual, de acordo com a Confederação Nacional dos Transportes (CNT,2019), é responsável por 61% da matriz de transporte de cargas e por 85% do transporte de passageiros.

A gênese do rodoviarismo parte da chegada dos primeiros veículos ao Brasil no final do século XIX. Costa, Silva e Cohen (2013) apresentam que a primeira década do século XX foi marcada pela elaboração de projetos de urbanização nas grandes cidades, destacadamente a capital federal do período, Rio de Janeiro, que comtemplaram a necessidade de criação de avenidas como indispensáveis para favorecer a circulação do novo meio de locomoção. Isso porque, já em 1906, havia 35 veículos no município, motivando a criação das primeiras ligações estaduais em direção ao interior.

No entanto, o definitivo impulso à construção das rodovias decorre da implantação das primeiras montadoras de veículos no Brasil. De acordo com Pereira e Lessa (2011), em 1919 a Ford iniciou a montagem, em São Paulo, do modelo Ford T a partir da importação de peças e com o uso da mão-de-obra brasileira. Em 1925, o mesmo modelo de operação foi seguido pela General Motors.

No bojo do crescimento da atividade fabril, bem como da frota nacional, o governo de Washington Luís preconizava que as principais ações da administração seriam calcadas na construção de estradas. No período de 1926 a 1930 foram elaborados planos para a criação de

rodovias, com recursos do “Fundo Especial para Construção e Conservação de Estradas de Rodagem Federal”.

O ideário rodoviarista permaneceu presente ao longo do governo de Getúlio Vargas (1930 – 1945), em que se estimulou a criação de estradas na região Nordeste, a criação do Departamento Nacional de Estradas de Rodagens (DNER), em 1937, e do Plano Rodoviário Nacional. Na sequência, de acordo com Vianna e Villela (2011), o governo de Eurico Dutra propôs o principal plano de infraestrutura da década, o Plano Salte, buscando a coordenação dos gastos públicos nas áreas de saúde, alimentação, energia e transporte. Para esse último, a ênfase seria dada à ampliação da malha viária.

Entretanto, todas essas ações se tornaram tímidas se comparadas às medidas estabelecidas no Governo de Juscelino Kubitschek (JK, 1956 – 1960). Como aponta Villela (2011), a administração JK foi embasada no avanço e modernização da economia e da indústria interna por meio das diretrizes do Programa de Metas, que objetivara, com clara ênfase desenvolvimentista, um fortalecimento da indústria como indutora de desenvolvimento, contando com a pujança de recursos naturais e populacionais para isso.

O programa, exitoso em termos de resultados de curto prazo, com taxa média de crescimento de Produto Interno Bruto (PIB) em 8,1%, teve os amplos investimentos direcionados predominantemente para os setores de infraestrutura básica, com ênfase em energia e transportes. Villela (2011) expõe que com o Plano de Metas foram construídos 17 mil quilômetros de rodovias, atingindo 138% da meta inicialmente estipulada, em comparação aos apenas mil quilômetros de ferrovias construídas, 32% da meta inicial.

Esse resultado é concordante com as demais ações do governo, que buscara a intensificação do Processo de Substituição de Importações por meio do incentivo da produção interna de automóveis e a abertura de diversos parques industriais no país, mediante fornecimento de incentivos fiscais e de infraestrutura básica.

Ao longo dos governos militares, no período do “Milagre Econômico”, segundo Hermann (2011), diversos programas foram criados e tiveram como um dos pontos principais a infraestrutura. Mesmo com o objetivo principal de desenvolvimento, em um dos objetivos secundários sobre o qual se apoiava a construção de estradas estava o de integração nacional. Isso, torna-se evidente, seja pelo Plano Estratégico de Desenvolvimento (PED), de 1968, no

Governo Costa e Silva como pelas duas fases do Programa Nacional de Desenvolvimento (PND), responsável por umas das principais obras do período, a Rodovia Transamazônica.

Ainda no período da ditadura militar, a partir da década de 1980, os investimentos em infraestrutura de transporte, e consequentemente em rodovias, foram freados no Brasil. Camilo (2016) indica que esse cenário foi decorrente da grande crise vivida pelo Estado brasileiro em função das dificuldades de acesso a crédito por parte dos países então classificados como subdesenvolvidos, após a moratória do México, de 1982.

A retomada dos investimentos ocorreu na segunda metade da década de 1990, com a execução de ações previstas nos Planos Plurianuais (PPA). Os PPAs foram estabelecidos pela Constituição Federal de 1988 com o objetivo de facilitar o planejamento econômico, a gestão do orçamento e a priorização de políticas (Couto, 2021). Assim, no bojo do primeiro PPA do governo de Fernando Henrique Cardoso, há a execução do plano “Brasil em Ação”, que teve dentre seus objetivos, de acordo com Raiser *et al.* (2017), a diminuição do tempo para a realização dos investimentos em transportes. Os autores apontam ainda que na sequência, e com os mesmos objetivos, foram criados os programas “Avança Brasil”, no âmbito do PPA de 2000 a 2003, e o “Programa Piloto de Investimentos” (PPI).

No entanto, os maiores volumes de investimento ocorreram na segunda metade da década de 2000, com as obras no escopo do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), no segundo governo de Luis Inácio Lula da Silva, de 2007 até 2010. O programa, que foi extremamente importante para o crescimento econômico do país frente aos efeitos globais originados pela crise do *subprime*, em sua primeira etapa foi responsável pelo investimento de 55 bilhões em infraestrutura de transporte, para todas as modalidades. O PAC foi expandido em sua segunda versão, entre 2011 e 2015, com investimentos de 100 bilhões em infraestrutura. (Silva, Martins e Neder, 2016).

1.2.2. Logística de exportação da soja

Correa e Ramos (2010) destacam que os pontos principais relacionados ao grande uso desse modal são decorrentes dos custos de implementação, uma vez que os custos fixos para a construção de uma rodovia são menores em comparação aos custos necessários para a implementação de trechos ferroviários. Assim, mesmo os custos variáveis sendo menores para o modal ferroviário, uma vez que são diluídos frente à capacidade de transporte da composição, contrapõem-se aos elevados custos variáveis do modal rodoviário,

principalmente em decorrência das grandes distâncias envolvidas na movimentação, em relação aos principais portos exportadores.

Estas escolhas estratégicas quanto as formas das movimentações, segundo Correa e Ramos (2010), são extremamente prejudiciais para a competitividade do produto nacional, uma vez que, considerando-se a soja, há um comprometimento de 25% do valor da saca com a logística. O percentual é elevado e se justifica principalmente pelo fato de que os custos variáveis são extremamente elevados, principalmente pela distância entre os principais estados produtores, no Centro-Oeste e dos principais portos no Sul-Sudeste, além do baixo valor agregado do produto, apontando para soluções intermodais, ou seja, integração de diversos modais de transporte, como uma virtuosa estratégia de mitigação de custos. A Figura 5 indica o panorama logístico do transporte de soja no Brasil, evidenciado as principais regiões produtoras e a localização das principais estruturas de transbordo rodoviário e hidroviário.

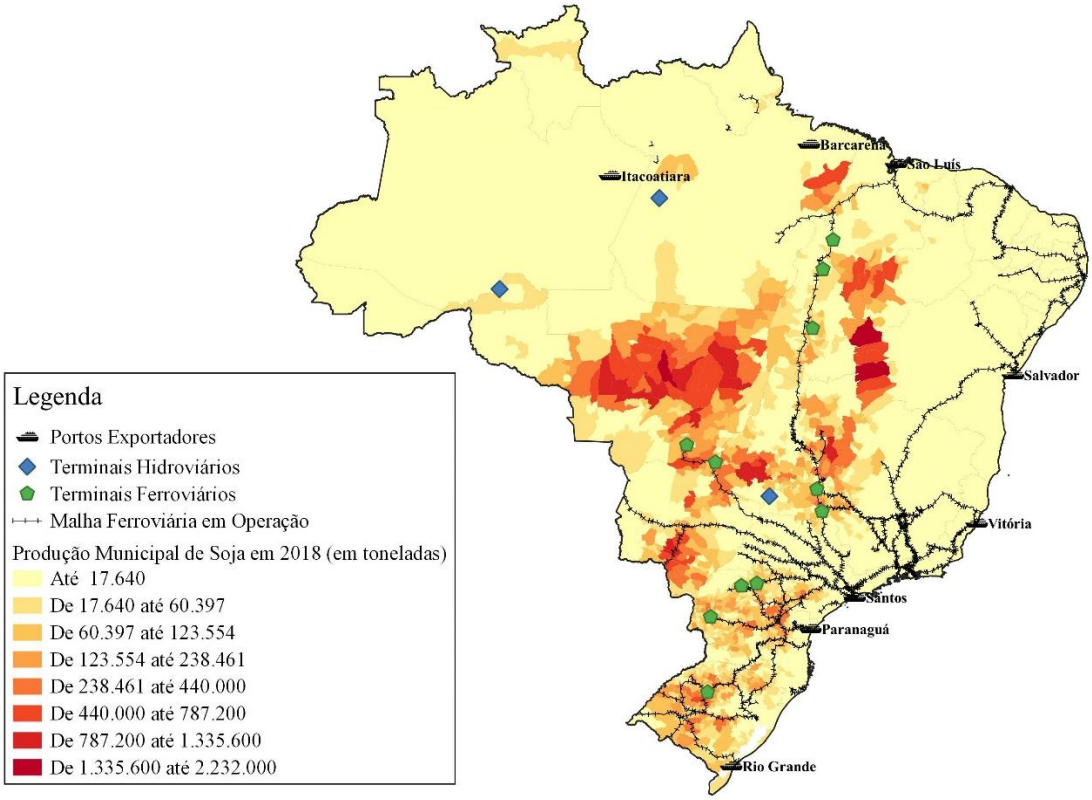


Figura 5 - Principais portos, terminais hidroviários e terminais ferroviários do Brasil

Fonte: Elaboração própria com dados do IBGE (2020) e Agência Nacional de Transportes Aquáticos (ANTAQ, 2019) e Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2019).

Para que a intermodalidade seja colocada em prática, bem como seus efeitos econômicos e ambientais possam ser efetivos, é extremamente necessário que haja uma sólida estrutura ferroviária. Assis *et al*. (2017) indicam que o Brasil possui a nona maior rede ferroviária do mundo, com mais de 29.800 quilômetros de extensão. Entretanto, a densidade ferroviária, ou seja, a extensão em relação à área, de 4,7 km/mil km², pode ser considerada baixa em comparação com outros grandes *players* da produção agrícola, como por exemplo, os Estados Unidos, que possuem a maior rede ferroviária com mais 194 mil quilômetros e uma densidade de 20 km/mil km².

Mesmo com uma malha menor do que Rússia, China e Índia, países também emergentes e integrantes dos BRICS (agrupamento de países de economias consideradas emergentes quanto ao desenvolvimento e formado por Brasil, Rússia, Índica, China e África do Sul), respectivamente, detentores das posições seguintes no ranking de maiores malhas, Assis *et al*. (2017) consideram que a primeira década do século XX trouxe grandes

investimentos para a ampliação da rede, buscando predominantemente o atendimento de corredores de exportação de produtos agrícolas e minerais. A operação ferroviária, oriunda de processo de concessão, é de responsabilidade das empresas: Vale S.A, com foco em concessões voltadas principalmente para a mineração, MRS Logística S.A, VLI. S.A e Rumo S.A. São operadores de menor porte Ferroeste, Tereza Cristina S.A, Ferrovia Transnordestina (FTL) e a Transnordestina Logística S/A (TSLA).

A análise de custos se mostra extremamente relevante para as estratégias de escoamento. Kussano e Batalha (2012) sintetizam que os principais componentes do custo logístico total podem ser divididos entre os relacionados ao transporte (do qual o frete é o principal componente), perda de mercadoria, remuneração por estadia e estoque em trânsito, custo de estadia e de oportunidade do estoque em trânsito. Somam-se a esses os relacionados a armazenagem, estoque, transbordo, custo tributário (representado pelo Imposto de Circulação de Mercadorias e Serviços - ICMS) e o custo de utilização da infraestrutura portuária. Os mesmos autores consideram a importância de análises de todos esses componentes e não apenas dos referentes a fretes, armazenagem e transbordo, o que julgam como sendo erroneamente trivial.

Kussano e Batalha (2012) consideram em suas análises três trechos para a exportação de soja: (I) Primavera do Leste (MT) para Santos (SP), utilizando a intermodalidade tanto hidroviária, quanto por meio de São Simão (GO), até Pederneiras (SP), local no qual se finaliza o trecho hidroviário e inicia-se o trecho ferroviário; (II) Primavera do Leste (MT) até Santos (SP), com o uso do trecho ferroviário, através do terminal de Alto Araguaia (MT), e (III), o trecho rodoviário direto. Por meio da análise dos custos, os quais são respectivamente R$ 234,22, R$ 183,61 e R$ 226,66 por tonelada, se evidencia que mesmo com as indicações favoráveis ao uso da intermodalidade essa alternativa não necessariamente é a mais vantajosa, muito em função da estrutura logística precária e inacessível para pequenos e médios produtores.

Assim como apresentado na Figura 5, a existência de terminais hidro-rodoviários é extremamente importante para melhoria na logística, por meio de solução intermodal. Teixeira e Campeão (2014) indicam esse como sendo um potencial negligenciado, uma vez que o país utiliza apenas 13 mil quilômetros dos 48 mil quilômetros navegáveis, compostos por 16 hidrovias. De acordo com CNT (2019), o transporte hidroviário representa apenas 13,6% da matriz de transportes nacional. Silva e Marujo (2012) apontam que uma vez que há

um menor consumo de combustível, o modal hidroviário caracteriza-se como o melhor ambientalmente para as emissões de CO_2. Silva e Marujo (2012) indicam ainda, com base em estudos da Agência Nacional de Transportes Aquáticos (ANTAQ), que o transporte de 42 milhões de toneladas, pelo modal fluvial, possibilitaria uma redução de 56% nas emissões de CO_2 frente o mesmo transporte com caminhões.

Os principais portos utilizados no transporte de soja se encontram na região Centro-Sul, destacadamente os portos de Santos e de Rio Grande, os quais, em 2019, foram responsáveis por 42,75% do escoamento. No entanto, nas últimas décadas, consolidou-se como alternativa para o escoamento da grande produção oriunda do Mato Grosso, ou das principais regiões do Norte e Nordeste, os portos do chamado "Arco Norte", localizados em Manaus, São Luis, Santarém, Belém e Salvador, cuja participação no escoamento da oleaginosa é crescente, conforme apontado pela Figura 6.

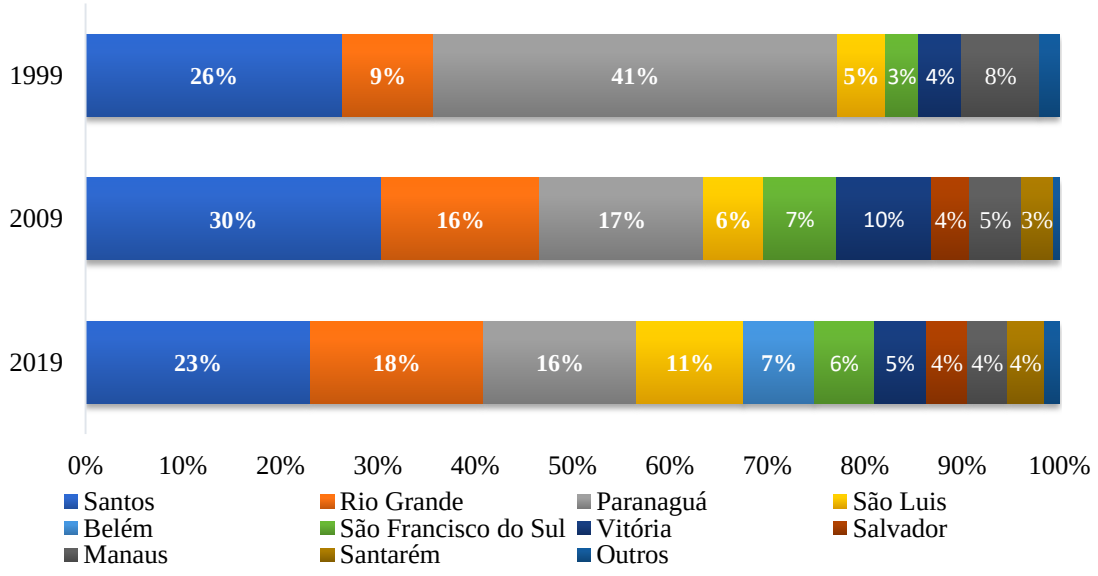


Figura 6 - Participação por porto nas exportações de soja em 1999, 2009 e 2019

Fonte: Elaboração própria com dados do ME (2019)

O uso dos portos do Arco Norte se tornou uma alternativa tanto em termos de competitividade, pelas menores distâncias e consequente diminuição nos fretes, como por eventualmente causar menores impactos ambientais em comparação aos portos do Centro -

Sul. Vettorazzi *et al*. (2017) demonstram que a movimentação por meio desses portos, em soluções multimodais, permitiu a redução de até 60% nas emissões de CO_2 dos fluxos originados no norte do Mato Grosso, sendo investimentos na melhoria da Hidrovia dos Tapajós uma grande alternativa. Por outro lado, o intensivo uso do transporte rodoviário para esses destinos pode ser prejudicial em termos de custo e de danos ambientais.

Esse comportamento apresentado pela participação dos portos do Arco Norte, é decorrente do papel fundamental dos investimentos em infraestrutura, importantes tanto para a economia, pela busca da competitividade, e com reflexos no meio ambiente. Os investimentos totais, representados pela Formação Bruta de Capital Fixo, foi o indicador mais afetado na recessão recente. De acordo com o IBGE (2020a), o indicador que em 2013 representou 20,9% do PIB, maior valor do século XXI, chegou ao menor patamar, de 16,4% da renda, em 2016.

Como justificativa, de acordo com Orair e Siqueira (2018), após 2015, período de término de uma trajetória de expansão do investimento público, esse foi reprimido de acordo com a necessidade de adoção de uma política fiscal equilibrada. Soma-se a isso, que o período de recessão (2015 – 2017) impactou diretamente o investimento privado, um dos indicadores cuja direção é determinante para o desempenho da economia. Esse cenário se refletiu nos investimentos em infraestrutura, cuja evolução é apresentada na Figura 7.

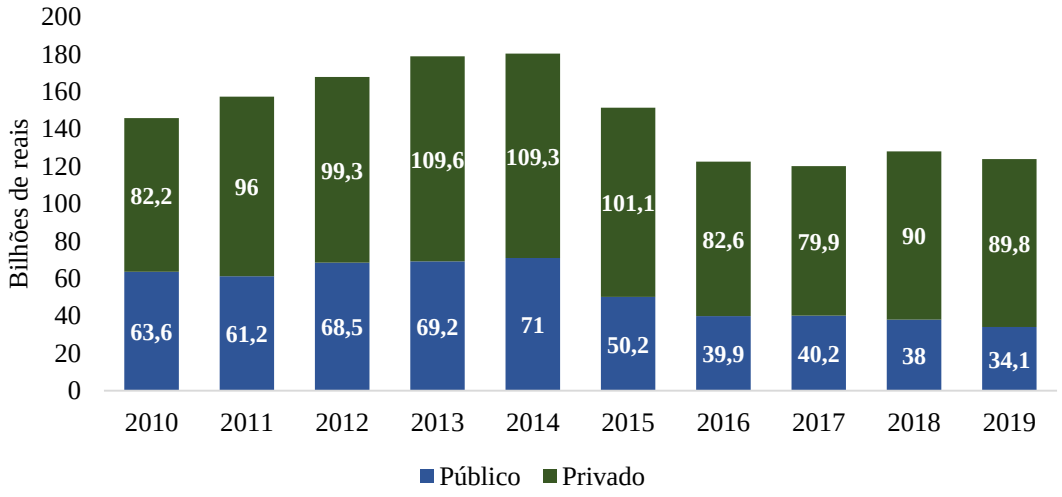


Figura 7 - Investimento em infraestrutura no Brasil (2010 - 2019).

Fonte: Elaboração própria com dados da Associação Brasileira da Infraestrutura e Indústrias de Base (Abdib, 2020).

Tal queda dos investimentos é acompanhada pela insuficiência dos aportes realizados, em comparação com a necessidade. Para o setor de transporte e logística, de acordo com Abdib (2020), em 2019, os investimentos foram de R$ 25 bilhões. No entanto, os investimentos necessários exigiriam R$ 149 bilhões, 2,26% do PIB. As projeções realizadas pelo Global Infrastructure Outlook / Oxford Economics (2017) em relação aos investimentos em infraestrutura necessários para o período de 2016 a 2040 são de US$ 61 bilhões para infraestrutura aérea, U$$ 127 bilhões em portos, US$ 207 bilhões em transporte rodoviário e US$ 1,2 trilhão em ferrovias, sendo o último o que apresenta maior gap esperado, uma vez que a indicação é para investimentos na ordem de US$ 345 bilhões.

Karpowicz, Góes e Garcia-Escribano (2018) apresentam em análise, que superar os gaps de investimentos é extremamente importante em níveis econômicos, uma vez que a infraestrutura é a base para a superação de gargalos históricos e para competitividade. Além disso sociais, uma vez que é um dos principais indutores de desenvolvimento, pela ampliação da rede de infraestrutura básica (serviços essenciais) e pela integração nacional proporcionada pela rede de transporte.

Esses autores ainda indicam que a superação desses gargalos pode ser acelerada com programas de concessão e parcerias com a iniciativa privada. Além disso, reformas econômicas são importantes para assegurar ambiente de negócio atrativo aos investimentos privados estrangeiros.

A melhoria de rodovias, como a BR-163, de acordo com Torres *et al*. (2017), permitiria a mitigação de perdas econômicas, tanto pela melhoria do rendimento do caminhão bem como pela diminuição de perda física de produto (o que promoveria redução dos danos ambientais).

Inegavelmente, o modal rodoviário apresenta vantagens relevantes para a movimentação, sendo a principal delas a flexibilidade no transporte. Mesmo assim, uma análise além dos custos de implementação, como a realizada por Eller *et al*. (2011), considerando-se os custos ambientais de perda de biodiversidade, de cobertura vegetal e de poluição, tanto para operação quanto instalação, indicam vantagens para as ferrovias. Fica evidente que o uso do transporte rodoviário é indutor de problemas ambientais,

principalmente relacionados à poluição, sendo que as ações voltadas para mitigação desse problema, por meio da formulação de políticas, devem incluir o setor de transportes.

1.3. A Questão Ambiental

1.3.1. Acordos ambientais internacionais

As revoluções econômicas, bem como as alterações das estruturas produtivas caracterizam a forte atuação antropológica sobre a natureza, por meio de um acentuado processo de uso de recursos naturais e, consequentemente, influência nos fenômenos climáticos. Frente à consciência da necessidade de alteração do curso do uso de recursos naturais e na relação da produção com o meio ambiente, Moser (2010) preconiza o grande desafio às autoridades de implantar ações reais de modificação desses cenários. Desafio, segundo o autor, estremado complexo, uma vez que exige fortes movimentos e mudanças institucionais e produtivas para o êxito.

Mesmo sem estipular metas para o enfrentamento das mudanças climáticas, denotadamente para o aquecimento global, as bases para a formulação de planos e políticas voltadas a esse fim surgem na segunda metade do século XX, inicialmente na Conferência de Estocolmo, em 1972. Essa, conforme apontam Guimarães e Fontoura (2012), tonou-se um marco por ser o primeiro grande evento no qual se discutiram as degradações ambientais provocadas pela ação humana e como os impactos derivados dessa podem atingir o desenvolvimento humanos das nações e os direitos humanos.

As discussões relacionadas ao meio ambiente foram reforçadas ao longo da década de 1990. Em 1992, no Rio de Janeiro, foi realizada a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, a Eco-92, na qual membros de 178 países discutiram as bases para medidas objetivando as reduções das emissões globais de gases do efeito estufa (GEE), com a criação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (CQNUMC), indicando caminhos para a realização de ações voltadas à mitigação dos danos ambientais.

Inicia-se nessa década, conforme relembram Marcatto e Lima (2013), por influência das decisões decorrentes da Eco-92, a realização anual das Conferências das Partes (COP), sendo a primeira realizada em Berlim, em 1995, na qual, por meio do Mandado de Berlim, iniciaram-se negociações visando à elaboração de um protocolo obrigatório de redução das emissões.

A formalização das tratativas e intenções dos encontros anteriores ocorreu na terceira COP, realizada em Quioto, Japão, em 1997, por meio do "Protocolo de Quioto", cujas regras para início e diferenciação da atuação dos países foram detalhadas nas conferencias seguintes. O Protocolo entrou em vigor em 16 de fevereiro de 2005, sendo sua principal contribuição a busca pela diminuição das emissões de GEE, por parte dos países desenvolvidos (membros do Anexo 1[1] da CQNUMC) a níveis 5% inferiores aos registrados por atividades relacionadas à atuação humana, abaixo dos níveis de 1990, entre 2008 e 2012.

Barrett (1998) acrescenta que uma vez estabelecidas as metas do Protocolo, sendo essas voltadas à atuação dos países desenvolvidos, com o entendimento de que todas as emissões realizadas por todos os países, independentemente de serem ou não do Anexo 1, são relevantes para o atingimento das metas, estabeleceram-se mecanismos de flexibilização com o intuito de diminuir o impacto econômico nos países desenvolvidos, integrando os países desobrigados pelo acordo a realizar ações. Os mecanismos adotados foram a Implementação Conjunta, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), ou seja, a implementação por parte dos países desenvolvidos de projetos de investimento sustentáveis em países excluídos das obrigatoriedades do Protocolo, que certificados, computariam os benefícios como parte da quota reduzida por esse país, mesmo sendo uma redução fora do seu território, além do Comércio de Emissões.

---

[1] A CQNUMC realizou a divisão entre os países membros da Convenção em pertencentes ao "Anexo 1", países industrializados, membros da OCDE (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico) em 1992 e os países oriundos do bloco soviético, passando por transição na economia. Os não pertencentes desse, foram denominados como "Não pertencentes ao Anexo 1", sendo posteriormente no Protocolo de Quioto desobrigados das determinações. Os países do "Anexo 1" são: Alemanha, Austrália, Áustria, Belarus, Bélgica, Bulgária, Canadá, Croácia, Dinamarca, Eslovênia, Espanha, Estados Unidos, Estónia, Rússia, Finlândia, França, Grécia, Holanda, Hungria, Irlanda, Islândia, Itália, Japão, Letónia, Liechtenstein, Lituânia, Luxemburgo, Mônaco, Noruega, Nova Zelândia, Polônia, Portugal, Reino Unido, República Checa, República Eslovaca, Romênia, Suécia, Suíça, Turquia e Ucrânia.

O protocolo, cuja vigência se encerraria em 2012, foi prorrogado até o final de 2020, após a COP-18, em Doha, Catar. Entretanto, a renovação ocorre com o enfraquecimento das metas frente à nova realidade, uma vez que Estados Unidos e China, responsáveis por 40% das emissões mundiais, são isentos das sanções legais do protocolo, visto que o primeiro não ratificou o acordo na COP-7, de Marrakesh, enquanto o segundo, caracterizado como país em desenvolvimento em 1997, não faz parte do Anexo 1.

Entretanto, uma vez que o Protocolo impôs diferentes responsabilidades aos países na sua fase inicial, bem como a desobrigação de participação por parte dos principais emissores, muitos questionamentos foram feitos em relação à eficiência do acordo para a redução das emissões. Maamoun (2019) aponta que há dificuldades para realizar essa afirmação, uma vez que o princípio de "responsabilidades comuns, porém diferenciadas" do protocolo causa viés de seleção nas análises, o que somado à característica transfronteiriça da poluição do ar, às análises baseadas nos desempenhos mitigatórios de emissões dos países, aumentam o viés. Assim, a autora, utilizando o método de Controle Sintético Generalizado (*Generalized Synthetic Control Method* – GSCM), para a avaliação do grupo de tratamento, identifica que, frente à robustez ao viés de seleção, houve entre 2008 e 2012 uma redução de aproximadamente 6% nas emissões de GEE.

Esses resultados seguem a mesma direção verificada por Grunewald e Martinez-Zarzoso (2016), em análise na qual se avaliou o impacto do Protocolo nas emissões frente aos países que ratificaram o acordo. Para isso, por meio do estimador *difference-in-differences* em painéis e por meio de escores de pareamento, realizou-se a comparação do grupo de integrantes do Anexo 1 com países de características similares (sob os quais não cabem as restrições legais do acordo) e indicaram uma redução de 7% nas emissões de dióxido de carbono (CO_2) nos países vinculados ao Protocolo.

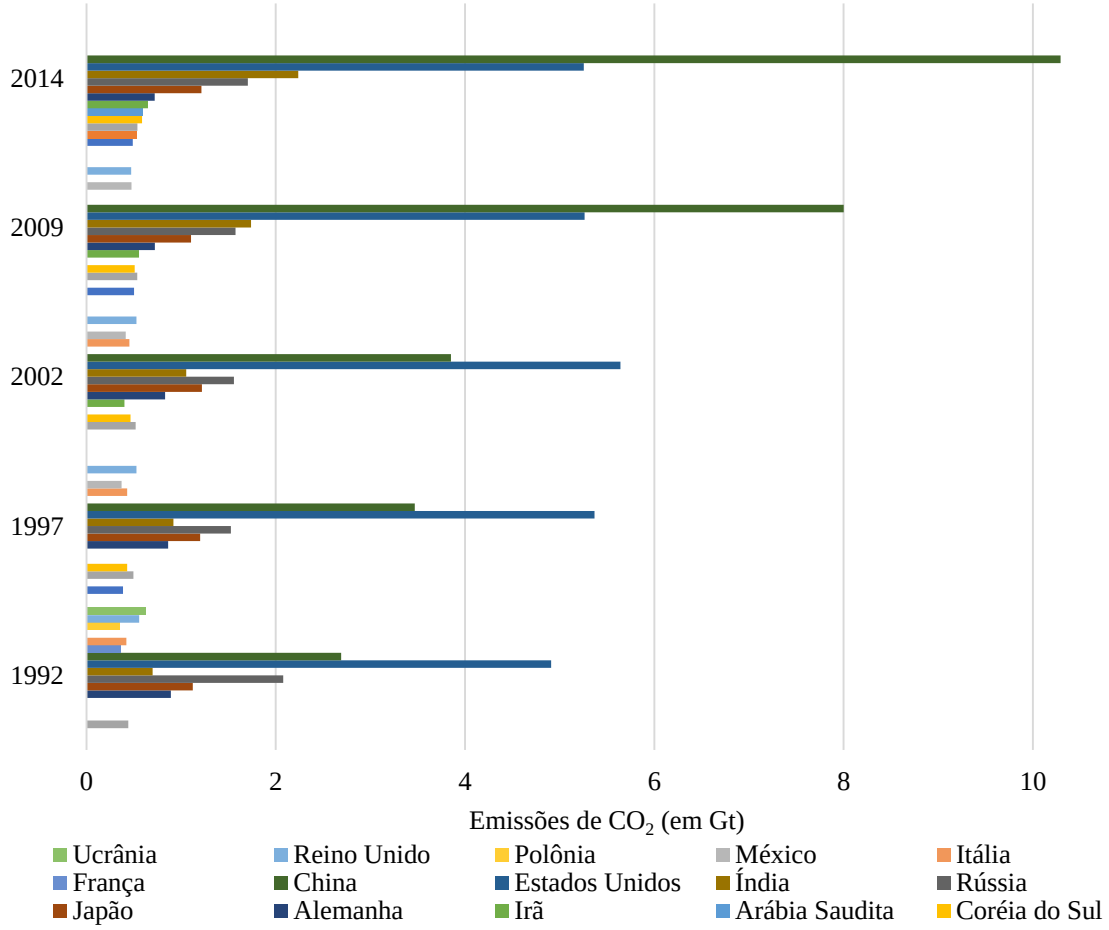
Tais resultados contrastam os apontados por Almer e Winkler (2017), que indicam que não há evidências de redução significativa nas emissões em CO_2, em análise que também utilizou GSCM no período de 1998 a 2011, para quinze países selecionados.

Christoff (2016) detalha que, em substituição ao Protocolo de Quioto assim como frente ao objetivo de se apontar um novo e abrangente acordo e dada a necessidade de redução das emissões em controle ao aquecimento global, negociações foram iniciadas na COP-15 em Copenhagen, sobre os moldes para esse eventual novo acordo e para o novo papel

dos países isentos de responsabilidades pelo Protocolo de Quioto como relevantes causadores de emissões.

Os países considerados economicamente como emergentes, embora não sendo os principais causadores das emissões acumuladas historicamente, possuem grande volume de emissão corrente de Gases do Efeito Estufa, destacadamente o dióxido de carbono (CO_2).

A Figura 8 indica que o motivo dessas discussões é derivado das consolidações dos países dos BRICS (Brasil, China, Rússia, Índia e África do Sul), como integrantes do ranking de maiores emissores, não podendo ser isentos de responsabilidades, como ocorreu com o Protocolo de Quioto.



Os anos escolhidos para demonstrar a evolução dos doze maiores países emissões de CO_2 baseou-se na realização de eventos e conferências relevantes para a discussão e implementação de acordos climáticos: 1992 (Eco Rio), 1997 (COP3, em Quioto), 2002 (Rio +10), 2009 (COP 15, em Copenhagem) e 2014 (Pré Acordo de Paris).

Figura 8 - Principais países emissões de CO_2 (1992-2014)

Fonte: Elaboração própria com base em World Bank Group (2020)

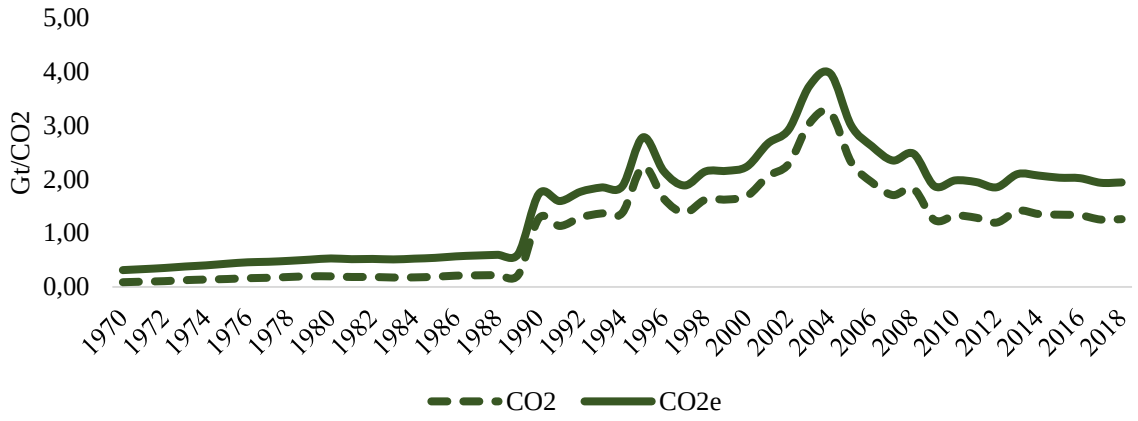
Assim, a 21ª Conferência das Partes (COP-21) se conclui com a assinatura do "Acordo de Paris", que possui como principais objetivos o controle da temperatura global abaixo de 2º acima dos níveis pré-industriais. Além disso, propõe-se a limitação do aumento da temperatura a 1,5º acima dos níveis pré-industriais. O acordo, conforme aponta Falkner (2016), foi realizado com base de que as responsabilidades, ao contrário do que ocorreu com o Protocolo de Quioto, deveriam ser diferenciadas para todos. Assim, por meio das *Nationally Determined Contributions* (NDCs), cada país apresentou suas ações para o cumprimento dos objetivos, de acordo com as suas características produtivas e capacidade de redução de emissões, sendo essas passíveis de alteração a cada cinco anos. O mesmo autor considera que essa forma de atribuição de metas é condizente com a impossibilidade de exigência de grandes reduções nas emissões por parte dos países membros seguindo "o mesmo manual", dado que a determinação por parte dos membros das ações a serem realizadas as tornam mais factíveis.

Entretanto, para que os objetivos sejam de fato alcançados, é necessária a materialização em projetos da disposição dos envolvidos. Nordhaus (2018) indica que pelos esforços implementados atualmente, assim como pelo enfraquecimento do engajamento dos países (tal como os Estados Unidos, que não ratificaram o acordo), as metas estipuladas pelo Acordo de Paris são inviáveis de serem atingidas, uma vez que poucas ações concretas estão sendo realizadas para a criação de novas tecnologias e políticas com essas finalidade. O estudo, embasado no modelo DICE (*Dynamic Integrated Model of Climate and the Economy*), indica que para estratégias que consideram a precificação de carbono (para o mesmo autor, a melhor alternativa de política), a inércia dos esforços somada às incertezas faz com que o preço do carbono tenha que ser progressivamente aumentado para que essas metas sejam atingidas enquanto as políticas seguem atrasadas.

Para que os acordos sejam producentes de fato, Stern e Rydge (2012) consideram que são necessárias diversas medidas que passam pela modificação de estruturas produtivas e processos, principalmente para a indústria, sendo que essas ações devem estar orientadas a um novo entendimento das fontes energéticas, com surtos de criatividade e inovação com foco em processos que utilizem fontes que promovam menores emissões dos GEE.

1.3.2. Políticas ambientais recentes no Brasil

A partir da realização da Eco-92 no Rio de Janeiro em 1992, percebe-se, de acordo com Moura (2016), um fortalecimento das ações do Brasil em busca de políticas públicas ambientais, tal como a criação do Ministério do Meio Ambiente em 1992, bem como a elevação, a partir do último decênio do século XX, das emissões de GEE no Brasil, conforme ilustra a Figura 9.



O valor apresentado para a emissões de CO_2e (equivalente) segue as conversões padrão do quinto relatório do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) – AR5, pela abordagem GWP (*Global Warming Potential*), calculado de acordo com o potencial de geração de aquecimento global CO_2 = 1, CH_4 = 21, N_2O = 310, HFC-125 = 2.800, HFC134a = 1.300, HFC-143a = 3.800, HFC-152a = 140, CF_4 = 6.500, C_2F_6 = 9.200, SF_6 = 23.900).

Figura 9 - Emissões de CO_2 e CO_2e no Brasil (1970-2018)

Fonte: Elaboração própria com base em Observatório do Clima - Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. (SEEG, 2019)

Viola e Franchini (2013) analisam a governança climática do Brasil e apontam que até 2005 houve a predominância da ideia de um modelo de crescimento "hiperintensivo em carbono". Os autores alegam que houve uma mudança de política no período de 2005 a 2009, quando a trajetória de emissões apresentou queda considerável em função da diminuição do desmatamento na Amazônia (a taxa média anual de desmatamento de 22 mil km^2 entre 2000 e 2005 passou para 7,5 mil km^2 em 2009), o que foi possível pelo aumento da fiscalização e implementação da lei por parte do Estado, atuação de organizações não governamentais (ONGs) e cooperação entre as unidades da federação que abrangem a Amazônia Legal.

É a partir da década de 2000, frente ao aumento nas discussões globais dos acordos e assembleias da ONU supracitadas, que o país buscou se comprometer voluntariamente já na COP-15, em Copenhague, à redução da emissão dos GEE entre 36,1% e 38,9% em relação ao volume projetado de emissões em 2020, com uma série de programas setoriais realizados para cumprir o escopo da Política Nacional de Mudança Climática (PNMC), instituída por meio da Lei no 12.187/2009.

Teixeira, Molleta e Luedemann (2016) ainda listam que os principais planos setoriais desenvolvidos visavam a mitigação das emissões e as adaptações às mudanças climáticas em alguns setores de extrema relevância para economia nacional, sendo os principais deles o Plano Indústria e o Plano ABC, visando à redução das emissões de carbonos nos setores industriais e agrícolas, respectivamente.

Os mesmos autores ainda apontam que, dentre os principais resultados dos esforços do Brasil (e também uma das principais justificativas para a escolha dos setores alvo da PNMC), observou-se que entre 2005 e 2014, de acordo com o relatório "Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil", ter havido uma redução de 87,1% nas emissões decorrentes no uso de terras e florestas (porém, um aumento nos demais setores), conforme ilustrado na Figura 10.

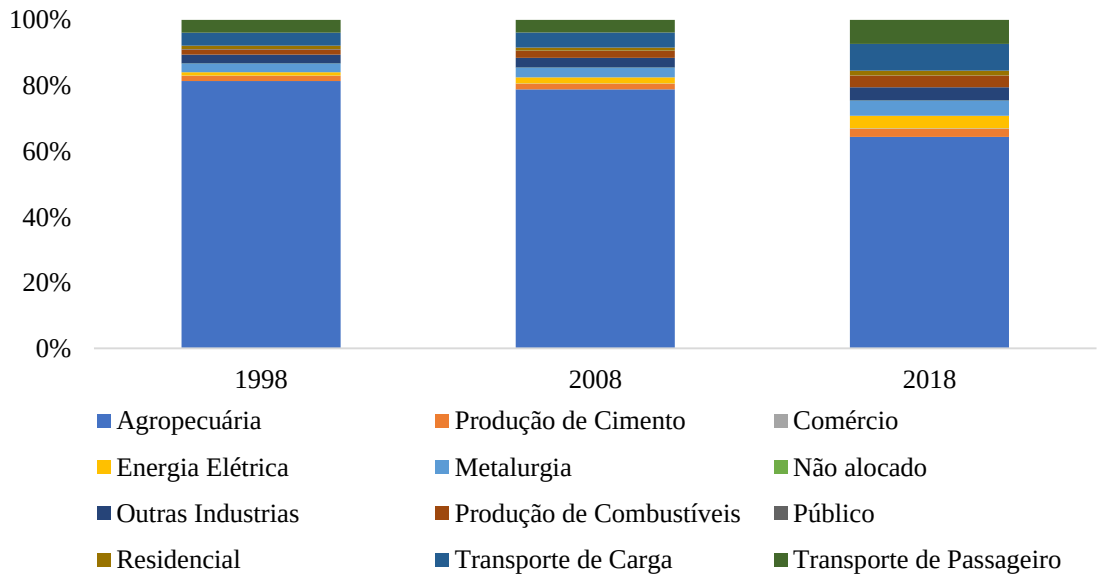


Figura 10 - *Share* dos setores nas emissões de CO_2 em 1998, 2008 e 2018

Fonte: Elaboração própria com base em Observatório do Clima -. (SEEG, 2019)

A Figura 10 confirma o identificado por Viola e Basso (2015), que consideraram que o Brasil apresenta um perfil de emissões diferenciado dos demais grandes emissores, tais como os Estados Unidos e a União Europeia, uma vez que, assim como indicado anteriormente, o segmento de uso da terra e florestas é o historicamente o que mais emite GEE (enquanto nos países desenvolvidos o segmento de energia ainda é, historicamente o maior emissor, muito em função do uso de fontes energéticas não renováveis).

Os mesmos autores ainda apontam que o Brasil é o maior produtor e usuário de energia elétrica global, sendo essa uma fonte renovável e energeticamente muito mais limpa que a oriunda de usinas termelétricas movidas a carvão. Entretanto, mesmo assim são necessárias políticas e ações voltadas ao segmento de energia pelo uso de combustíveis fósseis pelo sistema de transporte, dependente do modal rodoviário e tendo o óleo diesel, de baixa qualidade ambiental, dada a elevada concentração de enxofre na composição, como combustível principal. Mesmo o país sendo o maior produtor de etanol de cana-de-açúcar do mundo, ainda estão sendo realizadas modificações nas estruturas produtivas para a ampla produção de biodiesel no país, fomentadas pela Programa Nacional do Biodiesel de 2005.

Além disso, um dos riscos considerados é o desencorajamento da produção de biodiesel em virtude das expectativas decorrentes das reservas de petróleo do “Pré-Sal”, descobertas em 2006 (o aumento da oferta de combustível fóssil coloca em risco a preferência dos consumidores por biocombustíveis na guerra de preços). Assim, o segmento de transporte se evidencia como sendo um dos setores sobre o qual se recaem as maiores preocupações ambientais no Brasil.

1.3.3. As questões ambientais no setor de transportes

Fuglestvedt *et al*. (2010) expõem a preocupação do uso de transporte movido a diesel e dos diversos impactos atmosféricos dele decorrentes com a emissão de diversos gases, dos quais se destacam os óxidos de carbono (CO e CO_2), óxidos de nitrogênio (NOx), óxidos sulfúricos (SOx) e hidrocarbonetos aromáticos (HA). Entretanto, não há uma ampla preocupação na mitigação de todos esses gases, uma vez que alguns permanecem menor tempo particulado na atmosfera. Mesmo gerando danos ambientais, não foram incluídos nas metas de redução dos acordos com base no Protocolo de Quioto.

O enfrentamento das mudanças climáticas por meio das políticas e programas surgidos no escopo da Política Nacional de Mudanças Climáticas (PNMC) buscaram contribuir com os objetivos da política. Das ações adaptadas nesse período, destaque para Programa Nacional de Transportes e Logística (PNTC) e o Programa Nacional de Energia (PNE 2030).

O primeiro, de acordo com Neves, Chang e Pierri (2015), objetiva a criação e a melhoria de infraestrutura logística, com investimentos de R$ 290 bilhões, com ênfase em ampliação do modal de transporte ferroviário, com aplicação de 51% dos recursos e melhorias no transporte rodoviário, com 24% do montante do investimento. Esse plano, embora considerado importante por buscar ampliar a participação ferroviária, não se caracteriza, na visão dos autores, como um plano de características ambientais, uma vez que propõe a construção de rodovias em áreas de biomas que devem ser protegidos -como a Amazônia - bem como ainda incentiva essa modalidade, potencializando ameaças de outro grande problema ambiental: o desmatamento.

O Plano Nacional de Energia, ou PNE 2030, busca conseguir o atingimento de objetivos a longo prazo, até o ano de 2030, possuindo entre suas determinações o incentivo por meio de subsídios à produção de biodiesel, segundo Rathmann, Szklo e Schaeffer (2012). O trabalho de Santos e Ferreira-Filho (2017), que apresenta análise sobre impactos econômicos da medida, aponta que a expansão do uso do biocombustível, ao contrário das críticas, apresenta além dos benéficos impactos ambientais, benefícios econômicos, considerando-se aumento de valor nas variáveis emprego, investimentos e renda.

A poluição, além de todos os impactos ao meio ambiente, traz consigo problemas imediatos à saúde da população, sendo o principal e ainda vigente programa voltado à regulação da poluição no transporte surgiu objetivando mitigar os impactos das emissões de gases poluentes, inicialmente de veículos de passeio, na saúde. De acordo com Miraglia e Gouveia (2014), foi criado em 1986, pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), que tem sua evolução balizada por meio das novas tecnologias necessárias para a mitigação das emissões e objetivos das regras das regulações Euro, iniciadas em 1992 e desenvolvidas pela União Europeia para o controle das emissões por veículos.

Mesmo inicialmente buscando minimizar os impactos das emissões dos veículos leves, elaborou-se também fases específicas para os veículos pesados, que utilizam óleo diesel como

combustível, denominadas com prefixo “P”. O óleo diesel é grande agressor ao meio ambiente também pela presença de enxofre (S) em sua composição.

A Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2012) aponta que o programa possui, até o momento, sete fases, sendo que as cinco primeiras exigiram apenas modificações no motor e a sexta não está sendo seguida adequadamente. No entanto, a última fase, Proconve P7, exige além disso, adequações no sistema de pós-tratamento dos gases de escapamento, além da necessidade de uso do diesel com menor teor de enxofre, o S50 (50 partes por milhão).

Os veículos fabricados a partir de 2012 devem contar com a tecnologia de redução catalítica seletiva, SCR (*Selective Catalityc Reduction*), a qual, por meio de um reagente, o Arla 32, composto principalmente por ureia, realiza reações químicas no catalizador diminuindo as emissões de NOx (óxidos de nitrogênio). As ações se justificam, conforme aponta a Figura 9, pelo transporte de carga ser um importante emissor de GEE.

Essa preocupação com o transporte rodoviário não é exclusiva do Brasil. Kim e Van Wee (2009) realizaram a comparação em relação às emissões no transporte de contêineres na Europa, considerando as possibilidades de transporte realizado exclusivamente por modal rodoviário, bem como a intermodalidade por meio de trens movidos à eletricidade ou a óleo, concluindo que o pior cenário para as emissões é decorrente do uso exclusivo de caminhões. Os mesmos autores advogam ainda que a intermodalidade possa ser ambientalmente insuficiente em decorrência do uso das fontes não renováveis para a geração de energia elétrica. Para os Estados Unidos, Quiros *et al*. (2017) afirmam que as emissões de CO_2 por meio de veículos pesados a diesel é superior às decorrentes no transporte com veículo que utilizam diesel híbrido , biogás ou gás natural.

Outros fatores, os quais são extremamente intrínsecos na logística de transporte do Brasil, são potencializadores das emissões de GEE, principalmente de CO_2 no transporte de cargas. Uma vez que essa emissão decorre da combustão de diesel, o maior consumo do combustível acarreta diretamente maiores emissões. Esse consumo é aumentado em decorrência do esforço que os veículos realizam nas operações em rodovias de pavimentação de qualidade inferior, conforme elucidam Bartholomeu e Caixeta Filho (2009), que ainda indicam como estratégias a recuperação de estradas degradadas, o que seria producente na mitigação das emissões.

No Brasil, no entanto, a despeito disso, a maior parte da malha rodoviária pavimentada (108,8 mil quilômetros) é considerada de padrão insatisfatório ou regular, principalmente pelos critérios de qualidade dos pavimentos, bem como pela geometria da via, conforme apontado na Figura 11, de acordo com a Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2019). O levantamento indica que as condições gerais das rodovias consideradas irregulares aumentam o consumo de combustível em 5% ou, de acordo com o estimado, um consumo adicional de 900 bilhões de litros de diesel.

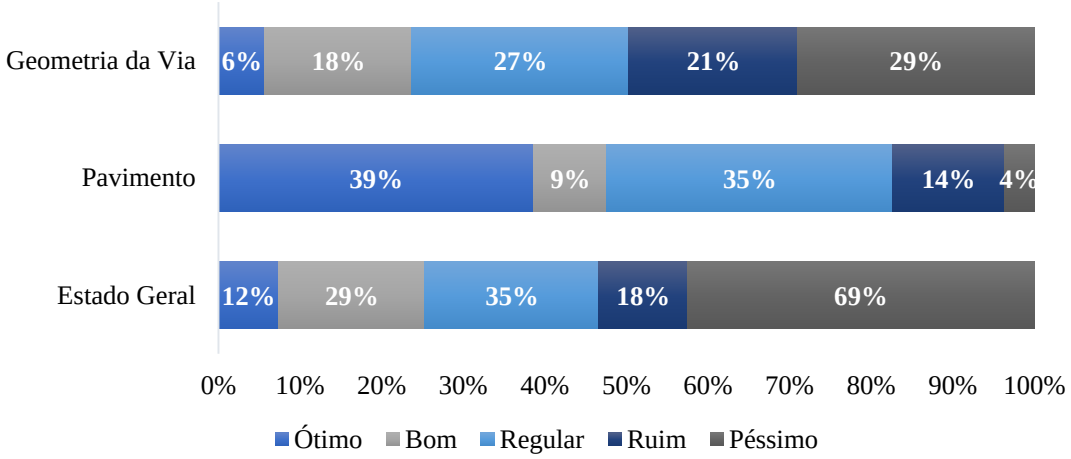


Figura 11 - Condições das rodovias no Brasil

Fonte: Elaboração própria com base em CNT (2019)

Além disso, Cruvinel, Pinto e Granemann (2012), em estudo sobre a mensuração econômica das emissões de CO_2 no transporte realizado por transportadores autônomos, apontam para que uma das principais variáveis indutoras de maiores emissões é a avançada idade da frota de caminhões no Brasil, a qual, por meio do aumento da ineficiência energética, bem como por desprover de novas tecnologias, gera maiores custos com diesel para os autônomos, bem como graves externalidades negativas à sociedade, decorrente das emissões. Os autores ainda estimam, por meio do método *Top Down*, que a renovação das frotas com a substituição dos veículos com idade maior que 30 anos provocaria uma redução anual de três milhões de toneladas de CO_2 emitidas. De acordo com CNT (2019), a idade média da frota nacional é de 15,2 anos.

O cultivo de soja apresenta diversos impactos ambientais, além dos relacionados ao transporte, enfoque principal desse trabalho. Fearnside (2001) aponta, considerando a evolução da produção no Brasil, que o setor sojicultor apresenta como potenciais de impacto ambiental a degradação do solo e contaminação de fontes de água pelo uso de substâncias químicas. Além desses, destaca um efeito de arrastamento (*dragging effect*) uma vez que os impactos nos ecossistemas decorrentes do avanço da produção são profundos em decorrência da criação de diversas infraestruturas – como as de logística, que além do impacto para a construção são indutoras para o crescimento de outras atividades danosas ambientalmente como a pecuária.

Um dos principais exemplos da ocorrência desse efeito de arrastamento é perceptível na dinâmica de uso da terra e a relação com o desmatamento, grande impacto ambiental pela emissão de gases e danos aos ecossistemas. A produção de soja no Brasil e a o avanço da fronteira agrícola possui indiretos, mas importantes, laços com o desmatamento. Conforme indicam Macedo *et al.* (2012), a produção de soja no estado do Mato Grosso, entre 2006 a 2010, teve 78% do crescimento decorrente do aumento da área, que ocorreu 91% em áreas anteriormente desmatadas para pastagens. Essa visão é compartilhada por Boerema *et al.* (2016) que apresentam que de 1961 até 2008, 80% da evolução da produção da oleaginosa ocorre em áreas degradadas para atividades da pecuária.

Silva *et al.* (2010), realizam analise ambiental para cada uma das etapas da cadeia, considerando o ciclo de vida da produção, desde os insumos até a exportação, para o Centro Oeste e Sul do Brasil. Os resultados evidenciam a redução do consumo de diesel no transporte, inclusive interno nas fazendas e a redução do uso de fertilizantes químicos como chave para a mitigação das emissões de CO_2. Para os autores, o desmatamento e o transporte contribuíram com 24% e 19% das mudanças climáticas geradas pela atividade, que é ambientalmente mais danosa quando realizada no Centro Oeste. Em complemento, o estudo de Raucci *et al.* (2015), indica que entre 2007 e 2010, no Mato Grosso, as emissões foram de 0.186 kg CO_2eq kg^{-1} de soja produzida, com destaque para a importância dos resíduos agrícolas, consumo de combustível e aplicação de fertilizantes para a potencialização das emissões.

1.4. A Curva Ambiental de Kuznets

1.4.1. Da desigualdade à questão ambiental

Uma das principais discussões abarcadas pela macroeconomia envolve a distribuição dos recursos entre os agentes econômicos, caracterizando um dos principais problemas econômicos associados à forma desigual com que essa distribuição ocorre. Sen (1997) espera que o processo de crescimento econômico de uma nação seja o principal responsável por uma melhor eficiência alocativa, por permitir através do acréscimo de renda uma melhoria da condição das mais diversas desigualdades.

Entretanto, o crescimento da renda estaria relacionado com uma maior desigualdade. Essa hipótese foi estudada pelo Prêmio Nobel Simon Kuznets, que buscou responder algumas questões sobre a desigualdade. Considerando a dotação inicial de ativos, percebe-se que há uma piora nas condições de desigualdade com o tempo. Assim, Kuznets (1955) parte do ideário de que em economias agrícolas e menos desenvolvidas em termos tecnológicos, devido a limitações de renda, há uma baixa desigualdade distributiva. Esse cenário se inverte, com um aumento da desigualdade, concomitante ao aumento da renda promovido pelo processo de industrialização, gerador de maior renda.

No entanto, essas desigualdades tendem a uma diminuição ao atingimento de níveis de renda *per capita* maiores, após um *turning point*. Esse comportamento, originaria curvas na forma de um "U" invertido para a relação desigualdade/renda *per capita*.

A relação entre economia e meio ambiente já percorria as discussões econômicas, porém focalizada na melhor forma de a economia lidar com recursos indispensáveis para o modo produtivo e energético atual, tal como indica Solow (1974), com o objetivo de buscar o crescimento condicionado aos limites desses recursos naturais. A partir da década de 1990, passou-se ao estudo da relação entre qualidade ambiental e o crescimento da renda. Grossman e Krueger (1991) apontaram, em estudo para o bloco NAFTA (North American Free Trade Agreement), composto por Estados Unidos, Canadá e México, a relação em "U-invertido" entre poluição e renda per capita, dando origem a teoria da "Curva Ambiental de Kuznets" (Environmental Kuznets Curve – EKC, sigla que será utilizada nesse trabalho). Na sequência, a validação da hipótese também foi realizada por Shafik e Bandyopadhyay (1992) e Selden e Song (1994).

Um dos principais motivos que explicariam esse processo decorre de que o crescimento econômico é responsável por mudanças estruturais na economia, inicialmente agrária e menos poluente, que passa para a fase industrial, representada pelo segmento ascendente da curva. O ponto de inflexão decorre de nova mudança, com aumento da

participação do setor de serviços na decomposição do crescimento - esse menos poluente - além de que com o crescimento, regulamentações e mecanismos institucionais seriam adotados para a garantia da preservação ambiental. Portanto, infere-se a ideia de que o crescimento econômico se coloca como uma alternativa viável para o meio ambiente.

Diversas críticas são consideradas na hipótese da EKC, sendo que as principais, apontadas por Stern (2004), decorrem de que a base teórica que subsidia as análises é puramente empírica, bem como para os mecanismos econométricos usados para as estimações que eventualmente não levam em consideração as características estatísticas dos dados, como por exemplo dependência espacial, tendências estocásticas das séries ou possibilidade de viés de seleção. Além disso, o mesmo autor considera que a validação da hipótese, além de estar condicionada aos dados, é divergente entre os países analisados, em virtude do estágio de desenvolvimento desses. Nesse sentido, países mais desenvolvidos não apresentariam séries de dados que evidenciariam curvas no formato preconizado.

Dinda (2005) aponta que dentre os diversos fatores que são responsáveis pelo aumento ou diminuição da pressão ambiental, e que são considerados na análise e estimação da EKC, estão as mudanças na regulação e na política ambiental que serão determinantes para a mitigação, no longo prazo, da degradação. Além dessas, destaque para variáveis populacionais, pelo eventual maior uso dos recursos naturais, ao progresso tecnológico, que poderá aumentar a eficiência no uso de energia e introduzir tecnologias mais limpas, bem como melhoria nos processos e uso de materiais. Em relação aos formatos, conforme apresentado na Figura 12, aponta-se que é possível que outras relações, e não apenas a de “U-Invertido”, sejam verificadas.

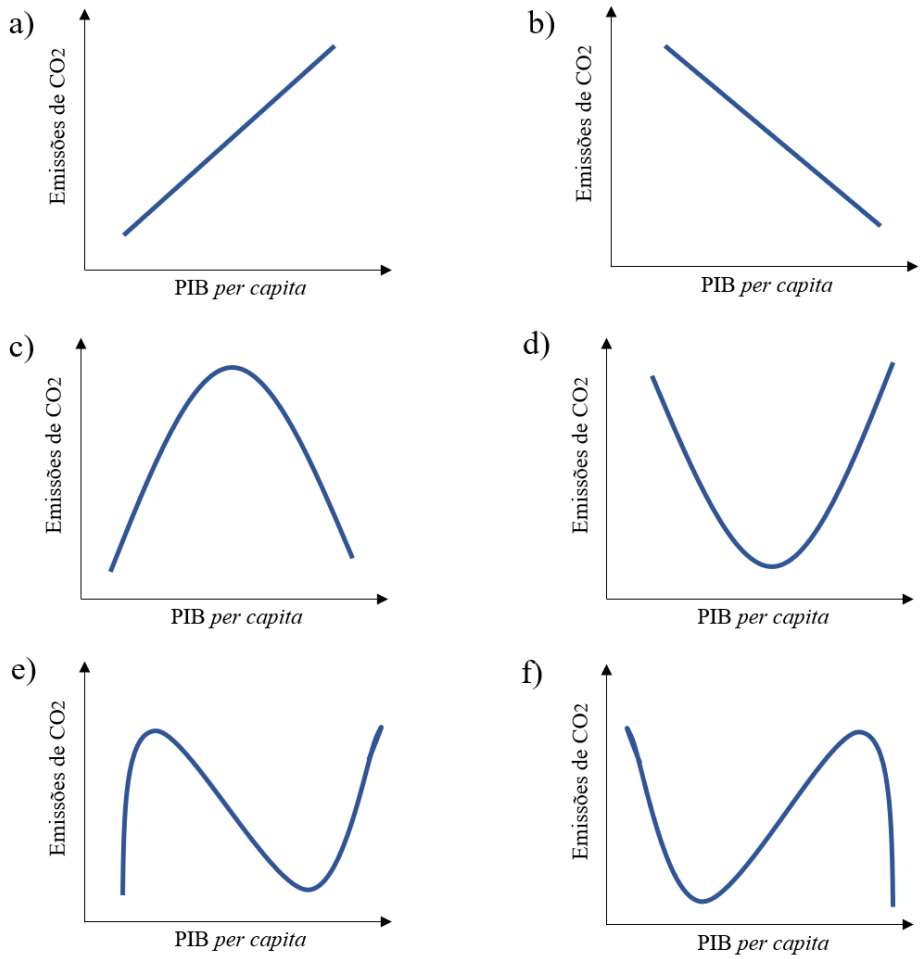


Figura 12 - Formatos genéricos da EKC

Fonte: Elaboração própria com base no exposto em Dinda (2005)

Dinda (2005) indica que a hipótese inicial da curva ambiental seja de que o aumento na degradação no ciclo industrial seria temporário, enquanto que a redução após o *turning point*, permanente. No entanto, há trabalhos, como Torras e Boyce (1998), que refutam a hipótese de que essa última prerrogativa seja verdadeira, gerando curvas em formado de "N", que indicam que após a redução da pressão ambiental, o aumento da renda pode novamente pressionar o meio ambiente, o que seria o principal impacto dos rendimentos decrescentes das tecnologias.

O comportamento da Curva Ambiental de Kuznets é explicado por Grossman e Krueger (1991) pela atuação de três efeitos. i.) Efeito escala: que decorre que uma maior utilização de insumos buscando uma maior produção e pressiona o meio ambiente pelo maior

uso de recursos naturais e energia. Nesse sentido, esse efeito aponta que o aumento da produção é um indutor da degradação ambiental. ii.) Efeito composição: esse apresenta potencial de redução da degradação, uma vez que está relacionado as mudanças estruturais da economia e transição de atividades mais poluentes, destacadamente da indústria, para maior atividade no setor de serviços e iii.) Efeito técnico: a adoção de novas tecnologias se torna um importante mitigador da degradação ambiental. Logo, a pesquisa de novas tecnologias e produtos, a adoção de novas técnicas de produção e operações mais limpas e eficientes impactam ao decrescimento do impacto ambiental, sendo esperado que esse efeito seja priorizado ao se atingir maiores níveis de renda.

Dessa forma, o efeito total, que é a soma dos três efeitos, será determinado por qual dentre eles se sobrepor. Uma vez que há críticas em relação a capacidade do efeito de composição conseguir determinar a curva (Torras e Boyce, 1998), os efeitos escala e tecnológico se consolidam como os reais determinantes. Assim, o formato em "N" da Curva de Kuznets pode ser explicado pelo maior impacto de um eventual aumento de produção. Balsalobre-Lorente e Álvarez Lorente (2016) apontam então para a real possibilidade de que em maiores níveis renda, a inflexão da curva seja possibilitada pela obsolescência tecnológica em termos ambientais.

1.4.2. Aplicações da Curva de Kuznets no mundo

As discussões ambientais são orientadas sobre o papel dos países ricos e em desenvolvimento, frente ao cenário das emissões. Nesse sentido, na sequência serão apresentados resultados de trabalhos focalizados nos países de maior renda, membros da OCDE[2] (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico).

Dentre os estudos realizados com foco na OCDE, destaca-se os realizados por Jebli, Youssef e Ozturk (2016), o qual identifica uma relação de "U-invertido" entre crescimento econômico (PIB *per capita*) e emissões de CO_2 para os países do bloco, entre 1980 e 2010.

[2] Os países membros da OCDE são: Alemanha, Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, Chile, Colômbia, Coreia do Sul, Dinamarca, Eslováquia, Eslovênia, Espanha, Estados Unidos, Estônia, Finlândia, França, Grécia, Holanda, Hungria, Islândia, Irlanda, Israel, Itália, Japão, Letônia, Lituânia, Luxemburgo, México, Nova Zelândia, Noruega, Polônia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suécia, Suíça e Turquia.

Além de comprovar a hipótese da EKC, o estudo vai além e comprova, por meio de testes de causalidade, a importância do uso de energias renováveis como importante recurso para redução das emissões, sem comprometimento à renda. A hipótese de inversão da curva para o bloco é identificada também por Sohag, Kalugina e Samargandi (2019) para estudo entre 1980 e 2017. No entanto, Erdogan, Okumus e Guzel (2020), em análise de dados em painel entre 1980 e 2014, pelo estimador AMG (*Augmented Mean Group*), não validam a hipótese da EKC.

Além desse estudo, com o ênfase para os investimentos em desenvolvimento e pesquisa em novas tecnologias de energia e as emissões de GEE, Alvarez-Herranz *et al*. (2017) apontam que para dados de 1990 a 2014 houve um comportamento de que a maior intensidade energética eleva o consumo de energia e consequentemente as emissões. O estudo utiliza painéis dinâmicos e considera que o processo de inovação tecnológica é cumulativo no tempo, auxiliando na diminuição da degradação ambiental.

Estudos diversos realizam a análise por meio de variáveis derivadas das básicas, como por exemplo o estudo de Menz e Welsch (2012), que considera não apenas a variável população, mas também variáveis de estratificação da faixa etária. Por meio de painel para 26 países, entre 1960 e 2005, identificam que essa evolução etária é acompanhada por maiores emissões de óxido de carbono (CO).

O uso de estimação por dados em painel dinâmico, por meio de GMM (*Generalized Method of Moments*), é realizado Joshi e Beck (2018), que não conseguem identificar a relações características da curva de Kuznets para 22 países da OCDE. Dentre as variáveis explicativas, consideram indicadores de liberdade econômica, identifica-se uma relação crescente entre renda e emissões de CO_2. Os mesmos autores, Joshi e Beck (2017), utilizam dessa metodologia para análise envolvendo desmatamento e renda, em países membros e não membros da OCDE, identificando uma relação corroborativa à hipótese da EKC no formato em “N”.

Os principais países considerados emergentes compõem os BRICS (Brasil, China, Índia, Rússia e África do Sul) e já integram, assim como indicado na seção anterior, o ranking das doze nações mais emissoras, muito disso em função da premissa de que estágios de desenvolvimento promovem maiores emissões de gases (o bloco é um dos principais objetos de pesquisa de trabalhos sobre a Curva Ambiental de Kuznets).

As relações da análise EKC são detectadas por Nassani *et al*. (2017), que em análise de painel entre os anos de 1990 e 2014, verificam a forma de "U-Invertido" em relação à renda e às emissões de dióxido de nitrogênio (N_20), além de identificarem por meio dos testes de causalidade a importância da ênfase em novas fontes de energia como mitigadoras da emissão assim como os impactos do transporte e da indústria no resultado.

A hipótese é suportada nas análises realizadas por Dong, Sun e Hochman (2017) e Danish *et al*. (2019), para os países dos BRICS, em relação às emissões de CO_2. Ambos os estudos utilizam a estimador AMG e constatam, além da relação da EKC, a importância do uso de energias renováveis como redutoras das emissões. O primeiro estudo ainda reforça, como alternativa, a ação benéfica para esse fim do gás natural. Os painéis englobaram, respectivamente, os períodos de 1985 a 2015 e 1990 a 2016.

Ozturk (2015) realiza a análise para identificar a validade da hipótese para indicadores de sustentabilidade que levem em consideração a relação entre comida, energia e água, conseguindo identificar a relação para o modelo que considera Brasil, Índia e África do Sul, no painel com estimação por GMM. Dentre os outros fatores relevantes para esse grupo de países na relação com as emissões de CO_2, destaque para urbanização, conforme inferido por Zhu *et al*. (2018), além da própria atividade agrícola, indicada por Balsalobre-Lorente *et al*. (2019).

Em relação aos estudos realizados para análise individual dos principais emissores de CO_2, destaque para os realizados para Estados Unidos e China. Em relação ao primeiro país, diversos trabalhos corroboram as hipóteses da existência da EKC por meio do formato de "U-Invertido", tal como o realizado com dados estaduais entre 1960 e 1990, por Aldy (2005). Rupasingha *et al*. (2004) chegam à mesma conclusão, em análise que considera a dependência espacial entre os dados estaduais. Além desses, a hipótese é corroborada pelas análises de Franklin e Ruth (2012), que acrescentam como variável, além da tradicional população, outra relacionada ao envelhecimento. Outro trabalho relevante é o de Atasoy (2017), por meio da análise para os 50 estados do país entre 1960 e 2010, em dados organizados em painel e com o uso do estimador AMG. A análise de Dogan e Ozturk (2017), no entanto, utilizando o modelo ARDL (*Autoregressive Distributed Lags*) de séries temporais e considerando variáveis como o uso de fontes energéticas renováveis e não renováveis, no período de 1980 a 2014, não identifica a relação preconizada para a EKC.

A análise ambiental de países em desenvolvimento, seguindo o já indicado pelos trabalhos relativos ao BRICS, passou a ser desenvolvida predominantemente nos últimos trinta anos. Para a China, segue-se o mesmo comportamento. Diao *et al*. (2009) apontam que um dos principais motivos para essa despreocupação decorre do fato de que apenas após as reformas estruturais e reabertura do país em 1978, promovida pelo governo Deng Xiaoping, houve o início de fato do processo de desenvolvimento. Os resultados dessas ações econômicas propiciaram ao país, na gênese do século XXI, um crescimento médio decenal de 9,7% e consequentemente ocasionou elevados impactos ambientais. O estudo dos autores, para a província de Jinping, corrobora, com as clássicas variáveis de produto, urbanização e uso de energia e água, a hipótese de curva em formato de "U-Invertido", após a análise das séries temporais. Dong, Sun e Dong (2018), também em análise de séries temporais, considerando quebras estruturais para dados de 1965 e 2016, chegam a resultado similar e ainda apontam a importância do uso de energia renovável para controle das emissões no longo prazo.

As prerrogativas da análise ambiental de Kuznets é corroborada para a China como um todo, considerando a análise em painéis espaciais realizada para o período de 1997 e 2012, por Kang, Zhao e Yang (2016), que evidenciam uma relação em "N" entre as emissões de CO_2 e a renda *per capita*, indicando que a curva é influenciada pelos transbordamentos espaciais e tem como principais indutores a urbanização e a fonte energética em carvão. A mesma constatação é derivada no trabalho He e Wang (2012), em análise a nível municipal (74 cidades), utilizando dados em painel.

Li, Wang e Zhao (2016), por meio da estimação em painel dinâmico pelos estimadores GMM e ARDL, para dados provinciais nos anos entre 1996 e 2012, suportam a hipótese da EKC, indicando dentre as variáveis que potencializam a degradação ambiental o consumo energético em carvão, bem como no longo prazo a urbanização e as atividades comerciais. O mesmo resultado é obtido pela análise de painel por regressão semiparamétrica para setores industriais, realizada por Wang *et al*. (2017).

1.4.3. Análise da Curva Ambiental de Kuznets para o Brasil

Diversos estudos utilizam a EKC para identificar os padrões do desenvolvimento econômico local nos impactos ambientais, muitos para o Brasil, tendo como objetivo a validação da hipótese para diferentes variáveis ambientais. Uma das principais preocupações

quanto ao meio ambiente, que envolve além dos danos provocados à emissão de gases mas também a preservação da biodiversidade, está no desmatamento do bioma Amazônia. Tritsch e Arvor (2016), em uma análise municipal entre 2000 e 2010 para a área da Amazônia Legal analisaram, por meio da curva de Kuznets, a relação entre desmatamento e indicadores socioeconômicos, identificando por meio de regressão quadrática, a validação da hipótese de *boom* no desmatamento nos estágios iniciais de desenvolvimento.

Oliveira *et al*. (2011) corroboram essa hipótese de que o crescimento, em seu estágio inicial, é um dos indutores do desmatamento, A análise dos autores leva em consideração também os municípios da Amazônia Legal, entre 2001 e 2016. A abordagem se diferencia da anterior uma vez que para a estimação da EKC utiliza dados em painel, considerando matriz de peso espacial (uma vez que se identifica dependência por meio da análise exploratória de dados espaciais) e considera variáveis adicionais como produção agrícola (soja, cana-de-açúcar), silvicultura (madeira), densidade populacional, crédito rural, área de floresta e extração vegetal de madeira e produtos não madeireiros. O resultado indica que a curva apresenta comportamento similar a um polinômio cúbico, em formato genérico de "N", no qual, após o decrescimento do desmatamento com o crescimento da renda, há uma nova inflexão de comportamento, seguido de aumento no desmatamento.

Dentre outras análises realizadas para o Brasil, destaque às voltadas à observação da EKC para resíduos sólidos, tal como a realizada por Morel, Triaca e Souza (2016), que identificam a relação em "U-Invertido" entre renda e disposição de resíduos sólidos entre 2000 e 2012.

Ávila e Diniz (2015) realizam uma análise que se busca identificar a relação da curva de Kuznetz no Brasil e a convergência entre a renda e as emissões para dados de 1972 a 2008, utilizando painéis dinâmicos, por estimação GMM, a qual valida a hipótese de curva em "N". A análise de convergência pelo modelo Block – Taylor, inspirado no modelo de crescimento de Solow, aponta a convergência entre renda e emissões. A relação em "N" também é observada por Saiani, Toneto Junior e Dourado (2013), em análise que relaciona o déficit de acesso a saneamento como *proxy* de degradação ambiental.

Alguns estudos não apresentam resultados que concordem com a hipótese da EKC frente à teoria. A análise de Almeida e Lobato (2019) para a região Norte, entre 2002 e 2015, com o uso de dados em painel por efeitos fixos, buscando a relação entre emissões de CO_2 e renda *per capita*, identifica uma relação em "U" não invertido. Almeida *et al*. (2017) estudam

o comportamento da degradação ambiental, refletido na variável de déficit de acesso a serviços de saúde ambiental, para dados estaduais de 2000 a 2014. A curva estimada por efeitos fixos em painel, por mínimos quadrados ordinários, apresenta comportamento similar a um “N” invertido. Além dessas, utilizando dados em painel para municípios do Mato Grosso do Sul, os mesmos autores não conseguem identificar o formato da EKC, nem em “U-Invertido” nem em “N”.

Entretanto, alguns autores, como Swart e Brinkmann (2020), consideram outras variáveis passíveis de serem indicadoras de desenvolvimento. Em uma análise considerando os estados brasileiros, as autoras utilizam como *proxy* um indicador de complexidade econômica, uma vez que quanto maior a complexidade econômica, maior a interação entre os sistemas produtivo, ocasionando maiores impactos ambientais. Com o uso de dados em painel para a estimação da EKC, identifica-se que quão mais complexa a economia, menor a degradação medida por meio de desmatamento, emissões de gases poluentes e diminuição de resíduos.

A sistematização dos estudos que realizam análise empírica da problemática ambiental pela Curva de Kuznets é realizada na Tabela 1.

Tabela 1 - Aplicações da Curva Ambiental de Kuznets

Autoria	Período Analisado	Medida de Degradação Ambiental	Região	Outras Variáveis Importantes	Modelo Estimado	Formato Validado
Rupasingha (2004)	1997	Emissões de CO_2	Estados Unidos	Urbanização, Grau de diversidade etnica e urbanização	SEM	"U-Invertido"
Aldy (2005)	1960 - 1999	Emissões de CO_2	Estados Unidos	Produção de carvão	EF e EA	"U-Invertido"
Diao *et al.* (2009)	1995 - 2005	SO_2	China	-	MQO	"U-Invertido"
Oliveira *et al.* (2011)	2001 - 2006	Desmatamento	Brasil	Urbanização e atividades agrícolas	GMM Espacial	"N - Invertido"
Menz e Welsch (2012)	1960 - 2005	Emissões de CO_2	OCDE	Estratificação da População	EF	Sem validação
Franklin e Ruth (2012)	1800 - 2000	Emissões de CO_2	Estados Unidos	Estratificação da População	MQO	"U-Invertido"
He e Wang (2012)	1990 - 2001	Emissões de SO2 e NOX	China	Regulação ambiental	EF e EA	"U-Invertido"
Saiani, Toneto Júnior e Dourado (2013)	1991 - 2000	Déficit de acesso a saneamento básico	Brasil	Indicadores municipais	EF	"N"
Ozturk (2015)	1980 - 2013	Emissões de CO_2	Brasil, Índia e Africa do Sul	Uso de terras, urbanização e atividade industrial	GMM	"U-Invertido"
Ávila e Diniz (2015)	1972 - 2008	Emissões de CO_2	Brasil	-	FMOLS e DOLS	"N"
Jebli, Youssef e Ozturk (2016)	1980 - 2010	Emissões de CO_2	OCDE	Energia Renovável	FMOLS e DOLS	"U-Invertido"
Kang, Zhao e Yang (2016)	1997 - 2012	Emissões de CO_2	China	Urbanização, uso de carvão e abertura econômica	SLM	"N-Invertido"
Li, Wang e Zhao (2016)	1996 - 2012	Emissões de CO_2, Desperdício de Água e Resíduos Sólidos	China	Consumo de Energia, Urbanização e Abertura Econômica	GMM e ARDL	"U-Invertido"
Tritsch e Arvor (2016)	2000 - 2010	Desmatamento	Brasil	-	MQO	"U-Invertido"
Morel, Triaca e Souza (2016)	2002 - 2010	Resíduos Sólidos	Brasil	-	EF e EA	"U-Invertido"
Alvarez - Herranz *et al.* (2017)	1990 - 2012	Emissões de CO_2	OCDE	Políticas regulatórias	EF e TSLS	"N"
Joshi e Beck (2017)	1990 - 2007	Desmatamento	OCDE e Não Membros	Urbanização e Uso de terras	GMM	"N"

Nassani *et al.* (2017)	1990 - 2014	Emissões de N_20	BRICS	Finanças, Transportes e Energia	EF	"U-Invertido"
Dong, Sun e Hochman (2017)	1985 - 2015	Emissões de CO	BRICS	Energia Renovável e Gás Natural	AMG	"U-Invertido"
Atasoy (2017)	1960 - 2010	Emissões de CO_2	Estados Unidos	Consumo de Energia e População	AMG	"U-Invertido"
Dogan e Ozturk (2017)	1980 - 2014	Emissões de CO_2	Estados Unidos	Energia Renovável e Não Renovável	EF e EA	Sem validação
Wang *et al*. (2017)	2000 - 2013	Emissões de CO_2	China	Urbanização nas zonas industriais	STIRPAT	"U-Invertido"
Almeida *et al.* (2017)	2000 - 2014	Déficit de acesso a saneamento básico e água	Brasil	Indicadores municipais	EF e EA	"N-Invertido"
Joshi e Beck (2018)	1995 - 2010	Emissões de CO_2	OCDE e Não Membros	Liberdade econômica	GMM	Sem validação
Zhu *et al.* (2018)	1994 - 2013	Emissões de CO_2	BRICS	Urbanização e Desigualdade	Regressão Quantilica	"U-Invertido"
Dong, Sun e Dong (2018)	1965 - 2016	Emissões de CO_2	China	Energia Renovável e Gás Natural	ARDL	"U-Invertido"
Sohag, Kalugina e Samargandi (2019)	1980 - 2017	Emissões de CO_2	OCDE	Atividade Industrial	CS-ARDL	"U-Invertido"
Danish *et al.* (2019)	1990 - 2016	Emissões de CO_2	BRICS	Energia Renovável	AMG	"U-Invertido"
Balsalobre - Lorente et al (2019)	1990 - 2014	Emissões de CO_2	BRICS	Atividade agrícola e uso de energia	FMOLS e DOLS	"U-Invertido"
Erdogan. Okumus e Guzel (2020)	1990 - 2014	Emissões de CO_2	OCDE	Energia renovável, preço do petróleo e abertura econômica	AMG/ FMOLS E DOLS	Não Validam / "U-Invertido"
Swart e Brinkmann (2020)	2003 - 2011	Resíduos Sólidos, Desmatamento, Queimadas e Poluição do Ar	Brasil	Urbanização	EF	"U-Invertido"

Nota: SEM - *Spatial Error Model*, FMOLS - *Fully Modified Ordinary Least Square*, DOLS - *Dynamic Ordinary Least Square*, SLM - *Spatial Lag Model*, TSLS - *Two-Stage least squares*, STIRPAT - *STochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology* e CS-ADRL - *Cross-sectionally Augmented Distributed Lag*

Fonte: Elaboração própria.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As análises realizadas com o objetivo de validar a hipótese da Curva Ambiental de Kuznets ocorrem predominantemente utilizando modelos econométricos, que têm como variável dependente algum indicador de degradação ambiental, seja relacionada a emissões ou ao desmatamento, que compreende todos os setores da economia estudada, sendo essa forma de análise predominante entre os estudos indicados pela seção anterior.

Nesse trabalho, a análise possui como variável dependente as emissões provenientes do transporte rodoviário e intermodal de soja no Brasil. O uso de variáveis de emissão relacionadas ao transporte é recorrente para validação da EKC para o setor. Kharbach e Chfadi (2017) realizaram uma análise na qual há a validação das hipóteses de um "U-Invertido" em relação às emissões do transporte rodoviário no Marrocos, no período de 1971 a 2011, considerando como importante variável o consumo energético.

Análise semelhante para o mesmo período foi realizada por Alshehry e Belloumi (2017), para dados da Arábia Saudita, considerando como variável dependente as emissões de dióxido de carbono (CO_2), exclusivas das atividades de transporte. Hassan e Nosheen, (2019) promoveram um estudo considerando como variável dependente a emissão de três gases derivados do transporte ferroviário em 37 países, de 1990 a 2017, encontrando relação de "U-invertido" para o CO_2.

Por fim, Shahbaz *et al.* (2020) realizaram uma estimação da EKC para os Estados Unidos, entre 2000 e 2017, considerando como variável dependente as emissões de CO_2 exclusivas do setor de transporte, corroborando a hipótese em relação ao formato da EKC, abordando uma alteração na terminologia, denominando o trabalho como uma análise da Curva de Transporte de Kuznets (*Transportation Kuznets Curve*).

Para que o objetivo principal desse trabalho, de verificação da hipótese da Curva Ambiental de Kuznets para o transporte de soja seja atingido, será necessária a construção de *proxy* da variável de degradação - emissões de CO_2 no transporte - que será utilizada como dependente nos modelos econométricos de efeitos fixo e *System* GMM, com auxílio de um modelo matemático de otimização.

Por meio do modelo matemático de minimização de custos haverá a determinação das quantidades movimentadas anualmente e a distribuição dessas quantidades entre os municípios produtores de soja. Por meio do uso de fatores de emissão específicos para os

diferentes modais, levando em consideração o consumo de combustível para a movimentação rodoviária e as quantidades e distâncias para o computo da emissão nos modais ferroviários e hidroviários, chega-se à variável dependente. A integração dos passos realizados é ilustrada na Figura 13.

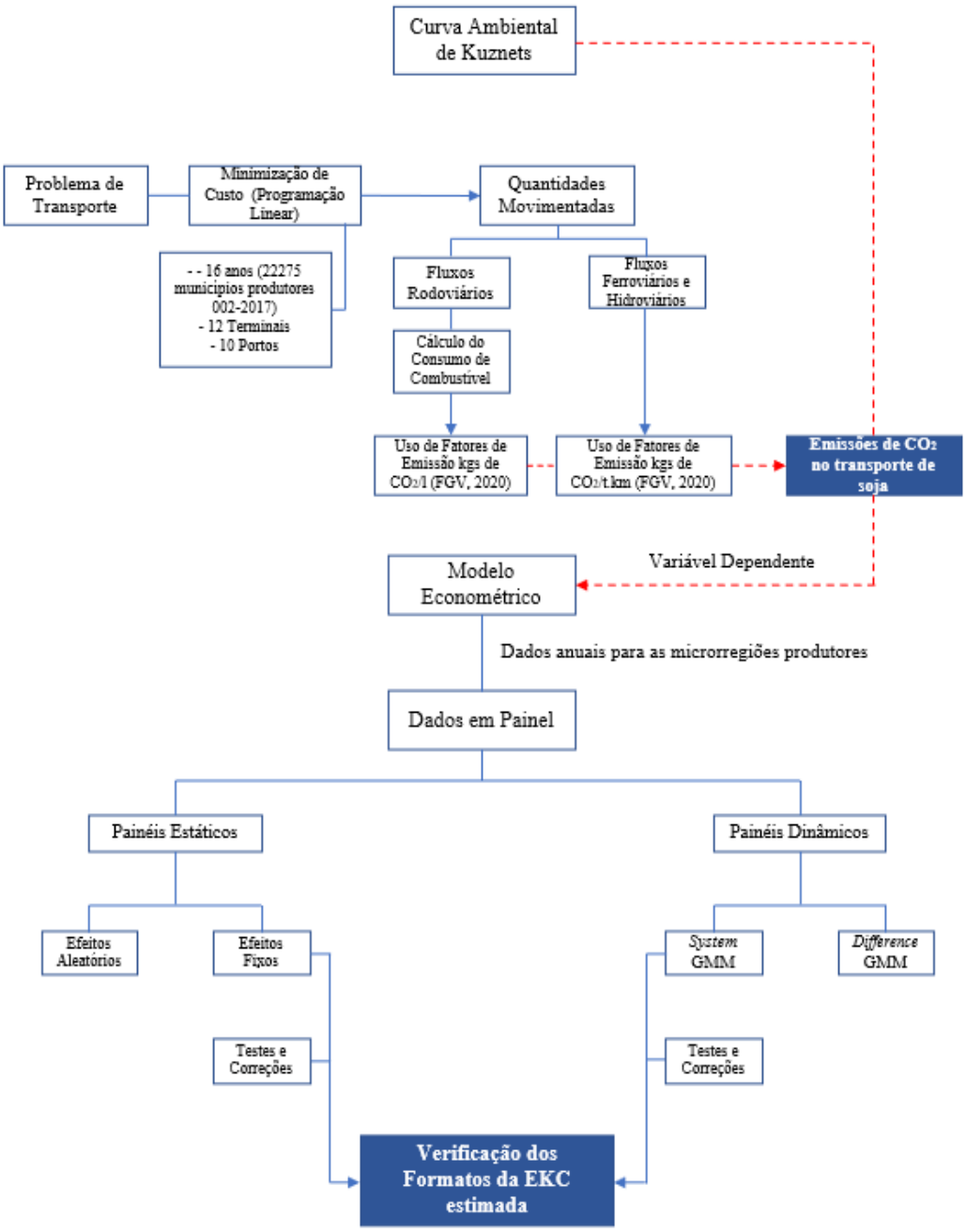


Figura 13 - Passos metodológicos.

Fonte: Elaboração própria.

2.1. Modelo econométrico

Para a validação das hipóteses em relação ao formato da EKC, uma das principais formas utilizadas e que será aplicada nesse trabalho é a análise por meio de dados em painel. A abordagem dos painéis de dados, de acordo com Baltagi (2005), decorre da presença de observações de entidades, também chamadas de unidades *cross section*, que apresentam evolução ao longo do tempo, ou seja, são bidimensionais. A análise de painel considera a possibilidade de estimação de modelos estáticos e dinâmicos.

Dentre as formas de estimação de modelos estáticos estão: a) *Pooled*, b) Efeitos Fixos e c) Efeitos aleatórios. Para a estimação por meio dos painéis dinâmicos, serão consideradas as formas baseadas no Método Generalizado dos Momentos (*Generalized Method of Moments* – GMM, como será denominado nesse trabalho).

Conforme aponta Wooldridge (2010), a equação (1) apresenta a forma funcional básica de dos dados em painel estáticos:

$$y_{it} = \boldsymbol{x}_{it}\boldsymbol{\beta} + c_i + u_{it} \tag{1}$$

Sendo assim, $\boldsymbol{x}_{it}$ a iésima observação das K variáveis explanatórias $\boldsymbol{\beta}$ **,** possui dimensão K x 1; c_i o efeito individual não observado e u_{it} o termo de erro idiossincrático, ou seja, que varia temporalmente e entre as unidades *cross section*.

O grande destaque nesse modelo decorre de c_i, considerado um efeito individual, ou heterogeneidade individual não observada, uma característica que interfere nas variáveis independentes, sendo dentre as possíveis causas a motivação ou criatividade inata dos indivíduos, a qualidade da gestão ambiental dos municípios, ou a melhoria nas técnicas de gestão nas empresas gerando impactos.

A forma de tratamento do termo é determinante para as diferentes abordagens dos efeitos fixos ou aleatórios, conforme exposto por Wooldridge (2010). A eventual presença de correlação entre o termo e qualquer variável do vetor de variáveis independentes $\boldsymbol{x}_{it}$, é responsável por inutilizar os resultados obtidos por meio de Mínimos Quadrados Ordinários.

Dessa forma, a estimação por efeitos fixos busca a eliminação das características individuais não observadas e invariantes no tempo para cada unidade *cross section*, representadas pelo termo c_i, permitindo a correlação entre o termo e alguma das variáveis explicativas do modelo.

Analogamente, a partir da premissa de que não há correção entre o termo não observado e a variável dependente, de acordo com Wooldrigde (2010), assume-se que o termo é uma variável aleatória, invariante no tempo, sendo assim recomendada a sua estimação por meio de efeitos aleatórios.

A escolha do modelo a ser estimado, conforme aponta Baltagi (2005), ocorrerá mediante a realização dos testes de Hausman, os quais possuem hipótese nula que recomenda o uso dos efeitos aleatórios, em detrimento da hipótese alternativa que aponta a correlação entre os efeitos e os regressores. Além disso, são realizados os testes de Chow e LM Breush Pagan, cujas hipóteses nulas indicam o uso de modelos *pooled* ao invés de efeitos fixos e aleatórios, respectivamente. Neste trabalho, será utilizado, com base nos testes mencionados, a estimação por efeitos fixos.

Por outro lado, modelos de dados em painel dinâmico se caracterizam pela inclusão da variável dependente defasada como uma das variáveis explicativas, conforme ilustrado pela expressão (2):

$$y_{it} = \gamma y_{i,t-1} + \boldsymbol{x}_{it}\boldsymbol{\beta} + c_i + u_{it} \qquad (2)$$

onde $y_{i,t-1}$ é o termo da variável dependente defasada.

No entanto, a utilização da variável defasada é indutora do problema de endogeneidade, em decorrência da correlação com os efeitos fixos, de modo que a estimação por meio de efeitos fixos e aleatórios é enviesada.

Dentre as possibilidades de estimação frente a esse problema, Anderson e Hsiao (1982) desenvolveram o método para estimação por meio de variáveis instrumentais, através das variáveis defasadas como instrumento. No entanto, o modelo desenvolvido por Arellano e Bond (1991) considera que o modelo desenvolvido anteriormente não leva em conta as condições de ortogonalidade possível.

Dessa forma, o *Difference* GMM, modelo desenvolvido por Arellano e Bond (1991) utiliza essas condições de ortogonalidade entre as defasagens da variável dependente e o erro, utilizando também mais instrumentos identificados por meio dos valores defasados de y e das variáveis pré-identificadas e exógenas, em uma extensão do modelo GMM.

A aplicação dos estimadores GMM, destacadas por Roodman (2009) são: i) Uso adequado para amostras com “T pequeno e N grande”, ou seja, em painéis classificados como

curtos pela análise de poucos períodos de tempo, em comparação com as unidades *cross section*; ii) Relação linear; iii) Variáveis independentes que possuam algum grau de endogeneidade, ou seja, não seguem o princípio da exogeneidade estrita, sendo relacionada de alguma forma com os efeitos fixos, iv) A presença de efeitos fixos e v) A heterocedasticidade e autocorrelação nas unidades *cross section*, porém não entre elas.

A alegação dos trabalhos posteriores, para Bun e Windmeijer (2010), é de que *Difference* GMM apresenta a possibilidade de inadequações, uma vez que, partindo da hipótese de correção entre as primeiras diferenças dos instrumentos e os efeitos não observados (fixos), os valores defasados podem ser instrumentos fracos. Assim Blundell e Bond (1998) desenvolvem um sistema de equações – *system* GMM, denominação decorrente do sistema de equações gerado pela equação geral e a equação transformada, no qual os instrumentos para as equações em diferenças são os valores em níveis das variáveis explicativas defasadas. De acordo com Roodman (2009), esses métodos são mais eficientes que o desenvolvido por Arellano e Bond (1991), uma vez que utilizam mais instrumentos, merecendo destaque que a quantidade de instrumentos deve ser menor que o número de observações. Por essas caracteristicas, a estimação do painel dinâmico ocorrerá pelo *system* GMM.

Dessa forma, após a estimação, os resultados são considerados após análise do teste de Hansen, que possui como objetivo indicar a validação dos instrumentos utilizados, de forma que não haja correlação entre eles e o termo do erro. O teste de Hansen substitui o teste de Sargan com a mesma finalidade, uma vez que a estimação será realizada por meio do System GMM *two-step*, que utiliza matriz de peso para casos de heterocedasticidade. Por fim, há a necessidade de rejeição da hipótese de correlação serial de segundo grau, realizado por meio do teste de Arellano e Bond.

Tal como apresentado na seção anterior, diversos trabalhos como o de Huang *et al.* (2008), Li *et al.* (2016) e Ozturk (2015) utilizam s*ystem* GMM na estimação da EKC.

Assim, o painel de dados elaborado para esse trabalho, considerou a evolução das variáveis das 290 microrregiões em que há cidades produtoras de soja ao longo dos períodos de 2002 até 2017. As variáveis, cuja agregação ao nível de microrregião partiu das informações municipais, são descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Variáveis utilizadas no modelo econométrico e sinais esperados

Representação	Variável	Unidade da Série	Fonte	Sinal Esperado
$lnCO_2$	Emissões de CO_2 no transporte de soja	Quilogramas (kg)	Equação	
ln(PIBSoja)	Proxy do produto interno bruto da soja por microrregião	Reais (R$)	Elaborado com base em Cepea (2020) e IBGE (2020b)[3]	+
ln(PIBSoja)²	Proxy do produto interno bruto da soja por microrregião ao quadrado	Reais (R$)	Elaborado com base em Cepea (2020) e IBGE (2020b)	-
ln(PIBSoja)³	Proxy do produto interno bruto da soja por microrregião ao cubo	Reais (R$)	Elaborado com base em Cepea (2020) e IBGE (2020b)	+
lnÁrea	Área de soja colhida	Hectares (ha)	Pesquisa Agrícola Municipal (IBGE, 2020b)	+
lnRebanho	Soma do efetivo de rebanhos de bovinos, suínos e galináceos	Cabeças	Pesquisa Pecuária Municipal (IBGE, 2020c)	-
lnIDHM	Média do índice de desenvolvimento humano		Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro (Firjan, 2020)	+
lnPopulação	População	Pessoas	Estimativas de População (IBGE,2020d)	+
lnPreço	Preço médio anual da soja	Reais (R$)	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA, 2020)	+
lnEmpregos	População empregada na produção de soja	Pessoas	Relação Anual de Informações Sociais (2019)	+
lnInvRodovias	Proxy dos investimentos públicos em rodovias	Reais (R$)	Elaborado com base em Observatório Nacional de Logística e Transportes (ONTL, 2020) e IBGE (2020a)[4]	-

Fonte: Elaboração própria.

[3] A elaboração das variáveis utilizadas como proxies para a renda soja, decorre do uso de dados do Cepea (2020) buscando identificar a representatividade da agricultura no PIB da agropecuária. Com esses fatores e com os dados do valor adicionado da agropecuária disponibilizados pelo Sistema de Contas Nacionais (IBGE, 2020a), chega-se a uma estimativa do PIB de toda a agricultura. De posse desse indicador e da representatividade do valor bruto de produção da soja (VPB) frente ao VBP de toda a agricultura (dados disponíveis pela Pesquisa Agrícola Municipal (IBGE, 2020b), há a estimativa do PIB da soja.

[4] A construção da variável ocorreu baseada na série do percentual em relação ao PIB estadual de investimento público em rodovias, disponibilizada pelo ONTL (2020), para os anos de 2010 até 2016. Para os anos anteriores (2002 a 2009) e 2017, foi utilizada a média anual de crescimento para cada estado a partir da série existente. Os valores a nível de microrregião foram obtidos a partir da série estadual, levando em consideração a representação do PIB microrregional em relação a renda estadual.

Será realizada a estimação de seis modelos, buscando a validação da curva ambiental e a identificação de quais variáveis são determinantes para as emissões no transporte. O Modelo (1), pretende identificar se há relação em "U-invertido" no modelo de efeitos fixos. O Modelo (2), também por efeitos fixos, busca avaliar um possível formato em "N", utilizando a representação cúbica da renda.

Por meio de painel dinâmico, os modelos (3) e (5), buscam respectivamente a validação dos formatos quadrático e cúbico, utilizando system GMM *one step*. Já os modelos (4) e (6), pretendem o mesmo objetivo, no entanto com o uso de system GMM *two step*.

A Equação (3) representa o Modelo (1):

$$\begin{aligned} lnCO2_{it} = {} & \beta_0 + \beta_1 \ln(PIBsoja)_{i,t} + \beta_2 \ln(PIBSoja)^2{}_{i,t} + \beta_4 lnÁrea_{i,t} \\ & + \beta_5 lnRebanho_{i,t} + \beta_6 lnIDHM_{i,t} + \beta_7 lnPopulação_{i,t} \\ & + \beta_8 lnPreço_{i,t} + \beta_9 lnEmprego_{i,t} + \beta_{10} lnInvRodovias_{i,t} \\ & + \varepsilon_{it} \end{aligned} \tag{3}$$

A Equação (4) representa o Modelo (2):

$$\begin{aligned} lnCO2_{it} = {} & \beta_0 + \beta_1 \ln(PIBsoja)_{i,t} + \beta_2 \ln(PIBSoja)^2{}_{i,t} \\ & + \beta_3 \ln(PIBSoja)^3{}_{i,t} + \beta_4 lnÁrea_{i,t} + \beta_5 lnRebanho_{i,t} \\ & + \beta_6 lnIDHM_{i,t} + \beta_7 lnPopulação_{i,t} + \beta_8 lnPreço_{i,t} \\ & + \beta_9 lnEmprego_{i,t} + \beta_{10} lnInvRodovias_{i,t} + \varepsilon_{it} \end{aligned} \tag{4}$$

A Equação (5) representa os modelos (3) e (5):

$$\begin{aligned} lnCO2_{it} = {} & \gamma lnCO2_{i,t-1} + \beta_0 + \beta_1 \ln(PIBsoja)_{i,t} + \beta_2 \ln(PIBSoja)^2{}_{i,t} \\ & + \beta_4 lnÁrea_{i,t} + \beta_5 lnRebanho_{i,t} + \beta_6 lnIDHM_{i,t} \\ & + \beta_7 lnPopulação_{i,t} + \beta_8 lnPreço_{i,t} + \beta_9 lnEmprego_{i,t} \\ & + \beta_{10} lnInvRodovias_{i,t} + \varepsilon_{it} \end{aligned} \tag{5}$$

A Equação (6) representa os modelos (4) e (6):

$$lnCO2_{it} = \gamma lnCO2_{i,t-1} + \beta_0 + \beta_1 \ln(PIBsoja)_{i,t} + \beta_2 \ln(PIBSoja)^2{}_{i,t} + \beta_3 \ln(PIBSoja)^3{}_{i,t} + \beta_4 lnÁrea_{i,t} + \beta_5 lnRebanho_{i,t} + \beta_6 lnIDHM_{i,t} + \beta_7 lnPopulação_{i,t} + \beta_8 lnPreço_{i,t} + \beta_9 lnEmprego_{i,t} + \beta_{10} lnInvRodovias_{i,t} + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

sendo:

$lnCO2_{it}$: logaritmo natural das emissões de CO_2 (kgs), oriundas das atividades de transporte de soja com origem na microrregião i, no ano t;

$lnCO2_{i,t-1}$: logaritmo natural das emissões de CO_2, oriundas das atividades de transporte de soja com origem na microrregião i, no ano $t-1$;

$lnPIB(Soja)_{i,t}$: logaritmo natural do Produto Interno Bruto *per capita*, da microrregião i, no ano t;

$ln(PIBSoja)^2{}_{i,t}$: logaritmo natural do Produto Interno Bruto *per capita* elevado ao quadrado, em reais (R$), da microrregião i, no ano t;

$ln(PIBSoja)^3{}_{i,t}$: logaritmo natural do Produto Interno Bruto *per capita* elevado ao cubo, em reais (R$), da microrregião i, no ano t;

$lnÁrea_{i,t}$: logaritmo natural da área colhida de soja, na microrregião i, no ano t;

$lnRebanho_{i,t}$: logaritmo natural do efetivo de rebanhos, na microrregião i, no ano t;

$lnIDHM_{i,t}$: logaritmo natural do IDH da microrregião i, no ano t;

$lnPopulação_{i,t}$: logaritmo natural da estimativa de população da microrregião i, no ano t;

$lnPreço_{i,t}$: logaritmo natural do preço da soja na microrregião i, no ano t;

$lnEmprego_{i,t}$: logaritmo natural dos empregos na produção de soja na microrregião i, no ano t;

$lnInvRodovias_{i,t}$: logaritmo natural dos investimentos públicos em rodovias na microrregião i, no ano t;

$\gamma, \beta_0; \beta_1; \beta_2; \beta_3; \beta_4; \beta_5; \beta_6; \beta_7; \beta_8; \beta_9$ e β_{10}: coeficientes a serem estimados;

ε_{it}: Termo de erro aleatório.

Para a estimação por meio de efeitos fixos e aleatórios, há a omissão do termo $\gamma lnCO2_{i,t-1}$ na Equação 3.

De acordo com Dinda (2004), a verificação do formato da EKC ocorre mediante os sinais dos coeficientes estimados relacionados às variáveis de renda. Assim, se: $\beta_1 \geq 0$; $\beta_2 < 0\ e\ \beta_3 = 0$, há a relação tradicional com o formato de "U-Invertido"; se: $\beta_1 \geq 0$; $\beta_2 \leq 0\ e\ \beta_3 > 0$, com β_1 e β_2 não sendo zero ao mesmo tempo, há uma relação em formato em "N".

2.2. Modelo de otimização: problema de transporte

Para a construção da variável dependente sobre as emissões de CO_2 originadas das movimentações nos municípios produtores de soja, é necessário a elaboração de uma *proxy* sobre os fluxos das movimentações. Nesse sentido, objetiva-se a identificação dos fluxos ótimos para o transporte de soja por meio de um modelo de otimização que utiliza programação linear[5].

O uso de modelos matemáticos de otimização é consolidado para a resolução de problemas de transporte, incluindo o de cargas agrícolas. Silva e Marujo (2012) utilizaram um modelo de programação linear para a identificação dos fluxos ótimos para o transporte intermodal da produção de soja originada em Sorriso (MT).

Outras aplicações com ênfase na soja foram realizadas com o uso de programação linear inteira mista, por meio de modelos de localização, com o objetivo de indicar as melhores localidades para instalações de armazenagem ou distribuição, como os trabalhos desenvolvidos por Almeida *et al.* (2016) e Mascarenhas *et al.* (2014)

Assim, o modelo de minimização de custos permite a movimentação considerando três tipos de fluxos:

[5] A modelagem será realizada no software GAMS (*General Algebraic Modeling System*). O script é apresentado no APÊNDICE A.

Fluxo I: Transporte de soja destinada ao mercado externo, transportada exclusivamente pelo modal rodoviário, tendo como origem as cidades produtoras e destino nos portos;

Fluxo II: Transporte de soja destinada ao mercado externo, tendo como origem as cidades produtoras e utilizando soluções intermodais, com transporte rodoviário da origem até a entrada em terminais ferroviários ou hidroviários e destino aos portos;

Fluxo III: Transporte de soja com destino ao mercado interno, exclusivamente pelo modal rodoviário tendo como origem as cidades produtoras e como destino as cidades que possuem unidades de fábricas e unidades de processamento, sendo considerado como o único fluxo de demanda interna por soja.

A Figura 14 ilustra os fluxos de transporte.

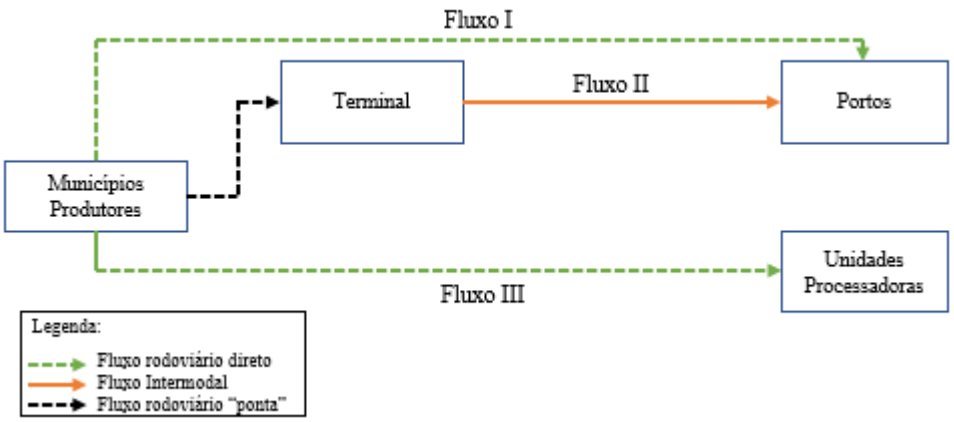


Figura 14 - Fluxos de transportes considerados no modelo matemático

Fonte: Elaborada pelo autor

A

Tabela *3* apresenta os índices considerados no modelo matemático e que representam os conjuntos de informações.

Tabela 3 - Índices e conjuntos do modelo matemático

Índice	Descrição	Conjunto
i	Municípios produtores de soja (origens)	*I*
j	Portos	*J*
k	Anos	*K*
l	Terminais	*L*
m	Unidades Processadoras	*M*

A Equação (7) define a função objetivo.

$$MIN\ Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} Q_{ijk} FMEROD_{ijk} + \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} R_{iljk} FMEMULTI_{iljk} + \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} S_{imk} FMI_{imk} \quad (7)$$

sendo as variáveis de decisão:

Q_{ijk}: quantidade de soja movimentada exclusivamente pelo modal rodoviário com origem no município i , para o porto j , no ano k;

R_{iljk}: quantidade de soja movimentada em solução intermodal com origem no município i , embarcada no terminal ferroviário/hidroviário l , para o porto j , no ano k;

S_{imk}: quantidade de soja movimentada exclusivamente pelo modal rodoviário, com origem no município i, para fábrica localizada no município m, no ano k.

Parâmetros:

$FMEROD_{ijk}$: frete rodoviário de soja com destino ao mercado externo, com origem no município i, para o porto j, no ano k;

$FMEMULTI_{iljk}$: frete intermodal de soja com destino ao mercado externo, com origem no município i, embarcada no terminal ferroviário/hidroviário l, para o porto j, no ano k;

FMI_{imk}: frete rodoviário de soja com destino ao mercado interno, com origem no município i, para fábrica localizada no município m, no ano k;

Restrições

O modelo está sujeito às seguintes restrições:

Oferta

$$\sum_{j \in J} Q_{ijk} + \sum_{l \in L} R_{iljk} + \sum_{m \in M} S_{imk} = PRODUÇÃO_{ik} \ \forall\ i \in I, k \in K \quad (8)$$

A restrição expressa em (8) indica que a soma da quantidade de soja originada no município i e transportada de modo exclusivamente rodoviário no ano k, com a quantidade que é escoada ao mercado externo por meio da intermodalidade - com entrada no terminal e saída no porto j - adicionada à quantidade com origem em i - destinada às fábricas localizadas em m no ano k – deve ser igual a quantidade de soja produzida pelos municípios i no ano k. Essa restrição possui a função de garantir que toda a produção dos municípios seja transportada para as regiões de demanda.

Capacidade dos Portos

$$\sum_{i \in I} Q_{ijk} + \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} R_{iljk} \leq CAPPORTO_{Jk} \ \forall \ j \in J, k \in K \tag{9}$$

A Equação *(9)* limita os fluxos de transporte à capacidade operacional dos portos. Assim, o total movimentado pelo modal rodoviário diretamente para o porto j, somado ao montante escoado por meio da intermodalidade - embarcado no terminal l e para o porto j, no ano k -, deve ser igual ou inferior à capacidade daquele porto.

Capacidade dos Terminais

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} R_{iljk} \leq CAPTERMINAL_{lk} \ \forall \ l \in L, k \in K \tag{10}$$

A restrição de capacidade dos terminais, expressa em (10), assim como a de capacidade dos portos, possui a finalidade de garantir que a quantidade de soja transportada por meio de solução intermodal respeite o limite de embarque de cada terminal l no ano k.

Capacidade das Fábricas

$$\sum_{i \in I} S_{iMk} \leq CAPFÁBRICA_{mk} \; \forall \, m \in M, k \in K \tag{11}$$

A Equação (11) indica que a capacidade das fábricas localizadas nos municípios m, em cada ano k, deve ser menor ou igual à quantidade de soja destinada pelos municípios i por meio de transporte exclusivamente rodoviário.

Porto de Vitória

$$\sum_{i \in I} Q_{iJk} = 0, \qquad \forall \, k \in K, para \; j = Vitória \tag{12}$$

A última restrição, representada pela Equação (12), possui o objetivo de indicar a impossibilidade de acesso por meio de rodovias ao terminal de Vitória (ES), uma vez que há acesso exclusivo por meio de ferrovias. Assim, a quantidade com origem no município i qualquer e destino a esse porto, no ano k qualquer, deve ser igual a zero.

Dentre os principais dados reais utilizados, destaque para os que embasaram a construção das séries de fretes utilizadas no modelo, na composição do custo de transporte e as respectivas distâncias das rotas. Os dados são disponibilizados pelo Sistema de Informações de Fretes (SIFRECA, 2020), em séries mensais com valores da remuneração pelo serviço de transporte de soja.

A transformação desses dados em série anuais deu-se inicialmente com o uso de uma média ponderada para os valores de cada uma das rotas, para os anos de 2002 até 2017, ponderados em relação à representatividade das exportações de cada mês frente ao montante anual. Assim, obteve-se o frete anual ponderado. Após isso, os valores ponderados foram deflacionados pelo Índice Geral de Preços – Disponibilidade Interna (IGP-DI), calculado pela Fundação Getúlio Vargas (FGV, 2020).

Posteriormente, realizaram-se estimações de valores de fretes para todas as origens, de acordo com os fluxos de transporte I, II e III estabelecidos. Assim, foram definidos corredores

de transporte para a movimentação de soja de acordo com as regiões de origem e destino da produção, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Corredores de transporte considerados para a estimação dos valores de fretes

Corredor	Origem	Destino
CO_MI	Municípios do Centro Oeste	Fábricas e Terminais
CO_ME	Municípios do Centro Oeste	Portos
NE_MI	Municípios do Nordeste e do Norte	Fábricas e Terminais
NE_ME	Municípios do Nordeste e do Norte	Portos
SE_MI	Municípios do Sudeste	Fábricas e Terminais
SE_ME	Municípios do Sudeste	Portos
SUL_ME	Municípios do Sul	Fábricas e Terminais
SUL_MI	Municípios do Sul	Portos

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesse sentido, a estimação para os valores dos fretes ocorreu mediante a divisão dos valores e distâncias das bases de dados de acordo com os corredores de transportes, seguidos pela estimação de curvas de frete utilizando regressão linear simples, tendo como variável independente a distância, destacadamente uma das mais importantes variáveis na definição dos preços de frete, de acordo com Martins (2008).

A Equação (10) aponta a forma funcional do modelo de regressão. A estimação foi realizada para cada um dos corredores de transporte definidos e para cada ano analisado[6]. O modelo de regressão foi estimado por meio de Mínimos Quadrados Ordinários, usando os erros padrão de White-Huber para controle de eventuais problemas de heterocedasticidade, ou seja, variância não constante dos resíduos, conforme aponta Wooldridge (2018).

$$ln\, Y = \alpha_1 + \alpha_2\, lnX + \varepsilon \tag{13}$$

sendo:

ln Y: logaritimo natural do frete em reais por tonelada (R$/t);

[6] Os valores dos coeficientes estimados são apresentados no APÊNDICE B.

α_1: coeficiente linear, (ou constante);

α_2: coeficiente angular;

lnX: logaritmo natural da distância[7];

ε: erro aleatório.

Assim, a obtenção dos valores dos fretes rodoviários em reais por tonelada (R$/t) ocorre por meio da função exponencial da Equação (11), tal como definida por Branco e Caixeta-Filho (2011):

$$Y = e^{\alpha_1} \times X^{\alpha_2} \tag{14}$$

onde:

Y: valor estimado do frete em reais por tonelada (R$/t);

α_1: coeficiente linear (ou constante);

α_2: coeficnente angular;

e: número de Euler;

X: Distância, em quilômetros, entre a origem e o destino na rota estimada.

Assim, foram estimados os valores para $FMEROD_{ijk}$, frete rodoviário de soja com destino ao mercado externo - com origem no município i, para o porto j no ano k e para FMI_{imk}, frete rodoviário de soja com destino ao mercado interno - com origem no município i, para fábrica localizada no município m, no ano k.

Os valores de $FMEMULTI_{iljk}$, frete intermodal de soja com destino ao mercado externo - com origem no município i, embarcada no terminal ferroviário/hidroviário l para o porto j, no ano k - são compostos pela soma do valor do frete rodoviário da origem até o terminal de entrada l, com o valor do frete ferroviário/hidroviário até o porto de saída j. Os valores do frete ferroviário são obtidos por meio de um desconto de 30%, mesma taxa aplicada por Branco e Caixeta- Filho (2011) no valor do frete rodoviário para a rota

[7] As distâncias utilizadas como variável explicativa na regressão são oriundas do Sifreca (2020). Para os valores de frete estimados, são utilizados dados de distância do Google Maps e do *software* Maptitude.

correspondente. Para os trechos hidroviários, o desconto aplicado é de 65%, como realizado por Rocha e Caixeta-Filho (2018).

Os parâmetros utilizados na restrição são embasados em dados reais. $PRODUÇÃO_{ik}$, representa a oferta de soja no município produtor i, no ano k, sendo oriunda de informações disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020b) sobre a produção de soja dos 2.275 municípios onde houve produção da oleaginosa no ano de 2017, ano base para definição das localidades. O acompanhamento da produção nesses municípios, a partir desse ano base, ocorre para o período de 2002 a 2017, de acordo com dados da Produção Agrícola Municipal (IBGE, 2020b).

$CAPPORTO_{Jk}$, parâmetro que busca determinar a capacidade dos portos, decorre da exportação realizada por portos brasileiros de 2002 a 2017. A fonte de dados é a Secretaria de Comércio Exterior (Secex, 2020), do Ministério da Economia, que estão apresentados no APÊNDICE C. O modelo considera os dez portos que apresentam movimentação a nível comercial localizados em Santos (SP), Paranaguá (PR), Rio Grande (RS), São Francisco do Sul (SC), Vitória (ES), Salvador (BA), São Luís (MA), Belém (PA), Santarém (PA) e Manaus (AM).

Os dados anuais dos terminais de transbordo ferroviário e hidroviário dão origem ao parâmetro $CAPTERMINAL_{lk}$, que indica limites à capacidade de recebimento desses terminais. Os dados possuem periodicidade anual, de 2002 a 2017, tendo como fonte o Anuário das movimentações ferroviárias da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) e o Anuário da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ, 2020), agregados no APÊNDICE D. Os terminais ferroviários considerados são localizados em: Alto Araguaia (MT), Araguari (MG), Cascavel (PR), Cruz Alta (RS), Londrina (PR), Palmeirante (TO), Porto Franco (MA), Porto Nacional (TO) e Rondonópolis (MT). Os terminais hidroviários estão localizados em Itaituba (PA), Porto Velho (RO) e São Simão (GO).

Os dados das agências reguladoras não possuem cobertura para o período de análise. Os dados da ANTT (2019) estão disponíveis apenas a partir de 2006, enquanto os divulgados pela ANTAQ (2019) apenas a partir de 2010. Assim, considerou-se como fator de aplicação: a média da participação das movimentações dos terminais em relação às exportações nacionais de soja, ao longo dos períodos correspondentes e, após isso, o uso desse fator médio como instrumento para composição da série pela multiplicação com o montante exportado (dados da SECEX, 2020).

A partir dos dados disponibilizados pela Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (Abiove, 2020), sobre a capacidade de processamento das indústrias, $CAPFÁBRICA_{mk}$, foram identificados os 85 municípios com fábricas instaladas em 2017.

Uma vez que os dados da Abiove (2020) apresentam apenas os locais das fábricas e a capacidade de processamento estadual, para a obtenção dos dados municipais, considerou-se o total da soma de rebanhos de aves, suínos e bovinos das cidades que possuem unidades processadoras como *proxy* da totalidade do rebanho estadual. Dessa forma, a capacidade de processamento foi rateada de forma proporcional à participação de cada município nessa *proxy*, e estão expostos no APÊNDICE E. Os dados sobre os rebanhos possuem como fonte a Produção Pecuária Municipal (IBGE, 2020c), no período de 2002 a 2017.

2.3. Cálculo das emissões

Para a construção da variável dependente que será utilizada no modelo econométrico, será realizada a estimação da variável de emissões de CO_2 decorrentes do consumo de combustível nas operações de transporte rodoviário e intermodal, pelos fluxos de transporte de soja.

O cálculo das emissões no transporte rodoviário, sejam as rotas para os portos por meio exclusivamente rodoviário, para as fábricas, ou o frete ponta - entre o município de origem e o terminal intermodal - seguirá a metodologia tier 1, método simplificado para cálculo das emissões com base no consumo de combustível em que não há necessidade de fatores de emissão específicos para o setor, desenvolvido pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 1996), conforme aponta a Equação (12).

$$CO2ROD = DIESEL \times FERODCO2 \tag{15}$$

na qual:

$CO2ROD$: Emissões de CO_2 em quilogramas (kg), provenientes do transporte rodoviário de soja na rota;

$DIESEL$: Consumo de óleo diesel em litros, para o transporte de soja;

$FERODCO2$: Fator de emissão de CO_2 pelo diesel de 2,60 kg/l. Valor utilizado pelo Programa GHG Protocol, sob organização do Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas (GVces/FGV, 2020).

Assim, para o cálculo das emissões, é necessário o cálculo do consumo de combustíveis. Como não há acesso a dados primários de consumo, serão utilizados dados secundários de acordo com a metodologia de custos de transporte do Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial (ESALQ-LOG). Tem-se como principal premissa que o transporte de soja, em cada localidade, é realizado por meio dos implementos bitrem graneleiro e rodotrem graneleiro, cujas especificações são indicadas na Tabela 5.

Tabela 5. Especificações dos implementos rodoviários considerados

Implemento	Tipo de Cavalo Mecânico	Capacidade (t)	Número de Eixos	Consumo de Combustível (l/km)
Bitrem Graneleiro	6x2	38	7	2,5
Rodotrem Graneleiro	6x4	50	9	2,1

Fonte: Elaboração própria, com base em informações e metodologia disponibilizada pelo ESALQ-LOG.

Assim, o consumo de diesel para cada uma das composições é calculado por meio da Equação (13):

$$DIESEL = \frac{DRod}{R} \tag{16}$$

sendo:

$DIESEL$: Consumo total de óleo diesel, em litros, do transporte rodoviário de carga originado no município, no ano

$DRod$: Distância total percorrida em quilômetros.

R: Rendimento do diesel em quilômetros por litro (km/l) para a composição.

Para o transporte realizado por meio da intermodalidade, o cálculo das emissões de CO_2 foi obtido pela Equação (14).

$$CO2INTER = CO2ROD + (Q \times DInter \times FEINTERCO2) \quad (17)$$

na qual:

$CO2INTER$: Emissões de CO_2 em quilogramas (kg), provenientes do transporte intermodal de soja;

$CO2ROD$: Emissões de CO_2 em quilogramas (kg), provenientes do transporte rodoviário de soja na rota;

Q: Quantidade de soja transportada em toneladas (t);

$DInter$: Distância do trajeto realizado por ferrovia ou hidrovia;

$FEINTERCO2$: Fator de emissão de CO_2 para o transporte ferroviário (0,0102 kg CO_2/t.km) ou hidroviário (0,00349 kg CO_2/t.km), de acordo com o Programa GHG Protocol/GVces/FGV (2020).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Modelo matemático

Para a realização da análise econométrica e posterior análise sobre o formato da Curva Ambiental de Kuznets, principal objetivo desse trabalho, fez-se uso de um modelo matemático de otimização para minimização do custo de transporte e definiram-se as quantidades movimentadas em três fluxos: fluxo (I) - Transporte rodoviário direto ao porto, fluxo (II) - Transporte intermodal ao porto e fluxo (III) - Transporte rodoviário direto às fábricas de processamento.

A Tabela 6 apresenta os valores das movimentações por cada corredor, considerando o cenário ótimo determinado pelo modelo matemático. Ao longo do período analisado, evidencia-se a modificação dos principais fluxos de transporte. Em 2002, ano inicial da análise e anterior ao início do denominado *boom das commodities*, a movimentação com destino ao mercado interno - representado pelo fluxo de transporte das fábricas -, foi responsável pela absorção 66% da produção. Em 2017, no entanto, há maior representatividade da exportação em relação ao total produzido transportado pelos fluxos (I) e (II), com 56% do total da produção nacional.

Tabela 6 - Transporte e emissão de CO_2 no transporte de soja por corredor (2002-2017)

	Quantidade Movimentada (mil toneladas) (A partir da Equação 7)			Emissões de CO_2 (mil toneladas) (A partir das Equações 16 e 17)		
Ano	Portos - Rodoviário	Portos - Multimodalidade	Fábricas	Portos - Rodoviário	Portos - Multimodalidade	Fábricas
2002	8.550,88	5.881,00	27.640,00	184,85	173,71	411,88
2003	14.877,47	8.164,56	28.817,50	360,97	214,21	361,95
2004	10.641,85	5.865,89	32.942,00	280,01	183,34	418,88
2005	9.954,96	6.841,84	34.274,50	209,16	254,92	777,77
2006	7.934,68	8.552,17	35.876,00	383,27	236,77	332,34
2007	12.060,60	8.572,28	37.133,00	701,38	213,25	383,73
2008	12.344,38	8.885,91	38.518,91	291,64	218,13	518,82
2009	8.538,71	7.421,67	41.324,75	196,18	168,39	495,06
2010	14.510,16	9.971,50	44.208,50	362,93	229,63	413,43
2011	19.654,37	12.812,51	42.284,00	654,37	314,29	301,99
2012	13.081,57	10.209,60	42.513,42	345,14	273,06	591,02
2013	23.326,69	13.878,13	44.470,00	507,40	404,07	606,58
2014	28.402,54	13.249,32	45.071,00	720,28	373,52	582,06
2015	34.051,78	16.524,89	46.826,00	1.001,36	429,85	377,26
2016	31.129,23	17.638,12	47.582,50	715,26	478,85	427,25
2017	45.941,20	21.096,65	47.694,25	1.327,06	537,43	320,26

As emissões no transporte de soja são calculadas a partir de fatores de emissão do consumo de combustível no modal rodoviário e dos fatores de emissão da relação: volume transportado e distância nos modais ferroviários e hidroviários. Essas emissões são a base para a construção da variável dependente do modelo econométrico para a validação das hipóteses da EKC.

De antemão, a análise do comportamento da variável permite vislumbrar os resultados potenciais da Curva Ambiental de Kuznets. Para a validação da curva com o formato em "U-Invertido", principal hipótese deste trabalho, é esperada uma redução das emissões conforme uma evolução na renda. Os resultados obtidos pelo modelo matemático permitem identificar que ao longo do período analisado há um crescimento médio anual de 7,42% na produção, um dos principais determinantes da renda, e um aumento de 9,27%, nas emissões anuais, número que permite a desconfiança de que outra relação da EKC seja evidenciada no transporte.

Esse comportamento, assim como preconizado por Grossman e Krueger (1991) é o denominado efeito escala, ou seja, um aumento na quantidade influenciando positivamente as emissões, conforme ilustrado na Figura 15.

No período analisado, as principais microrregiões produtoras de soja foram também as microrregiões cujos fluxos de transporte corresponderam as maiores emissões de CO_2, indicando a existência de um forte efeito escala.

No entanto, esse efeito de crescimento é diferenciado entre os fluxos de transporte analisados. O crescimento anual médio no transporte realizado por meio do modal exclusivamente rodoviário foi de 18,21%. Para esse corredor, as emissões médias sofreram um acréscimo de 28,37%. Para o fluxo que utiliza a intermodalidade, o crescimento das movimentações foi de 10,98%, acompanhado de uma elevação de 9,97% nas emissões. Já no fluxo para as fábricas, o crescimento médio na quantidade alocada foi de 3,77%, acompanhado de 5,46% de aumento nas emissões.

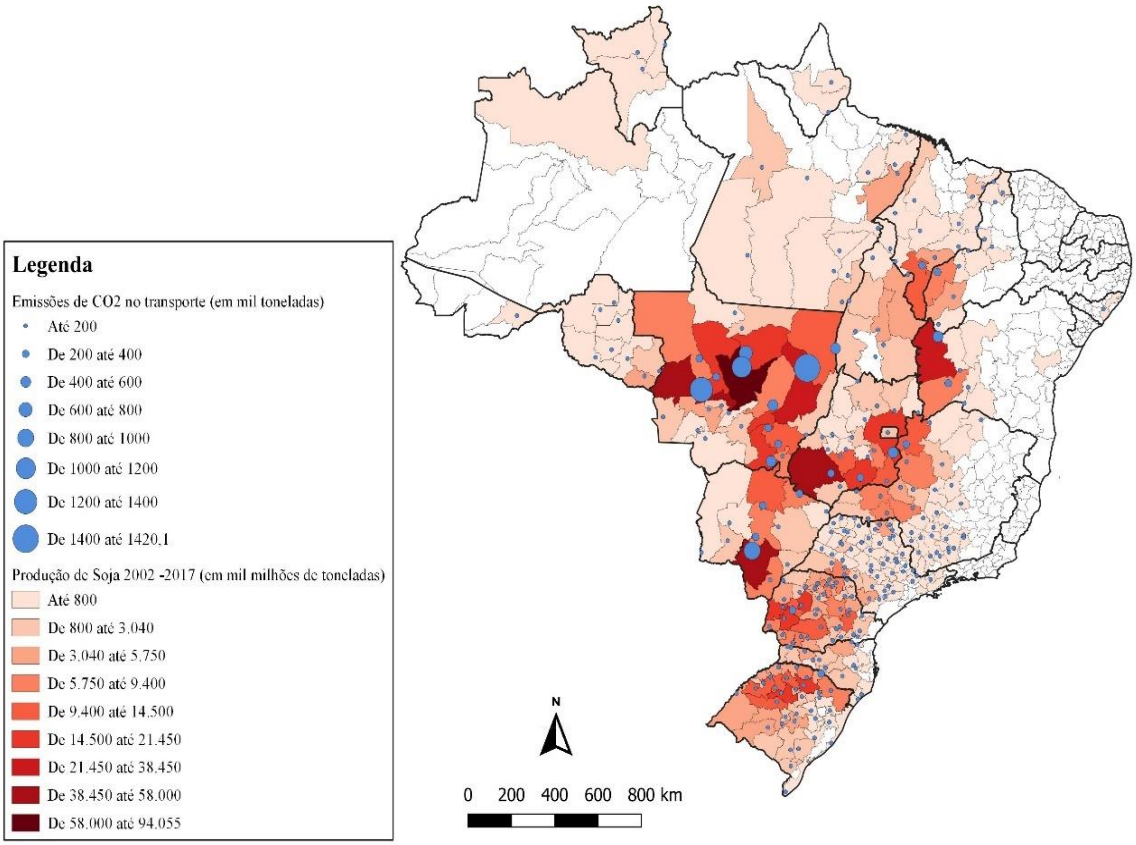


Figura 15 - Produção de soja e emissão de CO_2 no transporte (2002 -2017)

Fonte: Elaboração própria com base nos dados da pesquisa e IBGE (2020b)

Em suma, há uma potencialização das emissões no transporte em função da maior produção, sendo intensificada pelo transporte rodoviário direto com destino à exportação. O que é esperado, dado os impactos negativos que o consumo de combustíveis fósseis produz no meio ambiente.

No período analisado, por meio da alocação ótima proposta pelo modelo matemático, o fluxo rodoviário direto - Fluxo (I)-, foi responsável pelo transporte de 24,84% da produção e por 38,08% das emissões, um contraste com os transportes destinados às fábricas – Fluxo (III)-, com média anual de 60% na alocação de quantidade, mas de 39,06% nas emissões. Embora para essa análise ambos os fluxos utilizem exclusivamente o modal rodoviário, a proximidade das fábricas com as origens da produção possibilita o transporte em menores rotas e consequentemente menor consumo de combustível e emissões.

A alocação ótima permite ainda apontar o importante papel da intermodalidade, tanto em termos de competitividade quanto de redução das emissões. A Figura 16 apresenta a evolução dos volumes recebidos via intermodalidade pelos portos que mais utilizam essa solução. Destacadamente, num cenário de alocação ótima, ao longo de todo o período há o predomínio de movimentações por meio do Fluxo (III) para os portos de Santos (SP), Paranaguá (PR) e São Luís (MA).

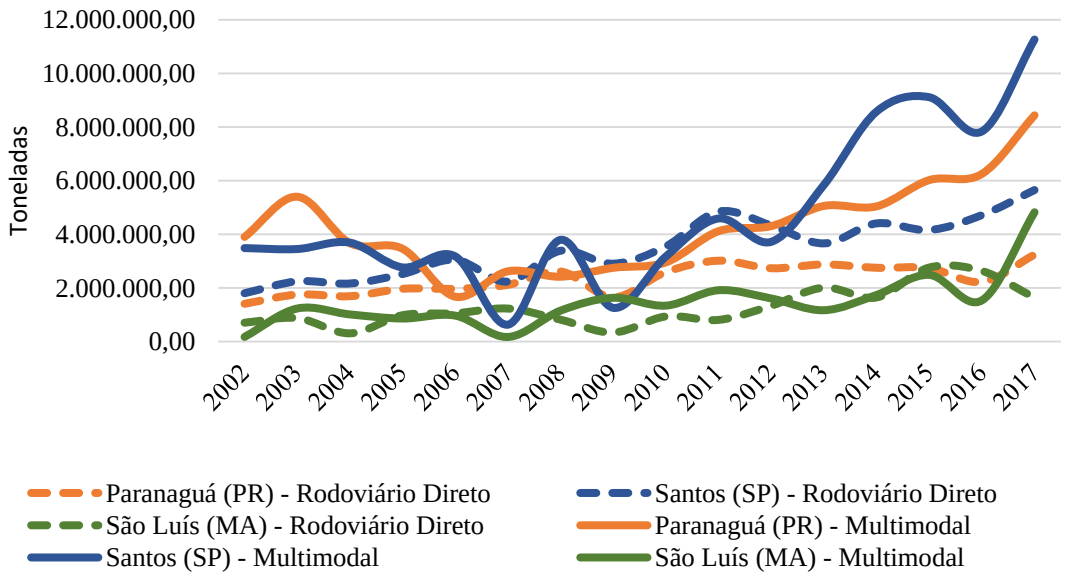


Figura 16 - Movimentação de soja pelos portos de Santos, Paranaguá e São Luís

Fonte: Elaboração própria com base nos dados da pesquisa.

Esse resultado é decorrente tanto da redução de custos possibilitada pela solução intermodal quanto pela ampliação da capacidade e/ou instalação de novos terminais de transbordo ferroviários e hidroviários. O uso dessas soluções possibilita a redução dos custos de transporte e aumento da competitividade pelo transporte em maior escala de produtos agroindustriais de baixo valor agregado. Na esteira disso, há a redução do consumo de combustível no modal rodoviário – utilizado apenas como parte do trajeto, já que há substituição de parte das rotas por modais cujos fatores de emissão são inferiores.

A Figura 17 apresenta a evolução do indicador de quilos de CO_2 emitidos por tonelada de soja transportada. Para a análise e buscando evidenciar a importância da multimodalidade nos indicadores ambientais, compara-se a média nacional do indicador no denominado Cenário 1, no qual todas as movimentações para exportação são realizadas exclusivamente por modal rodoviário - Fluxo (I) - e o Cenário 2, determinado pelo modelo matemático com a formulação completa, com os três fluxos.

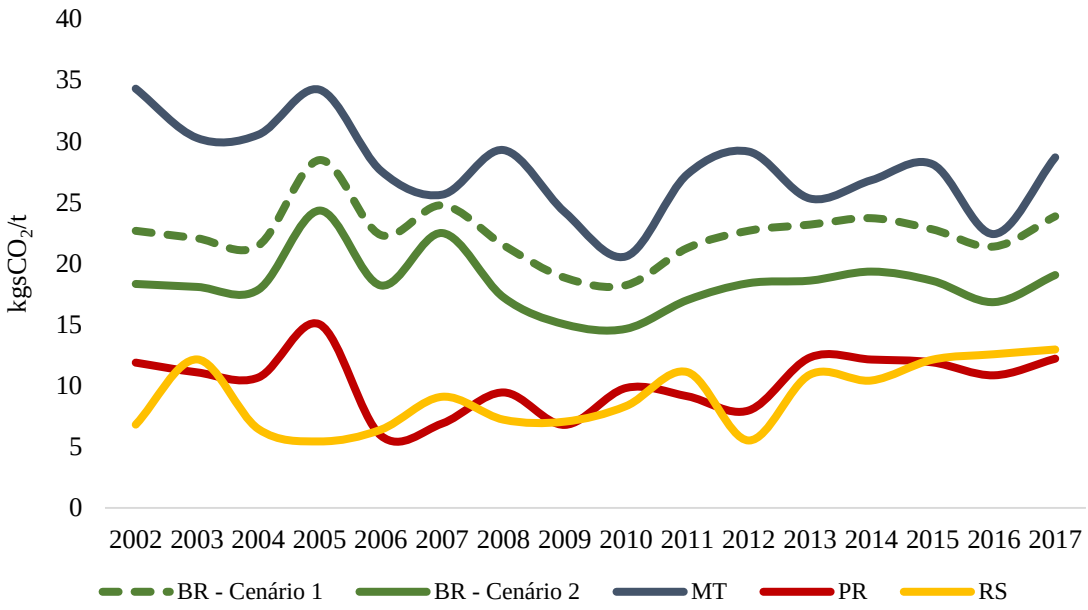


Figura 17 - Emissões de CO_2 por tonelada de soja transportada (2002-2017)

Fonte: Elaboração própria com base nos dados da pesquisa.

A média anual de emissões por tonelada transportada no Cenário 1, na alocação ótima, foi de 22,43 $kgCO_2/t$ de soja transportada, resultado em média 18,15 % superior as emissões pelo cenário que permite a multimodalidade.

Além disso, a Figura 17 ainda ilustra o problema da grande distância entre as principais regiões produtoras com as infraestruturas de escoamento. Destacadamente, os níveis de emissão por toneladas no estado do Mato Grosso (MT), principal estado produtor do Brasil, considerando o cenário com multimodalidade, é maior que a média nacional para o mesmo cenário. O escoamento da produção originada no Mato Grosso é mais danoso ambientalmente do que transporte originado em outras grandes regiões produtoras como o Paraná (PR) e o Rio Grande do Sul (RS), abaixo da média nacional, em função principalmente da proximidade com os portos de Paranaguá (PR) e Rio Grande (RS), respectivamente.

Os resultados obtidos no modelo permitem ainda identificar a hinterlândia dos portos ao longo do período. As origens das mercadorias recebidas pelos portos, pelos fluxos (I) e (II) são apresentadas na

Tabela 7.

Tabela 7 - Hinterlândia dos portos exportadores de soja

Portos	Principais Origens da Produção			
	Rodoviário Direto		Multimodalidade	
Belém (PA)	PA	60,88%	MT	100,00%
	MT	36,22%		
	AP	2,70%		
	Outros	0,21%		
Manaus (AM)	PA	26,03%	MT	93,86%
	MA	18,38%	RO	6,14%
	RR	18,33%		
	Outros	37,26%		
Paranaguá (PR)	PR	99,48%	PR	50,11%
	Outros	0,52%	MS	34,66%
			MT	14,50%
Salvador (BA)	BA	77,61%		
	TO	9,99%		
	MG	6,56%		
	Outros	5,84%		
Santos (SP)	MG	29,44%	MT	92,56%
	MT	19,72%	GO	4,26%

	PR	14,45%	MS	3,19%
	Outros	36,39%		
São Francisco do Sul (SC)	PR	54,40%		
	SC	26,59%		
	RS	15,28%		
	Outros	3,73%		
São Luís (MA)	MA	56,32%	MT	62,76%
	PI	22,32%	TO	26,45%
	TO	9,68%	MA	9,68%
	Outros	11,68%	Outros	1,12%
Rio Grande (RS)	RS	93%	RS	100,00%
	Outros	7%		
Vitória (ES)			GO	80,12%
			MG	18,27%
			DF	1,62%

Fonte: Elaboração própria com base nos dados da pesquisa.

Dentre as principais conclusões fornecidas pelo modelo, está que os portos localizados em grandes regiões produtoras, destacadamente os Portos de Rio Grande (RS), Paranaguá (PR) e São Francisco do Sul (SC), possuem uma importante atuação regional, voltada ao escoamento da produção local, fato não surpreendente pelas claras condições de competitividade.

A solução de transporte otimizada indica também o uso predominante de transporte multimodal para o produto originado no Centro Oeste, principalmente no Mato Grosso (MT), principal fonte das movimentações pelo Fluxo (II) para os portos de Santos (SP), São Luís (MA), Belém (PA) e Manaus (AM).

3.2. Análise das variáveis do modelo econométrico

O logaritmo natural da *proxy* de PIB da soja - a variável $lnCO_{2-,}$ nas microrregiões analisadas é a principal variável de interesse desse trabalho, considerando também sua forma quadrática e cúbica. A atividade da soja é de grande relevância para a economia nacional, considerando a grande importância da cadeia na pauta de exportações e na geração de empregos e renda, que se estende para os segmentos auxiliares de insumos e serviços. A evolução anual é apresentada na Figura 18.

Figura 18 - PIB da soja (2002 -2017)

Fonte: Elaboração própria com base em IBGE (2020b)

A evolução da série indica os dois diferentes cenários que ocorreram no mercado da soja ao longo do período analisado. O início do século é marcado pela euforia da entrada da China na OMC em 2001. No entanto, conforme ilustrado, no Brasil pode ser identificada uma queda no PIB setorial entre 2005 e 2006, o que ocorreu principalmente devido à desvalorização cambial e o impacto direto na rentabilidade pelo descompasso nos custos de produção e no recebimento em reais, embora com preços favoráveis no mercado internacional. Além disso, as safras de 2004/2005 e 2005/2006 sofreram com uma limitação no desenvolvimento das lavouras em virtude da estiagem e consequente impacto no desempenho do setor.

O segundo cenário, iniciado a partir de 2007, apresenta reversão e melhora no desempenho do setor, principalmente com a elevação dos preços internacionais das *commodities*, dentre elas a soja, dando início ao ciclo do *boom das commodities*, sendo um dos principais fatores desse contexto o estabelecimento do forte vínculo entre Brasil e China no complexo soja e carne.

Para o Brasil, o PIB da soja é o carro chefe no desempenho do agronegócio. Ao longo do período analisado, o produto do setor indicado pela *proxy* representou em média 3,94% do produto nacional. Os estados de Mato Grosso (9,43%), Piauí (8,24%), Bahia (7,97%) e Mato Grosso do Sul (6%) despontam como os mais dependentes do segmento agrícola da cadeia sojicultora. Os estados do Centro-Oeste representam o eixo tradicional da produção de soja,

com a consolidação da produção e da dinâmica econômica em torno da cadeia desde as décadas de 1980/1990.

Já os estados do Nordeste são os principais expoentes da expansão da fronteira agrícola recente, historicamente regiões menos dinâmicas economicamente em relação a outros setores da economia, a evolução da produção de soja, e consequente maior representatividade do segmento na economia local evidencia benefícios econômicos imediatos decorrentes do *boom das commodities*.

A variável *lnIDHM*, que representa o logaritmo do Índice Desenvolvimento Humano Municipal, elaborado pela Firjan (2018), é a média dos indicadores dos municípios das regiões analisadas. Conforme analisado por Hussain e Dey (2021), indicadores de desenvolvimento se mostram como importantes nas análises da EKC, uma vez que há a expectativa de que países que já atingiram elevados padrões de desenvolvimento apresentem trajetórias de decrescimento nas medidas de degradação ambiental.

Os autores destacam que maiores níveis de desenvolvimento humano são relevantes por representarem a possibilidade de que há na localidade uma preocupação ambiental, visto que, nos estágios iniciais da trajetória de desenvolvimento o objetivo é o atingimento de maiores níveis de renda. Após isso, há um aumento da sensibilidade ambiental, o que é potencializado pelo maior nível educacional e o consequente capital humano mais capacitado, e a pela ciência, com a criação de novas tecnologias, tudo isso empregado na busca por soluções ambientalmente menos danosas.

Arango-Miranda *et al.* (2020) apontam, no entanto, as expectativas para o divergente comportamento da variável em relação aos países em diferentes estágios de desenvolvimento. Em análise da EKC para o bloco Nafta, os autores identificaram que para os Estados Unidos, país membro da OCDE, o maior nível de desenvolvimento humano – representado pela variável explicativa IDH - está associado à redução das emissões. No entanto, o contrário ocorre para o México. Uma vez que o Brasil é considerado um país emergente é prudente a expectativa de que a variável apresente sinal positivo no modelo econométrico.

O índice desenvolvido pela Firjan, IDHM, segue os principais eixos estabelecidos pelo *United Nations Development Programme* (UNDP), que leva em consideração para a elaboração do IDH das nações: indicadores relacionados a renda (PIB *per capita*), saúde (expectativa de vida) e educação (nível de escolaridade, em anos).

De acordo com o UNDP (2019), as nações são classificadas quanto ao desenvolvimento em uma escala na qual a maior proximidade de 1 aponta maiores níveis de desenvolvimento, sendo o nível da classificação: i. muito alto: indicador superior a 0,800; (ii) alto: de 0,700 a 0,799; (iii) médio: de 0,600 a 0,699; (iv) baixo: de 0,500 a 0,599; e (v) muito baixo: inferior a 0,499. O IDHM Firjan apresenta a seguinte classificação: i. elevado: indicador superior a 0,800; (ii) moderado: de 0,600 a 0,799; (iii) regular: de 0,400 a 0,599 e (iv) baixo: inferior a 0,399. A evolução da classificação das microrregiões estudadas é apresentada na Figura 19.

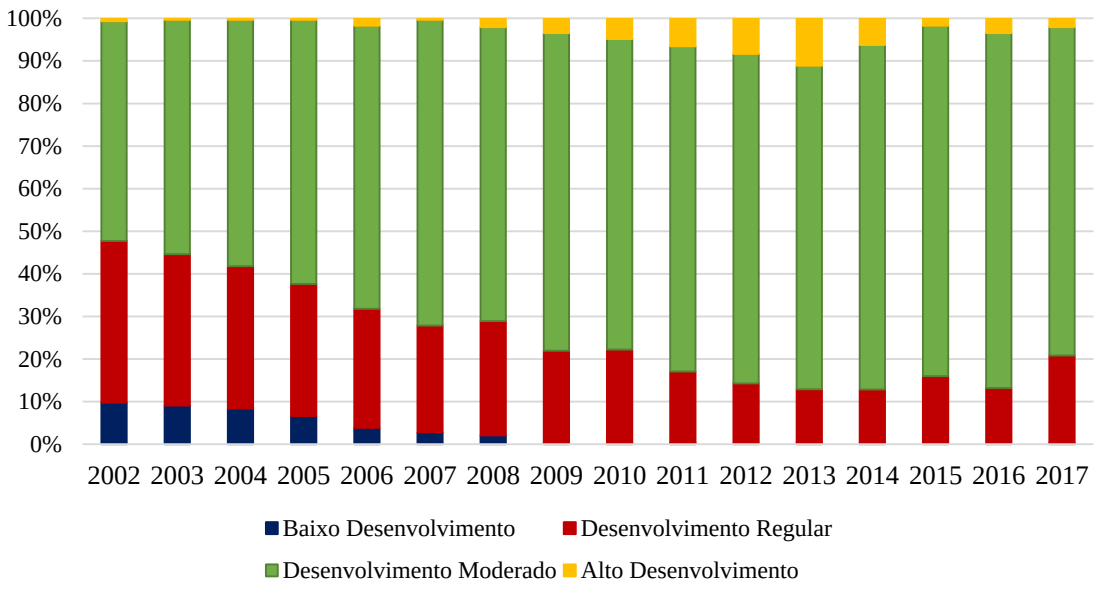


Figura 19 - Evolução percentual do IDH das microrregiões (2002 -2017)

Fonte: Elaboração própria com base em Firjan (2018).

Ao longo do período analisado, houve uma perceptível evolução nos indicadores de desenvolvimento das microrregiões. O principal indicador dessa melhora é a reversão do quadro de 10% das microrregiões classificadas como em baixo estágio de desenvolvimento para o cenário em que todas as microrregiões produtoras de soja são classificadas, no ano de 2017, com grau mínimo de desenvolvimento regular.

No outro extremo, no entanto, há uma grande dificuldade de atingimento de um alto grau de desenvolvimento humano, e consequentemente de políticas que estimulem esse desenvolvimento. Em 2013, 11,15% das microrregiões do estudo foram classificadas no melhor nível de desenvolvimento, sendo o melhor ano de toda a série, inclusive com a maior média anual, de 0,704. O ciclo de melhoria contínua dos indicadores – mais regiões saindo da condição de baixo desenvolvimento e outras conseguindo atingir o maior nível -, ocorre no período mais virtuoso da economia nacional ao longo desse começo de século: após a crise do *subprime*, e amparada em uma política econômica expansionista voltada para o fortalecimento de programas sociais e forte atuação governamental, sem êxito de longo prazo.

Todavia, nos anos posteriores houve uma reversão desse cenário, motivada principalmente pela grave crise econômica que atingiu o país. Apesar da influência dos indicadores de saúde e educação, o componente econômico é determinante pelo impacto direto nas famílias, através dos empregos e da renda, e consequentemente no acesso a

oportunidades e serviços de saúde. Afeta também o Estado na formulação de políticas de desenvolvimento, bem como na ideal provisão de serviços públicos.

A variável *lnÁrea*, que representa a área de soja colhida em hectares, é extremamente importante, uma vez que representa o efeito escala na produção, um dos mais importantes fatores para a explicação do formato da EKC nesse estudo. O Brasil é o segundo maior produtor da oleaginosa e ocupa a mesma posição na área cultivada.

Ao longo das últimas décadas, com o aumento no consumo mundial de grãos, motivado principalmente pelo aumento da demanda mundial por proteína animal, intensificou-se a destinação da produção para o esmagamento e fabricação de ração animal, além do já consolidado consumo humano através do óleo de soja e do uso da produção como fonte de biocombustíveis (Rigo *et al.* 2015). Além disso, o boom das commodities despontou como cenário incentivador no aumento da área de produção. A Figura 20 ilustra a evolução da área e do rendimento ao longo do período estudado.

A inclusão dessa variável se torna mais importante dada a sua relevância para o avanço da produção. Entre os anos de 2002 e 2017, o crescimento médio da área cultivada foi de 5,15%, número maior que o crescimento médio da produtividade em termo do rendimento da produção, de 2,37%, justificando o uso da área como variável de controle, em detrimento da produtividade. Não há dúvidas, no entanto, da importância do crescimento da produtividade e do uso de tecnologia e processos mecanizados na consolidação do Brasil como grande player global. Além do avanço da área destinada a produção, a variável *lnEmpregos* representa a evolução do emprego no segmento agrícola da cadeia da soja como indicador de crescimento do setor. A inclusão da variável decorre da expectativa inicial de que a criação de novos postos de trabalhos no segmento apresenta estreita relação com o desempenho da cadeia.

Mesmo com elevada mecanização na cadeia da soja, os indicadores de empregos apresentam crescimento ao longo do período analisado. De acordo com a RAIS, em 2017, os empregos formais do setor no campo totalizaram 121 mil postos de trabalho. Desde 2006, a taxa de crescimento dos empregos é de 5,94%.

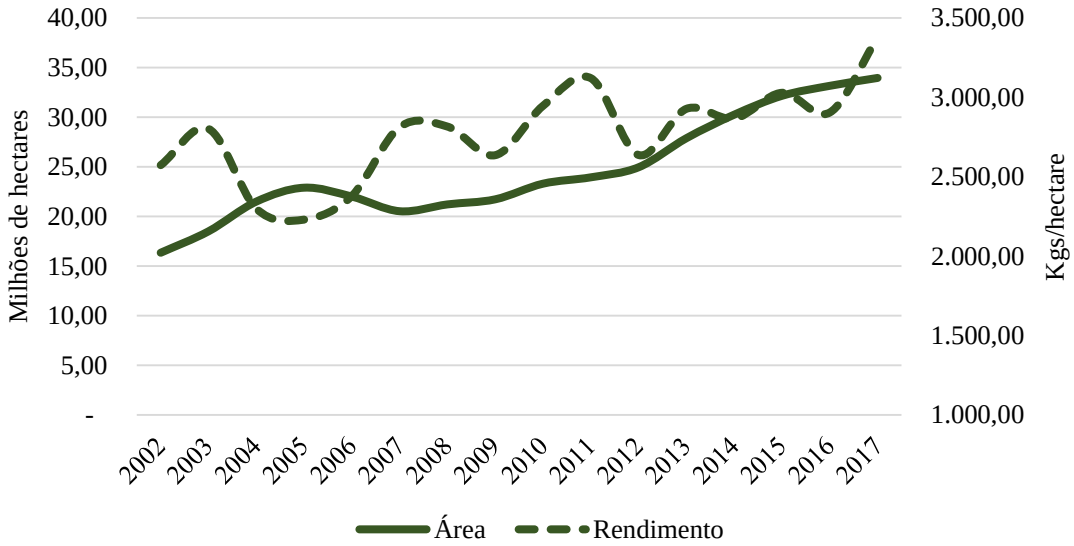


Figura 20 - Área colhida e produtividade da soja (2002 - 2017)

Fonte: Elaboração própria com base em IBGE (2020b)

O uso da variável *lnRebanho*, logaritmo natural do efetivo de rebanhos, é a soma dos rebanhos de bovinos, bubalinos, galináceos e suínos. A incorporação ao modelo se justifica pela hipótese de que a proximidade das principais regiões produtoras de soja com as principais regiões pecuaristas possibilitam, pelas menores distantes, uma redução nas emissões do transporte.

O setor de soja é importante integrante da produção pecuária, uma vez que é, juntamente com o milho, responsável pela alimentação dos rebanhos. Isso origina uma integração dos setores e a consolidação do complexo soja, milho e carne.

A produção de carne, destacadamente bovina e de aves, ocupa posição entre os dez mais importantes produtos da pauta de exportação nacional. O Brasil ocupa a primeira colocação no ranking de maiores exportadores de carne bovina (19,29%[8]) e de frango (35,42%). Em 2017, as exportações de carne totalizaram 1,53 milhão de toneladas, de acordo com a Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carne (ABIEC). Dados da Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA, 2018), evidenciam que as exportações de carne de frango e suína totalizaram respectivamente 4,2 e 0,68 milhões de toneladas.

[8] Fonte: Harvard University (2020)

Os estados com a maior produção de soja ocupam também a liderança na pecuária. De acordo com informações do IBGE (2020c), ao longo do período acompanhado, Mato Grosso, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Goiás, Pará e Rio Grande do Sul possuem os maiores efetivos de rebanhos. Na produção de frangos, cujo rebanho em 2017 foi de 1,42 bilhões de cabeças de galináceos, destaque para os estados da região Sul, com o Paraná sendo o maior produtor nacional, seguido por São Paulo, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Como última variável de controle há *lnInvRodovias*, que representa o logaritmo natural do investimento em rodovias. A variável é uma proxy da evolução do investimento em logística. Há a expectativa de que o investimento atue negativamente sobre as emissões de CO_2, uma vez que amplia as opções de escoamento e melhora as estruturas existentes.

Dada a impossibilidade de dados sobre investimento em logística ao longo de todo o período e no nível geográfico desejado, a variável representa o investimento público em rodovias, seja para atividades de manutenção ou construção de novas estruturas, com base em dados iniciais da ONTL (2020) e do IBGE (2020a). A evolução dos valores para as microrregiões acompanhadas é ilustrada na Figura 21.

O comportamento da série segue a mesma tendência do produto interno bruto, uma vez que é construída a partir da participação do investimento em rodovias na renda. Nesse sentido, merece destaque o forte investimento público realizado no bojo das políticas anticíclicas pós-crise de 2008, com o objetivo de potencializar a demanda agregada, com um conjunto de ações como o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) e o Programa de Investimento em Logística (PIL).

A queda dos investimentos após o período de 2013 é consequência da crise econômica alimentada pela grave crise política que atingiu o país e pela extinção dos programas outrora vigentes, conforme aponta Fernandes (2020).

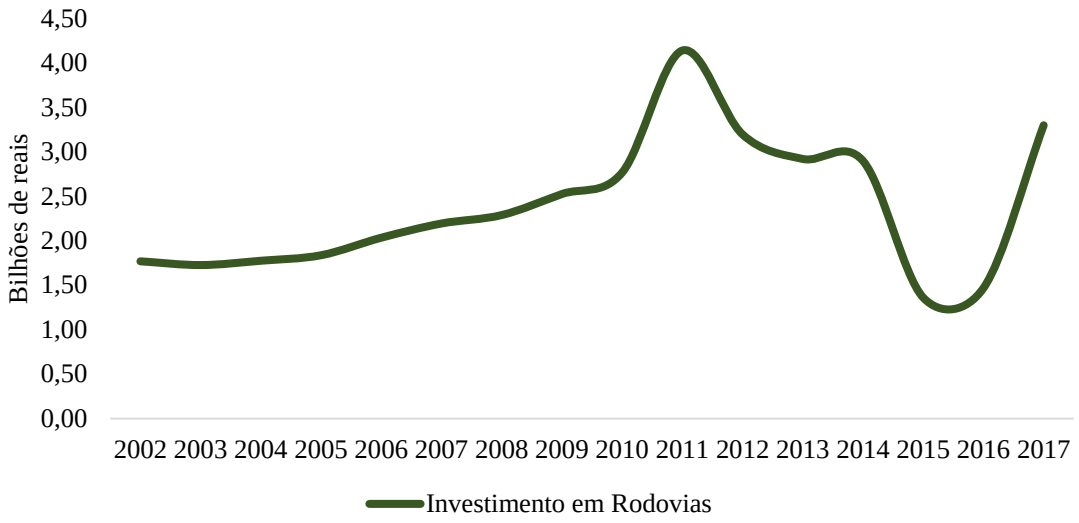


Figura 21 - Investimento público em rodovias (2002 -2017)

Fonte: Elaboração própria com base em ONTL (2020) e IBGE (2020a)

3.3. Modelo econométrico

A estimação econométrica buscando a validação dos formatos da Curva Ambiental de Kuznets, objetivo principal deste trabalho, ocorreu utilizando painel de dados.

A composição do painel de dados apresenta na dimensão de unidades *cross section* as 290 microrregiões onde existem cidades produtoras de soja, ao longo do período de 2002 até 2017, sendo 16 anos de séries de tempo.

O painel é estruturado de modo que se caracterize como balanceado, ou seja, acompanhamento de dados de todos os períodos e unidades *cross section*. No entanto, para algumas variáveis, devido a indisponibilidade de dados, há gaps nas séries. Assim, não há prejuízo para a estimação, exceto para execução de alguns testes que exigem séries completas. As estatísticas descritivas das variáveis, em logaritmo, estão disponibilizadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Estatísticas descritivas das variáveis do modelo

Variável	Observações	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
$lnCO_{2(t-1)}$	3983	13.05266	2.754075	2.439642	19.18215
$lnCO_2$	3693	13.02217	2.742317	2.439642	19.18215
ln(PIBSoja)	3983	17.31792	2.326874	7.405722	21.55769
ln(PIBSoja)²	3983	305.3232	76.49849	54.84472	464.7339
ln(PIBSoja)³	3983	5464.832	1932.433	406.1647	10018.59
lnÁrea	3983	9.70687	2.441638	0	14.64972
lnRebanho	4640	14	1.549027	7.104144	17.85938
lnIDHM	4595	-0.4384534	0.1775321	-1.226523	-0.15359
lnPopulação	4640	11.66791	1.110414	7.79111	14.92719
lnPreço	4640	4.303056	0.1565096	3.995727	4.52864
lnEmpregos	2694	4.301354	2.13382	0	9.295692
lnInvRodovias	4640	13.57049	2.42342	7.19064	20.11782

Fonte: Elaboração própria.

A problemática da falta de observações para algumas unidades seccionais em determinados períodos é explicitada na Tabela 8.

. Conforme supracitado, há implicação para a realização de alguns testes importantes que precisam ser realizados anteriormente às estimações dos painéis estáticos e dinâmicos.

Destacadamente, dentre esses testes estão os de raiz unitária para dados em painel. A estimação de séries com raiz unitária, conforme preconizam Granger e Newbold (1974), pode ser responsável por tornar a regressão espúria. Os testes buscando identificar a estacionariedade das séries em painéis de dados, são classificados, conforme apontam Breitung e Pesaran (2008), em testes de primeira e de segunda geração. A principal diferença é que os testes da primeira categoria, dentre os quais se destacam os testes de Levin-Lin-Chu (LLC), Im-Shin-Pesaram (IPS) ou de Fisher, pressupõem a independência seccional, ao contrário dos testes de segunda geração como o *Cointegrated Augmented Dickey-Fuller* (CADF), desenvolvido por Pesaran (2007).

Assim, anteriormente aos testes de raiz unitária, foi realizado o teste CD de Pesaran para detecção da dependência seccional entre as unidades *cross section* do painel. Os resultados de ambos os testes estão dispostos na Tabela 9.

.

Tabela 9 - Testes de dependência seccional e raiz unitária

Variável	Dependência Seccional	Raiz Unitária - Teste de Fisher			
	CD	P	Z	L*	Pm
$lnCO_2$	196.11*	999.58*	-4.76*	-4.78*	6.34*
$lnCO_2$	154.47*	969.62*	-14.62*	-14.63*	17.21*
ln(PIBSoja)	232.41*	748.69*	-9.89*	-9.53*	9.09*
ln(PIBSoja)²	235.61*	727.93*	-9.10*	-8.89*	9.17*
ln(PIBSoja)³	238.22*	710.14*	-8.52*	-8.33*	-8.33*
lnÁrea	282.31*	820.38*	-9.86*	-10.26*	12.25*
lnRebanho	41.28*	1228.54*	-15.18*	-15.55*	19.04*
lnIDHM	223.23*	1533.45*	-24.00*	-23.89*	28.42*
lnPopulação	237.78*	1179.76*	-10.30*	-12.43*	17.60*
lnPreço	365.44*	1858.40*			
lnEmpregos	153.39*	630.31*			
lnInvRodovias	169.92*	1298.14*	-19.06*	-18.65*	21.08*

Nota: *Significância a 1%
Fonte: Elaboração própria.

Assim, para todas as variáveis há a rejeição da hipótese nula de dependência seccional. Dessa forma, há a possibilidade do uso dos testes de raiz unitária de primeira geração. Uma vez que há gaps em algumas variáveis, os testes LLC e IPS não são performados. Logo, o teste de Fisher, baseado no *Augmented Dickey-Fuller* (ADF), permite a rejeição da hipótese nula de raiz unitária nos painéis para todas as variáveis, permitindo a estimação do modelo econométrico.

Os resultados do teste CD de Pesaran, além de permitirem a confiança nos resultados do teste de Fisher, permitem a utilização da estimação de efeitos fixos sem a utilização de mecanismos de correção para esse problema, como a matriz de erros padrão de Driscoll e Kraay (1998) ou estimador AMG . Além disso, os resultados são importantes uma vez que a estimação utilizando GMM não é robusta a formas persistentes de dependência seccional, de acordo com Roodman (2006), sendo necessária adoção de métodos que utilizem matrizes de pesos espaciais, procedimento dispensado nesse trabalho.

Em consequência, realizou-se a estimação do modelo de efeitos fixos para o Modelo (1), buscando validar a hipótese do formato em “U-Invertido” e do Modelo (2), do formato em “N”, por meio do estimador *within* e MQO Agrupados. Após a estimação inicial, foram realizados os testes de diagnósticos de problemas danosos a confiança nos modelos. Por meio do teste de Wald não foi houve a rejeição da possibilidade de heterocedasticidade. Além desse, o teste de autocorrelação de Wooldrige aponta para a presença de correlação serial.

Para a resolução desses problemas, utilizou-se a estimação erros padrão clusterizados. Os resultados dos modelos e dos testes de detecção são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados - Modelos de efeitos fixos

Variável Dependente: *lnCO₂*	Efeitos Fixos			
	(1)		(2)	
Variáveis	Coeficiente	t	Coeficiente	t
ln(PIBSoja)	0,0865	0,31	2,5876*	3,65
ln(PIBSoja)²	0,0136***	1,66	-0,1514*	-3,11
ln(PIBSoja)³			0,0035*	3,2
lnÁrea	0,5183*	6,93	0,5596*	7,5
lnRebanho	-0,0085	-0,22	-0,01339	-0,34
lnIDHM	-2,6852*	-6,22	-2,7027*	-6,33
lnPopulação	-1,7941*	-4,3	-1,824132	-4,23
lnPreço				
lnEmpregos	-0,0758*	-2,94	-0,0775*	-2,98
lnInvRodovias	0,0572	1,52	0,0440	1,16
Intercepto	22,5499*	3,97	10,53626	1,6
R^2	0,5444		0,5515	
Hausman (chi2)	97,77*		98,49*	
F(19,259)	101,38*		97,99*	
CD - Pesaran	305,91*		300,9*	
Teste de Wooldridge	F(1, 235) = 224,99*		F(1,235) = 213,65	
Wald (chi2)	1.6e+33*		2.8e+32*	

*Significância a 1%, ** Significância a 5% e *** Significância a 10%
Nota: Variáveis *dummies* estão omissas.
Fonte: Elaboração própria

Os resultados do modelo de efeitos fixos permitem vislumbrar o comportamento das emissões de CO_2 no transporte em relação a renda. A análise do formato em "U-Invertido", por meio dos resultados do Modelo (1), apresenta que os coeficientes relacionados as variáveis *ln(PIBSoja)* e *ln(PIBSoja)²* são positivos. Dessa forma, não há validação de formatos da EKC, por dois motivos principais: os sinais dos coeficientes são condizentes com uma curva positivamente inclinada, ou seja, aumentos da renda são sempre causadores de maiores emissões de carbono. Ademais, por meio dos valores da estatística t, não há significância estatística para o coeficiente da variável *ln(PIBSoja)²*.

Para o Modelo (2), verifica-se que os sinais dos coeficientes relacionais as variáveis de renda são estatisticamente significantes e validam o formato em "N" da ECK estimada. Além disso, o modelo é considerado válido pelos valores da estatística F. Nessa especificação, há

ainda validação importante sobre algumas variáveis de controle, corroborando a expectativa em relação ao sinal da variável lnÁrea.

Há também significância estatística para as variáveis que representam o IDHM, população e investimento em logística. Os sinais dessas variáveis são, no entanto, divergentes dos sinais esperados com base nos trabalhos anteriores, mas explicáveis em relação as regiões de estudo e do setor específico.

Mesmo com a validação no Modelo (2), a estimação de outros modelos é importante, pois os coeficientes do modelo não permitem o cálculo dos pontos críticos da EKC, os *turning points* da relação das emissões e renda. Além disso, os modelos de efeitos fixos são acessórios nessa análise, uma vez que, pela formulação das variáveis não há a confirmação de exogoneidade estrita. Na Tabela 11 , são apresentados os resultados do Modelos (3) a (6).

Os Modelos (3) e (4), que buscam testar a hipótese de EKC em formato quadrático, por meio de, respectivamente, *system GMM one step* e *two-step*, não permitem evidenciar esse comportamento da relação renda e emissões, uma vez que os coeficientes relacionais às variáveis de renda, embora apresentem os sinais esperados pela configuração de "U-Invertido", são estatisticamente não significantes. Além disso, os valores decorrentes da estatística de Hansen, indicam a inadequação dos instrumentos utilizados, comprometendo a aceitação do modelo.

Em acréscimo a falta de condições estatísticas para a validação, os modelos (3) e (4) apresentam possíveis *turning points* muito elevados, o que inviabiliza a análise a respeito de eventuais políticas que poderiam ser elaboradas buscando a inflexão na trajetória de emissões, uma vez que grande parte das microrregiões, em cada ano, possuem renda oriunda da soja muito distante do nível de renda crítico.

Os resultados dos modelos estimados por meio de GMM apontam divergências, algo esperado, uma vez que há uma grande sensibilidade decorrente das opções utilizadas na estimação, crítica em relação a EKC apontada por Dinda (2005).

As tentativas para a validação do formato em "N" realizadas pelos Modelos (5) e (6), apresentam resultados e sinais que permitem a validação do formato. Para a análise das variáveis, o modelo cujo resultado é mais satisfatório é o (6), que além de ser estimado utilizando *system GMM – two step*, é assintoticamente mais eficiente que o Modelo (5). Além disso, dentre os resultados das quatros especificações de painel dinâmico estimadas, foi o

único na qual, por meio da estatística t, foi possível inferir a significância estatística dos coeficientes das variáveis *ln(PIBSoja)*, $ln(PIBSoja)^2$ e $ln(PIBSoja)^3$ e por isso é o modelo final utilizado nas análises.

A validação do modelo é amparada ainda pelos testes e verificações realizadas após a estimação. Foram utilizados 30 instrumentos na estimação, número demasiado inferior ao de grupos do painel, 254, indicando que as estratégias utilizadas para evitar a proliferação de instrumentos foram exitosas, destacadamente o uso de instrumentos colapsados/combinados e restrição de uso de defasagens a no máximo segunda ordem.

Tabela 11 - Resultados - System GMM

	System GMM							
	(3)		(4)		(5)		(6)	
Variáveis	Coeficiente	t	Coeficiente	t	Coeficiente	t	Coeficiente	t
$lnCO_2$	0,1031191**	2,48	0,1183281*	2,93	0,0987919**	2,4	0,1166958*	3,22
ln(PIBSoja)	0,7509987	1,56	0,4139583	0,83	5,971533	1,59	8,264817**	2,18
ln(PIBSoja)²	-0,0187727	-1,2	-0,0095269	-0,57	-0,3691046	-1,6	-0,5114139**	-2,18
ln(PIBSoja)³					0,0075142	1,57	0,0104695**	2,17
lnÁrea	0,6823695*	2,79	0,6535606*	3,54	0,8221722*	3,12	0,704529*	3,96
lnRebanho	0,3507003**	2,4	0,3740874**	2,26	0,2596982**	1,74	0,2243146	1,39
lnIDHM	-2,769942*	-3,6	-2,579049*	-3,8	-2,610295*	-3,6	-2,123672*	-3,33
lnPopulação	-0,4031534*	-3,7	-0,4087807*	-3,32	-0,3834323*	-3,5	-0,3521517*	-3
lnPreço	0,7682188**	2,33	0,5638809	1,6	0,7592188**	2,28	0,5874817***	1,76
lnEmpregos	-0,0544651	-0,5	-0,105157	-1,19	-0,1106008	-1,1	-0,1079439	-1,32
lnInvRodovias	0,1012101*	2,89	0,1262868*	3,19	0,1125731*	3,29	0,1246414*	3,5
Intercepto	-7,605146***	-1,8	-3,895096	-0,88	-32,17646	-1,7	-42,74425	-2,15
Numeros de Instrumentos	28		28		30		30	
Arellano e Bond - AR (1)	-8,5*		-8,21*		-8,49*		-8,62*	
Arellano e Bond - AR (2)	1,76***		1,88**		1,53		1,88**	
Hansen (Chi2)	20,3		20,9		13,11		13,11	
Prob Hansen	0,004		0,004		0,108		0,108	
F	F(20, 253) = 98.12*		F(20, 253) =87.03*		F(21, 253) = 82.70*		F(21, 253) = 85.80*	
Turning Point 1	R$ 486.338.646,16		R$ 2.725.072.146,91		R$ 2.160.374,01		R$ 2.880.819,83	
Turning Point 2					R$ 77.168.686,18		R$ 48.241.626,73	

*Significância a 1%, ** Significância a 5% e *** Significância a 10%

Nota: Os modelos estimados consideraram as variáveis relacionadas ao segmento da soja (*ln(PIBSoja), ln(PIBSoja)², ln(PIBSoja)³, lnÁrea, lnRebanho, lnPreço e, lnEmpregos)* como endógenas para fins de instrumentalização, as demais foram consideradas estritamente exógenas. Além disso, as *dummies* de tempo, foram consideradas conforme aponta Roodman (2009), como instrumentos exógenos, apenas para a equação do *system* GMM em nível. Para evitar a proliferação de instrumentos, optou-se pela combinação de instrumentos (colapso) e pelo uso máximo da segunda defasagem como instrumento. Além disso, a estimação ocorreu com correção de pequenas amostras e erros padrão robustos. Variáveis *dummies* estão omissas. O script do modelo (6) está no APÊNDICE F.

Fonte: Elaboração própria.

Por meio do teste de Arellano e Bond, aceita-se a hipótese nula de que não há correlação serial de segunda ordem (AR2), indicando que o tratamento dado a endogeneidade foi adequado.

Por fim, através da estatística de Hansen, que assume p-valor de 0,108, há a aceitação da validação dos instrumentos. O valor apresentado está incluído no intervalo de 0,10 até 0,25 considerado por Roodmann (2009) como o que permite ampla confiança sobre a validade dos instrumentos, uma vez que valores elevados da estatística de Hansen podem ser resultados de influência da proliferação de instrumentos.

Assim, por meio do Modelo (6), os *turning points* da EKC ocorrem ao atingimento do nível de renda de R$ 2.880.819,83, a partir do qual ocorre a inflexão negativa, e de R$ 48.241.626,73, que marca a nova evolução na relação entre renda e emissões no transporte. Para esse trabalho, os pontos de inflexão já foram atingidos em algumas das regiões. Na Figura 22 é apresentada a evolução do comportamento das microrregiões em relação as fases da EKC para o transporte de soja.

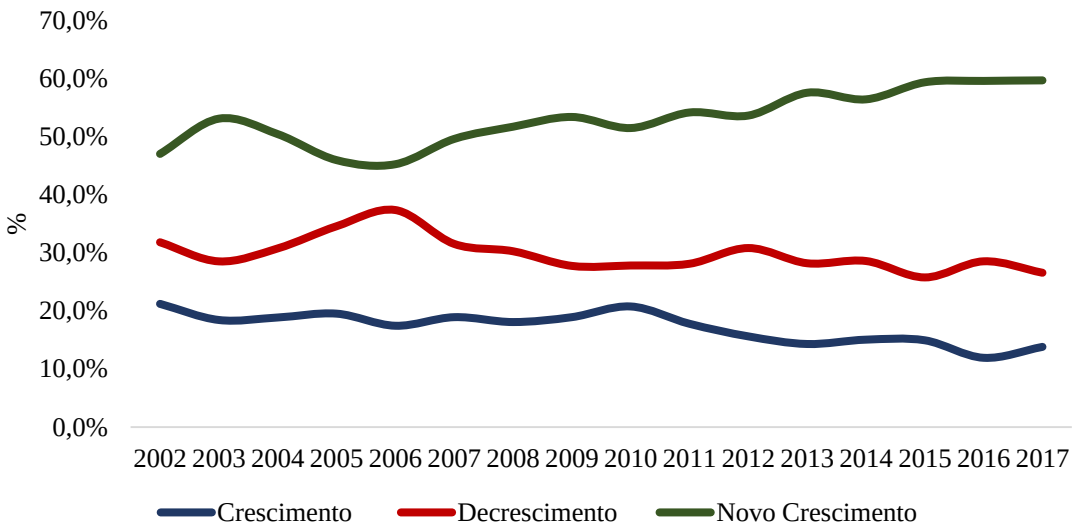


Figura 22 - Quantidade de microrregiões classificadas de acordo com a fase da EKC

Os resultados evidenciam que as microrregiões produtoras de soja apresentam renda em níveis que as colocam em uma trajetória de aumento das emissões nas operações de transporte. No ano inicial da análise, 2002, 47% das microrregiões apresentaram renda compatível com o segmento de nova ascendência na EKC. Em 2017, último ano acompanhado, esse patamar foi vigente em 60% das microrregiões. Situação que ocorre com a tendência de queda no número de regiões com renda dentro das fases de crescimento inicial e decrescimento das emissões.

Esse comportamento apresenta grande divergência quando as análises são realizadas com enfoque regional. Ao longo de todo o período de análise, as microrregiões do Sul e do Centro Oeste foram as mais representativas para a segunda fase ascendente da EKC. Em 2002, ano inicial da análise, essas microrregiões correspondem respectivamente a 49,01% e 28,43% das localidades na nova de crescimento das emissões. Já em 2017, último ano da análise, de 42,19% e 26,58. Em média, 74% das microrregiões da região Centro Oeste estão na fase de novo crescimento das emissões. Para a região Sul, esse número é de 75,98%. De 2014 até 2017, nenhuma microrregião do Centro Oeste foi classificada como estando na fase inicial

Ademais, merece destaque nas fases iniciais de crescimento e consequente decrescimento das emissões na Curva de Kuznets localidades da região Sudeste e Nordeste. Em 2017, 52,5% e 20%, respectivamente das regiões da fase de crescimento e 58,44% e 10,38% das regiões em fase de decrescimento das emissões, evidenciando as diferentes fases em que as regiões estão em relação ao segmento de soja, com as grandes regiões mais tradicionais tendo a maioria absoluta das microrregiões com nível de renda relacionado a crescimento contínuo da degradação ambiental, enquanto que as regiões ainda menos dinâmicas, de novas fronteiras agrícolas no Nordeste e no Sudeste, estão nos estágios iniciais da curva.

Além da verificação da relação de Kuznets por meio do Modelo (6), ainda é possível inferir sobre a importância das variáveis de controle na relação entre renda e emissões. Conforme esperado, o modelo permite indicar a grande importância da área no aumento das emissões, com significância estatística a 1%. Em relação as demais variáveis relacionadas ao mercado da soja, há relação positiva entre o preço da commodity e as emissões do transporte, situação esperada pelo estímulo provocado pela remuneração nas movimentações. No entanto, a variável relacionada ao nível de emprego na produção de soja, evidenciou-se estatisticamente não significante, sendo desconsiderada para análise.

Assim como a variável *lnEmpregos*, cujo sinal identificado foi divergente do esperado e sem a comprovação da significância estatística, é a situação da variável *lnRebanho*. A inclusão da variável na especificação do modelo considera a expectativa de aumentos no rebanho nas microrregiões como indutores de menores emissões no transporte, uma vez que a alimentação origina a maior demanda interna por grãos.

Dentre as variáveis de controle social, os sinais apresentados revertem a expectativa inicial. Para a variável população, importante nos estudos relacionados a EKC, há a conclusão com base no Modelo (6), da indicação do Modelo (2). Ou seja, o conjunto de dados desse trabalho indica que o aumento da população está relacionado a uma diminuição nas emissões no transporte de soja. Nos trabalhos de Isik, Ongan e Özdemir (2019) e Wang *et al.* (2016), que objetivam a validação das hipóteses da Curva de Kuznets para toda a economia analisada, as conclusões indicam que aumento na população é relacionado a acréscimo nas emissões.

No entanto, a principal justificativa para a divergência nesse trabalho decorre do fato de que, uma vez que se analisa o comportamento das emissões levando em consideração apenas um setor ligado à agricultura, e considerando o processo natural de mudança estrutural da economia, que envolve o crescimento da população em locais com maior predomínio do setor de serviços ou industrial, grandes populações indicam menor atividade agrícola e consequentemente menores emissões no transporte. Para o estudo, as 21 regiões que representam 50% de toda a produção, abrigam apenas 9,24% da população.

A variável *lnIDHM*, apresentou sinal negativo e significância, indicando que maiores níveis de desenvolvimento humano são importantes mitigadores das emissões. A expectativa inicial de um sinal positivo decorreu de trabalhos que consideram que o período de transição para maiores níveis de desenvolvimento, mensurados pelos indicadores de IDH, estão relacionados a maior degradação ambiental, uma vez que processo de crescimento econômico em países emergentes como o Brasil e os demais membros dos BRICS, exige maior exploração ambiental. Pelo contrário, em países já classificados como desenvolvidos, maiores indicadores de IDH auxiliam em redução do impacto ambiental. No entanto, os resultados apontam para uma direção em que melhorar os indicadores de desenvolvimento é benéfico para o meio ambiente, o que pode ser justificado pelo fato de que maior desenvolvimento inclui maiores níveis de tecnologia e produtividade.

Por fim, a variável *lnInvRodovias*, que representa os investimentos em rodovias, apresenta o sinal positivo divergente do esperado e se evidencia como estatisticamente significante. Dessa forma, explicita-se que maiores investimentos em rodovias são indutores de maiores emissões. Essa categoria de investimentos inclui dentre as ações a realização de manutenção de rodovias, recapeamento e a construção de novas estradas sob o controle estatal.

A expectativa inicial era de que um o sinal referente a variável fosse negativo, uma vez que ações de manutenção são importantes na mitigação das emissões pela melhoria da qualidade das vias. No entanto, uma possibilidade para explicar o sinal positivo é que a construção ou ampliação de novos trechos rodoviários podem sugestionar um incentivo ao uso da modalidade. De forma geral, maiores investimentos públicos em rodovias evidenciam a importância de ações voltadas para multimodalidade, uma vez que reafirmam o grande potencial degradante das rodovias.

Os resultados dos modelos estimados permitem indicar que, a relação entre a degradação ambiental promovida pelas emissões de CO_2 no transporte de soja e a renda setorial apresenta o comportamento de curva em "N", ou seja, após um período inicial de natural crescimento e o atingimento de um determinando nível de renda, há a reversão nas emissões. No entanto, esse comportamento não se sustenta no longo prazo ou numa atividade estabelecida a mais tempo, e há uma nova reversão no comportamento das emissões, a partir do qual o aumento da renda é estimulador de maiores danos ao meio ambiente.

O trabalho seminal de Grossman e Krueger (1991), no qual se valida o formato em "U-Invertido" da Curva Ambiental de Kuznets, aponta sobre os principais efeitos que podem explicar os formatos da EKC: efeitos composição, escala e tecnologia. Os resultados obtidos por esse trabalho confirmam a expectativa de Torras e Boyce (1998) em relação ao formato em "N" da EKC, e uma das principais explicações para isso decorre da real possibilidade de que no longo prazo o efeito escala aqui claramente representado pelo aumento da produção de soja, que consequentemente exige maiores operações no transporte e emissões, são preponderantes aos demais.

Embora houvesse a expectativa de que no setor de transporte de soja, com a criação de novos corredores logísticos, ampliação da capacidade de portos e instalação de novos terminais multimodais, investimentos que ocorrem buscando uma maior competitividade econômica por meio da logística, mas que geram externalidades positivas ao meio ambiente, permitissem a validação de uma EKC em formato de "U-Invertido", os resultados apontam que esse conjunto de ações aumentam a produtividade das operações logísticas e podem ser classificados para esse estudo como efeitos tecnológicos, mas não são suficientes para impossibilitar o aumento a longo prazo da degradação ambiental.

Uma vez que o modelo matemático formulado para identificação dos fluxos de transporte, e consequentemente as emissões no transporte de soja, incorpora o aumento da

infraestrutura logística ao longo do período, com os valores reais de capacidade dos portos, terminais e fábricas, a expectativa inicial era de que esse aumento de instalações propiciassem o aumento dos fluxos intermodais em nível que permitisse uma Curva de Kuznets no formato de “U-Invertido”.

O aumento da infraestrutura logística é relevante uma vez que permite o aumento da produtividade nas operações de transporte. Novos terminais de transbordo e a melhoria das redes ferroviárias e hidroviárias permitem, por meio da intermodalidade, ganhos na escala do transporte. Além disso, quanto mais numerosas as soluções possíveis, maior agilidade no transporte e menor dependência de terminais específicos, o que permite a diminuição dos custos, e como externalidade, a redução dos danos ambientais.

Nesse sentido, é de suma importância a ação por parte de formuladores de políticas públicas. Uma vez que os efeitos tecnológicos ainda são encarados como externalidades e não como objetivos principais, são necessárias ações que busquem a adequação desses objetivos como os principais norteadores de planos de investimento em logística, por meio de parcerias com a iniciativa privada através de concessões, leilões ou até mesmo incentivos.

Essas inversões de capital podem ser realizadas por agentes externos. Para isso, é necessário que a condução da política macroeconômica busque a manutenção de um ambiente de negócios reconhecidamente seguro. Para que os investimentos sejam realizados pelo setor público, são necessárias adequações que permitam a sustentabilidade das contas públicas.

O fomento a multimodalidade é essencial. Uma vez que a atividade agropecuária, e consequentemente o efeito escala tendem à contínua expansão, pelo lado da oferta motivada pelos contínuos ganhos de produtividade e pelo lado da demanda motivada pela expansão de mercados consumidores, exemplificado nesse trabalho pela China e o aumento das interações comerciais com o Brasil como fator extremamente relevante para o crescimento do setor, o efeito escala é potencializado pelas características geográficas do Brasil e suas conhecidas particularidades quanto a logística em um país de grandes dimensões.

Os resultados desse trabalho são obtidos utilizando no cálculo das emissões os mesmos fatores de produtividade ao longo de todo o período, ou seja, as condições de transporte rodoviário são iguais e não levam em consideração diferenciação de fatores relevantes como a idade dos veículos, qualidade dos pavimentos ou mudanças dos fatores de

emissão, ou seja, fatores com impacto na produtividade do transporte e que possuem grande importância.

Assim, não há dúvidas de que a melhoria dessas condições são importantes ações que podem ser tomadas buscando a sustentabilidade ambiental. Seldon e Song (1994) apontam como algo que pode reverter trajetórias de degradação ambiental, ações que busquem a elevação do nível educacional e social, além do uso de instrumentos regulatórios por parte do Estado, buscando maximizar o bem estar social quanto ao meio ambiente preservado.

Uma legislação nesses moldes e o reforço contínuo de fiscalização são aliados importantes. Dentre ações importantes realizadas buscando a mitigação dos problemas ambientais, há a intensificação da inspeção veicular ambiental, processo iniciado por meio da resolução 418 de 2009 do Conama, ou para seguimento das resoluções do Conselho Nacional de Trânsito (Contran) em relação aos limites de peso, como a resolução nº 2 de 2020.

Por fim, além das ações de investimento em multimodalidade e legislação, não há dúvidas de o surgimento e a inserção comercial de novas tecnologias no transporte, como veículos movidos integralmente a biocombustível, de forma híbrida ou a gás, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis, necessitarão de incentivos e programas que busquem levar essas tecnologias às operações. O Estado brasileiro, ao longo dos anos iniciais do século XXI, empregou esforços em programas de financiamento como o Procaminhoneiro e Finame PSI, com motivação desenvolvimentista e cujas inúmeras críticas recebidas são de que não favoreceram a renovação da frota nacional, retirando do mercado veículos com tecnologias mais danosas ao meio ambiente.

Para a incorporação das novas tecnologias de transporte, em caso de não incentivos por parte do mercado para a valorização real da sustentabilidade nas operações, caberá ao Estado, por meio dos seus mecanismos de fomento e frente ao seu dever de busca do bem estar social, a organização de programas que busquem facilitar o acesso as novas soluções, potencializadoras do efeito técnico pela melhoria dos indicadores de produtividade.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal deste trabalho é a validação da Curva Ambiental de Kuznets para o transporte de soja no Brasil no período de 2002 a 2017. O segmento da soja é um dos principais da economia nacional e teve seu crescimento potencializado no começo do século XXI, com o ingresso da China, principal exportador e parceiro comercial do país no complexo agroindustrial soja-carne, na Organização Mundial do Comércio (OMC), em 2001.

Para a validação do formato da relação entre evolução das emissões de dióxido de carbono (CO_2) e a renda no setor de soja, foi construída uma variável de emissão no transporte de soja com base em modelo matemático para otimização dos fluxos e, após isso, por meio de fatores de emissão, a determinação do montante de emissões por origem de produção.

A variável de emissões de CO_2 foi utilizada como dependente em modelos econométricos de dados em painel estáticos e dinâmicos, que evidenciaram que no transporte de soja, a EKC segue um formato em "N", o que indica que após o período inicial de crescimento e decrescimento, há uma nova inflexão que indica que a atividade é ambientalmente danosa no longo prazo. Além disso, destaque para as variáveis relacionadas a área e investimentos em rodovias como potencializadoras das emissões, e para a população e nível de desenvolvimento como importantes fatores para mitigação da degradação ambiental no transporte.

As evidencias fornecidas pelos modelos econométricos apresentam divergência da expectativa inicial do trabalho, que vislumbrava para o setor de soja uma Curva Ambiental de Kuznets com o formato em "U-Invertido", como a descoberta no trabalho de Grossman e Krueger (1991), sob a perspectiva de que o aumento da produção, principalmente motivada pelo comércio exterior, motivaria uma ampliação significativa de projetos de infraestrutura capazes de reverter a trajetória de emissões e garantindo que o crescimento setorial, de forma isolada, seria suficiente para garantir a proteção ambiental.

No entanto, resultados apontam para a necessidade de ações voltadas a mitigação dos problemas no transporte da soja. Uma vez que o principal motivo para a degradação ambiental é o aumento da produção, recorrente no Brasil, conforme dados do IBGE (2020b), com recordes de safra, são necessários que mais alternativas que busquem aumentar a

produtividade das operações de transporte sejam realizadas, destacadamente voltadas a diminuição do uso de combustíveis fósseis.

As medidas necessárias são voltadas ao aumento dos investimentos na intermodalidade, que destacadamente é uma redutora das emissões, graças principalmente a características marcantes do Brasil, como a longa distância entre as principais regiões produtoras e os portos de escoamento. São relevantes também ações para o transporte rodoviário, como a fiscalização dos termos estabelecidos pela legislação e os esforços de incorporação das novas tecnologias.

Esse trabalho apresenta como grande contribuição a adaptação de um experimento consolidado na literatura – a abordagem da EKC buscando identificar determinantes para a degradação ambiental – para uma abordagem setorial, o transporte de soja no Brasil, cuja aplicação apresentada pela literatura é rara.

A superação de algumas barreiras e premissas adotadas neste estudo é grande oportunidade para o desenvolvimento de trabalhos futuros. Destacadamente, como grande limitação, há um período de tempo que, embora possibilite a análise, é inferior ao período acompanhado em grande parte dos trabalhos que analisam a Curva de Kuznets, com períodos superiores a 25 anos, além dos 16 anos aqui analisados. Isso ocorre principalmente pela falta de dados de séries vitais para o desenvolvimento do trabalho, como as proporcionadas pelo Sistema de Contas Nacionais para a proxy da renda.

Esse trabalho utiliza, conforme supracitado, algumas premissas em relação aos indicadores de produtividade dos caminhões considerados no transporte, especificamente o rendimento de combustível, constante ao longo de todo o período. Para a simplificação, também são mantidos constantes os fatores de emissão de todos os modais de transporte. Alterações nesses parâmetros podem ser importantes na observação de outros comportamentos na relação emissões-renda. Além disso, não são consideradas variáveis de especialização e melhor performance dos condutores de veículos, bem como as divergentes condições das estradas pela qualidade dos pavimentos.

Dentre as elucidações proporcionadas pelos resultados, está que o comportamento identificado pela EKC é movido principalmente pela situação que ocorre nos principais estados produtores, das regiões Centro-Oeste e Sul, cujas localidades são as que se encontram em nova fase de expansão das emissões, em contraposição as microrregiões das regiões

Sudeste e Nordeste, sendo possível a realização de análises focalizadas em cada região, algo além dos objetivos desse trabalho.

Por fim, merece destaque que as análises empíricas da Curva de Kuznets apresentam divergências de acordo com as opções utilizadas para a estimação do modelo econométrico, critica apontada por Dinda (2002) e corroborada neste trabalho pelos diferentes resultados, principalmente em relação a significância estatística, nos modelos estimado por GMM.

Em suma, os resultados indicam a impossibilidade do crescimento setorial da soja ser suficiente para a diminuição da degradação promovida pelas emissões no transporte do produto sendo necessária uma articulação entre setor público e privado para tomada de ações que busquem o aumento da produtividade nas operações de modo que as emissões sejam mitigadas. O formato da EKC em “N” e a perspectiva de maiores crescimentos pela atividade, logo para as operações de transporte, permitem vislumbrar que em caso de omissão na tomada de ações, os efeitos a longo prazo podem ter importante papel no aprofundamento das problemáticas ambientais.

REFERÊNCIAS

ABDIB - Associação Brasileira da Infraestrutura e Indústrias de Base. Livro Azul da Infraestrutura, 2020. Disponível em: <https://www.abdib.org.br/livro-azul-da-infraestrutura/>. Acesso em : 10. fev. 2021.

ABIEC - Associação Brasileira de Exportadores de Carne. Exportações, 2020. Disponível em <http://abiec.com.br/exportacoes/> . Acesso em: 11.fev.2021.

ABIOVE - Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais. Estatísticas, 2020. Disponível em < https://abiove.org.br/estatisticas/> Acesso em: 23. jul. 202

ABPA - Associação Brasileira de Proteína Animal. Relatório Anual, 2018. Disponível em: <https://abpa-br.org/relatorios/> Acesso em: 10.fev. 2021.

AGUILAR, C.J.P; SHIKIDA, P.F.A; LOBO, D.S. Logística de exportação de grãos do Oeste do Paraná: perspectivas de potencialidades. Planejamento e Políticas Públicas, n. 51, 2018.

ALDY, J. E. An Environmental Kuznets Curve analysis of U.S. state-level carbon dioxide emissions. Journal of Environment and Development, v. 14, n. 1, p. 48–72, 2005.

ALMEIDA, M. G. ; LOBATO, T. C. A Curva de Kuznets Ambiental para a região norte do Brasil entre os anos de 2002 a 2015. Economia & Região, v. 7, n. 1, p. 7, jun. 2019.

ALMEIDA, M. S.; AMARAL, M.; MORABITO, R. A study of the locations of intermodal terminals in the brazilian network for soybean exports. Produção, v. 26, n. 3, p. 562–580, jul. 2016.

ALMEIDA, W. S.; SILVA, J. C.; VIEIRA, E. B.; SAIANI, C. C. Crescimento econômico e degradação ambiental: uma análise empírica com dados em painel a partir da hipótese da Curva Ambiental de Kuznets. Revista Espacios, v. 38, n. 39, ago. 2017.

ALMER, C.; WINKLER, R. Analyzing the effectiveness of international environmental policies: The case of the Kyoto Protocol. Journal of Environmental Economics and Management, v. 82, n. December 1997, p. 125–151, 2017.

ALSHEHRY, A. S.; BELLOUMI, M. Study of the environmental Kuznets curve for transport carbon dioxide emissions in Saudi ArabiaRenewable and Sustainable. Energy Reviews,Elsevier Ltd, ago. 2017

ALVAREZ-HERRANZ, A.; BALSALOBRE-LORENTE, D.; SHAHBAZ, M.; CANTOS, J. M. Energy innovation and renewable energy consumption in the correction of air pollution levels. Energy Policy, v. 105, p. 386–397, 2017.

ANDERSON, T. W.; HSIAO, C. Formulation and estimation of dynamic models using panel data. Journal of Econometrics, v. 18, n. 1, p. 47–82, jan. 1982.

ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. Diesel e emissões: A nova legislação 2012. Disponível em: < https://anfavea.com.br/docs/cartilha_proconveP7.pdf>. Acesso em: 25 Abr. 2020.

ANTT – Agência Nacional dos Transportes Terrestres. Anuário do Transporte Ferroviário, 2019. Disponível em <https://www.antt.gov.br/anuario-do-setor-ferroviario> Acesso em: 22. jul. 2020.

ARANGO MIRANDA, R.; HAUSLER, R.; ROMERO LOPEZ, R.; GLAUS, M.; PASILLAS-DIAZ, J. R. Testing the Environmental Kuznets Curve hypothesis in North America's free trade agreement (NAFTA) countries. Energies, v. 13, n. 12, p. 3104, 2020.

ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários. Anuários Estatístico, 2019. Disponível em < http://web.antaq.gov.br/Anuario/> Acesso em; 20. jul. 2020.

ARELLANO, M.; BOND, S. Some Tests of Specification for Panel Data: Monte Carlo Evidence and an Application to Employment Equations. The Review of Economic Studies, v. 58, n. 2, p. 277, abr. 1991.

ARELLANO, M.; BOVER, O. Another look at the instrumental variable estimation of error-components models. Journal of Econometrics, v. 68, n. 1, p. 29–51, jul. 1995.

ASSIS, A. C. V.; SILVA, C. A. D.; MARCHETTI, D. D. S.; DALTO, E. J., RIOS; E. C. S. D.; FERREIRA, M. D. A. Ferrovias de carga brasileiras: uma análise setorial. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, jul. 2017.

ATASOY, B.S. Testing the environmental Kuznets curve hypothesis across the US: Evidence from panel mean group estimators. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 77, p. 731-747, 2017.

ÁVILA, E. S.; DINIZ, E. M. Evidencias sobre curva ambiental de kuznets e convergencia das emissoes. Estudos Economicos, v. 45, n. 1, p. 97–126, ago. 2015.

BACHA, C.J.C. Economia e política agrícola no Brasil - 3ed. Campinas: Alínea, 2018.

BALSALOBRE-LORENTE, D; ÁLVAREZ-HERRANZ, A. Economic growth and energy regulation in the environmental Kuznets curve. Environmental Science and Pollution Research, v. 23, n. 16, p. 16478-16494, 2016.

BALSALOBRE-LORENTE, D.; DRIHA, O. M.; BEKUN, F. V.; OSUNDINA, O. A. Do agricultural activities induce carbon emissions? The BRICS experience. Environmental Science and Pollution Research, v. 26, n. 24, p. 25218–25234, 2019.

BALTAGI, B. Econometric analysis of panel data. Chichester: John Wiley & Sons, 2005.

BARRETT, S. Political economy of the Kyoto Protocol. Oxford Review of Economic Policy, v. 14, n. 4, p. 20–3, 1998.

BARTHOLOMEU, D. B.; CAIXETA FILHO, J. V. Quantification of the environmental impacts of road conditions in Brazil. Ecological Economics, v. 68, n. 6, p. 1778–1786, 2009.

BLUNDELL, R.; BOND, S. Initial conditions and moment restrictions in dynamic panel data models. Journal of Econometrics, v. 87, n. 1, p. 115–143, 1998.

BOEREMA, A.; PEETERS, A.; SWOLFS, S.; VANDEVENNE, F.; JACOBS, S.; STAES, J.; MEIRE, P. Soybean trade: balancing environmental and socio-economic impacts of an intercontinental market. PloS one, v. 11, n. 5, 2016.

BOLFE, É. L.; VICTÓRIA, D.C.; CONTINI, E; SILVA,G.B; ARAÚJO, L,S; GOMES, D. MATOPIBA em Crescimento Agrícola. Revista de Política Agrícola, v. 1, n. 4, p. 38–62, 2016.

BONETTI, L. P. Distribuição da soja no mundo : origem, história e distribuição. In : MIYASAKA, S.; MEDINA, J.C. (Ed.). A soja no Brasil. Campinas : ITAL, 1981.

BRANCO, J.E.H; CAIXETA-FILHO, J.V. Estimativa da demanda de carga captável pela estrada de ferro Norte-Sul. Journal of Transport Literature, v. 5, n. 4, p. 17–50, 2011.

BREITUNG, J; PESARAN, M. H. Unit roots and cointegration in panels. In: The econometrics of panel data. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 279-322. 2008.

BUN, M. J. G.; WINDMEIJER, F. The weak instrument problem of the system GMM estimator in dynamic panel data models. Econometrics Journal, v. 13, n. 1, p. 95–126, fev. 2010.

CARVALHO, L. Valsa brasileira: do boom ao caos econômico. São Paulo: Editora Todavia SA, 2018.

CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. PIB do Agronegócio Brasileiro, 2020. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>. Acesso em 26 fev. 2020.

CHRISTOFF, P. The promissory note: COP 21 and the Paris Climate Agreement Environmental Politics, Routledge, set. 2016.

CNA – Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. Publicações, 2020. Disponível em <https://www.cnabrasil.org.br/boletins/pib-do-agronegocio-cresce-3-81-em-2019>. Acesso em 26 fev. 2020.

CNT – Confederação Nacional dos Transportes. Pesquisa das Rodovias, 2019. Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/> . Acesso em 17 Abr. 2020.

CORREA, V. H. C.; RAMOS, P. A precariedade do transporte rodoviário brasileiro para o escoamento da produção de soja do Centro-Oeste: situação e perspectivas. Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 48, n. 2, p. 447–472, jun. 2010..

COSTA, F.; GARRED, J.; PESSOA, J. P. Winners and losers from a commodities-for-manufactures trade boom. Journal of International Economics, v. 102, p. 50–69, 1 set. 2016.

COSTA, R. G.-R.; SILVA, C. G. T.; COHEN, S. C. A origem do caos ? a crise de mobilidade no Rio de Janeiro e a ameaça à saúde urbana. Cadernos Metrópole, v. 15, n. 30, p. 411–431, dez. 2013.

COUTO, L. F. Faces e Funções: O (des)uso do PPA a partir de suas funcionalidades e a instabilidade orçamentário. IN: Boletim de Análise Político-Institucional. Brasília: IPEA, 2021.

CRUVINEL, R. R. S.; PINTO, P. V. H.; GRANEMANN, S. R. Mensuração econômica da emissão de CO_2 da frota dos transportadores autônomos de cargas brasileiros. Journal of Transport Literature, v. 6, n. 2, p. 234–252, jun. 2012.

DANISH; BALOCH, M. A.; MAHMOOD, N.; ZHANG, J. W.Effect of natural resources, renewable energy and economic development on CO_2emissions in BRICS countries. Science

of the Total Environment, v. 678, p. 632–638, 2019.

DIAO, X. D.; ZENG, S. X.; TAM, C. M.; TAM, V. W. Y.EKC analysis for studying economic growth and environmental quality: a case study in China. Journal of Cleaner Production, v. 17, n. 5, p. 541–548, 2009.

DINDA, S. A theoretical basis for the environmental Kuznets curve. Ecological Economics, v. 53, n. 3, p. 403–413, 2005.

DOGAN, E.; OZTURK, I. The influence of renewable and non-renewable energy consumption and real income on CO_2emissions in the USA: evidence from structural break tests. Environmental Science and Pollution Research, v. 24, n. 11, p. 10846–10854, 2017.

DONG, K.; SUN, R.; DONG, X. CO_2 emissions, natural gas and renewables, economic growth: Assessing the evidence from China. Science of the Total Environment, v. 640–641, p. 293–302, 1 nov. 2018.

DONG, K.; SUN, R.; HOCHMAN, G. Do natural gas and renewable energy consumption lead to less CO_2 emission? Empirical evidence from a panel of BRICS countries. Energy, v. 141, p. 1466–1478, 2017.

DRISCOLL, J.C.; KRAAY, A,C. Consistent covariance matrix estimation with spatially dependent panel data. Review of Economics and Statistics, v. 80, n. 4, p. 549-560, 1998

ELLER, R. D. A. G.; SOUSA JUNIOR, W. C.; LOPES, M.; CURI, C. Custos do transporte de carga no Brasil: rodoviário versus ferroviário [Costs of freight transportation in Brazil: highway versus rail]. Journal of Transport Literature, v. 5, n. 1, p. 50–64, 2011.

ERDOGAN, S.; OKUMUS, I.; GUZEL, A. E. Revisiting the Environmental Kuznets Curve hypothesis in OECD countries: the role of renewable, non-renewable energy, and oil prices. Environmental Science and Pollution Research, 2020.

ESCHER, F; WILKINSON, J. A economia política do complexo Soja-Carne Brasil-China. Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 57, n. 4, p. 656-678, 2019.

FALKNER, R. The Paris Agreement and the new logic of international climate politics. International Affairs, v. 92, n. 5, p. 1107–1125, set. 2016.

FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. Acta amazônica, v. 36, n. 3, p. 395-400, 2006.

FEARNSIDE, P. M. Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil. Environmental Conservation, v. 28, n. 1, p. 23-38, 2001.

FERNANDES, R.M,S. O Programa de Investimento em Logística (PIL): diretrizes, objetivos e desfechos. Geosul, v. 35, n. 76, p. 453-470, 2020.

FGV. Fundação Getúlio Vargas. Programa GHG Protocol Brasil. Ferramenta. Disponível em:< https://www.ghgprotocolbrasil.com.br/ > Acesso em: 20 ago. 2020.

FIRJAN - Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro. IFDM 2018. Disponível em <https://www.firjan.com.br/ifdm/downloads/> Acesso em: 20 nov. 2020.

FMI – Fundo Monetário Internacional. Primary Commodity Price System, 2020. Disponível em < https://data.imf.org/?sk=471DDDF8-D8A7-499A-81BA-5B332C01F8B9 > . Acesso em 13 Mar. 2020

FRANKLIN, R. S.; RUTH, M. Growing up and cleaning up: The environmental Kuznets curve redux. Applied Geography, v. 32, n. 1, p. 29–39, jan. 2012.

FREITAS, R. E.; DE MENDONÇA, M. A. A. Expansão agrícola no brasil e a participação da soja: 20 anos. Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 54, n. 3, p. 497–516, 2016.

FUGLESTVEDT, J. S.; SHINE, K. P.; BERNTSEN, T; COOK, J.; LEE, D. S; STENKE, A.;S KEIE, R. B.; VELDERS, G. J. M; WAITZ, I. A.JTransport impacts on atmosphere and climate: Metrics. Atmospheric Environment, v. 44, n. 37, p. 4648–4677, dez. 2010.

GASQUES, J. G.; BACCHI, M. R. P. ; BASTOS, E. T. Impactos do crédito rural sobre variáveis do agronegócio. Revista de Política Agrícola, v. 26, n. 4, 2017.

GLOBAL INFRAESTRUCTURE HUB. Brazil. Disponível em <https://www.gihub.org/countries/brazil/ > Acesso em: 11.fev.2021.

GRANGER, C, W. J.; NEWBOLD, P. Spurious regressions in econometrics. Journal of Econometrics, v. 2, n. 2, p. 111 - 120, 1974.

GROSSMAN, G.; KRUEGER, A. Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement. National Bureau of Economic Research, 1991.

GRUNEWALD, N.; MARTINEZ-ZARZOSO, I. Did the Kyoto Protocol fail? An evaluation of the effect of the Kyoto Protocol on CO_2 emissions. Environment and Development Economics, v. 21, n. 1, p. 1–22, 1 fev. 2016.

GUIMARÃES, R. P.; FONTOURA, Y. S. D. R. Rio+20 ou Rio-20? Crônica de um fracasso anunciado. Ambiente e Sociedade, v. 15, n. 3, p. 19–39, set. 2012.

HARVARD UNIVERSITY. Atlas of Economic Complexity, 2020. Disponível em: < https://atlas.cid.harvard.edu/ >. Acesso em: 16. Mar. 2021.

HASSAN, S. A.; NOSHEEN, M. Estimating the Railways Kuznets Curve for high income nations—A GMM approach for three pollution indicators. Energy Reports, v. 5, p. 170–186, 2019.

HAVRANEK, T; HORVATH, R; ZEYNALOV, A. Natural resources and economic growth: A meta-analysis. World Development, v. 88, p. 134-151, 2016.

HE, J.; WANG, H. Economic structure, development policy and environmental quality: An empirical analysis of environmental Kuznets curves with Chinese municipal data. Ecological Economics, v. 76, p. 49–59, 1 abr. 2012.

HERMANN, J. Reformas, Endividamento Externo e o “Milagre” Econômico (1964-1973) In: GIAMBIAGI, F.; VILLELA, A.; CASTRO, L.C.; HERMANN, J. Economia brasileira contemporânea. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

HUANG, B.N.; HWANG, M. J.; YANG, C. W. Causal relationship between energy consumption and GDP growth revisited: A dynamic panel data approach. Ecological Economics, v. 67, n. 1, p. 41–54, 2008.

HUSSAIN, A.; DEY, S. Revisiting environmental Kuznets curve with HDI: new evidence from cross-country panel data. Journal of Environmental Economics and Policy,v.10, p. 1-19, 2021.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estimativas de População, 2020d. Disponível em < https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao.html > Acesso em: 28. jul. 2020.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Agrícola Municipal, 2020b. Disponível em < https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas> Acesso em: 28. jul. 2020.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Pecuária Municipal, 2020c. Disponível em < https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ppm/tabelas> Acesso em: 28. jul. 2020.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sistema de Contas Nacionais, 2020a. Disponível em < https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pib-munic/tabelas> Acesso em: 28. jul. 2020.

IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change. AR5 Synthesis Report: Climate Change, 2014. Disponível em:< https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/ > . Acesso em: 12. Abr. 2021.

IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – The Reference Manual – Volume 3 – Energy, 1996. Disponível em: < https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>. Acesso em: 20 ago. 2020.

IŞIK, C; ONGAN, S; ÖZDEMIR, D. Testing the EKC hypothesis for ten US states: an application of heterogeneous panel estimation method. Environmental Science and Pollution Research, v. 26, n. 11, p. 10846-10853, 2019.

JEBLI, M. B.; YOUSSEF, S. B.; OZTURK, I. Testing environmental Kuznets curve hypothesis: The role of renewable and non-renewable energy consumption and trade in OECD countries. Ecological Indicators, v. 60, p. 824–831, 2016.

JOSHI, P.; BECK, K. Democracy and carbon dioxide emissions: Assessing the interactions of political and economic freedom and the environmental Kuznets curve. Energy Research and Social Science, v. 39, p. 46–54, 1 maio 2018.

JOSHI, P.; BECK, K. Environmental kuznets curve for deforestation: Evidence using GMM estimation for OECD and non-OECD regions. IForest, v. 10, n. 1, p. 196–203, 1 fev. 2017.

KANG, Y.-Q.; ZHAO, T.; YANG, Y. Y. Environmental Kuznets curve for CO_2 emissions in China: A spatial panel data approach. Ecological Indicators, v. 63, p. 231–239, 2016.

KAPLINSKY, R.; MESSNER, D. Introduction: The Impact of Asian Drivers on the Developing World. World Development, v. 36, n. 2, p. 197–209, fev. 2008.

KARPOWICZ, I.; GÓES, C.; GARCIA-ESCRIBANO, M. Filling the gap: Infrastructure investment in Brazil. Journal of Infrastructure, Policy and Development, v. 2, n. 2, p. 301-318, 2018.

KHARBACH, M.; CHFADI, T. CO_2 emissions in Moroccan road transport sector: Divisia, Cointegration, and EKC analyses. Sustainable Cities and Society, v. 35, p. 396–401, 2017.

KIM, N. S.; VAN WEE, B. Assessment of CO emissions for truck-only and rail-based intermodal freight systems in Europe. Transportation Planning and Technology, v. 32, n. 4, p. 313–333, ago. 2009.

KUSSANO, M. R.; BATALHA, M. O. Custos logísticos agroindustriais: avaliação do escoamento da soja em grão do Mato Grosso para o mercado externo. Gestão & Produção, v. 19, p. 619-632, 2012.

KUZNETS, S. Economic Growth and Income Inequality.The American Economic Review, v. 45, n. 1, p. 1-28, 1955.

LI, T.; WANG, Y.; ZHAO, D. Environmental Kuznets Curve in China: New evidence from dynamic panel analysis. Energy Policy, v. 91, p. 138–147, abr. 2016.

LIU, L.; CHENG, S. Y.; LI, J. B.; HUANG, Y. F. Mitigating environmental pollution and impacts from fossil fuels: The role of alternative fuels. Energy Sources, Part A, v. 29, n. 12, p. 1069-1080, 2007.

MAAMOUN, N. The Kyoto protocol: Empirical evidence of a hidden success. Journal of Environmental Economics and Management, v. 95, p. 227–256, mai. 2019.

MACEDO, M. N.; DEFRIES, R. S.; MORTON, D. C.; STICKLER, C. M.; GALFORD, G. L.; SHIMABUKURO, Y. E. Decoupling of deforestation and soy production in the southern Amazon during the late 2000s. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 109, n. 4, p. 1341-1346, 2012.

MADDALA, G. S.; WU, S. A comparative study of unit root tests with panel data and a new simple test. Oxford Bulletin of Economics and statistics, v. 61, p. 631-652, 1999.

MANZI, R. H. D. O fim do superciclo das commodities internacionais e seus reflexos na economia brasileira. Conjuntura internacional, v. 13, n. 1, p. 36, 5 out. 2016.

MARCATTO, T. I.; LIMA, L. A. Sociedade Contemporânea E O Protocolo De Quioto: O mundo em prol do meio ambiente. Connexio , v. 2, n. 2, p. 41–63, 2013.

MARCOVITCH, J. Para mudar o futuro: mudanças climáticas, políticas públicas e estratégias empresariais. São Paulo: Edusp, 2006.

MASCARENHAS, C. S.; DE OLIVEIRA, A. L. R.; LOPES, B. F. R.; COLETI, J. D. C. Avaliação da rede de armazenagem para a soja do Estado do Mato Grosso: Aplicação de um modelo de localização. Espacios, v. 35, n. 11, 2014.

MEDEIROS, C. A.; CINTRA, M. R. V. P. Impacto da ascensão chinesa sobre os países latino-americanos. Revista de Economia Politica, v. 35, n. 1, p. 28–42, 2015.

MENZ, T.; WELSCH, H. Population aging and carbon emissions in OECD countries: Accounting for life-cycle and cohort effects. Energy Economics, v. 34, n. 3, p. 842–849, mai. 2012.

MIRAGLIA, S. G. E. K.; GOUVEIA, N. Custos da poluição atmosférica nas regiões metropolitanas brasileiras. Ciência & Saúde Coletiva, v. 19, n. 10, p. 4141–4147, out. 2014.

MONTOYA, M. A.; BERTUSSI, L. A.; LOPES, R. L.; FINAMORE, E. B. Uma nota sobre consumo energético, emissões, renda e emprego na cadeia de soja no Brasil. Revista Brasileira de Economia, v. 73, n. 3, p. 345–369, 2019.

MOREL, B. L. G.; TRIACA, L. M.; DE SOUZA, O. T. Desenvolvimento econômico e a disposição de resíduos sólidos no Brasil: Um teste da hipótese da Curva Ambiental de Kuznets (CKA) para os municípios brasileiros. Espacios, v. 37, n. 17, 2016.

MOSER, S. C. Communicating climate change: history, challenges, process and future directions. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, v. 1, n. 1, p. 31–53, jan. 2010.

MOURA, A.M.M. Trajetória da Política Ambiental no Brasil. In: MOURA, A.M.M. Governança ambiental no Brasil : instituições, atores e políticas públicas. Brasília : Ipea, 2016.

NASSANI, A. A.; ALDAKHIL, A. M.; QAZI ABRO, M. M.; ZAMAN, K. Environmental Kuznets curve among BRICS countries: Spot lightening finance, transport, energy and growth factors. Journal of Cleaner Production, v. 154, p. 474–487, jun. 2017.

NEVES, F. M.; CHANG, M.; PIERRI, N. As estratégias de enfrentamento das mudanças climáticas expressas nas políticas públicas federais do Brasil. Desenvolvimento e Meio Ambiente, v. 34, n. 0, ago. 2015.

NICOLAU, O.L.B.; CHAVES, G.L.D.; ZANCHETTA, I. T. Avaliação do consumo energético e emissões de dióxido de carbono do transporte rodoviário do Brasil (2016-2026). Desenvolvimento e Meio Ambiente, v. 54, 2020.

NORDHAUS, W. Projections and uncertainties about climate change in an era of minimal climate policies. American Economic Journal: Economic Policy, v. 10, n. 3, p. 333–360, ago. 2018.

OLIVEIRA, G. L. T. The geopolitics of Brazilian soybeans. The Journal of Peasant Studies, v. 43, n. 2, p. 348–372, mar. 2016.

OLIVEIRA, G. L. T.; SCHNEIDER, M. The politics of flexing soybeans: China, Brazil and global agroindustrial restructuring. The Journal of Peasant Studies, v. 43, n. 1, p. 167–194, jan. 2016.

OLIVEIRA, R. C.; ALMEIDA, E.; FREGUGLIA, R. DA S.; BARRETO, R. C. S. Desmatamento e crescimento econômico no Brasil: Uma análise da curva de Kuznets Ambiental para a Amazônia Legal. Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 49, n. 3, p. 709–740, jul. 2011.

ONTL - Observatório Nacional de Transporte e Logística. Recursos e Infraestrutura – Rodoviário, 2020. Disponível em https://ontl.epl.gov.br/paineis-analiticos/painel-de-indicadores-de-transporte-e-logistica/recursos-e-infraestrutura/rodoviario/ Acesso em: 20. nov. 2020.

ORAIR, R. O.; SIQUEIRA, F. F. Investimento público no Brasil e suas relações com ciclo econômico e regime fiscal. Economia e Sociedade, v. 27, n. 3, p. 939-969, 2018.

OZTURK, I. Sustainability in the food-energy-water nexus: Evidence from BRICS (Brazil, the Russian Federation, India, China, and South Africa) countries. Energy, v. 93, p. 999–1010, 2015.

PAIM, B; LARA, F. M. Crédito e gasto privado no Brasil: da recessão à lenta recuperação. Indicadores Econômicos FEE, v. 45, n. 3, p. 9-20, 2018.

PEREIRA, L. A. G.; LESSA, S. N. O processo de planejamento e desenvolvimento do transporte rodoviário no Brasil. Caminhos de Geografia - Instituto de Geografia, v. 12, n. 40, p. 26–45, 2011.

QUIROS, D. C.; SMITH, J.; THIRUVENGADAM, A.; HUAI, T.; HU, S. Greenhouse gas emissions from heavy-duty natural gas, hybrid, and conventional diesel on-road trucks during freight transport. Atmospheric Environment, v. 168, p. 36–45, 2017.

RAISER, M.; CLARKE, R.; PROCEE, P.; BRICEÑO-GARMENDIA, C.; KIKONI, E.; KIZITO, J.; VIÑUELA, L. De volta ao planejamento: como preencher a lacuna de infraestrutura no Brasil em tempos de austeridade. Brasília: Banco Mundial, 2017.

RATHMANN, R.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Targets and results of the Brazilian Biodiesel Incentive Program - Has it reached the Promised Land? Applied Energy, v. 97, p. 91–100, set. 2012.

RAUCCI, G. S.; MOREIRA, C. S.; ALVES; P. A.; MELLO, F. F.; ALMEIDA FRAZÃO, L.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Greenhouse gas assessment of Brazilian soybean production: a case study of Mato Grosso State. Journal of Cleaner Production, v. 96, p. 418-425, 2015.

RIGO, A.A.; DAHMER, A.M.; STEFFENS, C.; STEFFENS, J.; CARRÃO- -PANIZZI, M.C. Characterization of soybean cultivars genetically improved for human consumption. International Journal of Food Engineering, v.1, p.1-7, 2015.

ROCHA, F.V.; CAIXETA FILHO, J. V. Ferrogrão: Impactos econômicos e a localização ótima do terminal de transbordo. Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento, v. 10, n. 2, p. 108-127, 2018.

ROODMAN, D. How to do xtabond2: An introduction to difference and system GMM in Stata. Stata Journal, v. 9, n. 1, p. 86–136, 2009.

RUPASINGHA, A.; GOETZ, S. J.; DEBERTIN, D. L.; PAGOULATOS, A. The environmental Kuznets curve for US counties: A spatial econometric analysis with extensions. Papers in Regional Science, v. 83, n. 2, p. 407–424, 2004.

SAIANI, C. C. S.; TONETO JUNIOR, R.; DOURADO, J. A. Déficit de acesso a serviços de saneamento ambiental: evidências de uma Curva Ambiental de Kuznets para o caso dos municípios brasileiros? Economia e Sociedade, v. 22, n. 3, p. 791–824, dez. 2013.

SANTOS, J. A.; FERREIRA FILHO, J. B. S. Substituição de combustíveis fósseis por etanol e biodiesel no Brasil e seus impactos econômicos: uma avaliação do Plano Nacional de Energia 2030. Pesquisa e Planejamento Econômico, v. 47, n. 3, 2017.

SECEX – Secretaria de Comércio Exterior. Exportações, 2020. Disponível em < http://comexstat.mdic.gov.br/pt/home > Acesso em : 26. jul. 2020.

SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. Emissões, 2020. Disponível em: < https://seeg.eco.br/ >. Acesso em: 03. Fev. 2021.

SEDIYAMA, A. F.; CASTRO JÚNIOR, L. G.; CALEGARIO, C. L. L.; SIQUEIRA, P. H. D. L. Análise da estrutura, conduta e desempenho da indústria processadora de soja no brasil no período de 2003 a 2010. Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 51, n. 1, p. 161–182, 2013.

SEN, A. K. From income inequality to economic inequality. Southern Economic Journal, v. 64, n. 2, p. 384-401, 1997.

SHAFIK, N.; BANDYOPADHYAY, S. Economic growth and environmental quality: a time series and cross-country evidence. Journal of Environmental Economics and Management, v. 4, p. 1-24, 1992

SHAHBAZ, M.; ABOSEDRA, S.; KUMAR, M.; ABBAS, Q. Environmental Consequence of Transportation Sector for USA: The Validation of Transportation Kuznets Curve. MPRA Paper, 2020.

SIFRECA - Sistema de Informações de Fretes. Disponível em: < https://sifreca.esalq.usp.br/> Acesso em: 20. jul. 2020.

SILVA, G.J.C; MARTINS, H.E.P; NEDER, H.D. Investimentos em infraestrutura de transportes e desigualdades regionais no Brasil: Uma análise dos impactos do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC). Brazilian Journal of Political Economy, v. 36, p. 840-863, 2016.

SILVA, M. P.; MARUJO, L. G. Análise de modelo intermodal para escoamento da produção da soja no centro oeste brasileiro. Journal of Transport Literature, v. 6, n. 3, p. 90–106, 2012.

SILVA, R. D.; GONÇALVES, G. M. Exportações e o desenvolvimento regional: um balanço da Lei Kandir para o Rio de Janeiro, Paraná e Minas Gerais. Semestre Económico, v. 22, n. 50, p. 179–204, 1 jan. 2019.

SILVA, V. P.; VAN DER WERF, H. M.; SPIES, A.;SOARES, S. R. Variability in environmental impacts of Brazilian soybean according to crop production and transport scenarios. Journal of environmental management, v. 91, n. 9, p. 1831-1839, 2010.

SIQUEIRA, T. V. O ciclo da soja: Desempenho da cultura da soja entre 1961 e 2003. BNDES Setorial, v. 20, p. 127–222, jul. 2004.

SOHAG, K.; KALUGINA, O.; SAMARGANDI, N. Re-visiting environmental Kuznets curve: role of scale, composite, and technology factors in OECD countries. Environmental Science and Pollution Research, v. 26, n. 27, p. 27726–27737, 2019.

SOLOW, R. M. The Economics of Resources or the Resources of Economics. The American Economic Review, v. 64, n. 2, p. 1–14, 1974.

STERN, D. I. The Rise and Fall of the Environmental Kuznets Curve. World Development, v. 32, n. 8, p. 1419–1439, 2004.

STERN, N; RYDGE, J. The new energy-industrial revolution and international agreement on climate change. Economics of Energy & Environmental Policy, v. 1, n. 1, p. 101-120, 2012.

SWART, J.; BRINKMANN, L. Economic complexity and the environment: Evidence from Brazil. In: Universities and Sustainable Communities: Meeting the Goals of the Agenda 2030. Cham: Springer, p. 3-45, 2020.

TEIXEIRA, B.S; MOLLETA, D.G.S.; LUEDEMANN, G. Brasil: esforços nacionais sobre as mudanças climáticas. In: MOURA, A.M.M. Governança ambiental no Brasil : Instituições, atores e políticas públicas. Brasília : Ipea, 2016

TEIXEIRA, P. E. F.; CAMPEÃO, P. Caracterização do corredor logístico hidroviário Centro-Oeste. Revista FSA, v. 11, n. 1, p. 73–93, jan. 2014.

TORRAS, M.; BOYCE, J. K. Income, inequality, and pollution: A reassessment of the environmental Kuznets curve. Ecological Economics, v. 25, n. 2, p. 147–160, mai. 1998.

TORRES, O.; FAGUNDES, M. B. B.; FIGUEIREDO, A. M. R.; RODRIGUES, A. M.; TREDEZINI, C. A. O. Impacto da Implantação do Custo do Pedágio na BR-163 em Relação ao Transporte de Soja do Estado de Mato Grosso. Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 55, n. 3, p. 533–550, set. 2017.

TRITSCH, I.; ARVOR, D. New pattern of socio-economic development and deforestation in the Brazilian Amazon. Land Use Policy, v. 59, p. 446–455, 2016.

UNDP - United Nations Development Programme Human Development Report 2019. Beyond income, beyond averages, beyond today: Inequalities in human development in the 21st century, 2019. Disponível em: <http://hdr.undp.org/en/content/human-development-report-2019>. New York: 2019

VETTORAZZI, A. C. ; JOAO, A. M. ; ROCHA, F. V. ; CAIXETA-FILHO, J. V. . Emissão de CO_2 na logística de exportação de soja do Mato Grosso: o caso das exportações pelo Arco Norte. Empreendedorismo, Gestão e Negócios, v. 6, p. 225-245, 2017

VIOLA, E.; BASSO, L. Brazilian Energy-Climate Policy and Politics towards Low Carbon Development. Global Society, v. 29, n. 3, p. 427–446, jul. 2015.

VIOLA, E; FRANCHINI, M. Brasil na governança global do clima, 2005-2012: A luta entre conservadores e reformistas. Contexto internacional, v. 35, p. 43-76, 2013.

VIANNA, S.B; VILLELA, A. O pós-Guerra (1945-1955). In: GIAMBIAGI, F.; VILLELA, A.; CASTRO, L.C.; HERMANN, J. Economia brasileira contemporânea. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

VILLELA, A. Dos "Anos Dourados" de JK à Crise não Resolvida (1956-1963) In: GIAMBIAGI, F.; VILLELA, A.; CASTRO, L.C.; HERMANN, J. Economia brasileira contemporânea. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

WANG, Y.; ZHANG, C.; LU, A.; LI, L.; HE, Y.; TOJO, J.; ZHU, X. A disaggregated analysis of the environmental Kuznets curve for industrial CO_2 emissions in China. Applied Energy, v. 190, p. 172–180, mar. 2017.

WOOLDRIDGE, J. M. Econometric analysis of cross section and panel data. Cambridge: MIT Press, 2010.

WOOLDRIDGE, J.M. Introdução à econometria: uma abordagem moderna. São Paulo: Cengage Learning, 2018.

WORLD BANK GROUP. World Development Indicators, 2020. Disponível em:< https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators> Acesso em 19 Abr. 2020.

ZHU, H.; XIA, H.; GUO, Y.; PENG, C. The heterogeneous effects of urbanization and income inequality on CO_2 emissions in BRICS economies: evidence from panel quantile regression. Environmental Science and Pollution Research, v. 25, n. 17, p. 17176–17193, 2018.

APÊNDICES

APÊNDICE A. *Script* do modelo no programa GAMS.

```
$ONECHO > modelo.txt

set = I rng = sets!b1:b1000000          rdim = 1

set = J rng = sets!d1:d1000000          rdim = 1

set = K rng = sets!f1:f1000000          rdim = 1

set = L rng = sets!h1:h1000000          rdim = 1

set = M rng = sets!j1:j1000000          rdim = 1

set = FFAB1 rng = fnordeste!a1:c1000000     rdim = 3

set = FFAB2 rng = fcentro!a1:c1000000       rdim = 3

set = FFAB3 rng = fsul!a1:c1000000          rdim = 3

set = FFAB4 rng = fssul!a1:c1000000         rdim = 3

set = FFAB5 rng = fsudeste!a1:c1000000      rdim = 3

par = PRODU rng = roferta!a1:c1000000       rdim = 2

par = PT rng = rcapporto!a1:c1000000        rdim = 2

par = CAPT rng = rcapt!a1:d100000           rdim = 3

par = CAPF rng = rcapfab!a1:c10000          rdim = 2


par = CRODO rng = fporto!a1:d1000000        rdim = 3

par = CMULT rng = finter!a1:e1000000        rdim = 4

par = CRFAB1 rng = fnordeste!a1:c1000000    rdim = 3

par = CRFAB2 rng = fcentro!a1:c1000000      rdim = 3

par = CRFAB3 rng = fsul!a1:c1000000         rdim = 3

par = CRFAB4 rng = fssul!a1:c1000000        rdim = 3
```

```
par = CRFAB5 rng = fsudeste!a1:c1000000      rdim = 3
$OFFECHO
$CALL GDXXRW dbase.xlsx @modelo.txt
$GDXIN dbase.gdx


SETS
I                    Municípios Produtores
J                    Portos
K                    Ano (2002 -2017)
L                    Terminal de transbordo ferroviário ou hidroviário
M                    Município com fábrica de esmagamento
FFAB1(I,M,K)         Combinações possíveis de fluxo para as fábricas
FFAB2(I,M,K)         Combinações possíveis de fluxo para as fábricas
FFAB3(I,M,K)         Combinações possíveis de fluxo para as fábricas
FFAB4(I,M,K)         Combinações possíveis de fluxo para as fábricas
FFAB5(I,M,K)         Combinações possíveis de fluxo para as fábricas
;
$LOAD I J K L M FFAB1 FFAB2 FFAB3 FFAB4 FFAB5
PARAMETERS


PRODU(I,K)           Oferta dos municípios produtores
PT(J,K)              Capacidade de recebimento dos portos
CAPT(L,J,K)          Capacidade operacional dos terminais de transbordo
CAPF(M,K)            Capacidade de processamento das fábricas
```

CRODO(I,J,K) Custo total do corredor rodoviário direto

CMULT(I,L,J,K) Custo total do corredor multimodal direto

CRFAB1 (I,M,K) Custo total do corredor rodoviário direto às fábricas

CRFAB2 (I,M,K) Custo total do corredor rodoviário direto às fábricas

CRFAB3 (I,M,K) Custo total do corredor rodoviário direto às fábricas

CRFAB4 (I,M,K) Custo total do corredor rodoviário direto às fábricas

CRFAB5 (I,M,K) Custo total do corredor rodoviário direto às fábricas

;

$LOAD PRODU PT CAPT CAPF CRODO CMULT CRFAB1 CRFAB2 CRFAB3 CRFAB4 CRFAB5

VARIABLES

CUSTO Função objetivo

VRODO(I,J,K) Volume movimentado no corredor rodoviário direto

VMULT(I,L,J,K) Volume movimentado no corredor multimodal direto

VFAB (I,M,K) Volume movimentado para às fábricas;

POSITIVE VARIABLES VRODO, VMULT, VFAB;

EQUATIONS

CT Equação de Custo Total

OFER (I,K) Equação que representa a produção de soja dos municípios

PORTOS (J,K) Equação que representa a restrição de demanda dos portos

TERMINAL (L,J,K) Equação que representa a restrição de capacidade dos terminais d transbordo

FABRICAS (M,K) Equação que representa a restrição de capacidade das fábricas esmagadores

VITORIA Equação que indica que não deve se mandar soja para vitória por fluxos rodoviários;

```
CT..        CUSTO =e= sum((I,J,K), CRODO(I,J,K)*VRODO(I,J,K))+sum((I,L,J,K),
CMULT(I,L,J,K)*VMULT(I,L,J,K))+sum((I,M,K),VFAB(I,M,K)$FFAB1(I,M,K)*CRFAB1(
I,M,K)+VFAB(I,M,K)$FFAB2(I,M,K)*CRFAB2(I,M,K)+VFAB(I,M,K)$FFAB3(I,M,K)*C
RFAB3(I,M,K)+VFAB(I,M,K)$FFAB4(I,M,K)*CRFAB4(I,M,K)+VFAB(I,M,K)$FFAB5(I,
M,K)*CRFAB5(I,M,K));


OFER(I, K)..   sum((J),VRODO(I,J,K))+sum((L,J),VMULT(I,L,J,K)) +
sum((M),VFAB(I,M,K)$FFAB1(I,M,K)+VFAB(I,M,K)$FFAB2(I,M,K)
+VFAB(I,M,K)$FFAB3(I,M,K)+VFAB(I,M,K)$FFAB4(I,M,K)+VFAB(I,M,K)$FFAB5(I,M
,K))=e=PRODU(I,K);

PORTOS(J,K)..
sum((I),VRODO(I,J,K))+sum((I,L),VMULT(I,L,J,K))=l=PT(J,K);

TERMINAL(L,J,K)..          sum((I),VMULT(I,L,J,K))=l=CAPT(L,J,K);

FABRICAS(M,K)..
sum((I),VFAB(I,M,K)$FFAB1(I,M,K)+VFAB(I,M,K)$FFAB2(I,M,K)+VFAB(I,M,K)$FFA
B3(I,M,K)+ VFAB(I,M,K)$FFAB4(I,M,K)+VFAB(I,M,K)$FFAB5(I,M,K))=l=CAPF(M,K);

VITORIA(J)$(ORD(J)EQ 10)..     sum((I,K),VRODO(I,J,K))=E=0;

MODEL EVERTON /ALL/;

SOLVE EVERTON USING LP MINIMIZING CUSTO;

DISPLAY  VRODO.L, VMULT.L, VFAB.L;

EXECUTE_UNLOAD "Resultados.gdx"

                VRODO.L, VMULT.L, VFAB.L;

EXECUTE 'gdxxrw.exe Resultados.gdx var = VRODO.L rng = vrodo!a1:z100000000 rdim =
3';
```

```
EXECUTE 'gdxxrw.exe Resultados.gdx var = VMULT.L rng = vmult!a1:z100000000 rdim =
4';

EXECUTE 'gdxxrw.exe Resultados.gdx var = VFAB.L rng = vfab!a1:z100000000 rdim = 3';
```

APÊNDICE B. Regressões de fretes.

Tabela B1. Parâmetros estimados das regressões de fretes.

Ano	Corredor	α_2	α_1
2002	CO_MI	0,796	-0,542
	CO_ME	0,861	-0,846
	NE_MI	1,030	-2,059
	SE_MI	0,711	0,035
	SE_ME	0,716	0,268
	SUL_MI	0,563	0,736
	SUL_ME	0,637	0,496
2003	CO_MI	0,815	-0,505
	CO_ME	0,972	-1,512
	NE_MI	0,533	1,390
	NE_ME	0,533	1,390
	SE_MI	0,641	0,499
	SE_ME	0,612	1,038
	SUL_MI	0,631	0,579
	SUL_ME	0,581	1,082
2004	CO_MI	0,773	-0,360
	CO_ME	0,765	-0,138
	NE_MI	0,612	0,812
	SE_MI	0,787	-0,349
	SE_ME	0,788	-0,229
	SUL_MI	0,533	0,987
	SUL_ME	0,553	1,036
2005	CO_MI	0,800	-0,494
	CO_ME	0,900	-1,041
	NE_MI	0,568	0,568
	NE_ME	0,711	0,194
	SE_MI	0,539	0,888
	SE_ME	0,925	-1,072
	SUL_MI	0,468	1,262
	SUL_ME	0,491	1,424
2006	CO_MI	0,771	-0,262
	CO_ME	0,794	-0,334
	NE_MI	0,818	-0,587
	NE_ME	0,050	4,883
	SE_MI	0,646	0,366
	SE_ME	0,628	0,773
	SUL_MI	0,612	0,593
	SUL_ME	0,565	1,124
2007	CO_MI	0,761	-0,168
	CO_ME	0,814	-0,450
	NE_MI	0,802	-0,534

	NE_ME	0,802	-0,534
	SE_MI	0,543	1,074
	SE_ME	0,765	-0,153
	SUL_MI	0,604	0,530
	SUL_ME	0,657	0,400
2008	CO_MI	0,681	0,256
	CO_ME	1,056	-2,373
	NE_MI	0,617	0,682
	NE_ME	0,792	-0,436
	SE_MI	0,663	0,355
	SE_ME	0,656	0,491
	SUL_MI	0,550	0,855
	SUL_ME	0,687	0,068
2009	CO_MI	0,672	0,249
	CO_ME	0,773	-0,276
	NE_MI	0,622	0,655
	NE_ME	0,727	0,009
	SE_MI	0,663	0,175
	SE_ME	0,613	0,832
	SUL_MI	0,543	0,870
	SUL_ME	0,607	0,630
2010	CO_MI	0,760	-0,274
	CO_ME	0,721	0,162
	NE_MI	0,661	0,422
	NE_ME	0,722	0,106
	SE_MI	0,567	0,815
	SE_ME	0,642	0,700
	SUL_MI	0,635	0,422
	SUL_ME	0,620	0,587
2011	CO_MI	0,736	-0,218
	CO_ME	0,675	0,326
	NE_MI	0,573	0,890
	NE_ME	0,937	-1,447
	SE_MI	0,736	-0,238
	SE_ME	0,583	0,960
	SUL_MI	0,600	0,581
	SUL_ME	0,679	0,206
2012	CO_MI	0,703	-0,012
	CO_ME	0,755	-0,262
	NE_MI	0,586	0,680
	NE_ME	0,728	0,149
	SE_MI	0,601	0,522
	SE_ME	0,618	0,683
	SUL_MI	0,596	0,561
	SUL_ME	0,572	0,827
2013	CO_MI	0,753	-0,215

	CO_ME	0,757	0,085
	NE_MI	0,512	1,169
	NE_ME	0,679	0,269
	SE_MI	0,618	0,493
	SE_ME	0,540	1,387
	SUL_MI	0,572	0,734
	SUL_ME	0,570	0,938
2014	CO_MI	0,712	0,008
	CO_ME	0,779	-0,346
	NE_MI	0,572	0,834
	NE_ME	0,693	0,187
	SE_MI	0,624	0,504
	SE_ME	0,654	0,558
	SUL_MI	0,525	0,987
	SUL_ME	0,653	0,328
2015	CO_MI	0,767	-0,331
	CO_ME	0,742	-0,045
	NE_MI	0,636	0,538
	NE_ME	0,757	-0,139
	SE_MI	0,821	-0,777
	SE_ME	0,663	0,517
	SUL_MI	0,547	0,970
	SUL_ME	0,567	0,952
2016	CO_MI	0,745	-0,250
	CO_ME	0,664	0,464
	NE_MI	0,481	1,338
	NE_ME	0,714	0,028
	SE_MI	0,692	-0,007
	SE_ME	0,653	0,248
	SUL_MI	0,602	0,424
	SUL_ME	0,656	0,220
2017	CO_MI	0,653	0,459
	CO_ME	0,571	1,221
	NE_MI	0,496	1,438
	NE_ME	0,619	0,782
	SE_MI	0,808	-0,596
	SE_ME	0,570	1,118
	SUL_MI	0,574	0,690
	SUL_ME	0,615	0,649

APÊNDICE C. Portos exportadores

Tabela C1. Restrição de capacidade de recebimento dos portos considerados no modelo (em mil toneladas).

Ano/ Município	Belém (PA)	Manaus (AM)	Paranaguá (PR)	Rio Grande (RS)	Salvador (BA)	Santarém (PA)	Santos (SP)	São Francisco do Sul (SC)	São Luís (MA)	Vitória (ES)
2002	-	1037,80	5313,14	2027,83	-	-	5290,33	1047,66	878,10	1736,81
2003	-	2016,24	7156,91	5151,27	-	1505,54	7119,91	2066,18	2109,84	1885,88
2004	-	1187,19	5362,99	2540,80	-	684,72	5857,56	1362,91	1321,46	2431,53
2005	-	1623,61	5430,54	683,85	-	1010,12	7528,17	2703,74	1842,63	3051,42
2006	-	1821,63	4330,23	3617,26	287,14	1192,30	7201,95	3258,73	2024,44	2954,04
2007	-	1791,24	4739,06	5500,14	623,17	1069,48	4760,02	2644,27	1622,04	2715,99
2008	222,53	1728,90	5033,84	4876,34	1337,49	1154,28	8889,11	2342,47	1971,69	3026,88
2009	-	1654,26	4402,03	3564,59	916,96	1301,89	7371,20	2489,27	1971,93	2627,32
2010	-	1498,22	5549,16	4779,26	1447,34	1024,80	8442,17	3259,47	2278,40	2594,34
2011	-	1296,95	7135,12	5966,43	1736,64	1000,32	9441,24	2820,13	2725,11	2653,61
2012	-	1536,80	7043,27	3744,87	1925,19	1077,18	10381,45	3025,00	2944,87	2572,78
2013	-	1486,46	7938,36	8413,60	1986,03	1204,35	13099,65	4239,74	3182,10	3030,70
2014	1379,78	1680,03	7796,11	8427,76	2284,12	1150,85	12987,98	5179,83	3385,01	3417,39
2015	2430,32	1898,17	8763,79	11617,56	2938,07	1272,14	13276,56	4859,76	5249,40	4016,83
2016	2509,25	2296,30	8479,24	10026,06	1729,79	2017,16	14796,85	4283,70	4172,18	3266,95
2017	4794,29	2469,28	11681,05	12881,59	3500,14	2209,37	16920,74	5049,85	6459,18	4182,22

Fonte: Elaboração própria com base em Secex (2020)

APÊNDICE D. Terminais intermodais.

Tabela D1. Restrição de capacidade de recebimento dos terminais considerados no modelo (em mil toneladas).

Ano/Terminais	Alto Araguaia (MT)	Araguari (MG)	Cascavel (PR)	Cruz Alta (RS)	Itaituba (PA)	Londrina (PR)	Maringá (PR)	Palmeirante (TO)	Porto Franco (MA)	Porto Velho (RO)	Rondonópolis (MT)	São Simão (SP)
2002	1117,40	1121,22	184,50	564,41	-	284,89	939,56	-	703,50	955,61	685,72	81,06
2003	1391,39	1396,15	229,74	702,80	-	354,75	1169,94	-	876,00	1189,92	853,87	100,94
2004	1342,66	1347,25	221,69	678,19	-	342,32	1128,96	-	845,32	1148,25	823,96	97,40
2005	1561,08	1566,42	257,76	788,51	-	398,01	1312,62	-	982,83	1335,04	958,00	113,25
2006	1755,24	1642,14	806,69	1167,54	-	658,57	3601,37	-	1501,51	1490,15	1296,20	126,40
2007	1351,26	2297,19	439,46	1569,45	-	417,99	1677,21	-	1231,01	1416,97	886,92	120,20
2008	2756,28	1865,72	556,37	1109,69	-	525,87	1532,61	-	1386,58	1466,91	860,48	124,43
2009	3225,98	1933,24	366,56	1288,09	-	781,81	1363,81	1,50	1514,20	1710,19	1202,99	145,07
2010	3330,27	1568,72	321,41	1055,24	-	720,75	1794,63	312,80	1546,52	2552,81	222,26	147,66
2011	4612,50	1654,64	278,31	1185,55	-	796,39	2126,41	416,00	1707,28	2115,00	236,92	-
2012	4188,59	2052,95	202,23	608,70	-	627,60	1906,25	675,29	1640,56	2712,83	143,32	-
2013	3598,31	2794,95	166,33	1041,79	-	845,88	1867,15	293,65	2310,28	1953,64	64,72	-
2014	219,28	3172,24	240,06	1153,05	468,35	623,63	1888,70	824,88	1721,73	2359,19	4189,44	-
2015	242,68	4180,60	299,15	1295,22	1375,91	455,14	1985,58	1527,66	1233,72	2211,09	3918,88	-
2016	291,78	3956,21	314,50	1453,87	1043,08	327,85	1910,84	1747,17	888,25	3795,86	4425,37	271,95
2017	310,86	5473,81	389,98	1916,58	2262,98	327,71	2522,97	2707,17	1353,23	4075,10	5341,93	332,93

Fonte: Elaboração própria com base em ANTT (2020)

APÊNDICE E. Fábricas esmagadoras.

Tabela E1. Restrição de capacidade de esmagamento das fábricas consideradas no modelo (em mil toneladas).

Município/Ano	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Alto Araguaia (MT)	50.22	50.22	71.34	72.73	74.11	76.19	85.89	111.86	126.75	122.37	122.89	134.15	139.95	142.72	142.89	144.96
Anápolis (GO)	26.56	30.25	49.60	53.21	55.11	57.61	56.43	58.78	61.42	60.60	62.40	62.98	69.14	78.52	79.77	79.77
Araguari (MG)	173.17	170.49	171.83	177.20	177.20	177.20	177.20	182.57	244.32	244.32	244.32	244.32	244.32	244.32	245.07	245.07
Araucária (PR)	200.52	202.62	222.32	224.77	230.61	236.91	239.01	239.01	249.47	237.22	250.17	250.17	250.17	250.17	250.83	251.88
Barreiras (BA)	1040.01	1040.01	1017.91	1017.91	1047.63	1047.63	1053.34	1053.34	1047.63	1200.01	1257.15	1236.39	1274.49	1274.49	1318.10	1318.10
Bataguassu (MS)	41.31	43.49	45.45	51.68	58.32	59.56	59.66	60.59	63.71	67.91	67.23	65.98	65.98	65.98	73.46	76.32
Bauru (SP)	215.01	239.91	248.21	259.01	272.29	276.44	285.24	295.20	280.26	220.49	231.61	235.31	245.27	245.27	245.27	247.38
Bebedouro (SP)	225.81	251.96	260.68	272.01	285.96	290.32	299.57	310.03	294.33	231.56	243.24	247.13	257.59	257.59	257.59	259.81
Cachoeira do Sul (RS)	138.10	137.76	135.02	145.30	161.74	169.97	176.82	195.33	208.35	205.13	209.45	214.93	200.06	200.06	206.91	203.89
Cafelândia (SP)	54.32	54.89	60.23	60.89	62.47	64.18	64.75	64.75	67.58	64.27	67.77	67.77	67.77	67.77	67.95	68.24
Camaquã (RS)	64.90	64.74	63.45	68.28	76.01	79.88	83.10	91.79	97.91	96.40	98.43	101.01	94.02	94.02	97.24	95.82
Cambé (PR)	160.75	162.43	178.22	180.19	184.87	189.92	191.61	191.61	199.99	190.18	200.56	200.56	200.56	200.56	201.08	201.92
Campo Grande (AL)	232.74	245.02	256.08	291.18	328.57	335.59	336.12	341.38	358.93	382.63	378.77	371.75	371.75	371.75	413.87	430.02
Campo Mourão (PR)	294.22	297.30	326.20	329.80	338.37	347.62	350.70	350.70	366.05	348.08	367.08	367.08	367.08	367.08	368.04	369.58
Campo Novo do Parecis (MT)	22.59	22.59	32.09	32.71	33.33	34.27	38.63	50.31	57.01	55.04	55.28	60.34	62.95	64.19	64.27	65.20
Canoas (RS)	0.93	0.92	0.91	0.97	1.08	1.14	1.19	1.31	1.40	1.38	1.40	1.44	1.34	1.34	1.39	1.37
Cariri do Tocantins (TO)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	222.95	222.95	222.95
Cascavel (CE)	498.83	504.06	553.07	559.16	573.70	589.37	594.59	594.59	620.62	590.15	622.37	622.37	622.37	622.37	624.00	626.61

Céu Azul (PR)	770.15	778.21	853.89	863.29	885.74	909.93	918.00	918.00	958.18	911.14	960.87	960.87	960.87	960.87	963.40	967.43
Chapecó (SC)	386.46	381.69	384.93	384.93	384.93	384.93	384.93	384.93	413.56	257.64	262.41	305.35	305.35	305.35	305.35	276.73
Clevelândia (PR)	61.11	61.75	67.76	68.50	70.28	72.20	72.84	72.84	76.03	72.30	76.25	76.25	76.25	76.25	76.45	76.77
Cruz Alta (RS)	24.39	24.33	23.84	25.66	28.56	30.01	31.22	34.49	36.79	36.22	36.99	37.95	35.33	35.33	36.54	36.00
Cuiabá (MT)	40.19	40.19	57.10	58.21	59.32	60.98	68.74	89.53	101.45	97.95	98.37	107.37	112.01	114.23	114.37	116.03
Dois Vizinhos (PR)	2500.61	2526.79	2772.49	2803.04	2875.92	2954.47	2980.65	2980.65	3111.14	2958.40	3119.87	3119.87	3119.87	3119.87	3128.07	3141.16
Dourados (MS)	494.79	520.91	544.42	619.04	698.52	713.45	714.57	725.76	763.08	813.45	805.24	790.32	790.32	790.32	879.87	914.20
Encantado (RS)	914.09	911.82	893.68	961.72	1070.60	1125.03	1170.40	1292.88	1379.07	1357.75	1386.33	1422.62	1324.18	1324.18	1369.55	1349.59
Erechim (RS)	203.52	203.02	198.98	214.13	238.37	250.49	260.59	287.86	307.05	302.30	308.66	316.75	294.83	294.83	304.93	300.48
Esteio (RS)	0.30	0.30	0.30	0.32	0.35	0.37	0.39	0.43	0.46	0.45	0.46	0.47	0.44	0.44	0.45	0.45
Estrela (RS)	775.46	773.53	758.14	815.87	908.23	954.41	992.89	1096.80	1169.92	1151.83	1176.08	1206.87	1123.35	1123.35	1161.84	1144.91
Fátima do Sul (MS)	219.18	230.75	241.16	274.22	309.43	316.04	316.54	321.50	338.02	360.34	356.70	350.09	350.09	350.09	389.76	404.97
Giruá (RS)	26.10	26.04	25.52	27.46	30.57	32.13	33.42	36.92	39.38	38.77	39.59	40.62	37.81	37.81	39.11	38.54
Goiatuba (GO)	59.20	67.43	110.56	118.59	122.84	128.39	125.78	131.01	136.89	135.06	139.08	140.38	154.11	175.01	177.80	177.80
Guarani das Missões (RS)	24.30	24.24	23.75	25.56	28.46	29.90	31.11	34.36	36.66	36.09	36.85	37.81	35.20	35.20	36.40	35.87
Guarapuava (PR)	149.23	150.79	165.45	167.28	171.63	176.31	177.88	177.88	185.66	176.55	186.18	186.18	186.18	186.18	186.67	187.46
Ijuí (RS)	50.84	50.71	49.70	53.48	59.54	62.57	65.09	71.90	76.69	75.51	77.10	79.12	73.64	73.64	76.16	75.05
Ipameri (GO)	141.30	160.95	263.88	283.07	293.20	306.46	300.22	312.70	326.73	322.37	331.96	335.08	367.83	417.74	424.38	424.38
Iraquara (BA)	14.19	14.19	13.88	13.88	14.29	14.29	14.37	14.37	14.29	16.37	17.15	16.86	17.38	17.38	17.98	17.98
Itacoatiara (AM)	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00
Itumbiara (GO)	42.02	47.87	78.48	84.18	87.20	91.14	89.29	93.00	97.17	95.87	98.72	99.65	109.39	124.23	126.21	126.21
Jataí (GO)	302.22	344.26	564.42	605.45	627.13	655.49	642.14	668.83	698.85	689.51	710.03	716.70	786.75	893.50	907.71	907.71
Joaçaba (SC)	198.47	196.02	197.69	197.69	197.69	197.69	197.69	197.69	212.39	132.31	134.76	156.82	156.82	156.82	156.82	142.11
Londrina (PR)	1015.13	1025.76	1125.50	1137.90	1167.49	1199.38	1210.01	1210.01	1262.98	1200.97	1266.52	1266.52	1266.52	1266.52	1269.85	1275.17

Lucas do Rio Verde (MT)	670.68	670.68	952.83	971.33	989.83	1017.58	1147.09	1493.99	1692.88	1634.42	1641.36	1791.68	1869.11	1906.11	1908.38	1936.13
Luís Eduardo Magalhães (BA)	310.81	310.81	304.20	304.20	313.08	313.08	314.79	314.79	313.08	358.62	375.70	369.50	380.88	380.88	393.92	393.92
Luziânia (GO)	117.12	133.40	218.72	234.62	243.02	254.01	248.84	259.18	270.82	267.20	275.15	277.73	304.88	346.24	351.75	351.75
Mairinque (SP)	227.95	254.36	263.16	274.60	288.68	293.08	302.41	312.97	297.13	233.76	245.56	249.48	260.04	260.04	260.04	262.28
Marau (RS)	1492.91	1489.20	1459.57	1570.70	1748.52	1837.43	1911.52	2111.56	2252.33	2217.51	2264.18	2323.46	2162.68	2162.68	2236.77	2204.17
Marechal Cândido Rondon (PR)	994.03	1004.44	1102.10	1114.25	1143.22	1174.44	1184.85	1184.85	1236.72	1176.00	1240.19	1240.19	1240.19	1240.19	1243.45	1248.66
Maringá (PR)	228.98	231.38	253.87	256.67	263.34	270.54	272.93	272.93	284.88	270.90	285.68	285.68	285.68	285.68	286.43	287.63
Muitos Capões (RS)	14.43	14.40	14.11	15.19	16.91	17.77	18.48	20.42	21.78	21.44	21.89	22.46	20.91	20.91	21.63	21.31
Nova Mutum (MT)	1754.99	1754.99	2493.30	2541.71	2590.13	2662.75	3001.64	3909.40	4429.84	4276.86	4295.01	4688.37	4890.98	4987.81	4993.74	5066.36
Orlândia (SP)	197.28	220.13	227.75	237.65	249.83	253.64	261.72	270.86	257.15	202.31	212.51	215.91	225.05	225.05	225.05	226.98
Osvaldo Cruz (SP)	416.82	465.10	481.20	502.12	527.87	535.91	552.97	572.29	543.32	427.44	449.01	456.19	475.50	475.50	475.50	479.59
Ourinhos (SP)	645.32	720.07	744.99	777.38	817.24	829.70	856.11	886.01	841.16	661.77	695.16	706.27	736.17	736.17	736.17	742.50
Paranaguá (PR)	4.99	5.04	5.53	5.59	5.74	5.89	5.95	5.95	6.21	5.90	6.22	6.22	6.22	6.22	6.24	6.27
Passo Fundo (RS)	306.59	305.83	299.75	322.57	359.09	377.34	392.56	433.64	462.55	455.40	464.99	477.16	444.14	444.14	459.36	452.66
Petrolina (PE)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	0.00
Pires do Rio (GO)	281.71	320.88	526.10	564.34	584.56	610.98	598.55	623.42	651.41	642.70	661.82	668.04	733.34	832.84	846.08	846.08
Ponta Grossa (PR)	222.89	225.22	247.12	249.85	256.34	263.34	265.68	265.68	277.31	263.69	278.09	278.09	278.09	278.09	278.82	279.99
Ponta Porã (MS)	90.61	95.39	99.70	113.37	127.92	130.66	130.86	132.91	139.74	148.97	147.47	144.73	144.73	144.73	161.13	167.42
Porto Alegre do Norte (MT)	39.64	39.64	56.31	57.41	58.50	60.14	67.80	88.30	100.05	96.60	97.01	105.89	110.47	112.66	112.79	114.43

Porto Franco (MA)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	500.00	500.00	375.00	375.00	381.25	381.25	375.00	375.00	375.00	375.00	375.00
Porto Nacional (TO)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	532.05	532.05	532.05
Primavera do Leste (MT)	430.96	453.71	474.18	539.18	608.41	621.41	622.38	632.13	664.63	708.51	701.36	688.36	688.36	688.36	766.36	796.26
Rancharia (SP)	1106.44	1234.60	1277.32	1332.86	1401.21	1422.57	1467.85	1519.11	1442.22	1134.64	1191.88	1210.93	1262.20	1262.20	1262.20	1273.05
Rio Grande (RS)	63.01	62.85	61.60	66.29	73.80	77.55	80.68	89.12	95.06	93.59	95.56	98.06	91.28	91.28	94.40	93.03
Rio Verde (GO)	1283.45	1461.94	2396.91	2571.15	2663.23	2783.64	2783.64	2840.31	2967.80	2928.14	3015.26	3043.59	3341.08	3794.40	3854.74	3854.74
Rondonópolis (MT)	109.82	109.82	156.02	159.05	162.08	166.63	187.83	244.64	277.20	267.63	268.77	293.38	306.06	312.12	312.49	317.04
Santa Cruz do Sul (RS)	103.43	103.17	101.12	108.82	121.14	127.30	132.43	146.29	156.05	153.63	156.87	160.97	149.83	149.83	154.97	152.71
Santa Rosa (RS)	60.70	60.55	59.34	63.86	71.09	74.71	77.72	85.85	91.58	90.16	92.06	94.47	87.93	87.93	90.94	89.62
Santo Anastácio (SP)	66.64	74.36	76.93	80.28	84.39	85.68	88.41	91.50	86.86	68.34	71.79	72.93	76.02	76.02	76.02	76.68
São Francisco do Sul (SC)	3.03	3.00	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02	3.02	3.25	2.02	2.06	2.40	2.40	2.40	2.40	2.17
São Joaquim da Barra (SP)	136.23	152.01	157.26	164.10	172.52	175.15	180.72	187.03	177.57	139.70	146.75	149.09	155.40	155.40	155.40	156.74
São Luiz Gonzaga (RS)	41.30	41.19	40.37	43.45	48.37	50.83	52.88	58.41	62.30	61.34	62.63	64.27	59.82	59.82	61.87	60.97
São Simão (SP)	11.42	13.01	21.33	22.88	23.70	24.77	24.27	25.28	26.41	26.06	26.84	27.09	29.74	33.77	34.31	34.31
Sorriso (MT)	936.87	936.87	1331.01	1356.85	1382.70	1421.46	1602.38	2086.97	2364.80	2283.13	2292.82	2502.81	2610.97	2662.66	2665.82	2704.59
Tapejara (PR)	173.83	173.39	169.94	182.88	203.59	213.94	222.57	245.86	262.25	258.19	263.63	270.53	251.81	251.81	260.44	256.64
Teresina (PI)	62.89	425.70	570.83	570.83	595.01	595.01	611.94	611.94	628.88	665.16	677.25	677.25	677.25	677.25	677.25	737.72
Toledo (MG)	6.76	6.83	7.49	7.57	7.77	7.98	8.05	8.05	8.41	7.99	8.43	8.43	8.43	8.43	8.45	8.49
Três Lagoas (MS)	147.92	155.73	162.76	185.07	208.83	213.29	213.63	216.97	228.13	243.19	240.73	236.27	236.27	236.27	263.05	273.31

Três Passos (RS)	89.78	89.56	87.78	94.46	105.16	110.50	114.96	126.99	135.46	133.36	136.17	139.73	130.06	130.06	134.52	132.56
Uberlândia (MG)	1439.33	1417.01	1428.17	1472.80	1472.80	1472.80	1472.80	1517.43	2030.68	2030.68	2030.68	2030.68	2030.68	2030.68	2036.93	2036.93
Uruçuí (PI)	2.11	14.30	19.17	19.17	19.99	19.99	20.56	20.56	21.12	22.34	22.75	22.75	22.75	22.75	22.75	24.78
Veranópolis (RS)	468.60	467.44	458.14	493.02	548.83	576.74	600.00	662.79	706.97	696.04	710.69	729.30	678.83	678.83	702.09	691.86
Videira (SC)	424.53	419.29	422.86	422.86	422.86	422.86	422.86	422.86	454.30	283.02	288.26	335.43	335.43	335.43	335.43	303.99
Vilhena (RO)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	175.00	87.50	87.50	75.00	75.00	75.00	75.00	75.00

Fonte: Elaboração própria com base em Abiove (2020)

APÊNDICE F. *Script* do modelo 6 no programa Stata.

```
. xtabond2  lnco2  lnLagCO2  lnPIBSoja lnPIBSoja2 lnPIBSoja3 lnpreo lnrea  lnrebanhos lnpop lnemprego  lnidh_novo lninvestimento y
> *, gmm( lnco2  lnPIBSoja lnPIBSoja2 lnPIBSoja3  lnpreo lnemprego  lnrebanhos lnrea, lag(2 2)  collapse) iv(  lnpop  lnidh_novo l
> ninvestimento , equation()) iv(y*, equation(level)) small robust twostep
Favoring space over speed. To switch, type or click on mata: mata set matafavor speed, perm.
y2002 dropped due to collinearity
y2003 dropped due to collinearity
y2004 dropped due to collinearity
y2005 dropped due to collinearity
y2016 dropped due to collinearity
y2017 dropped due to collinearity
Warning: Two-step estimated covariance matrix of moments is singular.
  Using a generalized inverse to calculate optimal weighting matrix for two-step estimation.
  Difference-in-Sargan statistics may be negative.

Dynamic panel-data estimation, two-step system GMM
------------------------------------------------------------------------------
Group variable: id                              Number of obs      =      2554
Time variable : ano                             Number of groups   =       254
Number of instruments = 30                      Obs per group: min =         1
F(21, 253)    =     85.80                                        avg =     10.06
Prob > F      =     0.000                                        max =        12
------------------------------------------------------------------------------
                |               Corrected
         lnco2  |      Coef.   Std. Err.      t    P>|t|     [95% Conf. Interval]
----------------+-------------------------------------------------------------
      lnLagCO2  |   .1166957   .0362386     3.22   0.001     .0453281    .1880634
     lnPIBSoja  |   8.264817   3.789487     2.18   0.030     .8018589    15.72777
    lnPIBSoja2  |  -.5114139   .2345514    -2.18   0.030    -.9733359   -.0494919
    lnPIBSoja3  |   .0104695   .0048237     2.17   0.031     .0009697    .0199692
        lnpreo  |   .5874817   .3329853     1.76   0.079    -.0682945    1.243258
         lnrea  |    .704529   .1781347     3.96   0.000     .3537133    1.055345
    lnrebanhos  |   .2243146   .1611287     1.39   0.165    -.0930099    .5416391
         lnpop  |  -.3521518   .1175746    -3.00   0.003    -.5837015    -.120602
     lnemprego  |  -.1079439   .0818043    -1.32   0.188     -.269048    .0531602
    lnidh_novo  |  -2.123672   .6374858    -3.33   0.001    -3.379127   -.8682174
lninvestimento  |   .1246414   .0356013     3.50   0.001     .0545287    .1947542
         y2006  |   -.426499   .1951072    -2.19   0.030    -.8107401   -.0422579
         y2007  |  -.2058129   .1332756    -1.54   0.124    -.4682838     .056658
         y2008  |  -.4969277   .1146373    -4.33   0.000    -.7226927   -.2711627
         y2009  |  -.6385685   .0997359    -6.40   0.000    -.8349867   -.4421502
         y2010  |  -.2061501   .1151265    -1.79   0.075    -.4328785    .0205784
         y2011  |  -.2548817   .0803835    -3.17   0.002    -.4131877   -.0965756
         y2012  |  -.5341174   .1074979    -4.97   0.000    -.7458222   -.3224126
         y2013  |   .0244335   .0674634     0.36   0.718     -.108428     .157295
         y2014  |  -.0934126    .054865    -1.70   0.090    -.2014628    .0146376
         y2015  |  -.1017586   .0493431    -2.06   0.040    -.1989341   -.0045831
         _cons  |  -42.74425   19.85412    -2.15   0.032    -81.84466   -3.643838
------------------------------------------------------------------------------
Instruments for first differences equation
  Standard
    D.(lnpop lnidh_novo lninvestimento)
  GMM-type (missing=0, separate instruments for each period unless collapsed)
    L2.(lnco2 lnPIBSoja lnPIBSoja2 lnPIBSoja3 lnpreo lnemprego lnrebanhos
    lnrea) collapsed
Instruments for levels equation
  Standard
    _cons
    lnpop lnidh_novo lninvestimento
    y2002 y2003 y2004 y2005 y2006 y2007 y2008 y2009 y2010 y2011 y2012 y2013
    y2014 y2015 y2016 y2017
  GMM-type (missing=0, separate instruments for each period unless collapsed)
    DL.(lnco2 lnPIBSoja lnPIBSoja2 lnPIBSoja3 lnpreo lnemprego lnrebanhos
    lnrea) collapsed
------------------------------------------------------------------------------
Arellano-Bond test for AR(1) in first differences: z =  -8.62  Pr > z =  0.000
Arellano-Bond test for AR(2) in first differences: z =   1.88  Pr > z =  0.060
------------------------------------------------------------------------------
Sargan test of overid. restrictions: chi2(8)    =  62.43  Prob > chi2 =  0.000
  (Not robust, but not weakened by many instruments.)
Hansen test of overid. restrictions: chi2(8)    =  13.11  Prob > chi2 =  0.108
  (Robust, but can be weakened by many instruments.)

Difference-in-Hansen tests of exogeneity of instrument subsets:
  GMM instruments for levels
    Hansen test excluding group:     chi2(1)    =   0.05  Prob > chi2 =  0.819
    Difference (null H = exogenous): chi2(7)    =  13.06  Prob > chi2 =  0.071
  iv(lnpop lnidh_novo lninvestimento)
    Hansen test excluding group:     chi2(5)    =   6.76  Prob > chi2 =  0.239
    Difference (null H = exogenous): chi2(3)    =   6.35  Prob > chi2 =  0.096

.
end of do-file
```