

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS E HUMANAS
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA E RELAÇÕES INTERNACIONAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA &
DESENVOLVIMENTO

Jéssica de Lima da Vida Pellenz

**EFICIÊNCIA NAS EMISSÕES DE GÁS CARBÔNICO NOS PAÍSES
DESENVOLVIDOS E EM DESENVOLVIMENTO**

Santa Maria, RS
2019

Jéssica de Lima da Vida Pellenz

**EFICIÊNCIA NAS EMISSÕES DE GÁS CARBÔNICO NOS PAÍSES
DESENVOLVIDOS E EM DESENVOLVIMENTO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Economia e Desenvolvimento, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título **Mestre em Economia e Desenvolvimento**.

Orientador: Prof. Dr. Valny Giacomelli Sobrinho
Co-orientador: Prof. Dr. Clailton Ataídes de Freitas

Santa Maria, RS

2019

PELLENZ, JÉSSICA DE LIMA DA VIDA
EFICIÊNCIA NAS EMISSÕES DE GÁS CARBÔNICO NOS PAÍSES
DESENVOLVIDOS E EM DESENVOLVIMENTO / JÉSSICA DE LIMA DA
VIDA PELLENZ.- 2019.
77 p.; 30 cm

Orientador: VALNY GIACOMELLI SOBRINHO CLAILTON
ATAÍDES DE FREITAS
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Sociais e Humanas, Programa de
Pós-Graduação em Economia e Desenvolvimento, RS, 2019

1. EFICIÊNCIA AMBIENTAL 2. EMISSÕES DE CO2 3. ECONOMIA
AMBIENTAL 4. FRONTEIRA ESTOCÁSTICA DE PRODUÇÃO I.
CLAILTON ATAÍDES DE FREITAS, VALNY GIACOMELLI SOBRINHO
II. Título.

Jéssica de Lima da Vida Pellenz

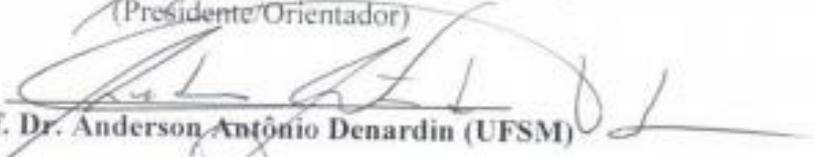
**EFICIÊNCIA NAS EMISSÕES DE GÁS CARBÔNICO NOS PAÍSES
DESENVOLVIDOS E EM DESENVOLVIMENTO**

Dissertação apresentada ao Curso de PósGraduação em Economia e Desenvolvimento da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título **Mestre em Economia e Desenvolvimento**.

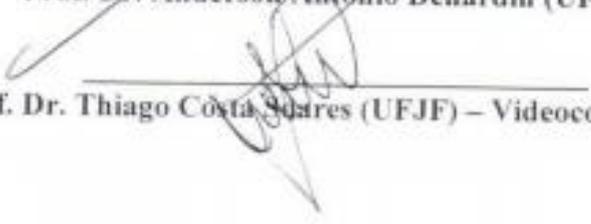
Aprovado em 25 de fevereiro de 2019;



Prof. Dr. Valny Giacomelli Sobrinho (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Prof. Dr. Anderson Antônio Denardin (UFSM)



Prof. Dr. Thiago Costa Soares (UFJF) – Videoconferência

Santa Maria, RS
2019

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação aos inconformados. Àqueles que não cedem diante das intempéries arbitrárias da vida. Aos destemidos. Àqueles que se atrevem a mudar a própria realidade. Aos obstinados. Àqueles que têm a grandeza de nunca desistir. Aos desassossegados. Àqueles que têm a audácia de buscar a melhor versão de si todos os dias. Aos impetuosos. Àqueles que têm a empáfia de enfrentar a violenta selva da existência e, ainda assim, conseguir – não apenas existir – mas ser.

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação não teria chegado a bom porto sem a colaboração, estímulo e empenho de várias pessoas. Com isso, gostaria de agradecer a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que esta tarefa chegasse ao final com sucesso. A todos, meus sinceros e cordiais agradecimentos. Algumas pessoas merecem que esse agradecimento seja feito de forma específica, tamanha a importância que tiveram para que esta etapa de minha vida se concretizasse.

Inicialmente, expresso minha eterna gratidão a minha família. À minha mãe, por ter me proporcionado a melhor formação possível até a minha juventude, o que me capacitou à continuidade nos estudos e posterior ingresso na academia, e por ser meu exemplo de coragem, zelo, amor e carinho. Aos meus avós, por todo o apoio e suporte em toda a jornada. Agradeço, especialmente, aos meus tios José e Fátima, por terem me acolhido em sua casa e me tratado como uma filha, por terem me dado conselhos tão preciosos e pelos “puxões de orelha” cada vez que eu desanimava, por terem me apontado o caminho certo sempre que eu enveredava para o errado. Saibam que são parte de mim, assim como eu sou de vocês.

Agradeço, também, ao corpo docente do PPGE&D por todo o conhecimento compartilhado. Aos professores Clailton e Valny não apenas contribuíram para minha formação técnica, seja em sala de aula quanto nas orientações, mas por serem exemplos de profissionalismo e dedicação. À digníssima Fabiane Amaral (nossa egrégia presidente do PPGE&D), por toda a competência, dedicação e esmero em sua função, e por ser exemplo de perseverança, caráter, determinação e otimismo, por ter sido nossa luz nos dias de escuridão, e por nos incentivar sempre que o desânimo nos abatia.

Meus agradecimentos a toda turma de Mestrado de 2017. Ainda que não sigamos juntos, nesses dois anos, enfrentamos os mesmos dias e noites intermináveis, vencemos os mesmos obstáculos para alcançarmos o mesmo objetivo. E vencemos. Diz o ditado que “não é o destino que importa, mas sim a jornada”, e que grata satisfação ter encontrado, no caminho, as colegas-amigas Caroline, Mariza, Ohanna e Jéssica Natany, que satisfação foi ter superado com vocês as piores dificuldades e ter vivido as maiores alegrias. Levo vocês comigo onde eu for.

Meu muito obrigada, também, para meus amigos, Aline, Fabrina, Maéle e Thiago, por terem me dado toda a força, pelos incentivos, por acreditarem na minha capacidade, por acharem tempo para conversar e, principalmente, por terem aguentado meus “reinaços” e frustrações nos dias de “vento norte”. Vocês são demais, e o meu coração gelado se aquece sempre que nos encontramos. Amo vocês!!

*We cannot solve our problems with the
same thinking we used when we created them.*

(Albert Einstein)

RESUMO

EFICIÊNCIA NAS EMISSÕES DE GÁS CARBÔNICO NOS PAÍSES DESENVOLVIDOS E EM DESENVOLVIMENTO

AUTORA: Jéssica de Lima da Vida Pellenz

ORIENTADOR: Valny Giacomelli Sobrinho

No contexto atual, em que diversos fenômenos catastróficos derivados das mudanças climáticas impõem cada vez mais preocupações e desafios para a humanidade, é natural que os formuladores de políticas climáticas devam estar atentos à forma com que os países estão, não apenas utilizando os recursos naturais em seus processos produtivos, mas também, de que forma cada nação contribui para o acúmulo de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera. Portanto, a necessidade de elaboração de estratégias para mitigação dos efeitos nocivos do aquecimento global tem levado a articulações de ações conjunta entre os países de todo o mundo. Contudo, para que essas estratégias levem à solução dos problemas, é necessário um profundo conhecimento das características de cada país quanto às suas performances ambientais atuais e históricas. Considerando, ainda, que mudanças climáticas podem colocar em risco o contínuo crescimento econômico, é necessário entender como as variáveis ambientais se relacionam com as econômicas. Nesse sentido o presente estudo se propõe a averiguar a relação existente entre as emissões de CO₂, um dos principais GEE originado da ação humana, e crescimento econômico, bem como verificar as performances ambientais dessas emissões em uma amostra de 161 países integrantes do Acordo de Paris. Através da estimação da Fronteira Estocástica de Produção, foram calculados os escores de eficiência técnica e ambiental utilizando um painel de dados compreendendo 161 grupos e 28 anos, resultando em 4508 observações. Aos insumos tradicionais da função de produção neoclássica (capital e trabalho), foram incorporadas as variáveis “emissões de CO₂”, visando analisar a importância que esta possui para o aumento no PIB dos países, e uma variável de tempo, com o intuito de auferir os efeitos do progresso técnico. Foram realizadas comparações entre os países da amostra dando ênfase às diferenças de performances entre os países desenvolvidos e os em desenvolvimento. Os principais resultados sugerem que as emissões de CO₂ são, de fato, imprescindíveis ao crescimento econômico, sobretudo nos países industrializados. O progresso técnico, por sua vez, provocou uma melhora no desempenho de todos os insumos (inclusive das emissões) nos países desenvolvidos. Contudo, nos países em desenvolvimento, parece ter ocasionado uma redução na utilização do fator “mão-de-obra”, além de não auxiliar em uma melhor utilização das emissões enquanto insumo produtivo. A análise das eficiências sugere que a performance técnica dos países foi muito maior do que a ambiental, apresentando escore médio de eficiência técnica relativamente alto, enquanto que os escores médios ambientais foram muito baixos. Os países industrializados foram os que apresentaram maior eficiência técnica, porém, se mostraram ineficientes quanto às emissões de CO₂.

Palavras-chave: Eficiência Ambiental. Eficiência Técnica. Emissões de CO₂. Fronteira Estocástica de Produção.

ABSTRACT

EFFICIENCY IN CARBON GAS EMISSIONS IN DEVELOPED AND DEVELOPING COUNTRIES

AUTHOR: Jéssica de Lima da Vida Pellenz

ADVISOR: Valny Giacomelli Sobrinho

In the current context, where a number of catastrophic phenomena arising from climate change are placing many concerns and challenges on humanity, it is natural that climate policy-makers should be aware of how countries are, not only using natural resources in their production processes, but also how each nation contributes to the accumulation of greenhouse gases (GHG) in the atmosphere. Therefore, the need of plotting strategies to mitigate the harmful effects of global warming has led to joint articulations actions among countries around the world. However, for these strategies to lead to the solution of the problems, a deep knowledge of the characteristics of each country is necessary as far as its current and historical environmental performances are concerned. Considering also that climate changes can jeopardize the continuous economic growth, it is necessary to understand how the environmental variables are related to the economic ones. In this sense, the present study intends to investigate the relationship between CO₂ emissions, a major GHG originated from human action, and economic growth, as well as to verify the environmental performance of these emissions in a sample of 161 countries included in the Paris Agreement. By means of the Stochastic Production Frontier estimation, the technical and environmental efficiency scores have been calculated through a data panel comprising 161 groups and 28 years, resulting in 4508 observations. To the traditional inputs of the neoclassical production function (capital and labor), the variables "CO₂ emissions" were incorporated, aiming to analyze the importance of that for the increase in the countries' GDP, and a variable of time, with the purpose of obtaining the effects of technical progress. Comparisons were made between sample countries with emphasis on the differences between developed and developing countries. The main results suggest that CO₂ emissions are indeed essential to economic growth, especially in industrialized countries. Technical progress has led to an improvement in the performance of all inputs (including emissions) in developed countries. However, in developing countries, it appears to have led to a reduction in the use of the "labor" factor, and does not help to make better use of emissions as input. The analysis of the efficiencies suggests that the technical performance of the countries was much higher than the environmental performance, showing a medium score of technical efficiency relatively high, while the average environmental scores were very low. The industrialized countries were the ones that presented the greatest scores of technical efficiency, but they were inefficient on CO₂ emissions.

Keywords: Environmental Efficiency. Technical Efficiency. CO₂ Emissions. Stochastic Production Frontier.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 EMISSÃO DE CO ₂ E AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	15
2.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E ECONOMIA	16
2.3 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.....	19
2.4 TEORIA DA PRODUÇÃO	21
2.4.1 Função de Produção com Capital Natural	24
2.4.2 Eficiência Técnica	25
2.4.3 Eficiência Ambiental	27
3 REVISÃO DE LITERATURA	28
4 METODOLOGIA	30
4.1 MODELO DE FRONTEIRA ESTOCÁSTICA COM DADOS EM PAINEL	30
4.1.1 Modelo de Ineficiência Invariante no Tempo	32
4.1.2 Modelo de Ineficiência Variável no Tempo.....	35
4.2 TESTES DE ESPECIFICAÇÃO	36
4.3 CONDIÇÕES DE REGULARIDADE DA FRONTEIRA DE PRODUÇÃO	37
4.3.1 Monotonicidade.....	37
4.3.2 Produtividade Marginal Decrescente	38
4.3.3 Quase-Concavidade	38
4.3.4 Elasticidade de Substituição	38
4.4 VARIÁVEIS E FONTE DE DADOS	40
4.4.1 Modelo Empírico Translog	41
4.4.2 Modelo Empírico Cobb-Douglas	43
5 RESULTADOS	44
5.1 ESCOLHA DOS MODELOS (INVARIÁVEL X VARIÁVEL NO TEMPO).....	44
5.2 ESCOLHA DA FORMA FUNCIONAL (COBB-DOUGLAS X TRANSLOG).....	48
5.3 ESTIMAÇÃO DA FRONTEIRA ESTOCÁSTICA.....	49
5.3.1 Condições de Regularidade	51
5.3.2 Análise das Elasticidades	52
5.3.3 Estimação dos Escores de Eficiência Técnica e Eficiência Ambiental.....	56

6	CONCLUSÃO.....	65
	REFERÊNCIAS	68
	ANEXO A – RELAÇÃO DE PAÍSES DA AMOSTRA	74
	ANEXO B – RANKING DE EFICIÊNCIA ORDENADO POR EFICIÊNCIA AMBIENTAL	76

INTRODUÇÃO

De todos os problemas que o mundo enfrenta na atualidade, o aquecimento global talvez seja o mais desafiador. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC (2013) declarou que a superfície da Terra apresentou temperaturas mais quentes em cada uma das últimas três décadas, resultado superior ao apresentado nas décadas anteriores a 1850. Além disso, a temperatura média da superfície global aumentou 0,8 graus no século passado, desempenho superior ao de épocas pré-industriais (IPCC, 2013). O Painel previu que até o final do século XXI a temperatura da superfície global deverá aumentar quatro graus ou mais acima dos níveis pré-industriais, caso nenhuma medida de mitigação às emissões seja tomada.

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) são consideradas as principais responsáveis pelas alterações climáticas observadas nas últimas décadas. O aumento da temperatura média no planeta é atribuído, principalmente, às emissões de dióxido de carbono (CO₂) provenientes de queima de combustíveis fósseis, de queimadas e de desmatamento. Desde a década de 1960, as emissões de CO₂ cresceram em torno de 256%, e a temperatura média do planeta teve um aumento de 0,5°C (WORLD BANK, 2015). Para evitar que as mudanças climáticas causem ainda mais danos no futuro, a temperatura média global não deve exceder em mais de 2°C acima das temperaturas pré-industriais (EDENHOFER et al., 2013), sendo que, no último século, presenciou-se um aumento de 0,8°C (STORM, 2009).

A necessidade de elaboração de estratégias para mitigação dos efeitos nocivos do aquecimento global tem levado a articulações de ações conjunta entre os países de todo o mundo. Capitaneados pela Organização das Nações Unidas (ONU), vários eventos deliberativos sobre as mudanças climáticas aconteceram nas últimas décadas para discutir tratados internacionais para mitigação dos efeitos das mudanças climáticas. O processo das Nações Unidas tomou forma institucional com a Convenção-Quadro das Nações Unidas para as Mudanças Climáticas (UNFCCC – da sigla em inglês para *United Nations Framework Convention for Climate Change*), proposta em 1992.

A partir dos anos 1990, dois tratados se destacam nas rodadas internacionais de discussões sobre o clima: o Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris. O primeiro, assinado em 1997, propunha que os membros (principalmente os desenvolvidos), deveriam se comprometer com a redução dos níveis de GEE, promover mudanças nos setores de energia e transportes, dentre outras metas.

O Protocolo de Kyoto utilizou o Princípio das Responsabilidades Históricas para estipular as metas dos países. Assim, os países foram alocados em dois grupos: no Anexo I, foram incluídos os países industrializados, já que foi considerada uma dívida histórica de emissões devido à industrialização intensiva em uso de combustíveis fósseis. No outro anexo (Não-Anexo I) foram incluídos os demais países.

O Acordo de Paris, vigente desde 2015, passa a utilizar o Princípio da Responsabilidade Comum, porém, Diferenciada¹, alterando a maneira como são distribuídas as metas de redução nas emissões de GEE. Agora, responsabilizam-se, de forma mais rígida, além dos países do Anexo I, alguns países considerados emergentes, como o Brasil, China, Índia e África do Sul².

Diante dessa problemática, entende-se que as políticas ambientais e econômicas devem ser trabalhadas de forma integrada, já que mudanças climáticas podem colocar em risco o contínuo crescimento econômico, seja por perda de produtividade, risco à saúde, perda de produção em virtude de desastres naturais, seja pelo comprometimento da produção de gerações futuras em virtude de esgotamento de recursos naturais. Nesse sentido, esse trabalho pretende averiguar a relação existente entre emissões de CO₂ e crescimento econômico, bem como verificar os escores de eficiência técnica e ambiental nos países signatários do Acordo de Paris, em especial, deseja-se verificar se os integrantes do chamado Anexo I conseguiram apresentar performances melhores do que os demais, tendo em vista as metas de redução de GEE mais rígidas desde o Protocolo de Kyoto. Para tanto, serão realizadas análises de fronteira estocástica de eficiência através de abordagem paramétrica com estimação das funções de produção Cobb-Douglas e Translog.

A eficiência ambiental se refere à ambição de aumentar os valores econômico-sociais e ao mesmo tempo reduzir os impactos ambientais. A preocupação central é criar mais valor com a menor degradação possível ao meio ambiente. Sob esta perspectiva, é essencial que os métodos de mensuração de eficiência ambiental forneçam as ferramentas necessárias para monitorar e direcionar as políticas públicas para que haja melhor aproveitamento tanto dos recursos econômicos quanto ambientais. Com este propósito, técnicas de análise de fronteira de

¹ Para maiores detalhes sobre os princípios de responsabilidades e as diferenças entre as metas do Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris, ver Souza e Corazza (2017).

produção podem ser importantes ferramentas para mensuração de eficiência econômica, pois possibilitam a incorporação dos danos ambientais aos resultados econômicos.

Nos modelos de fronteira estocástica, a produção é limitada por uma função de produção estocástica em que o termo de erro possui duas partes, o primeiro representando a aleatoriedade, o segundo, a ineficiência técnica. Nesse caso, o produtor enfrenta uma fronteira de produção aleatória, já que os choques estocásticos fogem do seu controle. Assim, é possível verificar quais alterações na tecnologia conduzirão ao melhor desempenho produtivo (fronteira).

Dentre os diferentes métodos de estimação da eficiência, a presente pesquisa utilizar-se-á da abordagem paramétrica, seguindo as especificações funcionais presentes na literatura de Battese e Coelli (1992, 1995). Especificamente, serão aplicadas as funções Translog e Cobb-Douglas para estimação da fronteira de produção estocástica. Essa abordagem foi realizada por Reinhard et al. (1999), Vaninsky (2010) e Marchand e Guo (2014), dentre outros, e será melhor detalhada nos capítulos 3 e 4.

Neste sentido, este trabalho buscará responder as seguintes questões:

- 1. Qual o nível de eficiência técnica e ambiental dos países signatários do Acordo de Paris?**
- 2. Existe evolução da eficiência durante o período estudado?**
- 3. Altos níveis de eficiência técnica são convertidos em maior eficiência ambiental?**

O objetivo principal deste trabalho é analisar as eficiências técnica e ambiental das emissões de CO₂ dos países desenvolvidos e em desenvolvimento no período de 1990-2017, utilizando o método de fronteira estocástica de produção.

Para proporcionar à pesquisa o ferramental necessário para alcançar esse propósito, pretende-se, de maneira específica:

- Estimar escores de eficiência técnica e eficiência ambiental para cada país;
- Verificar o comportamento das variáveis interativas na função Translog;
- Classificar os países pelos padrões de eficiência técnica e ambiental;
- Realizar comparações das eficiências entre países desenvolvidos (Anexo I) e em desenvolvimento (Não-Anexo I);
- Analisar se há alterações nas eficiências ao longo do tempo.

O estudo está estruturado em seis seções, sendo a primeira constituída por esta introdução. A seção dois, referencial teórico, apresenta as principais definições e teorias em que este trabalho se assenta. O tópico 3 discorre sobre a revisão de literatura, elencando alguns trabalhos semelhantes no que diz respeito às eficiências ambientais. Na seção 4 está descrita a metodologia que será utilizada para as estimações e cálculos apresentados na seção 5. Finalmente, na seção 6, são apresentadas as principais conclusões da pesquisa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 EMISSÃO DE CO₂ E AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A mudança climática tornou-se uma das principais ameaças à vida no planeta. As consequências das alterações no clima podem ser evidenciadas em todo o globo: mudanças nas estações, elevação do nível médio da temperatura em diversas regiões, descolamentos de *icebergs* e derretimento de calotas polares, enxurradas, furacões, etc (GORE, 2006). Segundo Henderson et al. (2017), após a revolução industrial, a concentração de gases de efeito-estufa na atmosfera cresceu acentuadamente, levando muitos cientistas a acreditar que as mudanças no sistema climático da Terra foram ocasionadas por emissões antropogênicas de GEE. Também afirmam que as mudanças climáticas são decorrentes do aumento na concentração de gases de efeito estufa (GEE), principalmente, dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). Destacam, ainda, que desde 1880 até 2017 a concentração de CO₂ equivalente³ cresceu de 290 ppm para 430 ppm⁴.

Patz et al. (2005) e Pereira et al. (2010) apontam diversos impactos provocados pelo desequilíbrio climático, dentre os quais, vale destacar as mudanças na precipitação e elevação da temperatura que afetam diretamente tanto a produtividade agrícola e a disponibilidade de água potável, quanto serão responsáveis pela disseminação de doenças. Da mesma forma, o aumento no nível do mar leva a eventos extremos provocando destruição do capital, salinização de solos produtivos e, até mesmo, fontes de água doce. Além disso, há efeitos potencialmente negativos sobre a biodiversidade do planeta. Contudo, Parry et al. (2007) afirmam que a mudança climática não está associada estritamente a aspectos negativos e apontam como exemplo períodos mais longos de crescimento de algumas culturas agrícolas na Europa Central e a possível abertura de rotas marítimas internacionais pela região ártica.

Invariavelmente, os poucos pontos positivos mencionados são suplantados pelos efeitos negativos que uma mudança brusca no clima do planeta pode gerar. Portanto, as mudanças climáticas passam a ser potencialmente perigosas, sobretudo do ponto de vista econômico, a partir do momento em que coloca em risco a capacidade das pessoas de sustentar suas comunidades, levando à escassez de produtos ou, mesmo, forçando pessoas a deixarem suas

³ As emissões de GEE são, normalmente, medidas em unidades equivalentes em CO₂.

⁴ Ppm indica a medida Partes Por Milhão.

casas face a alguma calamidade climática, como afirmam Raleigh, Jordan e Salehyan (2008). Outro ponto importante que deve ser destacado é a vulnerabilidade das sociedades frente às mencionadas alterações e qual a real capacidade de superar ou se adaptar a elas. Edenhofer et al. (2010) destacam um problema ético quanto à questão ambiental. Segundo esses pesquisadores, os países em desenvolvimento que contribuíram muito pouco para a mudança climática global no passado são, em geral, os mais vulneráveis, tanto com relação aos impactos enfrentados, quanto à capacidade adaptativa.

2.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E ECONOMIA

Desde que as nações começaram a perseguir intensivamente o crescimento econômico através do aumento da produção de bens, intensificaram-se também as emissões de gases poluentes, que geraram impactos negativos sobre o meio ambiente. O progresso técnico, responsável pelo aumento da produtividade dos insumos, só foi possível graças ao aperfeiçoamento de estratégias de exploração intensiva dos recursos naturais e humanos. Todavia, o produto gerado pela intensificação do uso de fatores não rendeu apenas resultados benéficos à sociedade.

Kümmel (1989) afirma que o avanço da indústria sustentado através da mecanização produtiva proporcionou efeitos irreversíveis à sociedade e à natureza. Sobretudo no que diz respeito às alterações climáticas ocasionadas a partir da revolução industrial, o modelo de produção implementado incorre no aumento demasiado das emissões de gases causadores do efeito estufa.

Jones e Vollarth (2015) também indicam a existência de um *trade off* entre a produção de bens e serviços e a qualidade do meio ambiente, alegando que a liberação de CO₂, através da queima dos combustíveis fósseis utilizados nos processos produtivos, contribui para o aquecimento global, incorrendo em sérias consequências para todo o planeta. Da mesma forma, Stern (2006) e Foley (2009) destacam que a geração de poluição intensifica o processo de mudança climática, aumentando o impacto negativo das ações humanas sobre a capacidade limitada da natureza em absorver esses resíduos de maneira adequada.

Apesar da aparente notoriedade da relação existente entre crescimento econômico e meio ambiente, foi apenas no final da década de 1960 e início de 1970 que o debate sobre a relação entre meio ambiente e crescimento econômico tomou importante papel nas discussões

acadêmicas. Após solicitação do Clube de Roma⁵, foi elaborado relatório intitulado “*The limits to growth*” por pesquisadores do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), no qual foi indicada a existência de uma barreira para o crescimento contínuo da renda mundial, já que a base de recursos naturais do planeta é finita (MEADOWS et al, 1972). A partir desse evento, iniciam-se as pesquisas que relacionam crescimento econômico e qualidade ambiental como *trade offs* produtivos, pois considerava-se que o crescimento econômico contínuo levaria, invariavelmente, à degradação ambiental.

Entretanto, a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (WCED da sigla em inglês), através do Relatório Brundtland (1987), apresentou estudos indicando a possibilidade de alcançar a sustentabilidade sem, necessariamente, comprometer o sistema econômico. Surge, então, a ideia de “Desenvolvimento Sustentável” e, com ela, diversos trabalhos que relacionam a degradação ambiental com o crescimento econômico em forma de “U” invertido, indicando que, até certo ponto de crescimento da renda, há um aumento na degradação ambiental, porém, quando atingido um ponto máximo de degradação, o crescimento na renda ocasionaria uma melhora nas condições ambientais. Essa relação ficou conhecida como Curva de Kuznets Ambiental, menção ao trabalho de Kuznets (1955).

Portanto, embora as mudanças climáticas possam ser evitadas através da redução das emissões de GEE, a relação entre as emissões e o desempenho econômico, também, deve ser analisada com atenção. O desenvolvimento econômico tem ligação estreita com as emissões, e nenhum dos países de renda alta tem emissões de CO₂ per capita inferiores a 7 toneladas por ano, sendo que a maioria emite mais do que isso (WORLD BANK, 2010). Mais ainda, existe uma relação quase linear entre as emissões históricas e o estoque de capital (EDENHOFER et al., 2008) que não pode passar despercebida quando propostas de redução nas emissões são realizadas, sob a pena de sacrificar o crescimento econômico.

No entanto, esse fato está ligado à utilização de energia produzida por meio de combustíveis fósseis, intensivos em emissão de GEE. Edenhofer et al. (2008) argumentam que as tecnologias de baixo carbono estão amplamente disponíveis e, por essa razão, não há porque temer que mitigações climáticas possam causar impactos negativos no desenvolvimento das nações. Porém, pode-se argumentar que, apesar de disponíveis, tais tecnologias possuem um

⁵ Evento em que participaram pesquisadores de diversos países e diversas áreas de atuação que teve como finalidade a promoção do entendimento multidisciplinar dos componentes que formam o sistema global (MOTA et al, 2008).

custo mais alto do que combustíveis fósseis, levantando a dúvida de quanto esse custo adicional poderia afetar o desenvolvimento e quais as chances de países menos desenvolvidos serem capazes de arcar com eles.

As discussões acerca de mitigação das mudanças climáticas apresentam aos pesquisadores do tema e aos formuladores de política ambiental uma questão econômica crucial que diz respeito ao uso histórico (ou temporal) do capital natural. Há um debate em andamento entre economistas sobre até que ponto o capital natural pode (ou deve) ser substituído totalmente pelo capital artificial⁶. Esta questão é particularmente relevante para os países em desenvolvimento, que ainda não constituíram tanto capital artificial quantos os desenvolvidos. Em termos econômicos, trata-se de uma questão de escolha temporal na qual um país opta, ou por desenvolver-se através do uso intensivo de combustíveis fósseis⁷ (como o fizeram antes os países desenvolvidos), relegando à geração seguinte as políticas de mitigação, ou pode optar por se desenvolver, no presente, investindo diretamente em tecnologias produtivas de baixo carbono⁸ (energia limpa).

Para Stern (2006) o cumprimento de uma agenda de mitigação global das mudanças climáticas não é possível sem a contribuição dos países em desenvolvimento⁹, a melhor saída para um desenvolvimento sustentável é a busca por meios produtivos menos degradantes, como a utilização de energias renováveis. Dessa forma, a implementação de leis globais de mitigação pode fazer com que os países em desenvolvimento tenham seu crescimento econômico estancado, pelo menos temporariamente, face às possíveis reduções forçadas nos níveis de emissões. Nesse caso, o ponto chave dos países com menor renda é a utilização eficiente do fator de produção “energia”, visando não cair em uma armadilha da pobreza.

A questão da sustentabilidade é um dos assuntos mais discutidos no debate de políticas internacionais. Segundo Korhonen e Luptacik (2004), esse termo se refere à obrigação que as atuais gerações têm de atender às suas necessidades sem que comprometa a capacidade das gerações futuras em satisfazer às suas próprias. Levando isso em conta, afirmam que os aspectos econômicos, sociais e ambientais estão ligados uns aos outros e que, por isso, a noção de desenvolvimento sustentável requer metodologias confiáveis para analisar e mensurar o

⁶ Mais detalhes em Neumayer (1999), Heal (2009) e Arrow et al. (2004).

⁷ Ver Jakob e Marschinski, (2012).

⁸ Ver Goldemberg (1998).

⁹ Stern (2006) argumenta que as emissões de GEE são consideradas externalidades negativas globais, já que a poluição gerada por um país não é retida por alguma fronteira geográfica, mas se espalha por todo o planeta.

impacto das atividades econômicas na esfera social e ambiental. Korhonen e Luptacik (2004) destacam que frequentemente as ações que destroem o capital social¹⁰ e ambiental podem aumentar o produto nacional, revelando uma indicação, muitas vezes precipitada, de onde e como se deve agir.

Dessa forma, é preciso que sejam desenvolvidos indicadores que mensurem não apenas a performance econômica dos países, mas também que levem em conta os problemas ambientais incorridos. O principal problema para a formulação de indicadores ambientais é que não existem medidas (ou preços de mercado) para as emissões, ou qualquer outro produto indesejável gerado pela economia. Essas dificuldades, no entanto, podem ser superadas através da utilização de ferramentas estatísticas para medir a eficiência ambiental (KORHONEN; LUPTACIK, 2004; LAHOUEL, 2015).

2.3 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Os aspectos ambientais estão diretamente ligados ao desempenho econômico das nações, uma vez que é impossível que haja produção sem que uma quantidade substantiva de recursos naturais seja empregada e sem que uma quantidade de poluição seja gerada. Nas últimas décadas, principalmente após os anos 1970, o processo econômico de produzir bens e serviços e gerar o bem-estar não é mais considerado apenas como um sistema que depende basicamente do acúmulo de capital físico e humano. O funcionamento do sistema econômico de produção é um emaranhado de processos que depende, sim de capital e de trabalho, mas os recursos naturais são fatores determinantes para o desenvolvimento das nações, sem os quais é impossível haver crescimento da produção. Esses fatores naturais são geralmente classificados como capital natural (BARBIER, 2003).

Perman et al (2003) destacam que a base de recursos do mundo é limitada e contém um conjunto complexo e inter-relacionado de ecossistemas que mostram sinais de fragilidade. Portanto, é cada vez mais questionável se as economias globais podem continuar crescendo sem prejudicar os sistemas naturais, que são o seu fundamento final. Essa evidência é destacada por Meadows et al. (1972), que se utilizam de uma abordagem próxima à teoria malthusiana para

¹⁰ Aqui, considera-se capital social sob a perspectiva da economia social (e não da contabilidade). Para Fukuyama (1996, p. 41), o termo se refere à "capacidade que decorre da prevalência de confiança numa sociedade ou em certas partes dessa sociedade".

alertarem sobre os limites do crescimento econômico sob a perspectiva do capital natural. Esse estudo enfatiza a existência de uma quantidade excessiva de poluição consumindo uma quantidade exagerada de recursos naturais e alerta para possíveis desastres mundiais como consequência.

Com a pesquisa de Meadows et al. (1972), apresentada na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente, em Estocolmo, Suécia, tem início uma série de debates, com participação de representantes de vários países, visando a encontrar alternativas para a problemática ambiental. Mebratu (1998) destaca que foi a partir dessa conferência que as relações entre economia e meio ambiente passaram a tomar corpo teórico e que se adotou o termo “ecodesenvolvimento”, precursor do conceito de desenvolvimento sustentável.

O conceito de sustentabilidade é proveniente das ciências biológicas e está ligado à capacidade de utilização dos recursos naturais sem que haja o comprometimento das gerações futuras. Motta (1996) destaca que, sob a perspectiva econômica, dois pontos devem ser observados acerca do desenvolvimento sustentável. O primeiro se refere ao fato de que a escassez dos recursos naturais e as externalidades geradas pelo uso do capital natural já se encontram em níveis muito elevados, constituindo ameaça à continuidade do crescimento econômico. O segundo ponto destaca que um novo padrão de crescimento econômico deva ser incentivado através do estabelecimento de processos que primem pela eficiência dos recursos naturais empregados.

O destaque sobre a utilização do conceito de sustentabilidade recai sobre duas correntes extremas de teóricos: uma que defende uma “sustentabilidade fraca” e outra que reivindica uma “sustentabilidade forte”. A diferença entre uma e outra é a relação de substitutibilidade entre capital natural (K_n) e capital manufaturado (K_m). De acordo com a visão de “sustentabilidade fraca”, não há essencialmente nenhuma diferença entre capital natural e manufaturado, assumindo, portanto, que são substitutos perfeitos um do outro. Assim sendo, enquanto o capital natural, que está sendo exaurido, é substituído pelo capital manufaturado, então o estoque agregado de capital (capital humano, físico e natural) continua crescendo, sendo condição suficiente para alcançar o desenvolvimento sustentável (BARBIER, 2003).

Por outro lado, os proponentes da “sustentabilidade forte” argumentam que o capital manufaturado não pode substituir todos os recursos ambientais utilizados nos processos produtivos. Basicamente, essa visão questiona se os dois tipos de capital, efetivamente, compõem um único estoque total de capital. A incerteza sobre muitos valores ambientais, em

particular o valor que as futuras gerações podem colocar em recursos naturais, limita ainda mais nossa capacidade de afirmar é possível compensar as gerações futuras pelas perdas irreversíveis na base de recursos naturais da atualidade. Assim, “sustentabilidade forte” sugere que os recursos ambientais não podem ser facilmente substituídos por outro tipo de capital, devendo ser protegidos para evitar que cheguem ao esgotamento (MOTTA, 1996; BARBIER, 2003).

Perman et al (2003) destaca, ainda, que a substitutibilidade entre capital natural e capital manufaturado não é a única forma de substituição relevante entre economia e meio ambiente. Afirma que substituições entre componentes naturais são muito importantes para que se oriente o fluxo de recursos naturais exauríveis na direção dos recursos renováveis. Por exemplo, uma mudança no uso de combustível fóssil para energia hidrelétrica faz com que o esgotamento de combustível fóssil seja retardado, e a geração de resíduos ocasionada pela combustão desses recursos fósseis seja reduzida.

O grau de substitutibilidade entre dois fatores produtivos pode ser medido através da elasticidade de substituição técnica, que calcula a taxa de variação relativa na proporção entre os insumos dada uma variação na taxa marginal de substituição técnica (TMgST) entre esses insumos. Considerando, novamente o capital natural (K_n) e capital manufaturado (K_m), é possível calcular a elasticidade por:

$$\eta_{ST} = \frac{\Delta(K_n/K_m)/(K_n/K_m)}{\Delta TMgST_{K_n K_m} / TMgST_{K_n K_m}} \quad (1)$$

Uma $\eta_{ST} = 0$ indica que os fatores de produção são empregados em proporções fixas, ou seja, são complementares um ao outro. Se $\eta_{ST} > 0$, indica que os insumos são substitutos, para $\eta_{ST} \rightarrow \infty$, os fatores são substitutos perfeitos. Assim sendo, para que a tese de “sustentabilidade fraca” seja comprovada, a elasticidade de substituição entre os insumos natural e material deve tender ao infinito. Caso contrário ($\eta_{ST} \rightarrow 0$), se sustenta a teoria da “sustentabilidade forte”.

2.4 TEORIA DA PRODUÇÃO

A produção de bens e serviços envolve a combinação de diversos insumos que, quando associados corretamente, fazem com que o processo produtivo seja considerado eficiente do

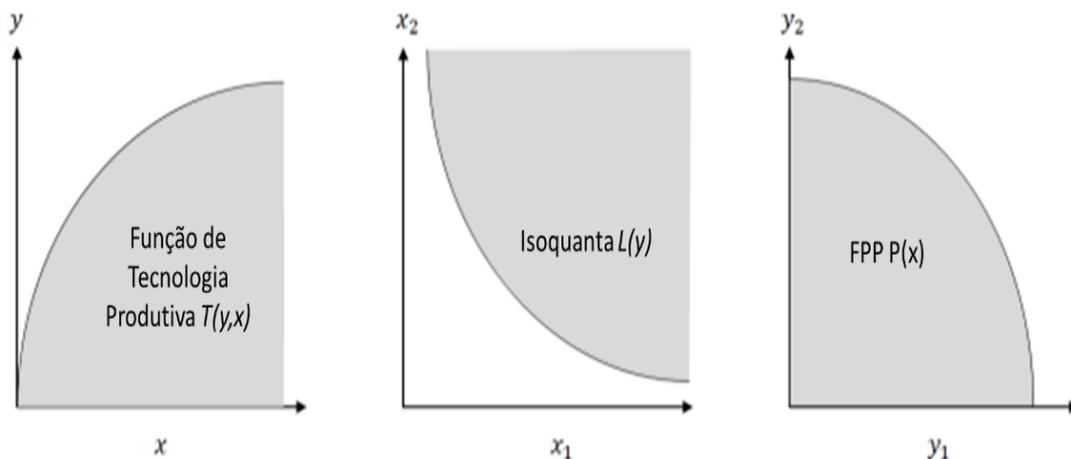
ponto de vista econômico, já que é possível gerar a maior quantidade de produto utilizando o mínimo possível de insumos. Em termos matemáticos, uma função de produção define o processo produtivo em função das possibilidades de combinação dos fatores disponíveis para gerar um mesmo nível de produto. Em linhas gerais, Greene (2008) define produção como um processo de transformar recursos em produtos economicamente úteis.

Coelli et al. (2005) afirmam que os produtores transformam insumos em produtos através de tecnologias produtivas as quais podem ser descritas teoricamente ou através de funções de produção. Utilizando a segunda abordagem, considera-se que um conjunto de tecnologia (T) é definido como um conjunto de vetores de produção viável (X, Y). Formalmente:

$$T = \{(Y, X): X \text{ pode produzir } Y\} \quad (2)$$

onde X é o vetor de insumos e Y , o vetor de produtos. A Figura 1 ilustra graficamente uma função de produção simples com um insumo e um produto, uma isoquanta de dois insumos¹¹ e uma fronteira de possibilidade de produção (FPP) entre dois produtos.

Figura 1 – Representação de função de produção, isoquanta e FPP



Fonte: Adaptado de Coelli et al. (2005).

¹¹ Representa as várias combinações de insumos que geram um mesmo nível de produto.

De forma intuitiva, percebe-se que o limite do conjunto de produção representado pela Equação (2) e pela Figura (1) representará a fronteira de produção, a qual indica o máximo de produção possível para um dado nível de insumos, ou seja, se a firma é eficiente do ponto de vista tecnológico.

Em contraste com o que mostra a Figura (1), a produção também pode ser caracterizada por representações paramétricas de funções de produção, a qual indica a relação entre insumos e produtos através de propriedades específicas que dependem da forma funcional escolhida. Como pode ser observado no Quadro 1, as formas funcionais para funções de produção, no âmbito da análise de eficiência, variam de formas bastante simples a mais complexas.

Quadro 1 – Formas Funcionais mais utilizadas

Linear	$y = \beta_0 + \sum_{n=1}^N \beta_n x_n$
Cobb-Douglas	$y = \beta_0 \prod_{n=1}^N x_n^{\beta_n}$
Quadrática	$y = \beta_0 + \sum_{n=1}^N \beta_n x_n + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \beta_{nm} x_n x_m$
Quadrática Normalizada	$y = \beta_0 + \sum_{n=1}^{N-1} \beta_n \left(\frac{x_n}{x_N} \right) + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=1}^{N-1} \beta_{nm} \left(\frac{x_n}{x_N} \right) \left(\frac{x_m}{x_N} \right)$
Translog	$y = \exp \left(\beta_0 + \sum_{n=1}^N \beta_n \ln x_n + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \beta_{nm} \ln x_n \ln x_m \right)$
Leontief Generalizada	$y = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \beta_{nm} (x_n x_m)^{1/2}$
Elasticidade de Substituição Constante	$y = \beta_0 \left(\sum_{n=1}^N \beta_n x_n^\gamma \right)^{1/\gamma}$

Fonte: Adaptado de Coelli et al. (2005)

No Quadro 1, y representa a produção, x_n são os insumos utilizados na produção de y e n representa o número de insumos utilizados que varia de $n = 1, 2, \dots, N$.

No presente trabalho, serão utilizadas as funções de produção Cobb-Douglas e Translog por possuírem propriedades úteis aos objetivos propostos, como a análise das elasticidades de substituição entre fatores. Além disso, Coelli et al. (2005) destaca que essas funções são consideradas flexíveis, lineares nos parâmetros e parcimoniosas, que são características importantes a considerar para a escolha da forma funcional.

2.4.1 Função de Produção com Capital Natural

Perman et al (2003) realiza uma análise de como o capital ambiental pode ser incorporado à função de produção, e destaca que a maioria das análises de produção envolvem apenas os insumos capital (material) e trabalho. Sendo que, para cada firma, a função de produção pode ser representada como:

$$Y = f_i(K_i, L_i) \quad (3)$$

em que Q_i denota o nível de produto gerado pelos insumos capital (K_i) e trabalho (L_i).

Ainda que seja utilizada com frequência na literatura econômica, a função representada pela Equação (3) não pode ser uma representação geral adequada do que a produção envolve segundo o princípio do equilíbrio de materiais. Se Y_i tiver alguma incorporação material, então deve existir algum insumo de material para a produção. Considerando R algum recurso natural extraído do meio ambiente, então a função de produção poderia ser escrita como:

$$Y_i = f_i(K_i, L_i, R_i) \quad (4)$$

As funções de produção como a Equação (4) são utilizadas com certa frequência na literatura sobre economia dos recursos naturais. Por outro lado, Perman et al (2003) destaca que a literatura de economia ambiental tende a enfatizar não os recursos extraídos, mas as inserções no meio ambiente, externalidades que surgem nos resíduos de produção e consumo, as quais podem ser representadas através da substituição de R da Equação (4) por uma variável de resíduo M , assim:

$$Y_i = f_i(K_i, L_i, M_i) \quad (5)$$

onde M_i representa o fluxo de resíduos decorrentes da atividade da empresa i como, por exemplo, as emissões de gases poluentes. A Equação (5) pode parecer estranha à primeira vista, uma vez que trata os fluxos de resíduos como um insumo para a produção. No entanto, representa é uma maneira razoável de proceder, considerando que as reduções nos resíduos significarão, necessariamente, redução na produção. O fato de não haver produção sem que,

necessariamente, a empresa emita determinada quantidade de resíduo, justifica o fato de que, no presente estudo serão utilizadas as emissões de CO₂ como insumo produtivo ao invés de *bad output*.

2.4.2 Eficiência Técnica

As medidas de eficiência podem ser caracterizadas como técnica ou econômica. Segundo Peña (2008), a eficiência técnica é alcançada quando se obtém o máximo de produto dado certo nível de insumos, ou quando utiliza o mínimo de insumos para dado nível de produção. Já a eficiência econômica se refere aos custos de produção, ou seja, é considerado eficiente economicamente o produtor que obtiver o máximo de produto com a menor relação de custos dos insumos.

Koopmans e Tjalling (1951) afirmam que o uso correto dos insumos na produção de bens ou serviços leva à chamada “eficiência técnica”. No ponto de eficiência técnica (ou produtiva), um aumento na produção de um bem requer, necessariamente, a redução da produção outro bem ou o aumento de pelo menos um insumo (recurso produtivo). Da mesma forma, a redução da utilização de qualquer insumo requer, obrigatoriamente, um aumento em outro insumo ou a redução de um dos bens produzidos. Farrel (1957) define eficiência como uma combinação ótima de recursos (insumos) que geram o máximo de produto possível, e, portanto, o objetivo da mensuração da eficiência corresponde à otimização do uso dos recursos.

Com isso, percebe-se que há duas orientações para a conceituação de eficiência. A primeira se refere à redução dos insumos, quando a produção permanece constante, definida como orientação para insumos, e a segunda reporta ao aumento da produção, quando se mantêm constantes os insumos, chamada de orientação para produtos (DEBREU, 1951; FARREL, 1957). Tais orientações foram definidas formalmente por Kumbhakar e Lovell (2000) como:

1. um vetor insumo $X \in L(Y)$ possui eficiência técnica se, e somente se, $X' \notin L(Y)$ para $X' \leq X$
2. um vetor produto $Y \in P(X)$ possui eficiência técnica se, e somente se, $Y' \notin P(X)$ para $Y' \geq Y$

sendo X um vetor de insumos, $L(Y)$ uma isoquanta e $P(X)$ uma fronteira de produção. Na definição (1), o vetor de produtos é mantido fixo e os insumos serão tecnicamente eficientes

quando nenhuma redução em qualquer dos insumos for possível. Já na definição (2), mantidos os insumos constantes, a produção será tecnicamente eficiente quando não for possível aumentar a produção de nenhum bem.

Utilizando das definições de eficiência de Farrel (1957), Coelli et al. (2005) formula a eficiência técnica como:

$$ET_I(Y, X) = \min_{\theta} [\theta | (\theta X, Y) \in T] \quad (6)$$

$$ET_P(Y, X) = \max_{\phi} [\phi | (X, \phi Y) \in T]^{-1} \quad (7)$$

em que ET_I representa a eficiência técnica com orientação ao insumo e ET_P , a eficiência técnica com orientação ao produto, X e Y são os vetores de insumos e produtos, respectivamente, e T é a fronteira tecnológica.

A Equação (6), que representa a eficiência técnica com orientação aos insumos, reflete o fato de que o vetor de insumos eficiente é encontrado quando se reduzem proporcionalmente todos os insumos até que eles se encontrem no limite do conjunto da tecnologia (T), e é igual a um número escalar θ , o qual varia de zero a um e indica a redução proporcional de todos os insumos. Por exemplo, um $\theta = 0,7$ indica que um mesmo nível de produto poderia ser produzido com 70% dos insumos utilizados, revelando uma ineficiência de 30%. Dessa forma, a firma será eficiente se θ for igual a um, pois, nesse caso, a totalidade dos insumos foi necessária para aquele nível de produção.

Já na Equação (7), que demonstra a eficiência técnica orientada para o produto, a eficiência técnica é alcançada quando a produção é maximizada dada certa combinação de insumos, e será igual a um número escalar ϕ , que varia entre zero e infinito e se refere à expansão de todos os produtos. Assim, para um dado nível de insumos, um produtor tecnicamente eficiente é definido como aquele cuja produção coincide com a fronteira de produção, sem possibilidade de expandir essa produção com o mesmo nível de insumo.

Considerando uma função de produção $f(x)$, a eficiência técnica de um produtor i é representada por:

$$ET_i = \frac{Y_i}{f(x_i)} \quad (8)$$

onde, ET_i é a eficiência técnica do produtor i , Y_i é a produção observada e $f(x_i)$ é a fronteira de produção calculada.

2.4.3 Eficiência Ambiental

Uma firma é considerada eficiente do ponto de vista ambiental quando utiliza a menor quantidade possível de recursos naturais para criar determinado nível de produto, evitando assim, a degradação do meio ambiente por meio de emissões de GEE e resíduos gerados. Dessa forma, a eficiência ambiental combina o desempenho econômico com variáveis ecológicas, de tal maneira que a menor utilização de insumos cause menores custos ambientais, mas sem que o crescimento econômico seja sacrificado.

No presente trabalho, a eficiência ambiental será derivada das funções de produção Cobb-Douglas e Translog, sob a hipótese de que os fatores de produção são alocados de maneira ineficiente. Convencionalmente, os danos ambientais são tratados como externalidades negativas e, portanto, modelados como um produto indesejado. Alternativamente, a abordagem aqui apresentada será com a utilização do dano ambiental (emissões de CO₂) como um insumo produtivo, sob o pressuposto de que é impossível que haja produção sem que seja emitida alguma quantidade de poluentes. Assim, a variável de insumo prejudicial ao meio ambiente é incorporada à função de produção. Nesse contexto, será utilizada a abordagem de Reinhard et al. (1999) para definir a eficiência ambiental, na qual equivale à razão entre o uso mínimo possível e o uso observado da variável emissões. Essa relação é formalizada como:

$$EA_i = [\min \theta : F(X_i, \theta Z_i) \geq Y_i], \quad (9)$$

onde, Y_i é a produção observada do país i , X_i são os insumos utilizados na produção, Z_i representa a variável emissões de CO₂ pelo i -ésimo país e $F(X_i, \theta Z_i)$ indica a fronteira ambiental eficiente. Assim, a eficiência ambiental para Reinhard et al. (1999) é uma eficiência orientada para os insumos, e de fator único para o insumo ambientalmente prejudicial. Mais detalhes sobre a estimação da eficiência serão tratados no capítulo 4.

3 REVISÃO DE LITERATURA

No presente capítulo são apresentados os trabalhos para a delimitação do estado da arte do tema em questão, mais especificamente: estender o estudo sobre o desempenho das emissões de CO₂, usando o método análise de fronteira estocástica (SFA) para uma abordagem com variáveis econômicas e ambientais agregadas. No que tange ao objeto de estudo e à metodologia, os trabalhos que mais se assemelham a este estudo são os de Reinhard et al. (1999), Vaninsky (2010) e Marchand e Guo (2014).

Reinhard et al. (1999) desenvolveram um estudo para estimar a eficiência técnica e ambiental de fazendas leiteiras na Holanda. O excedente de nitrogênio, decorrente da aplicação de quantidades excessivas de adubo químico e fertilizantes, foi tratado como um insumo prejudicial. Foi especificada uma fronteira estocástica de produção translog para estimar a eficiência técnica orientada para a produção. Já a eficiência ambiental foi estimada como a eficiência técnica orientada para insumos de um único insumo, o excedente de nitrogênio de cada fazenda. Como resultados, encontraram indícios de que a eficiência técnica média orientada para a produção é bastante alta, 0,894, mas a eficiência ambiental média orientada para os insumos é de apenas 0,441. Com esses resultados, concluíram que fazendas leiteiras intensivas são tecnicamente e ambientalmente mais eficientes do que fazendas extensivas.

Vaninsky (2010) investigou o desempenho ambiental dos Estados Unidos no período de 1990 a 2007 utilizando a SFA. A fronteira foi formada pelas variáveis PIB, consumo de energia, população e emissões de CO₂. Os resultados revelaram que as pontuações médias de eficiência aumentaram de 97,6%, em 1990, para 99,6% em 1999, e depois caíram para 98,4%, em 2007. O principal fator é a diminuição insuficiente da taxa de crescimento das emissões de CO₂ em relação ao crescimento do PIB, população e consumo de energia. A pesquisa permitiu inferir que o desempenho ambiental dos Estados Unidos melhorou durante o período estudado.

Já o trabalho de Marchand e Guo (2014) buscou calcular a eficiência técnica orientada para a produção e a eficiência ambiental da indústria química de Mumbai, Índia, usando a abordagem da fronteira estocástica. Foram incorporados os efeitos ambientais na abordagem da fronteira estocástica e calculada a eficiência ambiental das empresas. As variáveis carga de demanda biológica de oxigênio (DBO) e carga de demanda química de oxigênio (DQO) foram modeladas como insumos convencionais em dois modelos diferentes. Como principais

resultados, observaram que a eficiência ambiental das firmas é bastante baixa e que, tanto o retorno de escala, quanto o tamanho da empresa têm uma relação negativa com a eficiência ambiental.

Ademais, no que diz respeito a outras abordagens para mensuração das eficiências técnica e ambiental, o Quadro 2 apresenta alguns dos trabalhos mais recentes (a partir dos anos 2000), sendo que a metodologia mais utilizada é a de Análise por Envoltória de Dados (DEA).

Quadro 2 – Literatura eficiência técnica e ambiental

Autor	Nº de países	Período	Variáveis	Metodologia
Zaim e Taskin (2000)	25 países	1980-1990	Número de pessoas empregadas; Estoque de capital; PIB; Emissões de CO ₂ .	Fronteira de Produção Não-Paramétrica
Zhou, Poh, e Ang (2007)	26 países	1995-1997	Força de trabalho; Consumo de energia; PIB; Emissões CO ₂ , SO _x , NO _x E CO.	DEA
Halkos e Tzeremes (2009)	17 países	1980-2002	Estoque de capital; Número de pessoas empregadas; Emissão de enxofre p.c.; PIB p.c.	DEA
Camarero et al. (2013)	22 países	1980-2005	PIB; Emissões CO, NO _x , SO _x .	DEA
Rashidi e Saen (2015)	19 países	2012	Força de trabalho; Uso de energia; PIB; Emissões de CO ₂ .	DEA
Skare e Rabar (2017)	30 países	2002-2011	Taxa de inflação; Taxa de desemprego; PIB; Razão exportação/importação; Emissões CO ₂ .	DEA

Fonte: Elaboração própria.

A estratégia geral dos estudos com DEA é a utilização das variáveis ambientais como um produto indesejável, ou seja, a variável emissões de gases poluentes é modelada como dependente, e não como explicativa. No entanto, o presente trabalho utilizará uma modelagem de saída única (apenas uma variável dependente), seguindo a linha do trabalho de Reinhard et al. (1999) e serão utilizadas técnicas econométricas para a estimação das eficiências e da fronteira de produção estocástica para relacionar o melhor desempenho ambiental das emissões de CO₂ aos melhores níveis de crescimento econômico. O capítulo 4 especificará de maneira mais precisa a metodologia a ser utilizada.

4 METODOLOGIA

4.1 MODELO DE FRONTEIRA ESTOCÁSTICA COM DADOS EM PAINEL

A modelagem de fronteira estocástica é muito utilizada nas análises econômicas aplicadas. A principal motivação para o uso frequente desse modelo são as evidências encontradas por autores como Kumbhakar e Lovell (2000), ao afirmarem que nem todos os produtores são bem-sucedidos em seus problemas de otimização e, portanto, nem todos são tecnicamente eficientes.

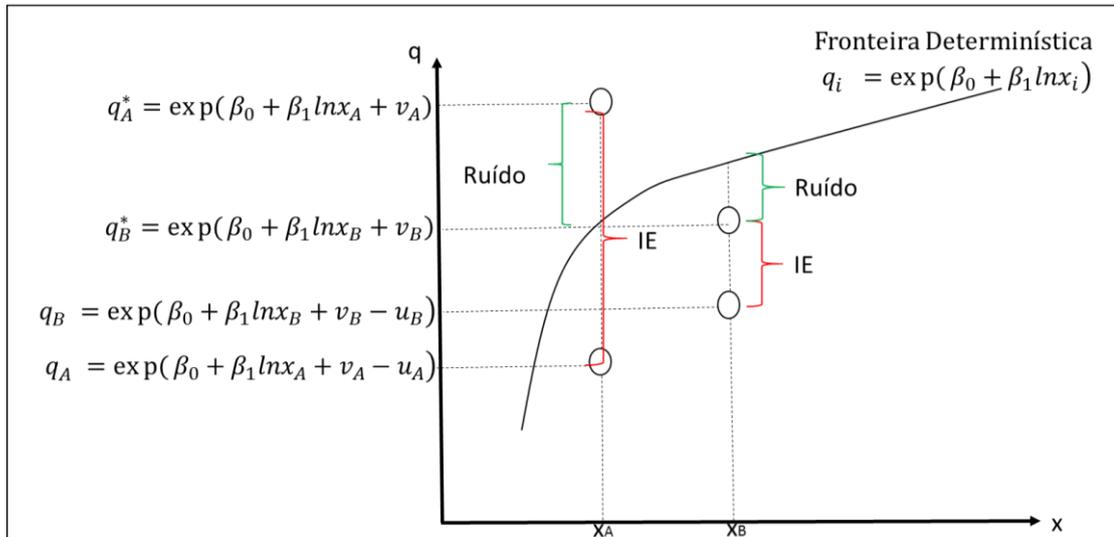
Segundo Coelli (1995), a abordagem de fronteira estocástica fornece uma fronteira tecnológica construída pelos produtores de melhor desempenho, sendo possível, portanto, comparar o comportamento de cada produtor. Se o produtor pertence à fronteira, ele será considerado eficiente, vis-à-vis aos demais amostrados. Se estiver localizado abaixo da fronteira, será ineficiente, e análises posteriores poderão identificar a fonte e o nível de ineficiência.

A Figura 2 demonstra os insumos e produtos de dois produtores (*A* e *B*), onde o componente determinístico está especificado para representar a existência de retornos decrescentes de escala. No eixo *X*, são relacionados os insumos utilizados no processo produtivo e, no *Y*, a produção. Assume-se que os produtores utilizam um nível x_i de insumos para produzir q_i unidades, então, as fronteiras de produção dos produtores *A* e *B* serão representadas por:

$$q_A^* = \exp(\beta_0 + \beta_1 \ln x_A + v_A) \quad (10)$$

$$q_B^* = \exp(\beta_0 + \beta_1 \ln x_B + v_B) \quad (11)$$

Figura 2 – Fronteira de Produção Estocástica



Fonte: Adaptado de Coelli et al. (2005, p. 244)

Na Figura 2, percebe-se que a fronteira de produção da firma A está acima da parte determinística da fronteira de produção apenas porque o ruído (v_A) é positivo, enquanto que a fronteira de produção da firma B está abaixo da linha determinística da fronteira porque o efeito do ruído é negativo. Também, percebe-se que a produção observada da firma A está abaixo da fronteira de produção, porque a soma do ruído e do efeito da ineficiência (IE) é negativo ($v_A - u_A < 0$).

Portanto, o modelo geral de fronteira estocástica envolve funções de produção com dois termos de erro, um que contabiliza os ruídos, ou efeitos aleatórios, ou seja, que não podem ser controlados pelas firmas (v_i), e outro que captura a ineficiência dos fatores (u_i). Assume-se que assume v tem distribuição normal padrão e é independente de u ; sendo que u é uma variável aleatória não negativa que capta os efeitos de ineficiência técnica dos fatores e que tem distribuição normal truncada em zero.

A forma funcional da fronteira estocástica será testada através de um teste de Máxima Verossimilhança, que permitirá verificar a adequação à amostra de dados. Em outras palavras, tal teste verifica se os dados utilizados legitimam a forma funcional Translog, menos restritiva, em detrimento da forma restritiva, representada pela função Cobb-Douglas.

A utilização de dados em painel se faz necessária para que seja possível uma análise de evolução da ineficiência no tempo. Além disso, as informações sobre variações ao longo do

tempo, também, permitem examinar se a ineficiência tem sido constante com o passar dos anos ou se a ineficiência é variável no tempo. Segundo Parmeter e Kumbhakar (2014), é importante observar se os efeitos individuais representam ineficiência (constante) ou se os efeitos são independentes da ineficiência e capturam alguma heterogeneidade não observada.

4.1.1 Modelo de Ineficiência Invariante no Tempo

O primeiro caso a ser testado é o de ineficiência como constante ao longo do tempo e especificada individualmente. Nesse caso, os efeitos individuais não observáveis do modelo clássico de dados em painel são a base a partir da qual a ineficiência é medida. O modelo pode ser escrito conforme o modelo de Fronteira de Produção Estocástica (FPE) proposto, inicialmente, por Aigner et al. (1977) e Meeusen e Van Den Broeck (1977).

Para a formalização da FPE consideram-se N firmas indexadas por $(i = 1, 2, 3, \dots, N)$ observadas em T períodos, isto é:

$$\begin{aligned} Y_{it} &= m(x_{it}; \beta) + \varepsilon_{it} \\ \varepsilon_{it} &= v_{it} - u_i \end{aligned} \tag{12}$$

em que, Y_{it} representa a produção, $m(x_{it}; \beta)$ é uma função linear nos parâmetros, x_{it} indica os insumos utilizados no processo produtivo, β indica os parâmetros da função; u_i e v_{it} são dois termos de erro distintos e independentes entre si.

A função de produção neoclássica padrão, que assume total eficiência dos fatores, pode ser considerada um caso de fronteira de produção estocástica em que $u_i = 0$, portanto, é possível apontar o modelo FPE como uma extensão do modelo neoclássico de produção. A principal distinção da Equação (12) para uma função de produção padrão se refere aos termos de erro, pois, o termo u_i , nessa equação, captura a ineficiência da máxima produção calculada a partir da função de produção $m(x_{it}; \beta)$, enquanto v_{it} revela as influências externas, as quais estão fora do controle do produtor, e incorpora as variações específicas da produção e do tempo na fronteira de produção.

Segundo Wooldridge (2010), o modelo de painel estocástico com tempo invariante pode ser estimado tanto com efeitos fixos quanto efeitos aleatórios. Para a escolha entre as duas

estruturas deve-se levar em conta o nível de relacionamento que se está disposto a assumir entre a ineficiência e as variáveis do modelo.

4.1.1.1 Efeitos Fixos

O modelo de painel estocástico de ineficiência invariante no tempo, utilizando estimação com efeitos fixos, pode ser escrito como¹²:

$$Y_{it} = \beta_0 + x'_{it}\beta + v_{it} - u_i \quad (13)$$

$$Y_{it} = \alpha_i + x'_{it}\beta + v_{it} \quad (14)$$

onde $\alpha_i = \beta_0 - u_i$. Segundo Parmeter e Kumbhakar (2014), a estrutura a ser selecionada depende do nível de relacionamento que se está disposto a assumir entre a ineficiência (u_i) e as variáveis do modelo. Portanto, no modelo de efeitos fixos, é permitida a correlação entre x_{it} e u_{it} . Mundlak (1961) argumenta que esta é uma propriedade desejável para aplicações empíricas nas quais há indícios de que a ineficiência está relacionada com algum dos insumos produtivos.

Após adicionar variáveis *dummies* referentes ao termo α_i , a Equação (14) será estimada por MQO. Uma vez obtida a estimativa de $\hat{\alpha}_i$, utiliza-se a seguinte transformação¹³ para obter o valor estimado de u_{it} :

$$\hat{u}_i = \max_i(\hat{\alpha}_i) - \hat{\alpha}_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (15)$$

A especificação em (5) implica que a unidade mais eficiente da amostra é 100% eficiente. Assim, a ineficiência estimada com efeitos fixos é comparada à melhor unidade da amostra. Para estimar a eficiência técnica específica do i -ésimo país, será calculado:

$$\widehat{ET}_i = e^{-\hat{u}_i} \quad (16)$$

¹² Parmeter e Kumbhakar (2014).

¹³ Schmidt e Sickles (1984).

em que, \widehat{ET}_i a eficiência técnica do país i .

4.1.1.2 Efeitos Aleatórios

Segundo Parmeter e Kumbhakar (2014), a estimação por efeitos aleatórios pode ser realizada por mínimos quadrados generalizados (MQG). Essa estimação evita as hipóteses de distribuição das variáveis e é comum para a estimação padrão do modelo de dados de painel linear em parâmetros com efeitos aleatórios. As estimativas por MQG na presença de heterogeneidade precisam ser modificadas e reinterpretadas antes de calcular a ineficiência. Uma alternativa ao uso do GLS é impor explicitamente as premissas distribucionais sobre os componentes aleatórios do modelo e estimar os parâmetros do modelo por máxima verossimilhança (ML = Maximum Likelihood). Uma vez que os parâmetros são estimados via ML, os estimadores de médias condicionais podem ser usados para estimar a ineficiência específica da empresa.

Para o caso de verificação de heteroscedasticidade, será realizada a estimação padrão por MQG. Assume-se que $E(u_i) = \mu$ e $u_i^* = u_i - \mu$ e substituem-se essas relações no modelo da Equação (15):

$$\begin{aligned} Y_{it} &= (\beta_0 - \mu) + x'_{it}\beta + v_{it} - u_i^* \\ Y_{it} &= \alpha^* + x'_{it}\beta + v_{it} - u_i^* \end{aligned} \quad (17)$$

em que, u_i indica o erro aleatório e v_{it} representa o termo de erro distribuído normalmente que capta as influências externas à decisão do produtor e $\alpha^* = \beta_0 - \mu$. Segundo Parmeter e Kumbhakar (2014), a estimação por MQG explica a natureza composta do termo composto $v_{it} - u_i^*$. Baltagi (2013) afirma que a estimação dos coeficientes angulares e o intercepto pode ser regredida por \hat{y}_{it} contra \hat{x}_{it} , sendo $\hat{y}_{it} = y_{it} - \theta \bar{y}_{it}$; $\theta = 1 - \sigma_v/\sigma_1$ e $\sigma_1^2 = T\sigma_u^2 + \sigma_v^2$.

Para a definição da estimativa de variância para implementação do MQG, define-se $\hat{\varepsilon}_{it} = y_{it} - x'_{it}\hat{\beta}$, então, uma estimativa de $\alpha_i = \beta_0 - \mu_i$ pode ser derivada por:

$$\hat{\alpha}_i = \frac{1}{T} \sum_t (\hat{\varepsilon}_{it} - \hat{\alpha}^*), \quad i = 1, \dots, N. \quad (18)$$

em que, se utiliza a hipótese de que o valor de \hat{v}_{it} no tempo é, em média, zero ($T \rightarrow \infty$).

Por fim, a ineficiência específica para cada firma pode ser obtida por meio da Equação (15). Da mesma forma que no modelo com efeitos fixos, assume-se que o melhor produtor seja 100% eficiente, e os demais terão sua eficiência medida de forma relativa a esse produtor.

4.1.2 Modelo de Ineficiência Variável no Tempo

Para modelos de ineficiência variante no tempo, será utilizada a abordagem de Battese e Coelli (1995), na qual os efeitos de ineficiência são distribuídos independentemente, como truncamentos de distribuições normais com variância constante, porém, com suas médias representando uma função linear de variáveis observáveis. A função de fronteira estocástica é dada por:

$$Y_{it} = \exp(x_{it}\beta + v_{it} - u_{it}) \quad (19)$$

em que, u_{it} representa uma variável aleatória não-negativa associada à ineficiência técnica da produção, v_{it} , com v_{it} assumindo distribuição normal padrão, e não se correlaciona com u_{it} .

$$u_{it} = z_{it}\delta + W_{it} \quad (20)$$

em que, z_{it} é um vetor ($1 \times m$) de variáveis explicativas associadas à ineficiência técnica ao longo do tempo; δ é um vetor ($m \times 1$) de coeficientes; e W_{it} representa uma variável aleatória definida por uma distribuição normal truncada em zero.

Battese e Coelli (1995) indicam o método de máxima verossimilhança (MV) para estimação simultânea dos parâmetros da fronteira estocástica e para o modelo de ineficiência técnica. Nesse método, a eficiência técnica pode ser medida usando um parâmetro da razão entre variâncias ($\sigma^2 \equiv \sigma_v^2 + \sigma_u^2$ e $\gamma \equiv \sigma_u^2/\sigma^2$). O termo γ , obtido por meio de MV, representa a existência de fronteira estocástica. Se γ for estatisticamente diferente de zero, então, a utilização da função de fronteira de produção é apropriada, já que a diferença entre a produção ideal e a observada é ocasionada por uma ineficiência técnica produtiva. Caso, γ for estatisticamente não significativo, indica que qualquer diferença na produção é atribuída aos termos de erro aleatório. Assim, os países que operam na fronteira serão classificados como

tecnicamente eficientes e, por isso, recebem resposta máxima de produção, para as dadas combinações de insumos utilizados.

4.2 TESTES DE ESPECIFICAÇÃO

Antes de realizar a estimação dos modelos de fronteira estocástica, serão realizados testes de especificação para cada um dos modelos, sendo que o primeiro será o teste de Hausman (1978), visando à escolha entre modelos com efeitos fixos (EF) ou efeitos aleatórios (EA). No entanto, o teste de Hausman possui algumas limitações e, caso os resultados apontem para a presença de heteroscedasticidade nos erros, os testes de especificação utilizados serão o de Hausman Robusto e Mundlack. Este procedimento testa a hipótese nula de que os parâmetros estimados por efeitos aleatórios são estatisticamente iguais aos estimados por efeitos fixos ($H_0: \hat{\beta}^{EA} = \hat{\beta}^{EF}$). Caso a hipótese nula seja rejeitada, então a estimação da função de fronteira de produção terá continuidade com a utilização de efeitos fixos, caso contrário, serão utilizados os estimadores de efeitos aleatórios.

O próximo teste será para a definição da forma funcional da fronteira estocástica, que será determinada através de um teste de máxima verossimilhança (LR - *Likelihood Ratio*) de adequação à amostra de dados. Serão testadas a forma funcional Translog, que apresenta propriedades menos restritivas, em contraposição a uma Cobb-Douglas. Tal teste, desenvolvido por Lee (1983), foi implementado, também, por Marinho e Bittencourt (2006), Souza et. al. (2008) e Constantin et. al (2009).

Após escolhida a melhor forma funcional para os dados, é importante determinar se os efeitos de ineficiência técnica estão presentes no modelo. A estimação dos efeitos de ineficiência só pode ser realizada se os efeitos de ineficiência forem estocásticos e tiverem uma especificação distributiva específica. Os seguintes testes de hipóteses serão realizados: (1) H_0 : efeitos de ineficiência não são estocásticos; (2) H_0 : efeitos de ineficiência não estão presentes. Esses testes são realizados através das significâncias estatísticas reportadas para os parâmetros γ e η , respectivamente, na estimação da fronteira estocástica.

Para garantir que as estimativas dos escores das eficiências técnica e ambiental sejam confiáveis e teoricamente consistentes, após a estimação da fronteira estocástica de produção, serão realizados os testes de regularidade para a forma funcional escolhida. Tais testes estão apresentados a seguir.

4.3 CONDIÇÕES DE REGULARIDADE DA FRONTEIRA DE PRODUÇÃO

As condições necessárias para a estimação de escores de eficiência consistentes são as mesmas aplicadas à Teoria da Produção: (1) monotonicidade; (2) lei da produtividade marginal decrescente; (3) quase-concavidade.

Segundo Sauer e Hockmann (2005), devido ao fato de sua forma funcional ser mais flexível do que a Cobb-Douglas, a função de Translog tem se tornado a especificação mais comum para estimar a fronteira de produção estocástica. Porém, grande parte dos trabalhos não testa as condições de regularidade. Sauer e Hockmann (2005) realizaram uma revisão de oito estudos publicados em que foi aplicada uma fronteira de produção estocástica usando a forma funcional Translog e constataram violação da condição de monotonicidade em pelo menos um insumo em quatro dos artigos. Além disso, as condições de produtividade marginal decrescente e de quase-concavidade foram violadas nos oito artigos analisados. Concluíram que, as condições de regularidade não se sustentaram e, portanto, os escores de eficiência estimados não eram teoricamente consistentes. Sauer e Hockmann (2005, p.14) afirmam, ainda, que os escores de eficiência estimados “não podem ser considerados como base apropriada para a formulação de políticas com foco no desempenho relativo das unidades de tomada de decisão investigadas”.

4.3.1 Monotonicidade

Para a função de produção ser considerada monotônica, todos os insumos devem possuir produto marginal não-negativo, ou seja:

$$\partial Y / \partial X_i \geq 0 \quad (21)$$

Como produto marginal de um insumo X_i é sempre não-negativo, então um aumento, mesmo que pequeno, na quantidade desse insumo ocasionará um aumento na quantidade de produto Y .

4.3.2 Produtividade Marginal Decrescente

A lei da produtividade marginal decrescente postula que à medida que se aumenta a utilização de determinado insumo, *ceteris paribus*, o aumento marginal na produção não pode ser crescente. Para a função translog, a produtividade marginal decrescente implica que:

$$\partial^2 Y / \partial X_i^2 \leq 0 \quad (22)$$

4.3.3 Quase-Concavidade

Segundo Chambers (1988, p.10), a condição de quase-convexidade está ligada à condição de convexidade do conjunto dos insumos. Em outras palavras, para que um conjunto de insumo seja convexo, é necessário que, se X_1 e X_2 podem produzir Y , então qualquer média ponderada desses insumos também pode produzir Y . Atender às condições de quase-concavidade requer, portanto, que o conjunto dos insumos seja convexo. A quase-concavidade é determinada através da matriz Hessiana, a qual se baseia nas derivadas de segunda ordem da função de produção.

$$H = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \quad (23)$$

onde:

H representa a matriz Hessiana ;

f_{ii} é a derivada de segunda ordem em relação ao insumo i ;

f_{ij} é a derivada mista de segunda ordem em relação aos insumos i e j .

As condições necessária e suficiente para que a função de produção seja quase-convexa é que H seja semidefinida negativa, que é determinada pela análise dos determinantes de H . Os determinantes devem apresentar sinais alternados, começando pelo sinal negativo.

4.3.4 Elasticidade de Substituição

O grau de substituição entre os insumos de produção dada uma variação nos índices de quantidade de insumos será analisado através da elasticidade de substituição de Morishima. Essa elasticidade, introduzida por Hicks (1932), é uma medida de substituição entre insumos e a curvatura da isoquanta, descrevendo a relação entre dois insumos i e j . Embora existam várias medidas para medir o grau de substituição entre insumos, apenas a elasticidade de substituição de Morishima será utilizada neste estudo por ser a que possibilita uma análise bidirecional entre dois insumos, ou seja, o quanto o insumo i pode substituir o j e vice-versa. Chambers (1988 p.35) aponta que a elasticidade de substituição de Morishima pode ser determinada através dos coeficientes da função de produção estimada.

$$\sigma_{ij}^M = \frac{f_j}{x_i} \frac{F_{ij}}{F} - \frac{f_j}{x_j} \frac{F_{jj}}{F} \quad (24)$$

sendo que:

F é o determinante da matriz Hessiana na fronteira

$$F = \begin{vmatrix} 0 & f_1 & f_2 \\ f_1 & f_{11} & f_{12} \\ f_2 & f_{21} & f_{22} \end{vmatrix};$$

F_{ij} é o cofator associado a f_{ij} ($F_{ij}=F_{ji}$);

f_j representa o produto marginal do insumo j .

x_i é o valor do insumo i ;

x_j é o valor do insumo j .

O fator de decisão das elasticidades é:

(1) se $\sigma_{ij}^M > 0$, o insumo j é substituto de i ;

(2) se $\sigma_{ij}^M < 0$, o insumo i é complementar de j .

Chambers (1988, p.96) destaca que a elasticidade de Morishima é a mais relevante do ponto de vista econômico, já que relaciona a resposta de um insumo i dada uma variação na razão entre os insumos i e j .

Remetendo ao tópico 2.3, onde foram discutidas as teses de “sustentabilidade fraca” e “sustentabilidade forte”, assumir-se-á que, para os casos de $\sigma_{ij}^M \rightarrow \infty$, comprova-se a tese de “sustentabilidade fraca” e consideram-se substitutos perfeitos as emissões com os demais

fatores. Já para o caso de $\sigma_{ij}^M \rightarrow 0$, rejeita-se a hipótese de substitutibilidade perfeita entre emissões e os demais fatores, aceitando a tese de “sustentabilidade forte”.

4.4 VARIÁVEIS E FONTE DE DADOS

Foram utilizados dados de vinte e oito anos, correspondentes ao período de 1990 a 2017, para 161 países signatários do Acordo de Paris, totalizando um painel balanceado com 4508 observações. As variáveis foram extraídas do banco de dados do Banco Mundial¹⁴, e compreendem dados de Produto Interno Bruto (Y), Formação Bruta de Capital Fixo ($FBCF$), Força de Trabalho (L), além da variável Emissões de CO₂ (E). As variáveis utilizadas, suas descrições estatísticas e unidades de medida estão elencadas no Quadro 3. A relação nominal dos países está descrita no anexo 1.

Quadro 3 – Variáveis do modelo

Variável	Unidade
PIB_{it}	Dólares correntes (2018 = 100).
$FBCF_{it}$	Formação Bruta de Capital Fixo em dólares correntes (2018 = 100).
L_{it}	Força de Trabalho Total
E_{it}	Emissões de CO ₂ convertidas em Mil Toneladas de Dióxido de Carbono (CO ₂)
T	Variável contínua (de 1 a 28) Indicando a Tendência Temporal

Fonte: Elaboração própria

As análises de fronteira estocástica serão realizadas para o agregado da amostra (que compreende os 161 países), e para as desagregações realizada pela UNFCCC à época do Protocolo de Quioto (Anexo I e Não-Anexo I). A tabela 1 apresenta as descrições estatísticas de cada variável utilizada nas análises, com suas respectivas médias, desvios-padrão, valores máximos e mínimos. Destacam-se tanto as estatísticas globais quanto as tomadas em separado de acordo com os países que integram ou não o Anexo I.

¹⁴ Disponível em: <<https://data.worldbank.org/indicator/>>.

Tabela 1 – Descrição estatística das variáveis

Variável	MODELO COMPLETO				ANEXO I				NÃO-ANEXO I			
	Média	DP*	Mín	Máx	Média	DP	Mín	Máx	Média	DP	Mín	Máx
lnPIB	23,95	2,24	18,43	30,59	25,85	1,89	21,43	30,59	23,33	1,98	18,43	30,13
lnFBCF	22,40	2,34	14,49	29,26	24,35	1,88	20,11	28,93	21,75	2,10	14,49	29,26
lnL	15,07	1,71	10,37	20,48	15,42	1,60	11,82	18,91	14,95	1,72	10,37	20,48
lnE	1,43	2,33	-4,71	7,89	3,14	1,70	-0,94	7,42	0,87	2,23	-4,71	7,89

Fonte: Elaboração própria

* DP = desvio-padrão

O conjunto de dados utilizado para a aplicação dos modelos empíricos foram tabulados como dados em painel. Hsiao (2003) e Frees (2004) destacam que, ao contrário dos modelos de séries temporais (em que o comportamento de um único indivíduo é analisado ao longo do tempo), ou de dados em *cross-section* (em que vários indivíduos são analisados de maneira estática no tempo), a aplicação de dados em painel permite controlar as variações tanto dos indivíduos quanto do tempo de forma simultânea. A seguir, são apresentados os modelos analisados.

4.4.1 Modelo Empírico Translog

O primeiro modelo empírico de fronteira de produção estocástica a ser estimado é um modelo Translog, no qual é possível incluir interações das variáveis, bem como os quadrados das variáveis, revelando seus efeitos quando utilizadas em maiores escalas. O modelo empírico translog será estimado com um produto (output) e quatro insumos (inputs), conforme Quadro 3, e será definido como:

$$\begin{aligned}
\ln Y_{it} = & \alpha_0 + \beta_f \ln FBCF_{it} + \beta_l \ln L_{it} + \beta_E \ln E_{it} + \beta_T T + \beta_{ff} \frac{1}{2} \ln FBCF_{it}^2 \\
& + \beta_{LL} \frac{1}{2} \ln L_{it}^2 + \beta_{EE} \frac{1}{2} \ln E_{it}^2 + \beta_{TT} \frac{1}{2} T^2 \\
& + \beta_{fL} \frac{1}{2} \ln FBCF_{it} \ln L_{it} + \beta_{fE} \frac{1}{2} \ln L_{it} \ln E_{it} + \beta_{fT} \frac{1}{2} \ln FBCF_{it} T \\
& + \beta_{LE} \frac{1}{2} \ln L_{it} \ln E_{it} + \beta_{LT} \frac{1}{2} \ln L_{it} T + \beta_{ET} \frac{1}{2} \ln E_{it} T - u_{it} \\
& + v_{it}
\end{aligned} \tag{25}$$

em que, T representa variável tempo visando a capturar o efeito do progresso técnico.

Considerando por simetria:

$$\beta_{fL} = \beta_{Lf};$$

$$\beta_{fE} = \beta_{Ef};$$

$$\beta_{fT} = \beta_{Tf};$$

$$\beta_{LE} = \beta_{EL};$$

$$\beta_{LT} = \beta_{TL};$$

$$\beta_{ET} = \beta_{TE}$$

A eficiência técnica será calculada a partir da Equação (20). O logaritmo da produção de um país tecnicamente eficiente é obtido quando se define $u_i = 0$ na Equação (25). O logaritmo da produção de um país ambientalmente eficiente é obtido substituindo E_{it} por E_{it}^F (emissões do país mais eficiente) e assumindo $u_i = 0$ na Equação (25) para obter:

$$\begin{aligned}
\ln Y_{it} = & \alpha_0 + \beta_f \ln FBCF_{it} + \beta_l \ln L_{it} + \beta_E \ln E_{it}^F + \beta_T T + \beta_{ff} \frac{1}{2} \ln FBCF_{it}^2 \\
& + \beta_{LL} \frac{1}{2} \ln L_{it}^2 + \beta_{EE} \frac{1}{2} \ln (E_{it}^F)^2 + \beta_{TT} \frac{1}{2} T^2 + \beta_{fL} \ln FBCF \ln L \\
& + \beta_{fE} \ln FBCF \ln E_{it}^F + \beta_{fT} \ln FBCF T + \beta_{LE} \ln L \ln E_{it}^F \\
& + \beta_{LT} \ln L T + \beta_{ET} \ln E_{it}^F T - u_{it} + v_{it}
\end{aligned} \tag{26}$$

A eficiência ambiental das emissões de CO₂ será calculada através da abordagem de Reinhard (1999), na qual o logaritmo da Eficiência Ambiental (EA) medido por ($\ln EA_{it} = \ln E_{it}^F - \ln E_{it}$) pode ser reescrito através da substituição da Equação (25) na Equação (18) em $\ln EA_{it}$, assim:

$$\ln EA_{it} = \left\{ - \left(\beta_E + \beta_{JE} \sum_j \ln X_{ijt} + \beta_{EE} \ln E_{it} \right) + \left[\left(\beta_E + \beta_{JE} \sum_j \ln X_{ijt} + \beta_{EE} \ln E_{it} \right)^2 - 2\beta_{EE} u_i \right]^{0,5} \right\} / \beta_{EE} \quad (27)$$

onde $\ln X_{ijt}$ representa o vetor de insumos produtivos.

A especificação da eficiência ambiental será baseada em Reinhard (1999), na qual define a eficiência ambiental como uma razão entre mínima emissão possível e emissão observada de CO₂, condicionada aos níveis observados de produção e insumos convencionais. A eficiência ambiental será estimada através dos parâmetros β_E e β_{EE} .

4.4.2 Modelo Empírico Cobb-Douglas

O segundo modelo a ser implementado será uma função de produção neoclássica padrão do tipo Cobb-Douglas com um produto (output) e quatro insumos (inputs).

$$\ln Y_{it} = \alpha_0 + \beta_f \ln FBCF_{it} + \beta_l \ln L_{it} + \beta_E \ln E_{it} + \beta_T T - u_{it} + v_{it} \quad (28)$$

Da mesma forma que no modelo translog, a eficiência técnica será calculada a partir da Equação (20) e a eficiência ambiental, através da Equação (27).

A utilização da função Cobb-Douglas, embora seja uma formalização útil e simples para tirar conclusões, muitas vezes pode revelar resultados inadequados para algumas finalidades, devido às restrições que impõe aos dados. Pittman (1981) argumenta que a imposição de elasticidades constantes de substituição e transformação é bastante restritiva em modelos com mais de um produto ou mais de dois insumos. Neste trabalho, como o modelo inclui três entradas (capital, trabalho e emissões), uma função de produção mais flexível talvez seja mais adequada. Por esse motivo, será testada a hipótese que a função translog se adequa melhor aos dados estudados.

5 RESULTADOS

Existem diversos modelos para dados em painel em que se pode medir a ineficiência de uma firma ou, no caso deste trabalho, de um país¹⁵. Kumbakhar, Lien e Hardaker (2014) destacam que as medidas de eficiência dependem, em grande parte, do modelo escolhido para análise, mas não há uma maneira pré-estabelecida de decisão entre um ou outro modelo. Esse trabalho, conforme mencionado no capítulo 4, terá uma análise restrita a dois modelos: (1) modelo de ineficiência invariante no tempo; e (2) modelo de ineficiência variável no tempo.

Os modelos foram estimados de acordo com as formas funcionais de produção Cobb-Douglas e Translog de três maneiras: a primeira corresponde à estimação dos modelos utilizando a totalidade dos dados, ou seja, incluindo todos os países da amostra e que foi denominado como “Amostra”1; a segunda se refere à regressão dos modelos para os países integrantes do Anexo I, a qual foi classificada como “Amostra 2”; e a terceira, trata de estimar os modelos para os países que não integram o Anexo I e foi definida como “Amostra 3”.

5.1 ESCOLHA DOS MODELOS (INVARIÁVEL X VARIÁVEL NO TEMPO)

Visando a escolha entre os modelos (1) e (2), foi empregada uma série de procedimentos para auxiliar no processo decisório. Inicialmente, foram estimadas as equações (10) e (13) utilizando as especificações Translog e Cobb-Douglas com dados em painel para verificar de que forma os dados se relacionam entre si. Para tanto, foram realizadas as regressões por efeitos fixos e, posteriormente, por efeitos aleatórios. Após, realizou-se o teste robusto de Hausman para decidir qual dos dois efeitos é o mais indicado para o conjunto de dados. A tabela 2 apresenta os resultados das estimações para a amostra 1.

¹⁵ Ver, por exemplo, Kumbhakar e Lovell (2000), Coelli et al. (2005) e Parmeter e Kumbhakar (2014).

Tabela 2 – Resultados Amostra 1

Variável	TRANSLOG		COBB-DOUGLAS	
	(1)EF	(2)EA	(3)EF	(4)EA
lnFBCF	0,333147***	0,397347***	0,4428606***	0,4801103***
lnL	0,935707***	0,575111***	-0,0777171**	0,1293419***
lnE	-0,73935***	-0,67609***	0,2265233***	0,2678123***
T	0,024335**	0,026013***	0,0330426***	0,0247716***
lnFBCF ²	0,004586	0,005398		
lnL ²	0,008854	0,06416***		
lnE ²	-0,09592***	-0,09448***		
T ²	0,000745***	0,000708***		
lnFBCF×lnL ^a	-0,05275***	-0,05948***		
lnFBCF×lnE ^a	0,087904***	0,093106***		
lnFBCF×T ^a	-0,00058	-0,00054		
lnL×lnE ^a	-0,00219	-0,01255		
lnL×T ^a	0,002095***	0,0009		
lnE×T ^a	-0,00239***	-0,00152**		
Constante	10,52855***	10,06118***	12,424745***	8,13377***
ε_{FBCF}	0,377463	0,438593	0,4428606	0,4801103
ε_L	0,101586	-0,83085	-0,0777171	0,1293419
ε_E	0,236998	0,287167	0,2265233	0,2678123
σ_u	0,73328407	-0,82968	0,82308698	0,29585444
σ_e	0,21607635	0,287167	0,23004586	0,23004586
P	0,91954196	0,61531318	0,92754438	0,62320583
Observações	4508	4508	4508	4508
Grupos	161	161	161	161
R2	0,8981	0,8952	0,8842	0,8802
Hausman Robusto		24,45***		18,42***

Fonte: Elaboração própria

*Significativo a 10%; ** Significativo a 5%; *** Significativo a 1%

^a Variáveis que demonstram os efeitos das interações das variáveis

As quatro estimações descritas na tabela 2 apresentaram estatísticas significativas a 1%, e os testes robustos de Hausman, tanto para a função Translog quanto para a Cobb-Douglas, rejeitaram a hipótese nula de que os efeitos individuais dos países são aleatórios. Tais resultados indicam que a utilização de efeitos fixos é a mais indicada para a amostra.

Após a estimação dos modelos, foi realizado o teste de Wald para verificar a significância estatística das variáveis de tempo nos modelos. O teste reportou estatística Chi-quadrada igual a 893,74, com “valor-p” igual a zero, o que rejeita a hipótese nula de que as variáveis são estatisticamente não significativas..

Seguindo com os critérios de escolha do modelo mais adequado, a tabela 3 apresenta os resultados para a amostra 2, que inclui apenas os países integrantes do Anexo I da UNFCCC.

Tabela 3 – Resultados Anexo 1 (Amostra 2)

Variável	TRANSLOG		COBB-DOUGLAS	
	(1)EF	(2)EA	(3)EF	(4)EA
lnFBCF	0,056626	1,100083***	0,552826***	0,65513***
lnL	-0,21487	1,263162**	-0,32799***	0,274626***
lnE	-2,89295***	-2,83744***	0,000205***	0,000105***
T	0,08673***	-0,00168	0,029605***	0,020566***
lnFBCF ²	-0,02307*	-0,07142***		
lnL ²	0,139181*	0,177337**		
lnE ²	0,042362	-0,08348		
T ²	-0,00011	-0,0001		
lnFBCF*lnL	-0,05191*	-0,09929***		
lnFBCF*lnE	0,162091***	0,241995***		
lnFBCF*T	0,002994***	0,004036***		
lnL*lnE	-0,09166	-0,12082		
lnL*T	-0,00382	0,00647**		
lnE*T	-0,00617**	-0,01536***		
Constante	38,21115***	8,410627**	1,694451***	5,326096***
ε_{FBCF}	0,307712	0,307712	0,5528261***	0,6551304***
ε_L	-1,16286	-1,16286	-0,327994***	0,2746263***
ε_E	0,648647	0,648647	0,0002047***	0,0001045***
σ_u	1,45492	0,149784	0,029605	0,020566
σ_e	0,133103	0,133103	0,154697	0,154697
ρ	0,9917	0,558763	0,984194	0,45953
Observações	1120	1120	1120	1120
Grupos	40	40	40	40
R ²	0,9384	0,9277	0,916	0,9047
Hausman Robusto		23,89***		21,83***

Fonte: Elaboração própria.

*Significativo a 10%; ** Significativo a 5%; *** Significativo a 1%

As análises das regressões para a amostra 2 também sugerem que os melhores estimadores são os de efeitos fixos, já que o teste robusto de Hausman reportou a rejeição da hipótese nula de que os efeitos individuais dos países são aleatórios. Assim, presume-se que os efeitos de ineficiência técnica são independentes do tempo para cada país. Também foi testada a significância das variáveis de tempo para a amostra, que acusou estatística Chi-quadrada igual a 214,68, com “p-valor” igual a zero, indicando a rejeição da hipótese nula de que as variáveis são estatisticamente não significativas. Com isso, para a amostra (2), o modelo invariante no tempo também foi rejeitado.

A tabela 4 apresenta os resultados para a amostra 3, que inclui os países Não-Anexo I da UNFCCC.

Tabela 4 – Resultados Não Anexo I (Amostra 3)

Variável	TRANSLOG		COBB-DOUGLAS	
	(1)EF	(2)EA	(3)EF	(4)EA
lnFBCF	0,326768**	0,390237***	0,419045***	0,436258***
lnL	2,309518***	0,721317***	-0,00378	0,159943***
lnE	-0,23122***	0,46488***	0,273069***	0,297429***
T	-0,0335**	0,017105	0,031057***	0,024704***
lnFBCF ²	0,028248***	0,022056**		
lnL ²	-0,03945	0,080646***		
lnE ²	-0,0734***	-0,07351***		
T ²	0,00081***	0,000943***		
lnFBCF*lnL	-0,07485***	-0,07397***		
lnFBCF*lnE	0,072161***	0,080937***		
lnFBCF*T	-0,00187**	-0,00258***		
lnL*lnE	-0,02871***	-0,02276**		
lnL*T	0,006828***	0,003647***		
lnE*T	-0,0009	-0,00067		
Constante	-1,72151	7,902512***	1,322766***	1,044417***
ε_{FBCF}	0,500445	0,512818		
ε_L	0,010496	0,267887		
ε_E	0,231615	1,216251		
σ_u	0,827814	0,29338	0,571802	0,308005
σ_e	0,228622	0,228622	0,246719	0,246719
ρ	0,929132	0,622175	0,843049	0,609149
Observações	3388	3388	3388	3388
Grupos	121	121	121	121
R2	0,8987	0,8965	0,8817	0,8804
Hausman Robusto		11,79		6,13

Fonte: Elaboração própria.

*Significativo a 10%; ** Significativo a 5%; *** Significativo a 1%

A tabela 4 mostra que, para a amostra 3, o teste robusto de Hausman falha em rejeitar a hipótese nula de que as variáveis possuem efeitos aleatórios. Nesse caso, a ineficiência técnica é distribuída aleatoriamente, com média zero, variância constante, e não está correlacionada com os regressores nem com o termo de erro estocástico. Assim, o melhor modelo a ser estimado é o de efeitos aleatórios. Ao teste de Wald para as variáveis de tempo foi atribuída estatística Chi-quadrada igual a 153,12, com “p-valor” igual a zero, indicando que os parâmetros são estatisticamente significativos e, dessa forma, rejeitando a utilização do modelo invariante no tempo.

É possível identificar, pelo menos, dois problemas importantes com o modelo de ineficiência invariante no tempo. Em primeiro lugar, esse modelo trata a ineficiência como constante ao longo dos anos, o que pressupõe que os países não se aperfeiçoam no processo produtivo com o tempo o que é bastante improvável, principalmente, em uma série temporal

longa, como a deste trabalho. Os testes de Wald realizados para cada amostra foram capazes de expor a significância estatística da variação temporal para o modelo, comprovando que as variáveis sofrem influência da tendência temporal. O segundo ponto a destacar é que o modelo invariante no tempo assume que os dois termos de erro (u_i e v_i) são homoscedásticos e, segundo Kumbhakar e Lovell (2000), isso poderá gerar estimativas enviesadas na análise da fronteira estocástica.

5.2 ESCOLHA DA FORMA FUNCIONAL (COBB-DOUGLAS X TRANSLOG)

Descartada a utilização do modelo invariante no tempo e com o intuito de superar suas dificuldades, a análise da fronteira estocástica de produção foi analisada a partir do modelo (2), variável no tempo. Para tanto, fez-se necessária a determinação da forma funcional mais adequada para o processo. Para esse fim, foram aplicados os critérios Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC) para a escolha entre a função Translog e Cobb-Douglas. A tabela 5 apresenta os resultados para todas as amostras.

Tabela 5 – Teste Razão de Verossimilhança dos Modelos

Grupo	ll (tab)	COBB-DOUGLAS			TRANSLOG		
		ll calc	AIC	BIC	ll calc	AIC	BIC
Amostra 1	-4547.97	311.87	-613.74	-581.67	599.48	-1168.96	-1072.75
Amostra 2	-863.77	523.47	-1036.94	-1011.83	697.08	-1364.18	-1288.86
Amostra 3	-3617.64	-2.15	668.30	14.30	44.94	-492.26	-400.34

Fonte: Elaboração própria.

A tabela 5 indica que, para todas as amostras estudadas, a forma funcional que mais se adequa aos dados é a forma menos restritiva (Translog), já que as estatísticas do teste razão de verossimilhança indicaram a rejeição da utilização da função Cobb-Douglas. O critério de decisão se deu pela escolha da forma que obteve menor AIC e BIC. Assim, a análise de fronteira estocástica de produção se dará com a utilização da Equação (25).

5.3 ESTIMAÇÃO DA FRONTEIRA ESTOCÁSTICA

Para a estimação da fronteira de eficiência estocástica, foi utilizado o modelo proposto por Battese e Coelli (1995), calculado através do software STATA 10.0. A inclusão das variáveis de tempo na função produção teve o objetivo de medir o progresso técnico ao longo das quase três décadas estudadas. Da mesma forma, os coeficientes nos termos de interação entre o tempo e cada um dos insumos de produção destinam-se a medir a taxa de viés da mudança técnica ao longo do período. Percebeu-se que os coeficientes de tempo e tempo ao quadrado são positivos e estatisticamente significativos, confirmando a hipótese de progresso tecnológico no período. Os resultados para as três amostras são apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Resultados Fronteira Estocástica

VARIÁVEL	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3
lnFBCF	0,720173**	1,058717***	-0,1518
lnL	1,403331***	2,079244***	0,491063***
lnE	-1,21484***	-2,65005***	0,208925*
T	0,00104*	0,10449***	0,0456***
lnFBCF ²	0,009764**	0,027023**	0,037168***
lnL ²	0,000297*	-0,05763	0,031306**
lnE ²	-0,13325***	-0,40195***	-0,06408***
T ²	0,000301*	0,001161***	0,00105***
lnFBCF*lnL	-0,07567***	-0,16669***	-0,03495***
lnFBCF*lnE	0,097708***	0,154502***	0,029107***
lnFBCF*T	-0,00055	0,004469***	0,002615***
lnL*lnE	0,034981***	0,24086***	0,002987
lnL*T	0,002263*	0,010931***	-0,00151**
lnE*T	-0,0024	-0,01691***	-0,00029
Constante	1,586447	0,679195	13,62918***
η	0,039135***	0,085211***	0,026865***
γ	0,999507***	0,981856**	0,604194**
σ^2	0,213289	0,006654	0,123858
σ_u^2	0,213184	0,006534	0,074834
σ_v^2	0,000105	0,000121	0,049024

Fonte: Elaboração própria.

*Significativo a 10%; ** Significativo a 5%; *** Significativo a 1%

Comparativamente, os coeficientes estimados para os países integrantes do Anexo I (Amostra 2) foram maiores, em módulo, do que para os demais países (Amostra 3), indicando que o progresso técnico foi mais intenso nos países desenvolvidos durante as últimas três décadas. O coeficiente no termo de interação entre FBCF e tempo tem sinal esperado e é estatisticamente significativo para as amostras 2 e 3, porém, a amostra 1 não apresentou relevância estatística nem econômica. Isso significa que, para os países desenvolvidos (amostra 2), o progresso técnico gerou um aumento na formação bruta de capital fixo, que cresceu, em média, 0,45% ao ano durante o período estudado. No mesmo período, o progresso técnico fez com que houvesse um aumento, também, no insumo mão-de-obra, possibilitando um crescimento de, em média, 1% ao ano. Já para os países em desenvolvimento ou subdesenvolvidos, a interação da variável de tempo com a de formação bruta de capital fixo demonstra que o progresso técnico proporcionou um aumento de cerca de 0,26% ao ano em FBCF, representando quase a metade do desempenho dos países desenvolvidos. Contudo, para essa amostra, o progresso técnico, nos países desenvolvidos, representou uma queda na utilização de mão-de-obra nas últimas três décadas, indicando uma redução de 0,15% ao ano.

Quanto às emissões de CO₂, a interação da variável de tempo com a ambiental demonstra que o progresso técnico tem feito com que haja uma redução nas emissões desse gás nos países desenvolvidos, onde a queda foi de 1,7% ao ano. Contudo, nos países em desenvolvimento, não é possível assegurar a mesma tendência, já que a interação entre as variáveis reportou coeficiente estatisticamente não significativo.

Ainda com relação à estimação da fronteira estocástica apresentada na tabela 6, as estatísticas η maiores do que zero e estatisticamente significativas em todas as amostras revelam que os efeitos da ineficiência técnica tendem a diminuir ao longo do tempo. Portanto, não é possível rejeitar a hipótese de que os países aumentam seus níveis de eficiência técnica ao longo do tempo.

Já a estatística γ apresentou valores próximos de 1 nas duas primeiras amostras, resultados semelhantes aos encontrados nos estudos de Battese e Coelli (1995) e Yang e Regis (2001). Tal estatística mede o percentual do resíduo ocasionado por ineficiência técnica. Assim, nas amostras 1 e 2, quase 100% dos resíduos são explicados por fatores de ineficiência técnica, enquanto que na amostra 3 este percentual é de 60,42%. O percentual restante dos resíduos é atribuído às variáveis que não podem ser controladas pelos países, compreendendo os ruídos

aleatórios. Pode-se afirmar, assim, a incidência de ineficiência técnica em todas as amostras estudadas.

5.3.1 Condições de Regularidade

A tabela 7 apresenta a análise das condições de monotonicidade e produtividade marginal decrescente na média dos dados. Os resultados mostram que os produtos marginais (derivadas primeiras) de cada um dos três insumos são positivos, e que a taxa de variação dos produtos marginais (derivadas segundas) está decrescendo, em virtude dos sinais negativos em cada insumo.

Tabela 7 – Resultados Condições Necessárias para Fronteira Estocástica

	MONOTONICIDADE (PRODUTO MARGINAL $\partial Y/\partial X$)			PRODUTIVIDADE MARGINAL DECRESCENTE ($\partial^2 Y/\partial X^2$)		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
FBCF	0,7829882	0,7539053	0,5046000	-0,0078132	-0,0049870	-0,0095001
L	0,1299126	1,3179782	0,2810219	-0,0075583	-0,0097373	-0,0124082
E	0,5081896	0,9978971	0,7780628	-0,3764740	-0,5364035	-0,0405529

Fonte: Elaboração própria.

Cumpridas as condições de monotonicidade, o próximo passo é verificar a condição de quase-concavidade, que foi testada por meio da determinação da matriz Hessiana, resultante das derivadas de segunda ordem da função de produção Translog. Os resultados são apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Resultado teste de quase-concavidade

Hessiano	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
H₁	-0,007813175	-0,00498697	-0,00950009
H₂	0,000048778	0,00011576	0,00013047
H₃	-0,000010436	-0,00003003	-0,00000638

Fonte: Elaboração própria.

A tabela 8 demonstra que a condição de quase-concavidade também foi satisfeita para todas as amostras estimadas. Os resultados mostram que se tratam de matrizes negativas semi-definida, já que os determinantes das de todas as sub-matrizes principais possuem sinais alternados, começando com negativo.

5.3.2 Análise das Elasticidades

A tabela 9 exibe os resultados das elasticidades de produção para os três modelos, determinadas com base na estimação da função de produção translogarítmica. Tais medidas foram calculadas para a média das amostras, e para os anos de 1990, 2000, 2010 e 2017, para que fosse possível verificar a alteração dos produtos marginais de cada insumo sobre o produto ao longo dos anos.

Tabela 9 – Elasticidades de Produção

	AMOSTRA1				AMOSTRA 2				AMOSTRA 3			
	FBCF	L	E	T	FBCF	L	E	T	FBCF	L	E	T
Média	0,783	0,129	0,508	0,006	0,753	1,317	0,997	0,701	0,504	0,281	0,778	0,282
Mín	0,231	-0,348	-0,416	-0,259	-0,273	-0,167	-1,333	0,176	0,117	0,033	0,088	0,075
Máx	1,151	0,766	2,830	0,266	1,277	2,345	1,012	5,77	0,831	0,614	2,941	2,55
Média												
1990	0,775	0,155	0,499	0,008	0,668	1,157	1,496	0,890	0,438	0,307	0,794	0,350
2000	0,776	0,168	0,433	0,007	0,718	1,326	1,020	0,732	0,475	0,301	0,758	0,292
2010	0,791	0,089	0,573	0,006	0,807	1,354	0,839	0,755	0,547	0,256	0,788	0,301
2017	0,798	0,101	0,513	0,005	0,855	1,493	0,459	0,780	0,575	0,251	0,751	0,317

Fonte: Elaboração própria.

Os dados dispostos na tabela 9 revelam que as elasticidades de produção dos quatro insumos são, na média, positivas. Já que as elasticidades indicam o quanto o produto varia quando houver variação em algum insumo, sempre que houver aumentos nos fatores de produção (capital, trabalho, emissões), o PIB também aumentará. Para os países do Anexo 1, o fator que, na média, mais impactou no PIB foi a mão-de-obra, sendo que, se esta aumentar em 1% (mantidos constantes os demais insumos), o PIB aumentará, em média, 1,32%. Já para os

países Não-anexo I, o fator que mais impacta no PIB são as emissões, que, no caso de aumentar em 1% (mantendo os demais insumos constantes), gera um aumento de 0,78% no PIB.

Quanto à amostra 1, os insumos FBCF e trabalho apresentaram pouca alteração em suas elasticidades comparando 2017 a 1990. Contudo, o insumo trabalho, em 2010, viu sua importância reduzida quase à metade em comparação com a década anterior, mas retornando aos níveis dos anos 90 em 2017. Outro ponto de destaque são as oscilações da elasticidade das emissões de CO₂ sobre o produto, apresentado uma queda de 1990 para 2000, mas invertendo essa tendência na década seguinte. De 2010 para 2017, novamente, as emissões apresentam decréscimo na sua ligação com o PIB, podendo ser reflexo das políticas climáticas implementadas pelo Acordo de Paris.

Os países da amostra 2, apresentam aumento gradual das elasticidades de FBCF e trabalho, tendo aumentado 28% e 29%, respectivamente, seus impactos no PIB. O trabalho (L) apresenta maior elasticidade do que o capital (FBCF) em todos os períodos. Já no que se refere às emissões de CO₂, há uma queda intensa (aproximadamente 70%) no período estudado. Em 1990, para cada 1% no aumento das emissões, o PIB crescia em torno de 1,49%. Já em 2017, essa demanda por emissões, que era elástica até os anos 2000, passa a ser inelástica.

Os resultados para a amostra 2 são particularmente interessantes, porque, apesar de terem demonstrado que a dependência das emissões vem sendo reduzida ao longo do tempo, a média das elasticidades no período ainda supera a média dos países em desenvolvimento, comprovando a importância das teorias de justiça ambiental, as quais afirmam que os países ricos se desenvolveram por meio da utilização intensiva de emissões e que devem ser, de alguma forma, responsabilizados por essa dívida ambiental histórica. Daí a iniciativa da UNFCCC de separar os grupos para implementação de políticas climáticas, sendo que os países desenvolvidos devem ser responsáveis pelos subdesenvolvidos, fornecendo a estes as condições financeiras e tecnológicas para se desenvolverem sem comprometer o meio ambiente.

Já nos países em desenvolvimento (amostra 3), ao contrário da amostra 2, o fator trabalho tem o menor efeito sobre o PIB em todos os anos. A variável com maior implicação sobre o produto são as emissões, que apresenta um decréscimo de 1990 a 2017, porém em proporções muito aquém das observadas nos países desenvolvidos. Nessas circunstâncias, levando em conta o ano de 2017, uma redução em 1% nas emissões dos países da amostra 3 ocasionaria uma queda de 75% no PIB, enquanto que nos países desenvolvidos o sacrifício econômico seria de 45%.

O que se pode destacar aqui é o fato de que o insumo trabalho, que já apresentava elasticidade muito abaixo dos países desenvolvidos, tem se reduzido paulatinamente durante todo o período, ratificando a análise do coeficiente de interação tempo-trabalho, que demonstrou que o progresso técnico tem ocasionado uma redução da utilização de trabalho. Esse é um problema importante e que deve ser analisado com mais detalhes em trabalhos futuros, já que, nos países subdesenvolvidos, a densidade populacional costuma ser maior que nos desenvolvidos, e uma redução da demanda por trabalho pode acarretar altas taxas de desemprego, prejudicando a economia e a qualidade de vida daquelas nações.

Considerando a soma das elasticidades dos quatro insumos, é gerada uma elasticidade de escala estimada, que indicou presença de retornos crescentes de escala em todas as amostras. Contudo, o desempenho dos países subdesenvolvidos representa menos da metade do apresentado pelos países desenvolvidos. Para estes, um aumento de 1% nos insumos gera 3,77% de acréscimo no produto, enquanto que, para aqueles, esse acréscimo é de apenas 1,84% em média. Para a amostra 1, a elasticidade de escala se manteve relativamente próxima da média (1,42). A amostra 3 também apresenta pouca oscilação ao longo dos anos, mantendo-se próxima a 1,85. Já para a amostra 2, a elasticidade de escala tem se reduzido gradualmente, passando de 4,21 em 1990 para 3,58 em 2017, fato decorrente da grande redução na elasticidade do fator emissões de CO₂.

Na tabela 10 são apresentadas elasticidades de substituição de Morishima, calculadas pela Equação (24), que corresponde à resposta de um insumo i dada uma alteração na razão entre o insumo i e outro insumo j . Valores negativos indicam complementariedade entre os insumos, enquanto que os positivos revelam uma relação de substitutibilidade entre eles.

Tabela 10 – Elasticidade de Substituição dos Insumos

(continua)

AMOSTRA	ELASTICIDADE	1990	2000	2010	2017	TOTAL
1	σ_{FL}^M	4,36E-05	4,59E-05	4,17E-05	4,41E-05	4,34E-05
	σ_{LF}^M	-2,57E-04	-2,56E-04	-2,57E-04	-2,56E-04	-2,57E-04
	σ_{FE}^M	6,11E-07	5,59E-07	6,18E-07	5,75E-07	5,99E-07
	σ_{EF}^M	-6,84E-07	-6,79E-07	-6,81E-07	-6,81E-07	-6,81E-07
	σ_{LE}^M	-7,40E-05	-6,76E-05	-7,46E-05	-6,91E-05	-7,25E-05
	σ_{EL}^M	2,01E-05	2,09E-05	1,94E-05	0,00002	2,01E-05

Tabela 10 – Elasticidade de Substituição dos Insumos

(continuação)

AMOSTRA	ELASTICIDADE	1990	2000	2010	2017	TOTAL
2	σ_{FL}^M	-0,0013	-0,0017	-0,0013	-0,0014	-0,0014
	σ_{LF}^M	-0,0105	-0,0112	-0,0105	-0,0106	-0,0106
	σ_{FE}^M	-0,0443	-0,0400	-0,0445	-0,0408	-0,0432
	σ_{EF}^M	0,2787	0,2792	0,2782	0,2792	0,2787
	σ_{LE}^M	-0,4900	-0,4521	-0,4984	-0,4702	-0,4823
	σ_{EL}^M	-0,21022	-0,22649	-0,20515	-0,2153	-0,2130
3	σ_{FL}^M	-2,34E-06	-2,56E-06	-2,27E-06	-2,40E-06	-2,37E-06
	σ_{LF}^M	9,58E-06	9,44E-06	9,54E-06	9,53E-06	9,55E-06
	σ_{FE}^M	5,04E-06	4,50E-06	5,07E-06	4,68E-06	4,89E-06
	σ_{EF}^M	-4,81E-06	-4,76E-06	-4,77E-06	-4,77E-06	-4,78E-06
	σ_{LE}^M	-1,19E-06	-1,07E-06	-1,19E-06	-1,10E-06	-1,16E-06
	σ_{EL}^M	3,40E-07	3,61E-07	3,29E-07	3,41E-07	3,43E-07

Fonte: Elaboração própria.

Considerando a amostra 1, o valor negativo de σ_{LF}^M , enquanto que σ_{FL}^M é positivo, indica que FBCF pode substituir o insumo trabalho, embora o trabalho não possa substituir o capital, já que sua relação é de complementariedade. Além disso, $\sigma_{FE}^M > 0$, indica que a formação de capital pode ser substituída por emissões, mas que estas são apenas complementares àquelas. Já os valores de σ_{EL}^M e σ_{LE}^M indicam que as emissões podem ser substituídas por mão-de-obra, mas não o contrário.

Os resultados para a amostra 2 indicam uma relação complementar entre capital e trabalho nos dois sentidos, já que σ_{FL}^M e σ_{LF}^M possuem sinais negativos. Ainda é possível visualizar que as emissões podem ser substituídas por FBCF, visto que $\sigma_{EF}^M > 0$, mas que FBCF não pode ser substituída por emissões de CO₂. Nesse caso, as emissões são complementares a FBCF e, também complementares entre si com relação à mão-de-obra, dados σ_{EL}^M e σ_{LE}^M menores que zero.

A exemplo da amostra 1, os países da amostra 2 também apresentam elasticidades de substituição muito próximas de zero, indicando que a relação entre os fatores está muito mais próxima da complementariedade do que da substitutibilidade. Se fossem analisados apenas os sinais das elasticidades, seria possível afirmar a possibilidade da mão-de-obra substituir a formação de capital. Contudo, como a magnitude da estatística de Morishima é muito pequena (próxima a zero), os insumos devem ser considerados apenas complementares um do outro. De

forma análoga, à medida que as elasticidades apresentam sinais negativos, é possível afirmar que a relação entre emissões e mão-de-obra é de complementaridade nos dois sentidos. Finalmente, a formação bruta de capital fixo pode ser substituída por emissões, porém, FBCF é apenas complemento das emissões, não podendo substituí-las.

O que se pode destacar da análise das elasticidades de substituição é que não se pode afirmar que capital e trabalho sejam, efetivamente, substitutos para as emissões de CO₂. Embora as elasticidades de substituição tenham apresentado sinais positivos em σ_{FE}^M nas amostras 1 e 3, a relação entre FBCF e emissões está muito mais próxima da complementaridade do que da substitutibilidade, já que os valores calculados estão mais próximos de zero. Remetendo à hipótese de “sustentabilidade fraca” entre emissões e os demais fatores, a análise das elasticidades de substituição permite refutar essa tese, e sustenta as teorias que defendem a “sustentabilidade forte”. Fica evidente, assim, que as emissões são fatores determinantes para o nível de produção e que, com a tecnologia de produção existente, não é possível reduzir o nível de emissões sem que a produção seja comprometida.

Dessa forma, a possibilidade de troca entre os três fatores visando a uma possível redução das emissões é muito baixa. Como se trata de complementos, em um eventual caso de mitigação mais severa das emissões devido, por exemplo, a risco de catástrofes ambientais, os resultados econômicos são bastante preocupantes. Da mesma forma, o aumento da utilização de capital e trabalho incentiva uma maior utilização de emissões para que se mantenham as proporções dos insumos.

A análise das elasticidades não contraria o fato de que o progresso técnico foi responsável pela redução das emissões (principalmente nos países desenvolvidos), contudo, o avanço tecnológico não está sendo tão bem-sucedido no que diz respeito ao fato de tornar os processos produtivos mais eficientes do ponto de vista das emissões, já que utilização de recursos fósseis, combinada com os demais insumos, ainda é considerada fator determinante para produção e para o crescimento da economia dos países.

5.3.3 Estimação dos Escores de Eficiência Técnica e Eficiência Ambiental

Conforme verificado nas análises anteriores, a utilização das emissões como insumo produtivo tem ligação direta com o produto final e também se relaciona de forma complementar com os demais fatores de produção. Verificou-se, também, que o progresso técnico vem

desempenhando um papel importante nas funções de produção dos países, sobretudo nos países desenvolvidos. A partir da fronteira de produção estimada e apresentada anteriormente na tabela 6, foram calculados os escores de eficiência técnica e ambiental para as três amostras. A tabela 11 apresenta as estatísticas descritivas dos resultados.

Tabela 11 – Escores das Eficiência Técnica e Ambiental por Amostra

ANO	TÉCNICA			AMBIENTAL		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
Média	0,37230	0,47424	0,41478	0,19545	0,10996	0,43672
Mínimo	0,05932	0,03816	0,06659	0,02609	0,01167	0,06466
Máximo	1,00	1,00	1,00	0,94075	0,21516	1,14134
1990	0,28282	0,36716	0,29576	0,14234	0,0791	0,32532
2000	0,34840	0,44670	0,38347	0,18895	0,10055	0,41741
2010	0,41594	0,52612	0,47288	0,21393	0,12489	0,48206
2017	0,46306	0,57972	0,53359	0,23195	0,14145	0,54334

Fonte: Elaboração própria.

Através da tabela 11, verifica-se que as médias das eficiências aumentam ao longo dos anos. Quanto à eficiência técnica, a amostra 3 foi a que apresentou melhor evolução no período estudado, com crescimento de 80% na média, enquanto que para a amostra 2 o aumento de eficiência foi de 58%. Tal resultado pode estar associado a um efeito de *catching up* (convergência), o que implica a redução da distância tecnológica entre os países mais atrasados em relação aos países desenvolvidos (BAUMOL et al, 1994). Contudo, essa afirmação se dá de maneira muito superficial, já que tais efeitos necessitam de muitas outras evidências e de uma metodologia específica para análise. Além disso, o cálculo da eficiência técnica se dá de maneira comparativa entre os componentes da amostra e, por isso, é demasiado precipitado fazer afirmações mais contundentes acerca dos efeitos de convergência, ficando a análise mais aprofundada para trabalhos futuros.

Quanto às eficiências ambientais, os países da amostra 2 foram os que apresentaram maior evolução ao longo dos anos, tendo aumentado seus escores médios em 79% nos últimos 28 anos. Outro fator a destacar nesse grupo é a distância dos escores entre os países, revelando uma variância de eficiência ambiental muito pequena, demonstrando que os países dessa amostra possuem característica bastante similares nas emissões. Já nos países da amostra 3, os escores de eficiência registraram aumento de 67% no período, e a variação entre países é muito

maior do que na amostra 2, evidenciando características bastante heterogêneas entre os países da amostra no que diz respeito às emissões de CO₂.

Além disso, pode-se destacar que maiores escores de eficiência técnica não implicam, necessariamente, maiores escores em eficiência ambiental nas amostras, fato que será apresentado com mais detalhes na sequência da análise. Nota-se que os países desenvolvidos possuem eficiência técnica média superior aos países em desenvolvimento. Entretanto, quando comparadas as eficiências ambientais médias, os maiores escores são dos países da amostra 3. Pode-se, assim, refutar a hipótese de que países mais eficientes na aplicação dos recursos produtivos são, também, os mais eficientes na utilização.

A tabela 12 dispõe, para a amostra 1, o *ranking* dos 40 países com maiores escores de eficiência técnica. Ao lado dos escores médios de eficiência técnica, apresentam-se os escores médios de eficiência ambiental.

Tabela 12 – *Ranking* de Eficiência Técnica

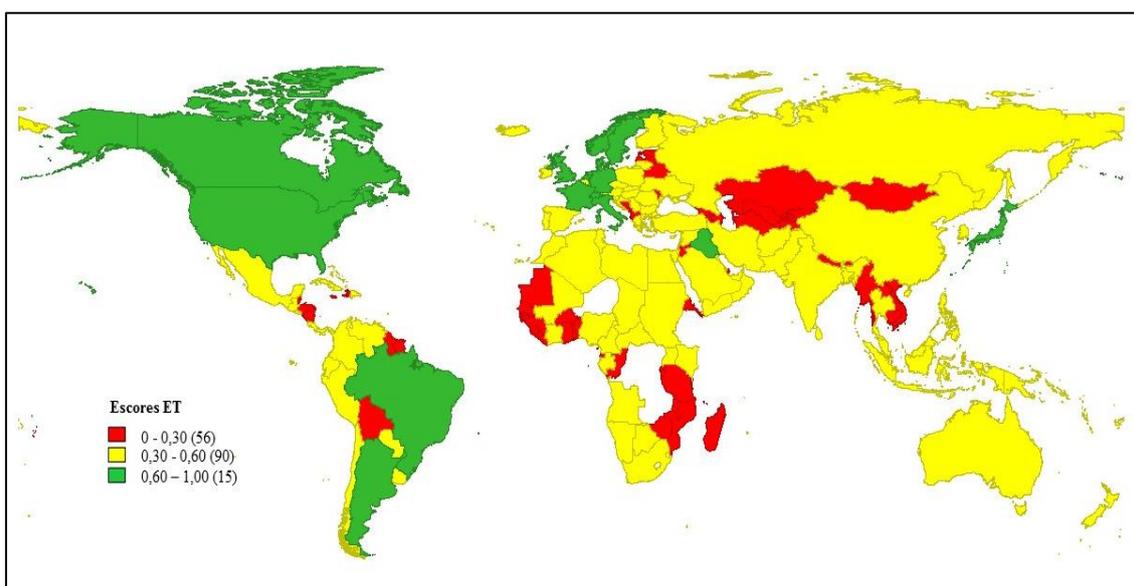
País	ET	Rank ET	EA	Rank EA	País	ET	Rank ET	EA	Rank EA
Reino Unido***	0,81	1	0,25	27	Irlanda***	0,56	21	0,22	45
Estados Unidos***	0,80	2	0,20	63	Finlandia***	0,55	22	0,21	52
Italia***	0,74	3	0,23	40	Cuba	0,54	23	0,24	35
Franca***	0,72	4	0,23	42	Israel	0,54	24	0,21	55
Alemanha***	0,70	5	0,21	59	Grecia***	0,54	25	0,20	65
Suica***	0,70	6	0,28	19	Russia***	0,53	26	0,15	109
Iraque	0,69	7	0,26	22	Portugal***	0,53	27	0,21	57
Suecia***	0,69	8	0,27	20	Nova Zelândia***	0,52	28	0,22	51
Brasil	0,67	9	0,22	46	Luxemburgo***	0,51	29	0,24	34
Noruega***	0,66	10	0,26	23	Islandia***	0,51	30	0,30	15
Dinamarca***	0,65	11	0,25	24	Australia***	0,50	31	0,16	98
Holanda***	0,63	12	0,22	50	Nigeria	0,49	32	0,20	61
Japao***	0,63	13	0,18	78	Arabia Saudita	0,49	33	0,16	101
Argentina	0,62	14	0,22	48	Emirados Arabes	0,49	34	0,18	82
Canada***	0,61	15	0,19	74	Chade	0,48	35	0,66	1
Espanha***	0,60	16	0,20	67	Africa do Sul	0,48	36	0,16	105
Mexico	0,59	17	0,19	73	Polonia***	0,47	37	0,16	104
Belgica***	0,58	18	0,21	60	Colombia	0,47	38	0,19	71
Austria***	0,58	19	0,22	49	Turquia***	0,46	39	0,16	102
Uruguai	0,56	20	0,31	12	Kuait	0,46	40	0,18	79

Fonte: Elaboração própria.

*** Integrantes do Anexo I

A tabela 12 demonstra a discrepância entre as eficiências técnica e ambiental nos países da amostra 1. Classificada por ordem de eficiência técnica, é possível perceber que, dos países desenvolvidos, o Reino Unido¹⁶ é o país que apresentou maior escore de eficiência técnica entre todos os países da amostra. Contudo, a eficiência ambiental média é apenas a 27ª colocada. Dos países desenvolvidos, os que apresentaram melhores colocações no *ranking* da eficiência ambiental foram Islândia (15ª), Suíça (19ª), Suécia (20ª), Noruega (23ª) e Dinamarca (24ª). O *ranking* completo dos países está descrito no apêndice A. A figura 2 apresenta a distribuição espacial dos escores médios de eficiência técnica.

Figura 2 – Distribuição Espacial das Eficiências Técnicas Estimadas



Fonte: Elaboração própria

As áreas em verde na figura 2 demonstram que apenas 15 países apresentaram escore de eficiência técnica acima de 0,60 e se concentram, basicamente, nos continentes Americano e Europeu. Além disso, é possível verificar a incidência de escores técnicos abaixo de 0,30 em 56 países (em vermelho). Nota-se uma concentração de países com baixa eficiência técnica nas regiões central e meridional do continente asiático, e nas regiões oriental e ocidental do

¹⁶ Apesar de ser um Estado Soberano formado por Inglaterra, Escócia, País de Gales e Irlanda do Norte, o Reino Unido é tratado como agregado pela UNFCCC.

continente Africano. Na América do Sul apenas Bolívia, Venezuela e Suriname apresentaram eficiência técnica abaixo de 0,30.

O *Department for Environment, Food and Rural Affairs of UK* – DEFRA (2013) publicou, em 2013, um relatório de Indicadores de Desenvolvimento Sustentável (SDE, da sigla em inglês), no qual atribui aos setores de fornecimento de energia e transportes o maior volume de emissões de CO₂ (DEFRA, 2013, p. 77), rebaixando-lhes, portanto, a eficiência ambiental. Importante destacar que o escore de eficiência do Reino Unido apresentou evolução ao longo dos anos. Contudo, no que diz respeito à sua colocação no ranking dos mais eficientes, passou da 17ª posição em 1990 para 32ª em 2017, indicando que sua evolução no período ficou aquém do que de outros países da amostra.

Para os Estados Unidos, que caíram de 36º para 73º lugar no ranking dos mais eficientes de 1990 a 2017, Vaninsky (2010) sugere que uma melhora na eficiência ambiental em relação às emissões de CO₂ não ocorre porque as taxas de redução das emissões ao longo dos anos não são suficientemente grandes para compensar o crescimento de variáveis como o PIB e consumo de energia. Portanto, enfatiza-se a necessidade de restringir as quantidades absolutas de emissões nesse país. Da mesma forma, no Reino Unido, Ramseur (2017) destaca que os setores mais problemáticos são o de energia e transporte. Conforme se sugere, uma melhora no desempenho ambiental do país passa por uma melhora na eficiência desses setores.

Dos países apresentados como mais bem colocados no *ranking* de eficiência técnica, destaca-se, em 9º lugar, o Brasil, sendo o mais bem classificado entre os países em desenvolvimento. No entanto, o desempenho ambiental do país foi bastante baixo, tendo saído da 25ª colocação em 1990 para a 62ª em 2017. Para uma possível melhora nos escores de eficiência ambiental, o país deve evoluir no setor agrícola, através da produção sustentável de alimentos, no setor de transportes, apresentando alternativas às fontes fósseis de combustíveis, implantação de usinas de bioenergia e expansão da capacidade eólica e solar na geração de energia (COMMIT, 2018).

A tabela 13 apresenta o ranking dos 40 países com melhor desempenho médio de eficiência ambiental.

Tabela 13 - *Ranking* de Eficiência Ambiental

(continua)

País	ET	Rank ET	EA	Rank EA	País	ET	Rank ET	EA	Rank EA
Chade	0,48	35	0,66	1	Serra Leoa	0,24	135	0,26	21
Vanuatu	0,30	103	0,55	2	Iraque	0,69	7	0,26	22
Ilhas Salomao	0,33	90	0,50	3	Noruega***	0,66	10	0,26	23
Comores	0,27	116	0,49	4	Dinamarca***	0,65	11	0,25	24
Africa Central	0,32	96	0,46	5	Laos	0,27	113	0,25	25
Burundi	0,26	125	0,40	6	Costa Rica	0,46	41	0,25	26
Tonga	0,24	130	0,40	7	Reino Unido***	0,81	1	0,25	27

Tabela 13 - *Ranking* de Eficiência Ambiental

(continuação)

Mali	0,39	60	0,36	8	Afeganistao	0,34	81	0,25	28
Gambia	0,26	119	0,33	9	Paraguai	0,41	55	0,25	29
Barbados	0,44	46	0,32	10	Uganda	0,33	93	0,25	30
Suazilandia	0,37	67	0,32	11	Costa Do Marfim	0,43	50	0,25	31
Uruguai	0,56	20	0,31	12	Namibia	0,37	69	0,24	32
Ruanda	0,29	109	0,31	13	Camaraes	0,39	64	0,24	33
Guine-Bissau	0,19	148	0,30	14	Luxemburgo***	0,51	29	0,24	34
Islandia***	0,51	30	0,30	15	Cuba	0,54	23	0,24	35
Fiji	0,36	76	0,29	16	Malawi	0,25	127	0,24	36
Belize	0,29	107	0,28	17	Malta***	0,38	65	0,24	37
Bahamas	0,43	47	0,28	18	Sudao	0,42	52	0,23	38
Suica***	0,70	6	0,28	19	Burkina Faso	0,28	112	0,23	39
Suecia***	0,69	8	0,27	20	Italia***	0,74	3	0,23	40

Fonte: Elaboração própria.

*** Integrantes do Anexo I

Os dados apresentados na tabela 13 mostram que os mais bem classificados quanto aos escores de eficiência ambiental foram na maioria países subdesenvolvidos. O primeiro país desenvolvido no *ranking* é a Islândia, na 15ª colocação. Contudo, o único país desenvolvido cuja classificação evoluiu foi Luxemburgo, que deixou a 40ª posição em 1990 para ocupar a 24ª colocação em 2017, demonstrando um melhor desempenho em relação aos seus semelhantes.

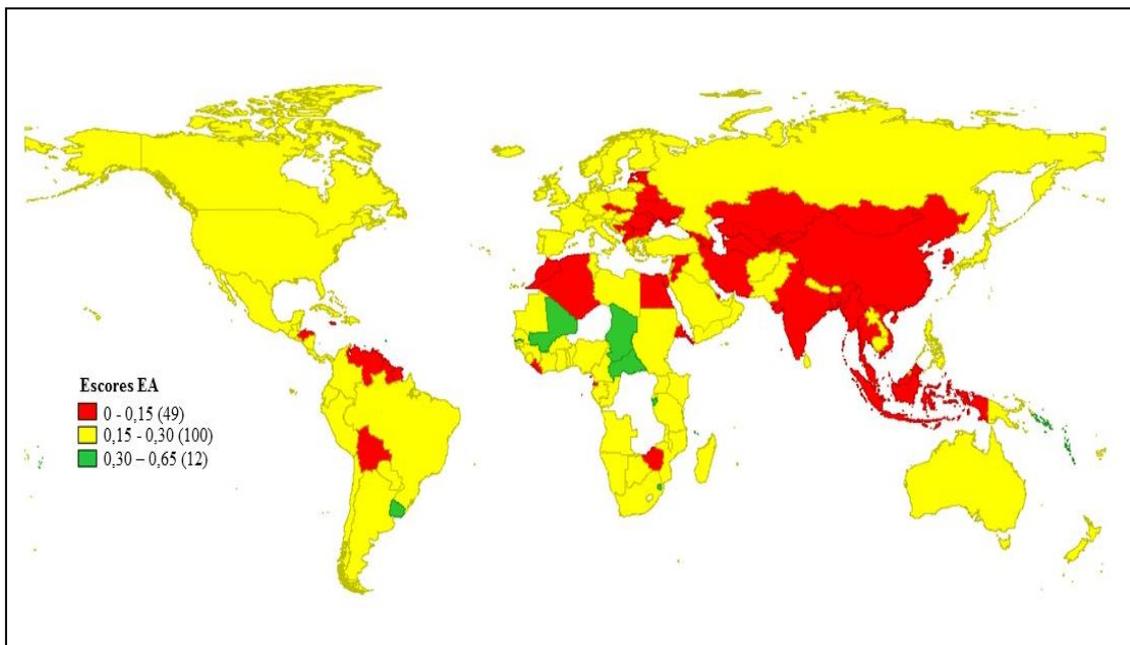
Assim como os demais países desenvolvidos (exceto Luxemburgo), o Canadá também apresentou queda no ranking de eficiência ambiental, caindo de 60º em 1990 para 79º em 2017, resultado que ratifica pesquisa de Boyd (2001), segundo a qual o país figurava na 27ª posição entre 29 países da OCDE. Além disso, destaca que o país, apesar dos compromissos firmados

com a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, apresenta crescimento nas suas emissões ao longo dos anos. Esse fato se traduziu no baixo desempenho ambiental captado por este trabalho.

Sobre o caso da Suécia, que, ainda que tenha perdido 7 colocações no *ranking* dos mais eficientes, apresentou evolução tanto nos escores técnicos quanto ambientais de 1990 para 2017. Minx et. al (2008) argumentam que esse país foi um dos primeiros a se comprometer com políticas industriais de baixo carbono e que sua indústria apresentou crescimento na eficiência de emissões desde os anos 1990. Também se aponta uma evolução na eficiência das emissões em outros setores como consumo das famílias e alimentação. Contudo, destaca-se que, para alcançar níveis mais eficientes de CO₂, é necessário combater os altos índices de emissões apresentados pelos setores de “agricultura, silvicultura e pesca” e, de maneira mais intensa, o setor de transportes.

A China, país que mais contribuiu para as emissões totais desde 1990, ocupa a 72^a colocação no *ranking* de eficiência técnica e é a 152^a colocada quanto à eficiência ambiental, o que demonstra uma situação preocupante para as pretensões mundiais de redução nos níveis de emissões. Além do baixo desempenho médio de suas emissões, o país ainda perdeu 19 posições nos últimos 27 anos, ficando à frente apenas de Myanmar, Mongólia, Turquemenistão e Catar. A figura 3 apresenta como os escores médios de eficiência ambiental estão distribuídos no espaço.

Figura 3 – Distribuição Espacial dos Escores Ambientais



Fonte: Elaboração própria

Não bastasse o péssimo desempenho ambiental da China, há nele um agravante relacionado às mudanças climáticas causadas pelas emissões de CO₂. Os países destacados em vermelho na figura 3 mostram que os escores mais baixos de eficiência ambiental estão localizados, majoritariamente, no continente asiático, demonstrando que as políticas climáticas em nível mundial devem ter um cuidado especial com essa região. Também se percebe uma concentração de países com baixos escores ambientais na Europa Oriental (Bielorrússia, Estônia, Ucrânia, Letônia, Romênia e Bulgária) e na América do Sul (Venezuela, Bolívia, Suriname e Guiana).

A figura 3 mostra, ainda, que a maioria dos países apresentaram escore de eficiência ambiental média entre 0,15 e 0,30 e que apenas 15 países alcançaram escores acima de 0,30, a maioria deles localizada no continente africano e na Oceania. No continente americano, o único país com desempenho superior foi o Uruguai, que apresentou escore ambiental médio de 0,56 e ocupa a 20ª colocação no *ranking* dos mais eficientes.

A análise dos resultados permitiu a refutação da hipótese de que os países com maiores escores de eficiência técnica possuem, também, maiores escores de eficiência ambiental. As

nações com maiores escores ambientais, em geral, não apresentaram o mesmo desempenho quanto à eficiência técnica. Tampouco os altos escores de eficiência técnica, principalmente dos países desenvolvidos, proporcionaram melhores desempenhos ambientais no que diz respeito às emissões de CO₂.

À luz das responsabilidades que devem ser impostas aos países quanto às emissões de CO₂, observa-se que os países do Anexo I do Protocolo de Quioto não podem deixar de ser cobrados pelo fato de seus desempenhos econômicos terem deixado uma dívida ambiental histórica, nem pelo fraco desempenho no que diz respeito à eficiência ambiental, já que não apresentaram melhora significativa ao longo dos anos. Contudo, nas últimas três décadas, países como China, Brasil, Irã, África do Sul, Arábia Saudita e Índia vêm demonstrando desempenho igualmente degradante, sobrecarregando o meio ambiente com emissões que poderiam ser diminuídas, se não evitadas, através de processos produtivos mais eficientes. Isso posto, é justo que esses países também devam obedecer a limites quanto a seus níveis de emissão e engajar-se em políticas climáticas que auxiliem na mitigação das emissões de gases poluentes.

6 CONCLUSÃO

A partir da análise da fronteira, ficou evidente que os países estão longe de serem eficientes quanto às emissões de CO₂ e que um melhor desempenho ambiental passa por maiores níveis de progresso técnico. Contudo, observou-se que os países que possuem maiores eficiências técnicas não obtêm o mesmo desempenho quanto às eficiências ambientais devido, em grande parte, ao nível de emissões históricas de CO₂, isto é, os países desenvolvidos (que possuem altos escores de eficiência técnica), a pesar de apresentarem redução no uso de emissões ao longo dos anos, ainda não conseguem se equiparar a alguns países em desenvolvimento no que diz respeito às performances ambientais, já que a média das emissões no período estudado extrapola a média dos países menos desenvolvidos.

Além disso, para os países desenvolvidos, o progresso técnico proporcionou um aumento na utilização de capital (FBCF) e de mão-de-obra (L), cujas taxas de crescimento corresponderam a 0,45% e 1% ao ano, respectivamente. Para os países em desenvolvimento, constatou-se que o progresso técnico proporcionou um aumento de cerca de 0,26% ao ano em FBCF e uma queda na utilização de mão-de-obra nas últimas três décadas, indicando uma redução de 0,15% ao ano. As interações entre a variável de tempo e a de emissões de CO₂ indicaram que o progresso técnico proporcionou uma redução nas emissões nos países industrializados, contudo, para os países em desenvolvimento parece não ter surtido nenhum efeito, já que o coeficiente de interação não foi estatisticamente significativo.

O cálculo das elasticidades de produção permitiu garantir a condição de monotonicidade da função de produção, indicando que todos os insumos afetam positivamente o produto. Além disso, pode-se perceber que, na média, um aumento em 1% no insumo capital (*ceteris paribus*) proporciona um acréscimo de 0,78% no PIB dos países industrializados e 0,5% no PIB dos países em desenvolvimento. Já o efeito de 1% de aumento na mão-de-obra gera um crescimento de 1,3% no produto dos países desenvolvidos (amostra 2), e apenas 0,28% no produto dos países em desenvolvimento (amostra 3). O PIB dos países desenvolvidos cresce, em média, 1% a cada 1% de aumento nas emissões, enquanto que nos países emergentes cresce 0,78%. Esses resultados sugerem que, no período estudado, os países desenvolvidos foram mais intensivos em emissões do que os países em desenvolvimento. Entretanto, percebeu-se uma redução significativa na elasticidade do produto em relação às emissões ao longo dos anos. Em 2017 (último ano de análise), ela corresponde a apenas 64% da elasticidade dos países desenvolvidos.

Isso demonstra que o impacto das emissões sobre o PIB, nos países desenvolvidos, tem-se reduzido ao longo dos anos, o que se explica, parcialmente, pelo efeito do progresso técnico. Os países em desenvolvimento apresentaram elasticidade do produto praticamente constante ao longo dos anos, o que também confirma o resultado da interação do progresso técnico, que não foi significativo para essa amostra (amostra 3). Aqui, pode-se intuir que os países industrializados, apesar de terem deixado uma dívida ambiental histórica por terem se desenvolvido com tecnologias intensivas em emissões, estão conseguindo criar processos produtivos menos poluentes. Já os países em desenvolvimento ainda têm sua produção muito atrelada às emissões de poluentes.

As elasticidades de substituição entre fatores confirmam a hipótese de “sustentabilidade forte” diante das emissões. Os resultados mostram elasticidades muito próximas de zero, indicando que os fatores produtivos não são substitutos, e sim, complementos uns dos outros. Logo, não é possível, por exemplo, aumentar o uso de capital para reduzir o nível das emissões sem que haja comprometimento do crescimento econômico. Visto que não é possível substituir a utilização de capital natural por outro fator produtivo, a perspectiva de redução das emissões fica restrita às ações do progresso técnico, sobretudo nos países desenvolvidos.

A estimação das eficiências técnicas permitiu verificar que os países integrantes do Anexo I ocupam as primeiras colocações no *ranking*, e que, em 9º lugar, o Brasil é o segundo mais bem classificado dentre os países em desenvolvimento, ficando atrás apenas do Iraque, que ocupa a 7ª colocação. Reino Unido e Estados Unidos lideram o *ranking* de eficiência técnica, entretanto têm desempenho bastante inferior quanto à eficiência ambiental, com base na qual ocupam a 27ª e 63ª colocações, respectivamente. Comparando os *rankings* de eficiência técnica e ambiental, destacam-se o Uruguai (20º em ET, e 12º em EA), Islândia (30º em ET e 15º em EA) e Chade (35 em ET e 1º em EA).

Apenas 15 países apresentaram escore de eficiência técnica superior a 0,6. Os melhores desempenhos estão localizados nos continentes americano e europeu. Além disso, 56 países possuem escores de ET menores do que 0,3 e estão localizados majoritariamente nas regiões central e meridional do continente asiático, e nas regiões oriental e ocidental do continente Africano. Na América do Sul apenas Bolívia, Venezuela e Suriname apresentaram eficiência técnica abaixo de 0,30.

Os escores estimados para a eficiência ambiental mostra que os países com melhores performances em emissões são países não desenvolvidos. Contudo, os escores apresentam

valores muito baixos, apenas Chade, Vanuatu e Ilhas Salomão apresentaram valores acima de 0,50, sendo que nenhum país apresentou valor igual a um, que indicaria eficiência total nas emissões. Dos países desenvolvidos, os melhores classificados no *ranking* de eficiência ambiental foram a Islândia (15^a colocada com escore 0,30), Suíça (19^a colocada com escore 0,28), Suécia (20^a colocada com 0,27 de escore). Reino Unido, como já mencionado, ocupa a 27^a colocação com escore auferido de 0,25.

A China, que foi o país que mais gerou emissões de CO₂ no período, ocupa a 72^a colocação no *ranking* de eficiência técnica, e é a 152^a colocada quanto à eficiência ambiental, o que demonstra uma situação preocupante para as pretensões mundiais de redução nos níveis de emissões, pois, não bastasse o montante de poluição gerada e a baixa performance média de suas emissões, o país ainda perdeu 19 posições nos últimos 27 anos. Os países com os menores escores de eficiência ambiental (menores do que 0,15) estão localizados próximos no continente asiático, próximos à China, demonstrando que essa é uma área crítica de emissão de poluentes e que deve ser tratada como prioridade para as políticas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Além dos países asiáticos, também se percebeu uma concentração maior de países com escores baixos na Europa Oriental (Bielorrússia, Estônia, Ucrânia, Letônia, Romênia e Bulgária) e na América do Sul (Venezuela, Suriname e Guiana).

REFERÊNCIAS

- AIGNER, D. J.; LOVELL, C. A. K. SCHMIDT, P. Formulation and estimation of stochastic frontier production functions models. **Journal of Econometrics**, [S.l.], v. 6, p. 21-37, 1977.
- ARROW, K. et al.. Are we consuming too much?. **Journal of Economic Perspectives**, v. 18, n. 3, p. 147-172, 2004.
- BALTAGI, H. **Econometric analysis of panel data**. 5. Ed. Grã Bretanha: John Wiley & Sons, 2013. 373p.
- BAUMOL, W.J. et al. Introduction: The Convergence of Productivity, Its Significance, and Its Varied Connotations. In. _____ et al. **Convergence of Productivity**. Oxford: Oxford University Press. 3-19. 1994.
- BOYD, D.R. **Canada vs. the OECD: An environmental Comparison**. University of Victoria, Victoria. BC (Canada), V. 32, n. 25, 2001. Disponível em: <https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:32026666>. Acesso em: 08. jan. 2019.
- BATTESE, G.; COELLI, T. Frontier production functions, technical efficiency and panel data with application to paddy farmers in India. **Journal of Productivity Analysis**, Boston, v. 3, p. 153-169, 1992. Disponível em: < <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00158774>>. Acesso em: 23 abr. 2018.
- _____. A model for technical inefficiency effects in a stochastic frontier production function for panel data. **Empirical Economics**, [S.l.], v. 20, pp. 325-332, 1995.
- CAMARERO, M. et al.. Eco-efficiency and convergence in OECD countries. **Environmental and Resource Economics**, [S.l.], v. 55, p. 87-106, 2013. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10640-012-9616-9>>. Acesso em: 12.mai. 2018.
- CHAMBERS, R.G. **Applied Production Analysis, a Dual Approach**. Cambridge University Press, 1988. 331 p.
- COELLI, T.J. Recent Developments in Frontier Modelling and Efficiency Measurement. **Australian Journal of Agricultural Economics**, [S.l.], v. 39, n. 3, p. 219-245, 1995. Disponível em: < <http://ageconsearch.umn.edu/record/22681> >. Acesso em: 10 mai. 2018
- _____. **An introduction to efficiency and productivity analysis**. 2. ed. United States: Editora Springer Science, 2005.
- COMMIT - Climate Policy Assessment and Mitigation Modeling to Integrate National and Global Transition Pathways. **Long-term, Low-Emission Pathways in Australia, Brazil, Canada, China, EU, India, Indonesia, Japan, Republic of Korea, Russia, and United States**. European Commission's Directorate-General for Climate Action. 2018. Disponível em: < <https://themasites.pbl.nl/commit/wp-ontent/uploads/COMMIT-Long-term-Low->

emission-pathways-in-Australia-Brazil-Canada-China-EU-India-Indonesia-Japan-Republic-of-Korea-Russia-USA-2.pdf >. Acesso em 1º.12.2018.

COSTANTIN, Paulo Dutra; RIVERA, Edward Rivera; MARTIN, Diogenes Leiva. Cobb-Douglas, Translog Stochastic Production Function And Data Envelopment Analysis In Total Factor Productivity In Brazilian Agribusiness. In: SIMPÓSIO DE ADMINISTRAÇÃO DA PRODUÇÃO, LOGÍSTICA E OPERAÇÕES INTERNACIONAIS, 12., 2009, São Paulo/SP. **Anais...** São Paulo/SP: instituição que realizou o evento, 2009.

DEBREU, G. The coefficient of resource utilization. **Econometrica**, [S.l.], v. 19, n. 3, p. 273-292, 1951. Disponível em: < <https://www.jstor.org/stable/1906814>>. Acesso em: 20 mar. 2018

DEFRA - Department for Environment, Food and Rural Affairs of UK. **Sustainable Development Indicators**. The National Archives. Kew, London. 2013. Disponível em: < <https://www.gov.uk/government/organisations/department-for-environment-food-rural-affairs/series/sustainable-development-indicatorsv> >. Acesso em 1º.12.2018

DUTTA, N. (nome completo); NARAYANAN, K. (nome completo). Econometric estimation of technical and environmental efficiency: an application to chemical industry in and around mumbai. In: ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE, 7., 2012, [S.l.]. **Anais...**

EDENHOFER, O. A global contract on climate change background. In: CONFERENCE A GLOBAL CONTRACT BASED ON CLIMATE JUSTICE, 2008, Bruxelas. **Anais...** Bruxelas: Institute for Climate Impact Research, 2008..

_____. The economics of low stabilization: model comparison of mitigation strategies and costs. **Energy Journal**, [S.l.], v. 31, n. 1, p. 11-48, 2010. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/41323490?seq=1#page_scan_tab_contents>. Acesso em: 29 abr. 2018

_____. The atmosphere as a global commons – challenges for international cooperation and governance. In: Harvard Project on Climate Agreements, Discussion Paper 58, 2013.

FARRELL, M. J.. The measurement of productive efficiency. **Journal of the Royal Statistical Society Series**, [S.l.], v. 120, n. 3, p. 253-290, 1957. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2343100?seq=1#page_scan_tab_contents>. Acesso em: 20 abr. 2018

FOLEY, D. The economic fundamentals of global warming. In: HARRIS, J.; GOODWIN, N. (eds.). **Twenty-first century macroeconomics: responding to the climate challenge**. Reino Unido: Edward Elgar, 2009.

FREES, E. **Longitudinal and panel data**, Cambridge: Cambridge University Press. 2004.

FUKUYAMA, F. **Confiança**: as virtudes sociais e a criação da prosperidade. Rio de Janeiro: Rocco, 1996. 455p.

GORE, A. **An inconvenient truth: the planetary emergency of global warming and what we can do about it.** New York: Rodale, 2006. 328p.

GREENE, W. Simulated likelihood estimation of the normal-gamma stochastic frontier function. **Journal of Productivity Analysis**, [S.l.], v. 19, p. 179-190, 2003.

_____. Reconsidering heterogeneity in panel data estimators of the stochastic frontier model. **Journal of Econometrics**, v. 126, p. 269-303, 2005.

_____. The econometric approach to efficiency analysis. In: FRIED, H.O.; LOVELL C.A.K.; SCHMIDT, S.S. (Eds.). **The measurement of productive efficiency and productivity Growth.** New York: Oxford University Press, 2008. cap. 2, pp. 92-159

IPCC. **Climate Change 2013.** The Physical Science Basis. Switzerland, 2013. Disponível em: <<http://www.climatechange2013.org/report/full-report>>. Acesso em: 09 abr. 2018.

HALKOS, G. E.; TZEREMES, N. G.. Exploring the existence of Kuznets curve in countries environmental efficiency using DEA window analysis. **Ecological Economics**, [S.l.], v. 68, p. 2168-2176, 2009.

HAUSMAN, J. A. Specification tests in econometrics, **Econometrica**, [S.l.], v. 46, n. 6, p. 1251-1271, 1978.

HEAL, G.: Climate economics: a meta-review and some suggestions for future research. **Review of Environmental Economics and Policy**, [S.l.], v. 3, n. 1, p. 4-21, 2009.
HENDERSON, R. M. et al. Climate change in 2017: implications for Business. In: HARVARD BUSINESS SCHOOL BACKGROUND NOTE 317-032, 2017. 39 p.

HICKS, J.R., **Theory of Wages**, London: MacMillan, 1932. 247 p.

HSIAO, C. **Analysis of Panel Data.** Ed.2. Cambridge, University Press. 2003.

JAKOB, M.; HALLER, M.; MARSCHINSKI, R. Will history repeat itself? economic convergence and convergence in energy use patterns. **Energy Economics**, [S.l.], v. 34 n. 1, p. 95-104, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988311001381>>. Acesso em: 10 mar. 2018

JONES, C. I.; VOLLARTH, D. **Introdução à teoria do crescimento econômico.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. 296p.

LAHOUEL, B. B. Eco-efficiency analysis of French firms: a data envelopment analysis approach. **Environmental Economics and Policy Studies**, [S.l.], v. 18, p. 1-22, 2015. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10018-015-0115-4>>. Acesso em: 5 mai. 2018

LEE, L. F. A test for distributional assumptions for the stochastic frontier functions. **Econometrics**, [S.l.], v. 22, p. 245-268, 1983. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304407683901021>>. Acesso em: 5 mai. 2018

KORHONEN, P.J.; LUPTACIK, M. Eco-efficiency analysis of power plants: an extension of data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**, [S.l.], v.154, p.437-446, 2004.

KOOPMANS, TJALLING C. Efficient Allocation of Resources. **Econometrica**, [S.l.], v. 19, n. 4, p. 455-465, 1951. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/1905538?seq=1#page_scan_tab_contents>. Acesso em: 6 mar. 2018

KÜMMEL, R. Energy as a factor of production and entropy as a pollution indicator in macroeconomic modelling. **Ecological Economics**, [S.l.], v. 1, p. 161-180, 1989. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0921800989900037>>. Acesso em: 4 mar. 2018

KUMBHAKAR, S.; LOVELL, C. **Stochastic frontier analysis**. LOCAL: Cambridge University Press, 2000. 344 p.

KUZNETS, S. Economic Growth and Income Inequality. **American Economic Review**, , [S.l.], v. 45, p.1-28, 1955. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/1811581>>. Acesso em: 2 mar. 2018

MARCHAND, S.; GUO, H. The environmental efficiency of non-certified organic farming in China: A case study of paddy rice production. **China Economic Review**, v. 31, p. 201-216, 2014. Disponível em: <https://www.usherbrooke.ca/ecole-gestion/fileadmin/sites/adm/documents/Economique/EE_of_OA_Guo.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2018.

MARINHO, E. L. L.; BITTENCOURT, A.. Crescimento econômico e dinâmica distribucional entre países. **Revista Brasileira de Economia**, [S.l.], v. 60, p. 261-279, 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-71402006000300004>. Acesso em: 4 mar. 2018

MEADOWS, D. H. et al. **Limits to Growth**. United States: Universe, 1972. 205 p.

MEEUSEN, W.; VAN DEN BROECK, J. Efficiency estimation from Cobb-Douglas production functions with composed error. **International Economic Review**, , [S.l.], v. 18, n. 2, p. 435-444, 1977. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/pdf/2525757.pdf?seq=1#page_scan_tab_contents>. Acesso em: 3 mar. 2018

MINX, J.; SCOTT, K; PETERS, G; BARRETT, J. An Analysis of Sweden's Carbon Footprint – **A Report to WWF Sweden**. WWF, Stockholm, Sweden. 2008. Disponível em: <https://www.wwf.se/source.php/1242860/4553_Swedenscarbonfootprint_SIDA.pdf>. Acesso em 1º.12.2018.

MOTA, J. A. et al. Trajetória da governança ambiental. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental (IPEA)**, [S.l.], v. 1, p. 99-113, 2008.

NEUMAYER, E. Global warming: discounting is not the issue, but substitutability is. **Energy Policy**, [S.l.], v. 27, p. 33-43, 1999. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421598000639>>. Acesso em: 13 mar. 2018

PARMETER, C. F.; KUMBHAKAR, S.C.. Efficiency Analysis: A Primer on Recent Advances. **Foundations and Trends in Econometrics**, [S.l.], v. 7, n. 3-4, p.191-385, 2014.

PARRY, M. et al. **Climate Change 2007 – Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007

PATZ, J.A. et al. Impact of regional climate change on human health. **Nature**, [S.l.], v. 438, n. 17, p. 310-317, 2005.

PEÑA, C. R. Um Modelo de Avaliação da Eficiência da Administração Pública através do Método Análise Envoltória de Dados (DEA). **RAC**, Curitiba, v. 12, n. 1, p. 83-106, 2008. SE

RALEIGH, C.; JORDAN, L.; SALEHYAN, I. Assessing the impact of climate change on migration and conflict. In: **WORLD BANK WORKSHOP ON SOCIAL DIMENSIONS OF CLIMATE CHANGE**, 2008, World Bank Group instituição que realizou o evento, 2008.

RAMSEUR, J. L.. U.S. Carbon Dioxide Emissions Trends and Projections: Role of the Clean Power Plan and Other Factors. **Congressional Research Service**, Washington, D.C.: Congressional Research Service, 2017. Disponível em: <<https://fas.org/sgp/crs/misc/R44451.pdf>>. Acesso em 1º.12.2018.

RASHIDI, K.; SAEN, R. F. Measuring eco-efficiency based on green indicators and potentials in energy saving and undesirable output abatement. **Energy Economics**, [S.l.], v. 50, p. 18-26, 2015

REINHARD, S. **Econometric analysis of economic and environmental efficiency of Dutch dairy farms**. 1999. 174 p.. Tese (Wageningen Agricultural University), Dutch, 1999.

SCHMIDT, P.; SICKLES, R. C. Production frontiers and panel data. **Journal of Business and Economic Statistics**, [S.l.], v. 2, p. 367-374, 1984.

SKARE, M.; RABAR, D. Measuring Sources of Economic Growth in OECD Countries. **Engineering Economics**, [S.l.], v. 28, n. 4, p. 386-400, 2017.

SOUSA, M. C. S.; TANNURI-PIANTO, M. E.; ARCOVERDE, F. D. Fronteiras de eficiência estocásticas para as empresas de distribuição de energia elétrica no Brasil: uma análise de dados de painel. **Estudos Econômicos**, São Paulo, v. 38, p. 13-42, 2008.

STERN, N. **Stern review report on the economics of climate change**. Londres: HM Treasury, 2006.

STOKEY, N. L. Are there limits to growth? **International Economic Review**, [S.l.], v. 39, n. 1, p. 1-31, 1998.

STORM, S. Capitalism and climate change: can the invisible hand adjust the natural thermostat?. **Development and Change**, [S.l.], v. 40, n. 6, p. 1.011-1.038, 2009.

VANINSKY, A. Y. Interstate comparison of environmental performance using stochastic frontier analysis: The United States case study. **World Academy of Science, Engineering & Technology**, [S.l.], v. 66, p. 21-25, 2010.

World Commission on Environment and Development (WCED). **Nosso Futuro Comum**. 1. ed. Rio de Janeiro: FGV, 1987. 430 p.

WOOLDRIDGE, J. M.. **Econometric analysis of cross section and panel data**. 2. ed. Massachusetts: MIT Press, 2010.

WORLD BANK. **World Development Report 2010**. Whashington: The World Bank Group, 2010. Disponível em:
<<http://documents.worldbank.org/curated/en/201001468159913657/World-development-report-2010-development-and-climate-change>>. Acesso em: 02 mar. 2018.

_____. **World Bank annual report 2015**, Washington: World Bank Group, 2015. Disponível em: < <http://www.worldbank.org/en/about/annual-report-2015>>. Acesso em: 02 mar. 2018.

YANG, C. Y.; REGIS, P. Executive compensation and firm efficiency in China. In: **Conference of Interdisciplinary Business & Economics Research**. 2011. Disponível em: < https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1869634>. Acesso em 1º.12.2018.

ZAIM, O.; TASKIN, F. Environmental efficiency in carbon dioxide emissions in the OECD: A non-parametric approach. **Journal of Environmental Management**, , [S.l.], v. 58, p. 95-107, 2000.

ZHOU, P.; POH, K. L.; ANG, B. W. A non-radial DEA approach to measuring environmental performance. **European Journal of Operational Research**, , [S.l.], v. 178, n. 1, p. 1-9, 2007.

ANEXO A – RELAÇÃO DE PAÍSES DA AMOSTRA

PAÍS	AMOSTRA	PAÍS	AMOSTRA	PAÍS	AMOSTRA
Afeganistao	1,3	Eslovenia	1,2	Moldavia	1,3
Africa Central	1,3	Espanha	1,2	Mongolia	1,3
Africa Do Sul	1,3	Estados Unidos	1,2	Montenegro	1,3
Albania	1,3	Estonia	1,2	Myanmar	1,3
Alemanha	1,2	Fiji	1,3	Namibia	1,3
Angola	1,3	Filipinas	1,3	Nepal	1,3
Arabia Saudita	1,3	Finlandia	1,2	Nicaragua	1,3
Argelia	1,3	Franca	1,2	Nigeria	1,3
Argentina	1,3	Gabao	1,3	Noruega	1,2
Armenia	1,3	Gambia	1,3	Nova Zelandia	1,2
Australia	1,2	Gana	1,3	Oman	1,3
Austria	1,2	Georgia	1,3	Panama	1,3
Azerbaijao	1,3	Grecia	1,2	Papua-Nova Guine	1,3
Bahamas	1,3	Guatemala	1,3	Paquistao	1,3
Bahrein	1,3	Guiana	1,3	Paraguai	1,3
Bangladesh	1,3	Guine	1,3	Peru	1,3
Barbados	1,3	Guine Equatorial	1,3	Polonia	1,2
Belgica	1,2	Guine-Bissau	1,3	Portugal	1,2
Belize	1,3	Haiti	1,3	Quenia	1,3
Benin	1,3	Holanda	1,2	Quirguistao	1,3
Bielorrussia	1,2	Honduras	1,3	Reino Unido	1,2
Bolivia	1,3	Hungria	1,2	Republica Dominicana	1,3
Bosnia E Herzegovina	1,3	Iemen	1,3	Republica Tcheca	1,2
Botswana	1,3	Ilhas Salomao	1,3	Romenia	1,2
Brasil	1,3	India	1,3	Ruanda	1,3
Brunei	1,3	Indonesia	1,3	Russia	1,2
Bulgaria	1,2	Ira	1,3	Senegal	1,3
Burkina Faso	1,3	Iraque	1,3	Serra Leoa	1,3
Burundi	1,3	Irlanda	1,2	Servia	1,3
Butao	1,3	Islandia	1,2	Singapura	1,3
Camaroes	1,3	Israel	1,3	Siria	1,3
Camboja	1,3	Italia	1,2	Sri Lanka	1,3
Canada	1,2	Jamaica	1,3	Suazilandia	1,3
Catar	1,3	Japao	1,2	Sudao	1,3
Cazaquistao	1,3	Jordania	1,3	Suecia	1,2
Chade	1,3	Kuait	1,3	Suica	1,2
Chile	1,3	Laos	1,3	Suriname	1,3
China	1,3	Leberia	1,3	Tailandia	1,3
Chipre	1,2	Letonia	1,2	Tajiquistao	1,3
Colombia	1,3	Libano	1,3	Tanzania	1,3
Comores	1,3	Libia	1,3	Togo	1,3
Congo	1,3	Lituania	1,2	Tonga	1,3
Coreia Do Sul	1,3	Luxemburgo	1,2	Tunisia	1,3
Costa Do Marfim	1,3	Macedonia	1,3	Turquemenistao	1,3
Costa Rica	1,3	Madagascar	1,3	Turquia	1,2
Croacia	1,2	Malasia	1,3	Ucrania	1,2
Cuba	1,3	Malawi	1,3	Uganda	1,3
Dinamarca	1,2	Mali	1,3	Uruguai	1,3
Egito	1,3	Malta	1,2	Uzbequistao	1,3
El Salvador	1,3	Marrocos	1,3	Vanuatu	1,3
Emirados Arabes	1,3	Mauricia	1,3	Venezuela	1,3
Equador	1,3	Mauritania	1,3	Vietnan	1,3
Eritrea	1,3	Mexico	1,3	Zimbabue	1,3
Eslovaquia	1,2	Mocambique	1,3		

ANEXO B – RANKING DE EFICIÊNCIA ORDENADO POR EFICIÊNCIA AMBIENTAL

(Continua)

PAÍS	ET	RANK ET	EA	RANK EA	PAÍS	ET	RANK ET	EA	RANK EA
Chade	0,48	35	0,66	1	Emirados Arabes	0,49	34	0,18	82
Vanuatu	0,30	103	0,55	2	Quenia	0,31	99	0,17	83
Ilhas Salomao	0,33	90	0,50	3	Sri Lanka	0,33	89	0,17	84
Comores	0,27	116	0,49	4	Brunei	0,33	88	0,17	85
Africa Central	0,32	96	0,46	5	Singapura	0,43	49	0,17	86
Burundi	0,26	125	0,40	6	Butao	0,16	152	0,17	87
Tonga	0,24	130	0,40	7	Republica Dominicana	0,36	74	0,17	88
Mali	0,39	60	0,36	8	Nepal	0,24	132	0,17	89
Gambia	0,26	119	0,33	9	Montenegro	0,25	128	0,17	90
Barbados	0,44	46	0,32	10	Tanzania	0,26	118	0,17	91
Suazilandia	0,37	67	0,32	11	Equador	0,37	68	0,17	92
Uruguai	0,56	20	0,31	12	Hungria***	0,41	54	0,16	93
Ruanda	0,29	109	0,31	13	Benin	0,23	138	0,16	94
Guine-Bissau	0,19	148	0,30	14	Senegal	0,27	115	0,16	95
Islandia***	0,51	30	0,30	15	Lituania***	0,34	84	0,16	96
Fiji	0,36	76	0,29	16	Mauritania	0,21	143	0,16	97
Belize	0,29	107	0,28	17	Australia***	0,50	31	0,16	98
Bahamas	0,43	47	0,28	18	Gana	0,28	111	0,16	99
Suica***	0,70	6	0,28	19	Filipinas	0,39	63	0,16	100
Suecia***	0,69	8	0,27	20	Arabia Saudita	0,49	33	0,16	101
Serra Leoa	0,24	135	0,26	21	Turquia***	0,46	39	0,16	102
Iraque	0,69	7	0,26	22	Oman	0,37	70	0,16	103
Noruega***	0,66	10	0,26	23	Polonia***	0,47	37	0,16	104
Dinamarca***	0,65	11	0,25	24	Africa Do Sul	0,48	36	0,16	105
Laos	0,27	113	0,25	25	Tunisia	0,33	86	0,15	106
Costa Rica	0,46	41	0,25	26	Togo	0,19	147	0,15	107
Reino Unido***	0,81	1	0,25	27	Iemen	0,31	100	0,15	108
Afeganistao	0,34	81	0,25	28	Russia***	0,53	26	0,15	109
Paraguai	0,41	55	0,25	29	Paquistao	0,40	59	0,15	110
Uganda	0,33	93	0,25	30	Nicaragua	0,24	133	0,15	111
Costa Do Marfim	0,43	50	0,25	31	Libano	0,32	97	0,15	112
Namibia	0,37	69	0,24	32	Egito	0,41	56	0,15	113
Camaroes	0,39	64	0,24	33	Bolivia	0,29	110	0,15	114
Luxemburgo***	0,51	29	0,24	34	Servia	0,35	79	0,15	115
Cuba	0,54	23	0,24	35	Honduras	0,26	126	0,15	116
Malawi	0,25	127	0,24	36	Albania	0,23	137	0,15	117
Malta***	0,38	65	0,24	37	Bangladesh	0,32	95	0,15	118
Sudao	0,42	52	0,23	38	Jamaica	0,27	114	0,14	119
Burkina Faso	0,28	112	0,23	39	Guine Equatorial	0,17	151	0,14	120

ANEXO B – RANKING DE EFICIÊNCIA ORDENADO POR EFICIÊNCIA AMBIENTAL

(Continuação)

PAÍS	ET	RANK ET	EA	RANK EA	PAÍS	ET	RANK ET	EA	RANK EA
Italia***	0,74	3	0,23	40	Venezuela	0,40	58	0,14	121
Guatemala	0,44	44	0,23	41	Zimbabue	0,26	123	0,14	122
Franca***	0,72	4	0,23	42	Marrocos	0,33	87	0,14	123
Papua-Nova Guine	0,35	78	0,23	43	Georgia	0,24	131	0,14	124
El Salvador	0,39	61	0,23	44	Eritrea	0,13	158	0,14	125
Irlanda***	0,56	21	0,22	45	Eslovaquia***	0,33	94	0,13	126
Brasil	0,67	9	0,22	46	Coreia Do Sul	0,42	51	0,13	127
Congo	0,29	106	0,22	47	Bahrein	0,30	105	0,13	128
Argentina	0,62	14	0,22	48	Romenia***	0,34	83	0,13	129
Austria***	0,58	19	0,22	49	Siria	0,30	104	0,13	130
Holanda***	0,63	12	0,22	50	Leberia	0,12	160	0,13	131
Nova Zelandia***	0,52	28	0,22	51	Suriname	0,19	149	0,13	132
Finlandia***	0,55	22	0,21	52	Malasia	0,36	75	0,13	133
Panama	0,39	62	0,21	53	Tailandia	0,35	77	0,12	134
Chipre***	0,40	57	0,21	54	Bulgaria***	0,30	102	0,12	135
Israel	0,54	24	0,21	55	Republica Tcheca***	0,34	82	0,12	136
Mauricia	0,34	85	0,21	56	Armenia	0,20	146	0,12	137
Portugal***	0,53	27	0,21	57	Macedonia	0,24	136	0,12	138
Madagascar	0,26	121	0,21	58	Argelia	0,33	91	0,12	139
Alemanha***	0,70	5	0,21	59	Indonesia	0,36	73	0,12	140
Belgica***	0,58	18	0,21	60	Jordania	0,26	122	0,12	141
Nigeria	0,49	32	0,20	61	Tajiquistao	0,18	150	0,12	142
Mocambique	0,26	117	0,20	62	Letonia***	0,23	139	0,12	143
Estados Unidos***	0,80	2	0,20	63	Guiana	0,15	154	0,11	144
Eslovenia***	0,43	48	0,20	64	Ira	0,34	80	0,11	145
Grecia***	0,54	25	0,20	65	India	0,37	71	0,11	146
Guine	0,26	120	0,20	66	Bosnia E Herzegovina	0,22	140	0,11	147
Espanha***	0,60	16	0,20	67	Ucrania***	0,32	98	0,11	148
Croacia***	0,42	53	0,19	68	Cazaquistao	0,29	108	0,10	149
Peru	0,44	45	0,19	69	Estonia***	0,22	142	0,10	150
Haiti	0,25	129	0,19	70	Bielorrusia***	0,24	134	0,10	151
Colombia	0,47	38	0,19	71	China	0,36	72	0,10	152
Angola	0,38	66	0,19	72	Vietnan	0,22	141	0,09	153
Mexico	0,59	17	0,19	73	Quirguistao	0,16	153	0,09	154
Canada***	0,61	15	0,19	74	Moldavia	0,15	155	0,09	155
Libia	0,45	42	0,18	75	Azerbaijao	0,20	145	0,09	156
Gabao	0,33	92	0,18	76	Uzbequistao	0,20	144	0,08	157
Camboja	0,26	124	0,18	77	Myanmar	0,13	159	0,07	158
Japao***	0,63	13	0,18	78	Mongolia	0,14	157	0,07	159
Kuait	0,46	40	0,18	79	Turquemenistao	0,14	156	0,06	160
Botswana	0,30	101	0,18	80	Catar	0,12	161	0,05	161
Chile	0,44	43	0,18	81					