

**CONSELHO REGIONAL DE ECONOMIA – CORECON/PR
33º PRÊMIO PARANÁ DE MONOGRAFIAS**

**TÍTULO: A RELAÇÃO ENTRE CRESCIMENTO ECONÔMICO E DEGRADAÇÃO
AMBIENTAL: EMISSÃO DE CO₂e NO BRASIL (1990-2018) E AS METAS DO
ACORDO DE PARIS**

PSEUDÔNIMO DO AUTOR: MÉNON CÁRMIDES

CATEGORIA:

ECONOMIA PARANAENSE ()

ECONOMIA PURA OU APLICADA (X)

RESUMO

Este trabalho busca verificar a relação entre variáveis que representam crescimento econômico e a emissão de dióxido de carbono com base na teoria da curva de Kuznets ambiental (CKA) e a forma como essa relação contribui para o alcance das metas do Acordo de Paris 2015, para o caso brasileiro. Para alcançar o objetivo aplicou-se o modelo econométrico autorregressivo com defasagens distribuídas (ARDL) envolvendo dados de emissões de dióxido de carbono equivalente (CO₂e), Produto Interno Bruto (PIB) *per capita*, produção de energia renovável e áreas com cobertura agrícola, para o período 1990 – 2018. A discussão se assenta na importância que as mudanças climáticas vêm alcançando nas últimas décadas em decorrência de efeitos perversos para sociedade ocasionados por alterações no sistema Terra. Essas alterações causam prejuízos econômicos e sociais, tornando-se uma preocupação, também, dos economistas. O resultado alcançado é compatível com uma CKA de longo prazo. O crescimento da renda aumenta as emissões até um ponto de inflexão, depois passa a reduzi-las. As demais variáveis pioram o resultado ambiental no curto prazo, e melhoram-no no longo prazo. Portanto, perseguir o crescimento econômico não é inconsistente com o objetivo de reduzir as emissões. Todavia, não se pode normalizar as emissões, uma vez que os efeitos resultantes podem ser irreversíveis.

Palavras-chave: Curva de Kuznets Ambiental. Crescimento Econômico. Emissões de CO₂. Modelo Autorregressivo com Defasagens Distribuídas.

ABSTRACT

This work seeks to verify the relationship between variables that represent economic growth and carbon dioxide emissions based on the theory of the environmental Kuznets curve (EKC) and how this relationship contributes to achieving the goals of the 2015 Paris Agreement, in the Brazilian case. To achieve the objective, the autoregressive distributed lag (ARDL) econometric model was applied involving data on carbon dioxide (CO₂e) emissions, Gross Domestic Product (GDP) per capita, renewable energy production, and areas with agricultural coverage, for the period 1990 - 2018. The discussion is based on the importance that Climate changes have been achieving in recent decades as a result of perverse effects on society caused by changes in the Earth system. These alterations cause economic and social losses, becoming a concern for economists. The result achieved is compatible with EKC in the long run. Income growth increases emissions to a tipping point, then starts to reduce them. The other variables worsen the environmental result in the short run and improve it in the long run. Therefore, pursuing economic growth is not inconsistent to reduce emissions. However, emissions cannot be normalized, as the resulting effects may be irreversible

Keywords: *Environmental Kuznets Curve. Economic Growth. CO₂ Emissions. Autoregressive Distributed Lag.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Crescimento exponencial da população mundial na Era Moderna	13
Figura 2 - Algumas tendências socioeconômicas pós “grande aceleração”	15
Figura 3 - Algumas tendências do sistema Terra pós “grande aceleração”	17
Figura 4 - Curva de Kuznets Ambiental.....	23
Figura 5 - Soma cumulativa dos resíduos – CUSUM	51
Figura 6 - Soma cumulativa dos resíduos quadrados – CUSUMSQ	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Participação da energia renovável na produção de energia primária nacional 1990-2018	35
Gráfico 2 – Participação média do setor agropecuário no produto brasileiro entre 1996 e 2018	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo descritivo dos dados.	33
Tabela 2 - Testes de estacionariedade ADF e PP para variáveis em nível $I(0)$	47
Tabela 3 - Testes de estacionariedade ADF e PP para variáveis após a primeira diferença $I(1)$	47
Tabela 4 - Estatísticas obtidas para o modelo de cointegração de longo prazo.....	48
Tabela 5 - Resultados do ARDL teste de limites de cointegração para o curto e longo prazo	48
Tabela 6 - Resultados dos testes de diagnóstico do modelo	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo dos estudos que testaram uma curva de Kuznets ambiental....	30
Quadro 2 - Resumo dos dados usados no estudo	37

LISTA DE SIGLAS

ADF	Teste de Estacionariedade de Dickey Fuller Aumentado (<i>Argumented Dickey-Fuller</i>)
AIC	Crítério de Informação de Akaique (<i>Akaique Information Criterion</i>)
Agl	Área com Cobertura Agrícola (<i>Agricultural Land</i>)
AP15	Acordo de Paris 2015
ARDL	Modelo Autorregressivo com Defasagens Distribuídas (<i>Autoregressive Distributed Lag</i>)
BEN	Balanço Energético Nacional
BRICS	Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul (<i>Brazil, Russia, India, China and South Africa</i>)
CKA	Curva de Kuznets Ambiental
CO2	Dióxido de Carbono
CO2e	Dióxido de Carbono Equivalente
COP	Conferência das Partes
CUSUM	Soma Cumulativa dos Resíduos (<i>Cumulative Sum of Recursive Residuals</i>)
CUSUMSQ	Soma Cumulativa dos Resíduos Quadrados (<i>Cumulative Sum of Squares of Recursive of Residuals</i>)
DF	Teste de Dickey-Fuller
DOLS	Dynamic Modified Ordinary Minimum Screening
ECM	Modelo de Correção de Erros (<i>Error Correction Model</i>)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPRE	Produção de Energia Renovável (<i>Energy Production Renewable</i>)
FGLS	Feasible Generalized Least Square
FMOLS	Fully Modified Ordinary Minimum Screening
GEMS	Global Environmental Monitoring System's
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLS	Mínimos Quadrados Generalizados (<i>Generalized Least Squares</i>)
HQC	Crítério de Informação de Hannan-Quinn (<i>Hannan-Quinn Information Criterion</i>)

iNDC	Intenção de Contribuição Nacionalmente Determinada (<i>Intended Nationally Determined Contribution</i>)
IPCC	Intergovernmental Panel Climate Change
LCI	Limite Crítico Inferior
LCS	Limite Crítico Superior
NAFTA	North American Free Trade Agreement
NDC	Contribuição Nacionalmente Determinada (<i>Nationally Determined Contribution</i>)
OLS	Mínimos Quadrados Ordinários (<i>Ordinary Least Square</i>)
ONU	Organização das Nações Unidas
PIB	Produto Interno Bruto
PIB ²	Produto Interno Bruto ao Quadrado
PP	Teste de Estacionariedade Phillip Perron
PVAR	Painel de Vetores Autorregressivos
SBIC	CrITÉrio de Informação de Schwarz (<i>Schwarz Bayesian Information Criterion</i>)
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
SR15	Especial Report 2015, Global warming of 1.5°C
STIRPAT	Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology
WDI	World Development Indicators

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	A PREOCUPAÇÃO COM A DEGRADAÇÃO AMBIENTAL E O CRESCIMENTO ECONÔMICO	13
2.1	EMISSÕES ANTRÓPICAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA E IMPLICAÇÕES ECONÔMICAS	20
2.2	O CRESCIMENTO DAS EMISSÕES EM FORMA DE U-INVERTIDO, A CURVA DE KUZNETS AMBIENTAL	22
2.3	REVISÃO DA LITERATURA.....	25
2.4	CONTRIBUIÇÃO PARA A MATÉRIA.....	31
3	DADOS E METODOLOGIA.....	33
3.1	CONJUNTO DE DADOS UTILIZADOS	33
3.2	METODOLOGIA	39
3.2.1	Estacionariedade	39
3.2.2	Modelo Autorregressivo com Defasagens Distribuídas (ARDL)	40
3.2.3	Testes dos resíduos	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	RESULTADOS.....	46
4.1.1	Teste de raiz unitária para estacionariedade das séries.....	46
4.1.2	O teste de limites e os parâmetros obtidos no ARDL	47
4.1.3	Resultados dos testes de diagnósticos dos erros.....	49
4.2	DISCUSSÕES	52
4.2.1	Sobre os Resultados de Longo Prazo	52
4.2.2	Sobre os Resultados de Curto Prazo	54
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
	REFERÊNCIAS.....	58

1 INTRODUÇÃO

O problema com o qual essa monografia se preocupa está alinhado as discussões atuais acerca das mudanças climáticas que buscam encontrar um caminho possível entre o desenvolvimento da sociedade e a manutenção das condições de vida no planeta Terra.

As alterações climáticas em decorrência das emissões de gases de efeito estufa (GEE) têm chamado atenção pela urgência, cada vez mais evidente com os efeitos do aquecimento da superfície terrestre sobre a vida dos indivíduos: alterações no ciclo das chuvas, alterações no nível dos oceanos e fluxo das correntes marítimas, frequência e intensidade das tempestades e secas, fenômenos adversos (frio ou calor) em regiões onde não são esperados. Além dos prejuízos instantâneos e aparentes, inundações, queimadas e perdas na produção, também há problemas de longo prazo como o desaparecimento de espécies, perda do controle natural de pragas, supressão de comunidades e atividades costeiras etc.

Preocupados com a urgência da mudança climática, os países vêm se organizando, após 1982, no entorno do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), com a finalidade de encontrar um caminho comum capaz de promover o crescimento e desenvolvimento econômicos aliados a uma conservação dos ecossistemas naturais. O último painel do IPCC, de maior expressão, foi realizado em Paris em 2015 e ficou conhecido como Acordo de Paris (AP15), onde os países se comprometeram a empenhar os esforços necessários para limitar o aquecimento da superfície da Terra em 1,5° C acima dos níveis pré-industriais até o final do século. O Brasil é um dos signatários voluntários do AP15. Como voluntário, propôs uma intenção de redução de emissões de dióxido de carbono (CO₂) em duas etapas: até 2025 reduzir as emissões em 37% e até 2030 em 43%, percentuais em relação as emissões de 2005.

A relevância econômica do tema pode ser evidenciada pelos múltiplos trabalhos realizados na área do desenvolvimento econômico pós década de 1990. Dentre os pesquisadores que deram início aos estudos estão Grossman e Krueger (1991), Shafiki e Bandyopadhyay (1992) Panayotou (1993), Grossman e Krueger (1995) com trabalhos seminais publicados na primeira metade dos anos 1990. Mais recentemente, o volume de trabalhos e autores debruçados sobre o tema tem

aumentado. Ben Jebli e Ben Youssef (2015), Saboori, Sulaiman e Mohd (2016) e Alam et al. (2016) são citados, além dos relatórios periódicos sobre mudança climática produzidos pelos painéis interdisciplinares do IPCC.

A partir destas questões, esta monografia procura analisar a relação entre o crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) *per capita* e o nível de emissões de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) para o Brasil, no período 1990-2018, buscando verificar se a estratégia de crescimento continuado é compatível com uma trajetória de alcance das metas do AP15. O objetivo pode ser delineado em três subobjetivos:

- a) Verificar se relação existente entre o crescimento do PIB *per capita* e as emissões de CO₂e confirma ou refuta a hipótese da curva de Kuznets ambiental (CKA)
- b) Analisar a relação entre a variação das áreas sobre cobertura agrícola (AgL) e da produção de energia renovável (EPRE) sobre as emissões.
- c) Discutir como a relação descoberta nos objetivos anteriores contribui para as intenções assumidas pelo Brasil perante o AP15.

Escolheu-se a emissão de CO₂e como variável dependente por ser uma medida amplamente utilizada nos estudos que avaliam as alterações no consumo de recursos naturais e seus efeitos sobre as mudanças climáticas, também é a unidade de medida assumida no AP15. Como representante do crescimento econômico a escolha foi pelo PIB *per capita*, além de outras duas variáveis da atividade econômica: área coberta por terras agrícolas e a produção de energia renovável.

O método econométrico empregado é um modelo autorregressivo de defasagens distribuídas (ARDL) proposto por Pesaran, Shin e Smith (2001) que, se destaca por sua aplicabilidade em séries temporais cointegradas com processo de raiz unitária $I(0)$, $I(1)$ ou ambos sem a necessidade de estabilizar as séries, mantendo informações primordiais para a interpretação dos resultados.

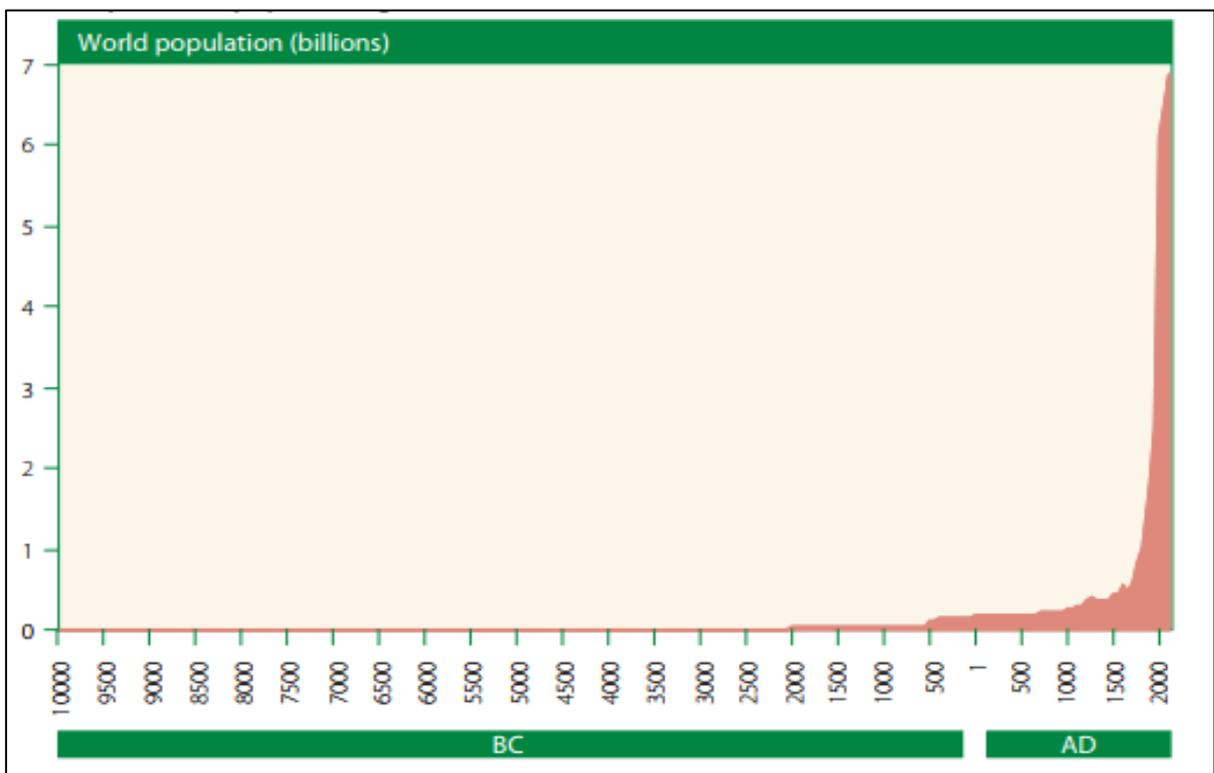
Além deste capítulo introdutório, o trabalho está dividido em quatro capítulos. O capítulo 2 traz o contexto da discussão acerca da degradação ambiental e os impactos causados pelo crescimento econômico, além de, apresentar estudos empíricos anteriores sobre o tema. O terceiro capítulo traz os dados utilizados, o modelo e suas justificativas. O penúltimo, apresenta os resultados dos testes e discute-os. Finalmente o capítulo 5 apresenta as considerações finais do estudo e os possíveis desenvolvimentos que podem decorrer dele.

2 A PREOCUPAÇÃO COM A DEGRADAÇÃO AMBIENTAL E O CRESCIMENTO ECONÔMICO

Decorreram alguns séculos até que a humanidade saísse de comunidades isoladas, dependentes da sazonalidade e de condições inerentes a natureza sobre as quais não dominava, para uma Era onde, aparentemente, dobrou o ecossistema a seu favor.

No século XVIII a Revolução Industrial marcou o início de uma importante alteração na relação do homem com os recursos naturais. A criação da máquina a vapor em 1774 por James Watt, e a expansão massiva do uso de combustíveis fósseis permitiram um aumento sem precedentes na produção de bens e crescimento da população, alterando a composição das estruturas da sociedade (ANDRADE; MOLLINA, 2014; PÁDUA, 2015; BAYER; URANGA; FORCHEZATTO, 2022). A população mundial deu um salto, após um lento crescimento nos séculos precedentes, passando de 1 bilhão em 1800 para 6,1 bilhões em 2010, Figura 1, chegando a 7,8 bilhões em 2020.

Figura 1 - Crescimento exponencial da população mundial na Era Moderna



Fonte: Adaptado de United, 2011.

Outros avanços que são importantes estão relacionados ao ganho de produtividade e eficiência dos processos. Segundo Organização das Nações Unidas (ONU), a renda cresceu cerca de 24 vezes mais rápido após 1800 em relação aos dezesseis séculos anteriores (UNITED, 2011). Entretanto, grande parte desse avanço se deu de forma irregular, sendo que a diferença no crescimento da renda entre os países desenvolvidos e em desenvolvimento é profunda. Junto do crescimento dos recursos os países desenvolvidos experimentaram reduções drásticas nas taxas de natalidade, mortalidade, ganhos de longevidade e alteração da pirâmide etária. Por outro lado, “países em desenvolvimento ainda apresentam taxa de natalidade muito maiores que as taxas de mortalidade, junto a um crescimento da renda mais lento, resultando num rápido crescimento populacional.” (UNITED, 2011, p. 3, “tradução nossa”).

A reconstrução pós Segunda Guerra, iniciada em 1945, marca uma segunda fase do Antropoceno¹ chamada de “grande aceleração”². Segundo Pádua (2015), a queda dos preços do petróleo, o consumo em massa e as contínuas inovações tecnológicas deram ritmo ao “boom” populacional e ao consumo desenfreado, mudando drasticamente o efeito antrópico sobre o meio ambiente.

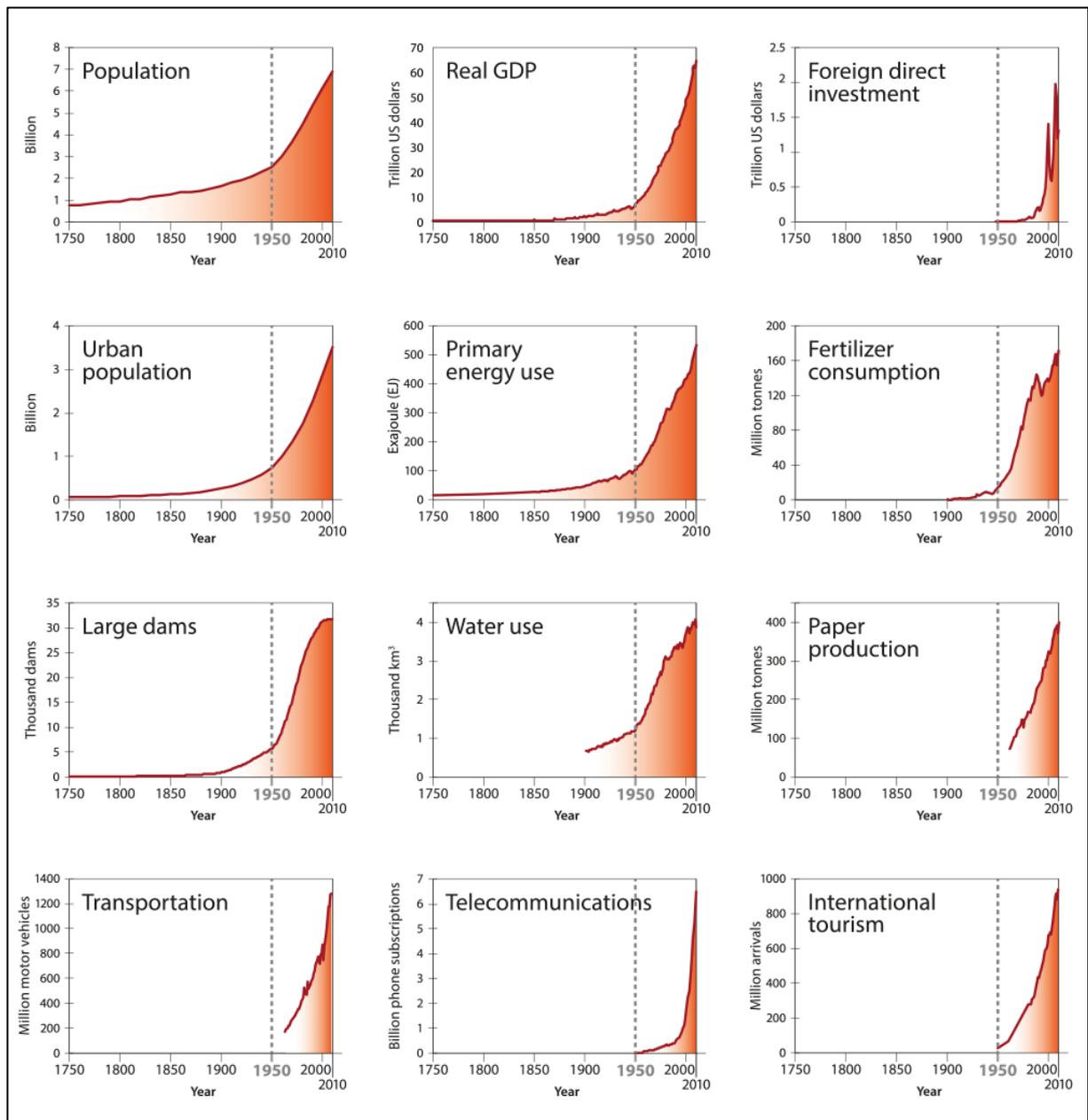
A imagem é como a de uma ventania desdobrada em um furacão: os ventos das revoluções industriais – que por sua vez já representavam uma grande mudança em relação ao padrões pré-industriais de produção e consumo – se tornaram rajadas capazes de multiplicar radicalmente as consequências socioambientais da ação humana. (PADUA, 2015)

Segundo Silva e Arbilla (2018), a “grande aceleração” marca o ponto drástico de uma alteração sem precedentes na relação entre os homens e o sistema Terra. As mudanças que já vinham se consolidando ganham dinamismo e conduzem as alterações no ecossistema numa velocidade muito acima da esperada de forma natural. Esse dinamismo pode ser observado tanto no avanço de indicadores do desenvolvimento econômico, que dão um salto pós 1950, Figura 2, quanto no comprometimento dos recursos naturais que acelera na segunda metade do século XIX, Figura 3.

¹ A “Era dos Homens”, termo originado em Eugene F. Stroemer na década de 1980. E usado para designar a época geológica onde o homem exerce um papel central na geologia e na ecologia, com início no final do século XVIII, ver também Silva e Arbilla (2018).

² Ponto de referência no Antropoceno que marca uma virada no ritmo das alterações do Sistema Terra, ver também Steffen et al. (2015).

Figura 9 - Algumas tendências socioeconômicas pós “grande aceleração”



Fonte: adaptado de Steffen et al. (2015).

Figura 9 - Algumas tendências socioeconômicas pós “grande aceleração” Fonte: adaptado de Steffen et al. (2015).

Figura 10 - Algumas tendências socioeconômicas pós “grande aceleração”

Figura 11 - Algumas tendências socioeconômicas pós “grande aceleração” Fonte: adaptado de Steffen et al. (2015).

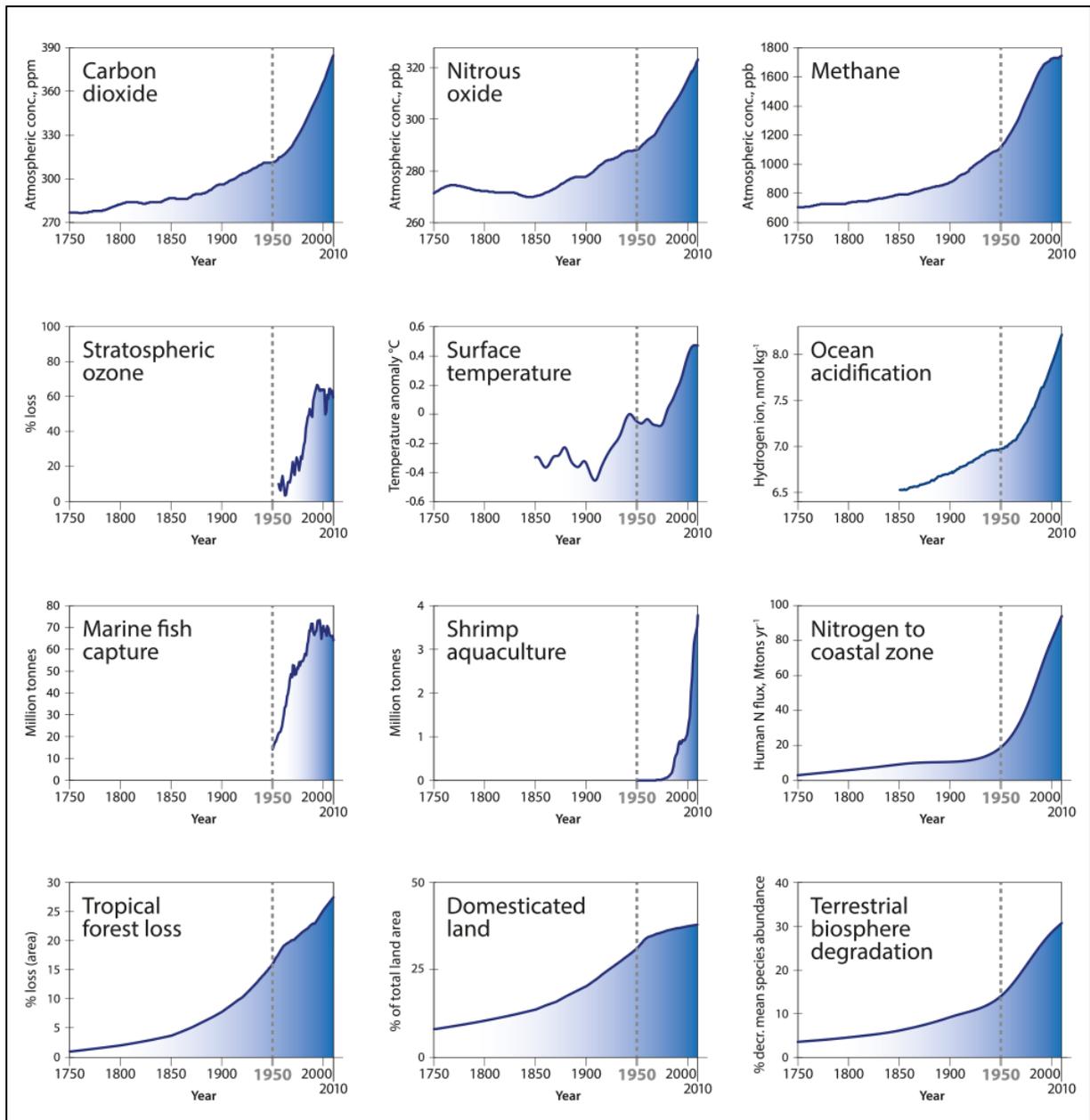
Figura 12 - Algumas tendências socioeconômicas pós “grande aceleração” Fonte: adaptado de Steffen et al. (2015).

Durante longo período, os recursos naturais raramente foram incluídos nas discussões econômicas. Quando o foram, estavam incluídos de forma implícita nas discussões sobre a renda da terra de Ricardo³, e mais drasticamente nos trabalhos de Thomas Malthus⁴ que postulava uma incapacidade produtiva condizente com o crescimento populacional. No entanto, nenhuma dessas discussões se relacionava com a geração de resíduos e escassez de recursos naturais. Mesmo a discussão de Malthus não tratava da escassez de recursos, e sim da velocidade da transformação produtiva.

³ David Ricardo discute no capítulo 2 da sua obra seminal a renda da terra. Para ele a renda estava ligada a qualidade, capacidade produtiva da terra. Ver mais em Ricardo (1817/1996).

⁴ Malthus apontava que não era possível manter o crescimento da população a longo prazo, pois os recursos eram produzidos segundo leis da natureza de uma forma crescente, aritmética, enquanto a população crescia seguindo uma proporção exponencial, ver mais em Malthus (1820/1996).

Figura 17 - Algumas tendências do sistema Terra pós “grande aceleração”



Fonte: adaptado de Steffen et al. (2015).

Figura 13 - Algumas tendências do sistema Terra pós “grande aceleração” Fonte: adaptado de Steffen et al. (2015).

Figura 14 - Algumas tendências do sistema Terra pós “grande aceleração”

Figura 15 - Algumas tendências do sistema Terra pós “grande aceleração” Fonte: adaptado de Steffen et al. (2015).

Figura 16 - Algumas tendências do sistema Terra pós “grande aceleração” Fonte: adaptado de Steffen et al. (2015).

Em 1950, Nicholas Georgescu-Roegen foi o primeiro economista a propor ensaios discutindo as limitações do ecossistema em absorver os impactos gerados pelo processo produtivo.

Georgescu-Roegen (1958, apud GEORGESCU-ROEGEN, 2012) contraria a visão mecanicista neoclássica de um sistema econômico fechado, no qual tudo no ciclo se recupera, se produz e se consome para o próprio sistema. Para ele o sistema econômico é aberto trocando energia com exterior, e só é possível porque a energia dos recursos naturais pode ser manipulada e transformada. Contudo, essa transformação resulta na liberação de novas cargas para o meio ambiente, que não mais podem ser recuperadas. A energia livre se dissipa pelo sistema exercendo pressão sobre o ecossistema.

Entretanto as provocações de Georgescu-Roegen não foram observadas e só voltam à discussão na década de 1970 quando acontece o Clube de Roma e a publicação do seu trabalho, o Relatório Meadows, em 1972, intitulado “Limites do Crescimento”. Segundo Dinda (2004), Romeiro (2012) e Morais (2019), esse é o ponto de início das preocupações efetivas com as consequências do crescimento econômico.

Dez anos mais tarde aconteceu a Conferência de Nairobi, em 1982, que resultou na criação da Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, chefiada pela primeira-ministra da Noruega, GRO Harlem Brundtland, cujo nome foi emprestado para o Relatório Brundtland em 1987. Esse documento, também denominado “Nosso Futuro Comum” apresenta os resultados dos trabalhos da Comissão. O Relatório traz uma conceituação de desenvolvimento econômico, na qual é imprescindível produzir de forma a fornecer os recursos necessários para a sociedade atual sem comprometer as necessidades das gerações futuras, “os objetivos do desenvolvimento social e econômico em todos os países devem (ou deveriam) estar alinhados com práticas sustentáveis, priorizando o equilíbrio ambiental.” (BAYER; URANGA; FOCHEZATTO, 2017, p. 130).

Ceretta, Sari e Ceretta (2020) lembram que essas questões relativas aos impactos das emissões nos sistemas ecológicos trouxeram à tona discussões importantes acerca de como tornar os processos dentro da sociedade mais sustentáveis, culminando na criação de uma série de grupos e uniões no entorno de pontos de interesse comum, seguidos de tratados na busca de um comprometimento

com metas de emissão ao ponto de reduzir ou, até mesmo, parar os efeitos perversos das mudanças climáticas.

Depois do Clube de Roma em 1968 e da Comissão Mundial de 1982, em 1988 a ONU cria o *Intergovernmental Panel on Climate Change*⁵ tornando a mudança climática uma questão política e pública (MORAIS, 2019). Em 1995 acontece a primeira Conferência das Partes (COP1) encaminhada pelo IPCC, em Berlim, onde diversos países assumem um compromisso com a redução das emissões de gases de efeito estufa e mais tarde vão assinar o Protocolo de Kyoto como uma das diretrizes daquela Conferência. Moraes (2019) aponta que, a partir desse acordo, a preocupação com as mudanças climáticas começa a ganhar consistência.

Até o ano de 2015 foram realizadas mais dezenove Conferências. A COP21 em Paris, que ficaria conhecida como o Acordo de Paris, é muito maior que as anteriores, é abrangente e traz disposições sobre diversas questões: adaptação às mudanças climáticas, capacitação, transferência de tecnologia e política florestal ancoradas nos países desenvolvidos, mas sem esquecer os países em desenvolvimento. O AP15 também estabelece um pico de emissões a ser perseguido e assimilado pelos signatários (MORAIS, 2019).

O Brasil, como signatário voluntário do AP15, submeteu sua Contribuição Nacionalmente Determinada (iNDC)^{6 7} em 2015, propondo-se a reduzir as emissões de CO₂e: “o Brasil se compromete a trabalhar para reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% abaixo dos níveis de 2005 até 2025” e “reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 43% abaixo dos níveis de 2025 até 2030.” (BRASIL, 2016, p. 1-2, “tradução nossa”).

No ano de 2018 o IPCC publicou o Relatório Especial 2015 “*Global warming of 1.5°C*” (SR15), clamando por urgência das medidas e das políticas que visam a limitação da elevação da temperatura da Terra dentro do limite de 1,5° C acima dos níveis pré-industriais. De acordo com o SR15, atingindo-se o limite ocorrerão alterações no ciclo e na intensidade de chuvas e secas, duração, amplitude e picos de temperatura máxima e mínima, elevação entre 0,26 m a 0,77 m no nível dos

⁵ Um grupo de trabalho formado por *experts* em uma série de temas com a finalidade de orientar políticas econômicas e de proteção da biodiversidade a serem adotadas por diferentes agentes de distintas esferas.

⁶ São metas de proposição voluntária pelos países em desenvolvimento, já que os países não são obrigados a se comprometer com os resultados.

⁷ Em 2022 o Brasil submeteu uma revisão das iNDC 2015, onde a principal novidade foi se comprometer com a neutralização das emissões até 2050. Ver mais em Brasil (2022)

oceanos nos próximos 80 anos, comprometendo os ecossistemas costeiros e suas populações, o que causará grandes perdas da biodiversidade, degradação de ecossistemas inteiros, perdas de produtividade na agricultura, aquicultura e agropecuária além de agravamento de problemas de saúde das populações mais vulneráveis. Segundo o IPCC (2018), espera-se que esses efeitos ocorram de forma desigual.

As populações com maior probabilidade de sofrer as maiores consequências adversas com o aquecimento global de 1,5°C ou mais, incluem populações em desvantagem e vulneráveis, como povos indígenas e comunidades locais dependentes da subsistência agrícola ou costeira [...]. Espera-se que a pobreza e desvantagem de algumas populações aumentem à medida que o aquecimento global aumenta. (IPCC, 2018, p. 9, “tradução nossa”)

A consolidação dos acordos internacionais e seus trabalhos, principalmente pós IPCC, levaram diversas instituições a coletarem e disponibilizarem inúmeras séries de dados efetivos sobre a degradação ambiental. Esses, aliados a dados econômicos e uma série de ferramentas instrumentais, possibilitaram a condução de estudos empíricos sobre a relação entre o crescimento econômico e a degradação ambiental.

2.1 EMISSÕES ANTRÓPICAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA E IMPLICAÇÕES ECONÔMICAS

Com os trabalhos do Clube de Roma, as preocupações acerca do caminho tomado para o crescimento começam a ser inseridas nas discussões acadêmicas. Segundo Saboori, Sulaiman e Mohd (2016) e Morais (2019), após superada a fase da não preocupação com a questão ambiental, a etapa seguinte procura desvendar quais são as variáveis e os efeitos desencadeados pela perseguição ao crescimento econômico que podem interagir contraditoriamente ao meio ambiente, às questões sociais, políticas e culturais.

À medida que o tema se consolida, chama a atenção de economistas que passam a desenvolver estudos empíricos sobre o assunto (DINDA, 2004). Os primeiros trabalhos, após os anos 1990, tratando da relação entre crescimento e meio ambiente são os trabalhos de Shafiki e Bahndyopadhyay (1992), Panayotou (1993), encomendados pelo Banco Mundial, e Grossman e Krueger (1991) e Grossman e

Krueger (1995). Eles mostram, pioneiramente, que existe uma relação empírica entre crescimento econômico e degradação ambiental.

Segundo Souza, Irffi e Asevedo (2022), a degradação dos ecossistemas se deve, principalmente, a atividades antrópicas do ser humano. Entretanto é preciso compreender que apesar dos impactos negativos do crescimento sobre o meio ambiente, os recursos naturais são parte importante na produção de bens e serviços (GROSMAN; KRUEGER, 1991, GROSMAN; KRUEGER, 1995, AHMAD, et al., 2016, ALAM et al., 2016, CERETTA; SARI; CERETTA, 2020). Logo, essa face do problema não pode ser descartada: “pode ser dada a sugestão de reduzir o consumo de energia para superar o problema da emissão de CO₂. No entanto, a redução do consumo de energia exercerá uma pressão sobre o crescimento econômico que obviamente não é boa para o país.” (AHMAD, et al., 2016, p. 5, “tradução nossa”).

Para Grossman e Krueger (1995), tanto os recursos ambientais quanto o crescimento econômico e nosso bem-estar estão intimamente ligados:

Qualidade Ambiental tem muitas dimensões. Nossas vidas são afetadas pelo ar que respiramos, a água que bebemos, a beleza natural que observamos, e a diversidade de espécies com as quais temos contato. A capacidade de nossos recursos para produzir bens e serviços é influenciada pelo clima, volume das chuvas, e os nutrientes do solo. Nós sentimos desconforto com o ruído excessivo e o trânsito, e com o risco de uma catástrofe nuclear. Cada uma dessas dimensões da qualidade ambiental. Pode responder ao crescimento econômico de diferentes formas. (GROSSMAN; KRUEGER, 1995, p. 355, “tradução nossa”)

Grossman e Krueger (1991) e Grossman e Krueger (1995), apontam três mecanismos por meio dos quais o aumento da atividade econômica se relaciona com a degradação ambiental. O primeiro deles nominado como escala. Uma vez que o aumento e a liberalização dos investimentos e do comércio levem a uma expansão da atividade econômica, sem que a natureza da atividade mude, o volume total da poluição aumentará. O segundo mecanismo é chamado de efeito composição. Com a liberalização do comércio entre os países, cada economia tende a se especializar na produção daquilo que possui vantagens comparativas, contudo se essa vantagem vier de uma fraca regulação ambiental, então uma determinada economia pode acabar se especializando em produzir bens com grande carga poluidora. O terceiro mecanismo está ligado ao avanço tecnológico que se dá por duas vertentes: a abertura comercial e a ampliação dos negócios internacionais, que pode beneficiar, principalmente, os países menos desenvolvidos com a transferência de tecnologia, em geral, mais limpa; o segundo impacto vem com o aumento da renda e riqueza gerada na expansão

comercial que leva ao surgimento de maiores demandas por políticas para um ambiente mais amistoso.

A partir do Protocolo de Kyoto, o CO₂ passa a ser o elemento de maior atenção por seu papel no aquecimento global. Se os estudos pioneiros usavam uma série de indicadores dispersos, após o Protocolo o dióxido de carbono fica no centro dos estudos da relação entre crescimento econômico e degradação. Sua importância não se dá apenas pela relação com o aquecimento global, mas, também, e principalmente, porque é o subproduto principal da atividade produtiva (IPCC, 2018, CERETTA; SARI; CERETTA, 2020). Dessa forma, é possível aludir que quanto maior o nível de atividade econômica de um país, maior sua carga de emissões.

2.2 O CRESCIMENTO DAS EMISSÕES EM FORMA DE U-INVERTIDO, A CURVA DE KUZNETS AMBIENTAL

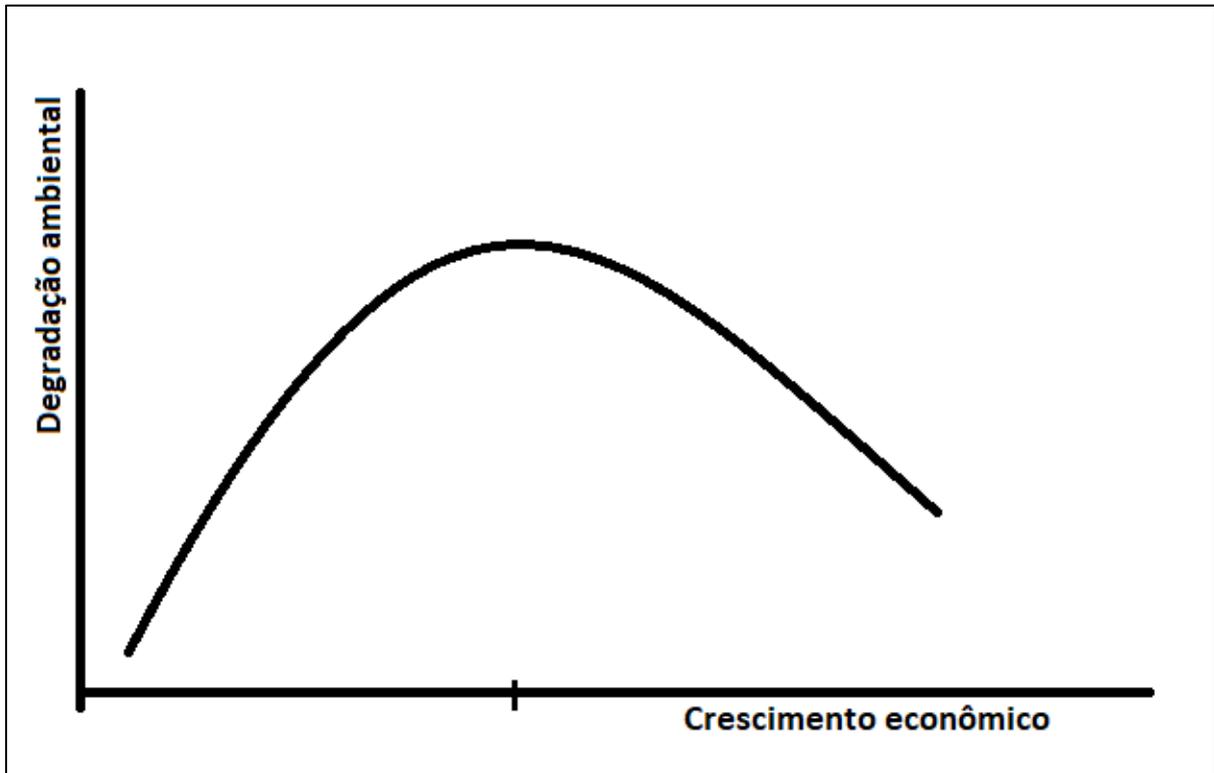
O primeiro e o principal desenvolvimento teórico sobre a relação empírica entre crescimento econômico e degradação ambiental foi contextualizado por Grossman e Krueger em 1991, quando estudaram uma série de indicadores de qualidade ambiental do México e como eles poderiam ser afetados positiva ou negativamente com a adesão do país ao *North American Free Trade Agreement* (NAFTA). Mais tarde essa relação foi associada a outro desenvolvimento da década de 1950, em que Simon Kuznets (1955) estuda como o crescimento econômico afeta a desigualdade de renda.

Segundo Linhares et. al. (2012), a hipótese de Kuznets, a curva em forma de U-invertido, tem fundamento a partir da percepção de que em estágios iniciais de crescimento da economia há uma migração da mão de obra de maior qualificação para setores dinâmicos onde o retorno é mais elevado, acentuando a desigualdade de renda. Após um período de consolidação, os demais setores usufruem do dinamismo anterior, experimentando uma homogeneização dos ganhos que faz com que a diferença de renda diminua à medida que a economia continue crescendo.

No trabalho de 1991 e no de 1995, Grossman e Krueger estabelecem que há uma relação, no formato U-invertido, com a poluição aumentando nos estágios iniciais do crescimento econômico, atingindo um pico em algum momento, para passar a declinar a partir de então (ZAMBRANO-MONSERRATE et al., 2016; MORAIS, 2019).

Essa relação, Figura 4, foi chamada de curva de Kuznets ambiental (CKA) pela primeira vez por Panayotou no trabalho de 1993 (DINDA, 2004).

Figura 25 - Curva de Kuznets Ambiental



Fonte: Adaptado de Dinda (2004).

Figura 25 - Curva de Kuznets AmbientalFonte: Adaptado de Dinda (2004).

Figura 26 - Curva de Kuznets Ambiental

Gráfico 5 – Participação da energia renovável na produção de energia primária nacional 1990-2018

Figura 27 - Curva de Kuznets AmbientalFonte: Adaptado de Dinda (2004).

Figura 28 - Curva de Kuznets AmbientalFonte: Adaptado de Dinda (2004).

A CKA passa então a ser uma ferramenta amplamente utilizada para investigar a relação entre crescimento econômico e degradação ambiental. O esquema “passou a ser referência para explicar a relação de como a poluição ambiental evolui em virtude de crescimento econômico.” (BIAGE; ALMEIDA, 2015, p. 510).

O argumento teórico para a CKA dá conta que, no início, a transição de uma economia de subsistência para uma economia de dinâmica produtiva, aumenta

consideravelmente o uso de recursos naturais, seja pela exploração ou pela demanda para transformação, nesse ponto a regeneração dos recursos não é suficiente para repô-los. Quando atinge níveis mais altos de produção, o ganho tecnológico com materiais menos intensivos em recursos naturais e mais eficientes, assim como a conscientização ambiental que se forma junto com o avanço da legislação, derrubam o consumo dos recursos e emissão de poluentes a um nível menor, possibilitando então que a regeneração dos recursos usados seja capaz de repor o consumo. (DINDA, 2004, AHMAD, et al., 2016; MORAIS, 2019).

Grossman e Krueger (1995) estabeleceram as bases desses argumentos para a curva de Kuznets ambiental:

A condição do meio ambiente pode se deteriorar com o tempo se as concentrações de poluentes aumentar ou se as pessoas desenvolveram um gosto por bens intensivos em poluição. O oposto pode ocorrer se a inovação tecnológica tornar o abatimento da poluição menos custoso e se um aumento da conscientização das pessoas conduzir uma mudança autônoma nas demandas por proteção ambiental. (GROSSMAN; KRUEGER, 1995, p. 370, “tradução nossa”)

e

À medida que as nações ou regiões experimentam maior prosperidade, seus cidadãos exigem que mais atenção seja dada aos aspectos não econômicos de suas condições de vida. Os países mais ricos, que tendem a ter um ar urbano e as bacias hidrográficas relativamente mais limpas, também possuem padrões ambientais relativamente mais rigorosos e aplicações mais duras da legislação ambiental do que os países de renda média e mais pobres, muitos dos quais ainda têm problemas ambientais urgentes para resolver. (GROSSMAN; KRUEGER, 1995, p. 372, “tradução nossa”)

Biage e Almeida (2015) colocam que o comportamento da CKA é complexo e pode ser decomposto em três efeitos. O efeito de escala decorre da adoção do uso intensivo de recursos naturais nos processos produtivos e amplificação da produção, além do desperdício decorrente dessa escalada, pode haver ainda algum efeito positivo em decorrência do maior nível de recursos financeiros disponíveis para investimento em medidas de mitigação dos efeitos adversos.

O efeito composição, descrito pelos autores citados no parágrafo anterior, culmina em um aumento da poluição nos estágios iniciais com possível reversão de tendência no longo prazo, as economias passam de processos produtivos primários e menos intensivos em recursos naturais para processos intermediários de base intensiva e depois indústrias de alto nível de poluição, a mudança ocorre na composição da proporção de cada base produtiva na economia de um país. No longo

prazo as economias passam a adotar processos melhores e os serviços assumem proporção relevante na economia. A pressão sobre os recursos, e a pressão política da comunidade leva a alteração na composição da produção sem, no entanto, alterar a composição do consumo, a demanda por bens intensivos em poluição é deslocada para a produção de países de menor renda que acabam assumindo esse papel na produção de bens intensivos.

O efeito redução é oriundo de alterações tecnológicas que tornam os processos produtivos mais limpos, seja pelo uso de processos mais eficientes ou pela substituição de *inputs* mais prejudiciais, por alternativas amigáveis (BIAGE; ALMEIDA, 2016).

Dinda (2004), Biage e Almeida (2015) e AHMAD, et al. (2016), chamam a atenção para a sensibilidade de usar a CKA como elixir teórico, seja porque o ponto de inflexão pode estar num nível irreversível para o ecossistema e “quando a degradação ambiental mostra irreversibilidade, os níveis mais elevados de crescimento econômico não podem ser sustentados.” (ARROW, et al., 1995, apud BIAGE; ALMEIDA, 2015, p. 510). Ou porque os estudos se limitam no tempo e a análise pode demonstrar o comportamento de U-invertido somente em um período. Ou, ainda, devido a sensibilidade dos dados e dos modelos econométricos aplicados que podem levar a conclusões divergentes em diferentes situações (AHMAD, et al., 2016, p. 6)

2.3 REVISÃO DA LITERATURA

Com a assunção do problema entre crescimento e degradação ambiental, a disponibilidade de dados, e o primeiro passo das análises empíricas ter sido dado por Grossman e Krueger no estudo de 1991 verificando e traçando a proposta para a explicação da relação U-invertido, uma série de estudos buscando verificar a CKA surgiram para diversos países. Além da curva alguns desses trabalhos buscavam identificar qual a relação entre outros indicadores econômicos e a degradação.

No trabalho de 1991 os autores avaliam como a entrada do México para o *North American Free Trade Agreement* (NAFTA) poderia impactar a poluição naquele país. Eles assumem que o acordo internacional teria impactos positivos sobre a renda do México. Avaliando a relação entre PIB *per capita*, e variáveis indicadores de qualidade ambiental, o resultado indicou que os níveis de poluição aumentavam quando o país

possuía renda baixa, entretanto, começavam a decrescer a medida que atingia uma renda mais elevada, entre US\$ 4.000,00 e US\$ 5.000,00 em valores base de 1985. Essa descoberta permitiu aos autores inferir que o México poderia se beneficiar do NAFTA. Contudo, ressaltaram que o nível de degradação ambiental não está relacionado somente com o efeito de políticas e do crescimento da renda. É preciso levar em consideração a forma como se altera a composição intersetorial da atividade econômica.

Em outro estudo Grossman e Krueger (1995) usaram o modelo de mínimos quadrados generalizados (GLS) para analisar dados de qualidade do ar e da água em bacias hidrográficas, para um grupo de cidades de diferentes países, reunidos pelo *Global Environmental Monitoring System's* (GEMS). O resultado mostra uma relação de U-invertido da qualidade ambiental em relação ao crescimento econômico para os quatro grupos de variáveis estudadas: qualidade do ar nas regiões urbanas, qualidade da água, contaminação da água por agentes patogênicos e presença de metais pesados na água das bacias hidrográficas. O ponto de inflexão da curva, para quase todos os casos, está antes de cada cidade atingir uma renda *per capita* de US\$ 8.000,00. Para os autores, isso mostra que não há uma inconsistência entre crescimento econômico e degradação ambiental, contudo também não significa que acelerar o crescimento vai conduzir a uma melhor condição ambiental.

Dentre os estudos que avaliaram a existência de uma curva de Kuznets ambiental (CKA), Alam et al. (2016) aplicaram o modelo autorregressivo com defasagens distribuídas (ARDL) estudando o período compreendido entre 1970 e 2012 para o Brasil, China, Índia e Indonésia. O estudo analisou os efeitos das variáveis econômicas PIB *per capita*, consumo de energia e crescimento populacional, sobre a variável dependente CO₂. O modelo de longo prazo mostrou uma relação positiva do crescimento econômico para as emissões de dióxido de carbono. Ou seja, o crescimento da renda aumenta as emissões para Brasil, China e Indonésia, somente na Índia o resultado não é estatisticamente significativo. O consumo de energia, no mesmo modelo, indicou que seu aumento também leva a um crescimento das emissões para todos os países investigados, diferentemente do crescimento populacional que não apresentou resultado significativo para nenhum deles. O Produto Interno Bruto quadrado (PIB²) *per capita* foi condizente com a CKA, apresentou coeficiente negativo e significativo, para Brasil, China e Indonésia, sendo que somente a Índia teve um coeficiente positivo, refutando a CKA. Essa divergência de resultado

foi atribuída a um maior compromisso dos três primeiros países frente a adoção de políticas para melhora dos coeficientes ambientais. A Índia não teria se demonstrado entusiasta da adoção de políticas verdes.

Resultado condizente ao anterior foi obtido por Khan et al. (2021), aplicando o ARDL dinâmico para a economia norte americana, no período entre 1985 e 2020, que confirmou a hipótese tanto no longo quanto no curto prazo. Os autores aplicaram contra as emissões de CO₂ – variável dependente, uma série de variáveis representantes do crescimento econômico, dentre elas a qualidade institucional, urbanização, o desenvolvimento financeiro e o PIB. O trabalho confirmou a CKA no curto e longo prazo, com crescimento econômico impactando positivamente as emissões, e o quadrado do crescimento impactando negativamente emissões. Das demais variáveis apenas qualidade institucional tem um efeito negativo sobre as emissões de CO₂.

Bölük e Mert (2015), usando o ARDL estudaram o caso da Turquia entre 1961 e 2010. Eles usaram PIB e produção de energia elétrica de fontes renováveis, excluindo hidroelétrica, como variáveis econômicas e CO₂ como variável ambiental. O resultado de longo prazo indica a existência de uma relação de U-invertido com um ponto de inflexão aproximadamente de US\$ 9.920. No curto prazo, a conclusão é semelhante, com um coeficiente de ajuste de cerca de 82%, o que indica que quando as emissões de CO₂ estão afastadas do equilíbrio de longo prazo, leva cerca de 1,2 ciclos até convergirem novamente. A produção de energia renovável, excluída hidrelétrica, contribui para a redução das emissões no longo prazo. Ainda que o resultado para o curto prazo indique aumento das emissões em decorrência da produção de energia renovável, os autores salientam que o coeficiente de ajuste do modelo indica que rapidamente o efeito volta para o equilíbrio e passa a ser negativo.

Saboori, Sulaiman e Mohd (2016) aplicaram o modelo ARDL para avaliar a existência da CKA na Malásia entre 1980 e 2008. O modelo incluiu, além da variável de resposta, CO₂, GDP *per capita*, consumo de energia *per capita*, abertura comercial e percentual da população urbana em relação ao total. Os resultados sugerem a existência de uma curva de Kuznets ambiental somente no longo prazo, isso condiz, segundo os autores, com outros trabalhos que indicaram a CKA ser um fenômeno de longo prazo. Por sua vez, para o consumo de energia, o coeficiente positivo indica um crescimento das emissões com o aumento do consumo de energia, tanto no longo prazo, quanto no curto prazo. Em outro trabalho com a mesma ferramenta, AHMAD

et al. (2016), estudando o caso da Croácia, só concordaram com a curva no longo prazo, sendo que no curto prazo o resultado não sustentou a curva em U-invertido, o que condiz com o argumento de Saboori, Sulaiman e Mohd.

Zambrano-Monserrate et al. (2016) aplicaram o teste de Pesaran, Shin e Smith, ARDL, usando dados de emissão de CO₂, PIB, uso de energia e produção de energia elétrica de recursos hídricos, do período compreendido entre 1971 e 2011, para o Brasil. Os coeficientes para o PIB e PIB², positivo e negativo, respectivamente, estão alinhados com a hipótese da CKA. O coeficiente para o uso de energia indica que o aumento do consumo aumenta as emissões. Por sua vez, a produção de eletricidade por fontes hidroelétricas reduz as emissões no longo prazo. Para o curto prazo o efeito do PIB não é estatisticamente significativo, portanto, a CKA não pode ser confirmada, e os coeficientes para consumo de energia e produção de hidreletricidade são similares ao longo prazo.

Gómez e Rodriguez (2020) conduzem uma investigação para os países do NAFTA no período 1971 a 2014, usando as variáveis CO₂, PIB, abertura comercial e consumo de energia. Aplicando os testes de Pedroni e o de Kao para cointegração, testam os coeficientes para o longo prazo, e o resultado alcançado está em linha com uma CKA. Estudando caso semelhante para Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul (BRICS) entre 1980 e 2015, Castro, Alves e Caixeta (2019), concordam com este resultado a partir dos modelos *Dynamic Modified Ordinary Minimum Screening* (DOLS) e *Fully Modified Ordinary Minimum Screening* (FMOLS). Usando outra metodologia, *Feasible Generalized Least Square* (FGLS) Freire-Vinueza, Meneses e Cuesta (2021) chegaram ao mesmo resultado para a América Latina entre 1980 e 2015.

Biage e Almeida (2015), para estabelecer relações de impacto entre CO₂, PIB e outros fatores exógenos, usaram um modelo de dados em painel de efeitos fixos para trinta e sete países de diferentes níveis de desenvolvimento econômico no período compreendido entre 1991 e 2006. A variável dependente utilizada foi o CO₂ *per capita*, tendo como explicativas: proporção de área coberta por florestas em relação ao território total, proporção de áreas protegidas em relação ao território total, PIB *per capita*, taxa de população empregada, consumo de energia equivalente, taxa de alfabetização de adultos com quinze anos ou mais, percentual de matrículas no ensino médio, índice de Gini, expectativa de vida e percentual de pessoas com acesso a água potável. O resultado obtido mostra uma curva ambiental que destoa do caso

clássico, tendo a forma de N sem apresentar, no segundo estágio, uma redução dos níveis de poluição consistente. Os autores enfatizam ainda que, o nível de renda onde ocorre a lateralização é demasiado alto, quase inatingível para a grande maioria das economias. Chamam atenção, ainda, para o fato de o PIB *per capita* ter sido a variável que teve menor impacto sobre o aumento das emissões.

No trabalho os autores mostram que o coeficiente do consumo de energia tem sinal positivo, indicando um aumento da poluição em decorrência do aumento do consumo de energia. Para os autores, isso está alinhado ao fato de que as economias, para crescerem, passam por um processo de transformação da produção para uma indústria de maior demanda energética. A variável de áreas florestais tem sinal positivo aumentando as emissões. Esse coeficiente é interpretado como esperado ao considerar que quanto maior for a área de floresta, mais vulnerável à ação degradante ela está. A partir da mesma ótica, o coeficiente negativo para áreas protegidas está em acordo com o esperado, pois as áreas protegidas são menos vulneráveis à degradação.

Um estudo aplicando econometria espacial no nível regional, foi conduzido por Souza, Irff e Asevedo (2022) para 61 municípios do estado do Ceará. Verificou-se a relação do crescimento econômico com o desmatamento na Mata Atlântica entre 2011 e 2017. O teste indicou que a curva tem formato de N, próximo do resultado de Biage e Almeida (2015).

Resultados diferentes dos anteriores estão em Ben Jebli e Ben Youssef (2015), estudando o caso da Tunísia entre 1980 e 2009, usando ARDL para CO₂, PIB, consumo de energia renovável, consumo de energia não renovável, exportações e importações. Os autores refutam a CKA para o longo prazo, entretanto concordam no curto prazo para os dois modelos, um somente com importações e outro somente com exportações. Evangelista et al. (2020) não encontram uma relação de U-invertido aplicando painel de vetores autorregressivos (PVAR), para países sul-americanos de 1980 a 2009. Para o Brasil no período 1997 a 2016, Morais (2016), usando o modelo *Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology* (STIRPAT) com CO₂, PIB e outras sete variáveis explicativas, encontra resultados que não suportam a curva em U-invertido. Os dois últimos estudos encontram uma relação positiva, em que crescimento econômico aumenta as emissões, em linha com o resultado de longo prazo apresentado em Ben Jebli e Ben Youssef (2015).

Um resumo dos estudos, anteriormente analisados, que testaram a existência de uma curva de Kuznets ambiental (CKA) entre variáveis econômicas e ambientais, pode ser verificado no Quadro 1.

Quadro 1 - Resumo dos estudos que testaram uma curva de Kuznets ambiental

Autores	Abrangência	Variáveis	Método	Formato da curva
GROSSMAN; KRUEGER (1991)	Várias cidades de vários países separadas por grupos de indicadores	SO ₂ , DMt, SPt, GDP _{pp}		U-invertido
GROSSMAN; KRUEGER (1995)	Várias cidades de vários países separadas por grupos de indicadores	AQ, WQ, PWC, HMW, GDP _{pp}	GLS	U-invertido
BIAGE et al. (2015)	37 países entre 1991 e 2006	CO ₂ , FLORPC, PROT, PIB, EMPR, EC, AFDT, MATSEC, GINI, VIDA, AGUA	Painel de efeitos fixos	N - Crescente com lateralização intermediária
BÖLÜK e MERT (2015)	Turquia (1961 – 2010)	CO ₂ , PIB, PIB ² , EPRE	ARDL	U-invertido
JEBLI e YOUSSEF (2015)	Tunísia (1980 – 2009)	CO ₂ , PIB, PIB ² , ECREN, ECNREN, IT	ARDL	U-invertido somente curto prazo
AHMAD et al. (2016)	Croácia (1992 – 2011)	CO ₂ , PIB _{pp} , PIB ² _{pp}	ARDL	U-invertido somente no longo prazo
ALAM et al. (2016)	Brasil, China, Índia e Indonésia (1970 – 2012)	CO ₂ , PIB, PIB ² , EC, POPG	ARDL	U-invertido
MORAIS (2016)	Brasil (26 estados e Distrito Federal)	CO ₂ , PIB, PIB ² , ...	STIRPAT	Crescente
SABOORI; SULAIMAN; MOHD. (2016)	Malásia (1980 – 2008)	CO ₂ , PIB, PIB ² , EC, IT, URB	ARDL	U-invertido somente no longo prazo
ZAMBRANO-MONSERRATE (2016)	Brasil (1971 – 2011)	CO ₂ , PIB, PIB ² , EC, EPRE	ARDL	U-invertido somente no longo prazo
DE CASTRO; ALVES; CAIXETA (2019)	BRICS (1971 – 2011)	CO ₂ , PIB, PIB ² , EC, VC	FMOLS, DOLS	U-invertido
EVANGELISTA et al. (2020)	Países sul-americanos	CO ₂ , PIB, PIB ²	PVAR	Crescente
GÓMEZ e RODRÍGUEZ (2020)	NAFTA (1971 – 2014)	CO ₂ , ECREN, PIB, TO	Pedroni e Kao	U-invertido no longo prazo
FREIRE-VINUEZA; MENESES; CUESTA (2021)	15 países da América do Latina (1980 – 2015)	CO ₂ , PIB, PIB ² , FDI	FGLS	U-invertido
KHAN; et al. (2021)	USA (1985 - 2020)	CO ₂ , PIB, PIB ² , EC, IQ, FD, URB, REM	DARDL	U-invertido

SOUZA; IRFFI; ASEVEDO. (2022)	61 municípios do Ceará (2011 - 2015)	DEF, PIB, PIB ² , PIB ³ , POPD, CAT, EC, FPM,	Tobit, Tobit pooled	N
-------------------------------------	---	--	------------------------	---

AFDT - taxa de alfabetização de adultos; AGUA - percentual da população que possui acesso a água potável; AQ - qualidade do ar; CAT - pecuária; CO2 - dióxido de carbono; DARDL - *Dynamic Autorregressive Distributed Lag*; DM - matéria negra; EC - consumo de energia; ECREN - consumo de energia renovável; ECNREN - consumo de energia não renovável; EMPR - taxa da população empregada; EX - exportações; FD - desenvolvimento financeiro; FDI - investimento externo direto; FLORPC - proporção de área coberta por florestas em relação ao território total; FPM - Fundo de Participação dos Municípios; PIB_{pp} - Produto Interno Bruto *per capita*; PIB²_{pp} - Produto Interno Bruto quadrado *per capita*; PIB³ - Produto Interno Bruto ao cubo; GINI - índice de Gini; GLOB - globalização; IQ - qualidade institucional; IM - importações; IT - comércio internacional; MATSEC - percentual de matrículas no ensino médio; POPD - concentração demográfica; POPG - crescimento populacional; PROT - proporção de áreas protegidas em relação ao território total; PWC - concentração de patógeno na água; REM - remessas enviadas ao exterior; SO2 - dióxido sulfúrico; SPT - partículas suspensas no ar; TO - *trade open*; URB - urbanização; VC - variável de comércio; VIDA - expectativa de vida; HMW - presença de metais pesados na água; WQ - qualidade da água.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a finalidade de verificar a relação entre variáveis ambientais e econômicas, mas não de testar uma CKA, Ceretta, Sari e Ceretta (2020), usando um painel de dados com limites, aplicado a 37 países divididos em três estratos de acordo com o nível de renda, concluíram que combustíveis fósseis e PIB *per capita* têm impacto positivo sobre a emissão de CO₂, ou seja, aumentam a degradação ambiental. Por sua vez o consumo de energias renováveis diminui a emissão de CO₂. Os autores enfatizam, ainda, que a intensidade das relações é mais forte para os países de menor renda.

Ainda com relação a direção das relações entre as variáveis, AHMAD et al. (2016), ALAM et al. (2016), Ben Jebli e Youssef (2015) verificam que GDP *per capita* aumenta as emissões de CO₂ no longo prazo. Para Khan et al. (2021) e ALAM et al. (2016), o consumo de energia aumenta as emissões.

O trabalho de Evangelista et al. (2020) indicam que choques no crescimento do GDP, consumo de energia e consumo de combustíveis fósseis aumentam as emissões de gases poluentes.

2.4 CONTRIBUIÇÃO PARA A MATÉRIA

O crescimento econômico alcançado no último século, com destaque para a “grande aceleração”, trouxe muitos benefícios para a sociedade, mas também trouxe preocupações até então despercebidas. Com a relevância que a questão da degradação foi assumindo, alguns autores se dedicaram para entender a relação entre o crescimento econômico e o aumento dos danos ambientais.

Ainda que testes empíricos tenham se apresentado condizentes com a hipótese da curva de Kuznets ambiental, sua difusão, e por vezes, resultados controversos não permitiram tirar conclusões amplas e permanentes. Dinda (2004) e Ahmad et al. (2016) atribuem essa debilidade a dificuldades na consolidação das variáveis a serem testadas e a dinâmica de transição tecnológica que altera o cenário rapidamente.

Entretanto, compreender a relação entre as emissões de GEE e o crescimento econômico é de grande importância (CERETTA; SARI; CERETTA, 2020), principalmente em se tratando dos países emergentes que são colocados contra a parede, pois, ao mesmo tempo que dependem de desenvolver suas economias, isso pode acarretar um aumento relevante da degradação ambiental, capaz de causar prejuízos econômicos futuros (BIAGE; ALMEIDA, 2015, SOUZA; CORAZA, 2017).

Segundo Alam et al. (2016):

As economias emergentes como o Brasil (...) vivem o dilema de promover o crescimento econômico e, ao mesmo tempo, enfrentar os problemas ambientais, devem considerar principalmente a economia de energia e a mudança para combustíveis não fósseis e imposto sobre o carbono. (ALAM et al, 2016, p. 477, “tradução nossa”)

O Brasil desenvolveu esforços para reduzir suas emissões (ZAMBRANO-MONSERRATE et al., 2016), contudo a relação entre crescimento e emissões no país só foi estudada num segundo momento, e os estudos ainda são escassos.

Segundo Zambrano-Monserrate et al. (2016), os avanços obtidos pelo Brasil entre 2005 e 2013 na redução das taxas de desmatamento em 70% equivalente a uma redução de 3,2 Gt de CO₂, são representantes dos esforços naquele período. Desse modo o país chegou a reclamar o título de líder frente as ações da Mudança Climática. A investigação da curva de Kuznets ambiental (CKA) no Brasil é importante porque “pode lançar alguma luz sobre o futuro deste país, cuja relevância como referência mundial - e especialmente para a América do Sul - hoje certamente atrairá ou desanimará as nações vizinhas a seguirem seu exemplo rumo à sustentabilidade.” (ZAMBRANO-MONSERRATE et al., 2016, p. 209, “tradução nossa”).

Esse trabalho se insere na temática como um esforço, usando dados recentes e, consolidados, representativos do crescimento econômico do Brasil e da degradação ambiental, na tentativa de compreender como as variáveis se relacionam e qual a implicação dessa relação para com os objetivos do país frente ao AP15.

3 DADOS E METODOLOGIA

Nesta monografia busca-se empregar os dados mais atualizados e completos disponíveis na base de dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) e do *World Development Indicators* (WDI), assim como métodos econométricos amplamente difundidos na literatura.

3.1 CONJUNTO DE DADOS UTILIZADOS

Os dados utilizados por este estudo foram selecionados com base na teoria da curva de Kuznets ambiental e nas relações teóricas entre as variáveis selecionadas. Eles abrangem o período que vai de 1990 a 2018, e são os dados mais atualizados para todas as variáveis envolvidas. Ademais, não abrangem o período crítico da pandemia mundial de SARS-COV2 iniciado em dezembro de 2019. O resumo descritivo dos dados está exposto na Tabela 1.

Tabela 1 - Resumo descritivo dos dados.

Variável	Unidade	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
CO2e	t GWP-AR5	2.249.139.008,75	348.101.028,89	1.735.591.033,96	3023812090,48
GDP _{pp}	dólares de 2015	7.497,74	1.078,78	5.974,59	9.247,57
GDPSQ _{pp}		57.339.818,32	16.488.838,15	35.695.726,44	85.517.613,43
AgL	Km ²	2.311.628,59	30.346,91	2.278.050,00	2.368.788,01
EPRE	Tep	93.404,68	22.650,75	66.557,61	129.692,96

Número de observações: 29.

Fonte: Elaboração do autor.

A variável de interesse que representa a degradação ambiental é o dióxido de carbono equivalente⁸ (CO2e) medido em toneladas (t) de GWP-AR5⁹, disponibilizado pelo Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa

⁸ Unidade métrica padronizada para comparar a emissão de vários gases de aquecimento global com base no potencial de aquecimento global (*global warming-potential – GWP*) convertendo outro gás ou conjunto de gases para uma quantidade equivalente de dióxido de carbono com o mesmo potencial de aquecimento. Ver mais em IPCC (2014)

⁹ O termo AR5 é usado para denominar que a medida GWP está de acordo com o cálculo recomendado no AR5 *Climate Change 2014*.

(SEEG), que é uma iniciativa do Observatório do Clima para fazer a contabilidade das emissões brasileiras anualmente. Outras bases de dados trazem a emissão de dióxido de carbono (CO₂), entretanto de forma relativa, abrangendo apenas a geração por fontes específicas como é o caso para o consumo de combustíveis fósseis. O SEEG, por sua vez, contabiliza as emissões dos cinco setores: Agricultura, Energia, Mudanças de Uso da Terra, Processos Industriais e Resíduos (DE AZEVEDO, 2018). A opção em não usar os dados relativos, em termos *per capita* por exemplo, se deu por considerar que os efeitos das emissões de GEE são dispersos e independem de termos relativos, uma vez que afetam a sociedade como um todo.

As variáveis explicativas são, além do Produto Interno Bruto (PIB) *per capita*, que é a principal métrica do crescimento econômico, a produção de energia primária renovável (EPRE), e a área de terra coberta pela agricultura (AgL).

O PIB *per capita* medido em dólares de 2015 foi obtido no WDI, o banco de dados do Banco Mundial. E o PIB²¹⁰ *per capita*, representando o quadrado do PIB *per capita* que é incluído para demonstrar se existe uma relação U-invertido. O PIB, segundo Callen (2020), mensura, em termos monetários, o valor da produção final de bens e serviços em determinado período dentro do território de uma economia. O PIB é um indicador de desempenho e saúde de uma economia, “um aumento no PIB real é interpretado como sinal de que a economia está inda bem.” (CALLEN, 2020, p. 3, “tradução nossa”).

A produção de energia primária renovável foi obtida junto ao Balanço Energético Nacional (BEN) de 2019¹¹ elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e sua unidade de medida está em toneladas equivalentes de petróleo (Tep). A inclusão da desta variável se justifica porque o consumo de energia é umas das variáveis mais representativas do crescimento econômico (KEEN, 2020). De acordo com verificado por Perobelli, Ferreira Neto e Corrêa (2016), à medida que uma economia cresce, o uso de energia se intensifica nas diversas matrizes produtivas.

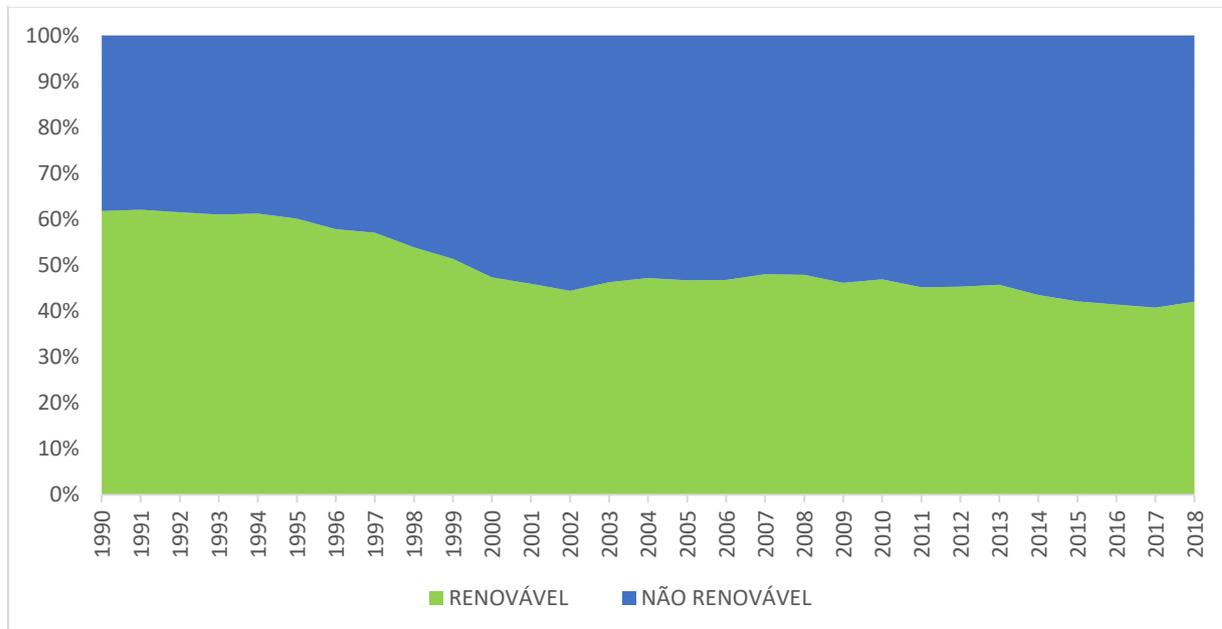
A opção por usar a produção primária passa pela disponibilidade de separar as fontes em renovável e não renovável. A primeira tem importante papel na matriz

¹⁰ Gross Domestic Production Square per capita

¹¹ O BEN 2019 refere ao ano de 2018. Não foi utilizado as matrizes mais recentes porque os dados necessários já estavam disponíveis no BEN 2019.

energética nacional, apesar de perder espaço nas últimas décadas, como representado no Gráfico 1.

Gráfico 10 – Participação da energia renovável na produção de energia primária nacional 1990-2018



Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados do BEN (2019).

Gráfico 10 – Participação média do setor agropecuário no produto brasileiro entre 1996 e 2018
Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados do BEN (2019).

Gráfico 11 – Participação média do setor agropecuário no produto brasileiro entre 1996 e 2018

Gráfico 12 – Participação média do setor agropecuário no produto brasileiro entre 1996 e 2018
Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados do BEN (2019).

Gráfico 13 – Participação média do setor agropecuário no produto brasileiro entre 1996 e 2018
Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados do BEN (2019).

Ademais, a energia renovável é de origem limpa e sua disponibilidade, espera-se, causa menor impacto negativo reduzindo as emissões de gases de efeito estufa (GEE). No entanto, há que se considerar que produzir energia de matriz renovável também produz poluentes. A designação “matriz limpa” faz jus apenas ao fato de que o saldo entre a poluição gerada e absorção pode ser positivo – ao produzir a cana-de-açúcar para o etanol, por exemplo, a planta absorve uma certa carga de poluentes

atmosféricos – ou, ainda, a quantia gerada de poluentes é menor que aquela produzida pelas matrizes alternativas, baseadas em hidrocarbonetos.

Outro contribuinte em favor da inclusão da variável EPRE é o seu papel na geração da riqueza de um país. Alam et al. (2016) salientam que a energia é um dos motores do crescimento econômico. É largamente usada no processo produtivo, tendo um papel tão relevante quanto o capital e a mão de obra. “Como qualquer escassez no fornecimento de energia afeta o crescimento econômico, o consumo de energia no processo de produção é considerado uma pré-condição do desenvolvimento econômico sustentável.” (ALAM et al., 2016, p. 466). Ainda de acordo com os autores, a atividade produtiva, ao consumir energia, gera grandes contingentes de GEE, com grande impacto ecológico. Para Saboori, Sulaiman e Mohd (2016), o consumo de energia é o principal fator de agravamento das emissões. Contudo, apesar de a redução do consumo de energia ser uma forma de reduzir o problema, ao mesmo tempo levaria a um impacto negativo e significativo sobre o crescimento econômico. Keen (2020), coloca que a energia é diretamente necessária para a produção e geração da renda, logo, se a produção de energia tiver que ser reduzida em resposta ao aquecimento global, o PIB também cairá. A questão é quanto, e a resposta depende do nível de dependência em relação aos combustíveis fósseis, que é grande.

A variável explicativa terras sob uso agrícola (AgL) é incluída pioneiramente¹² num estudo como *proxy* da fonte de emissão Alterações no Uso da Terra, que é a principal emissora dos GEE no Brasil (SEEG, 2021). Apesar da limitação da variável, ela é a que melhor representa esse tema, entre as disponíveis. Segundo o World Bank – WDI (2022), de onde os dados foram coletados.

A terra agrícola refere-se à parcela da área de terra que é arável, sob culturas permanentes e sob pastagens permanentes. A terra arável inclui a terra definida pela FAO como terra com culturas temporárias (áreas de cultivo duplo são contadas uma vez), prados temporários para roçada ou pastagem, terra sob mercado ou hortas e terra temporariamente em pousio. Excluem-se as terras abandonadas devido à agricultura itinerante. As terras com lavouras permanentes são aquelas cultivadas com lavouras que ocupam a terra por longos períodos e não precisam ser replantadas após cada colheita, como cacau, café e borracha. Esta categoria inclui terrenos com arbustos floridos, árvores frutíferas, nogueiras e vinhas, mas exclui terrenos com árvores cultivadas para madeira ou madeira. Pastagem permanente é a terra usada por cinco ou mais anos para forragem, incluindo culturas naturais e cultivadas. (WORLD, WDI source, 2022, “tradução nossa”)

¹² O autor desconhece até o momento outro estudo que tenha empregado a área de terras agrícolas como variável explicativa.

Desse modo, os dados AgL, plotados em quilômetros quadrados (Km²), abarcam tanto terras destinadas a produção de culturas como a criação de animais, outro importante emissor de GEE. Entretanto, é preciso olhar com cautela para os dados uma vez que eles não levam em consideração a produtividade que sabidamente evolui ao longo dos anos, o que pode ser tanto positivo ao demandar menos área para produzir quantias semelhantes, quanto negativo se considerar que os ganhos de produtividade decorrem muitas vezes da intensificação das culturas e do maior emprego de fertilizantes nos solos, hormônios e aceleração de engorda de animais. No Quadro 2 está um resumo dos dados usados e o efeito esperado sobre a variável de interesse.

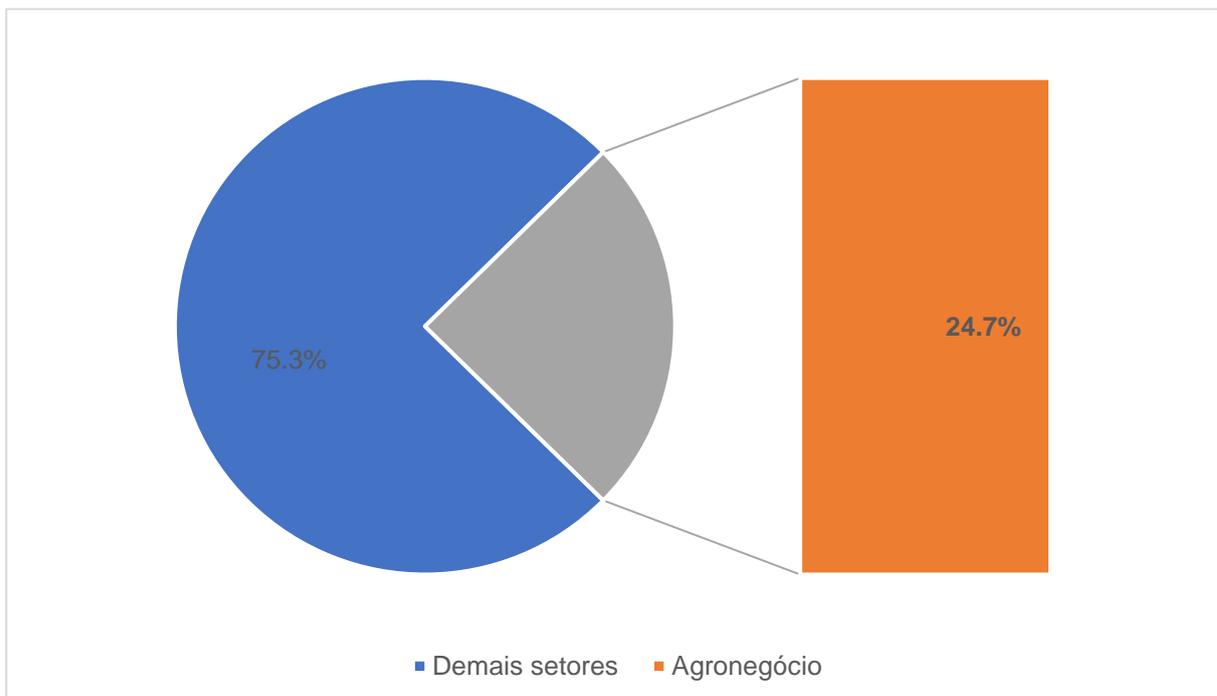
Quadro 2 - Resumo dos dados usados no estudo

Variáveis	Descrição	Unidade	Fonte	Sinal esperado
CO2e	Dióxido de carbono equivalente	t GWP-AR5	SEEG	
GDPpp	Produto Interno Bruto <i>per capita</i>	Dólares 2015	WDI	+
GDPSQpp	Produto Interno Bruto <i>per capita</i> ao Quadrado			-
AgL	Terras de uso agrícola			Km ²
EPRE	Produção de energia primária renovável	Tep	BEN	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Biage e Almeida (2015) usaram variáveis representando áreas florestais com a justificativa do papel que elas têm sobre o sequestro de carbono e sua contribuição para a biodiversidade. Segundo eles a conversão de áreas florestais para outros fins, pelas queimadas, extração madeireira, produção de pastagens e cultivo agrícola, é tida como grande problema. Os autores salientam que os países em desenvolvimento sofrem grande impacto de queimadas. No Brasil, as queimadas são tanto antropogênicas como relacionadas à agricultura, nas áreas da região Amazônica, Brasil Central, Floresta Tropical e Cerrado. “Estas queimadas estão atreladas à forte expansão das atividades agropecuária e agrícola” (BIAGE; ALMEIDA, 2015, p. 543). Moraes (2019), vê nas mudanças do uso da terra o principal emissor de CO₂.

Gráfico 14 – Participação média do setor agropecuário no produto brasileiro entre 1996 e 2018



Fonte: Elaborado pelo autor, com base nos dados CEPEA, (2021).

Fonte: Elaborado pelo autor, com base nos dados CEPEA, (2021).

Fonte: Elaborado pelo autor, com base nos dados CEPEA, (2021).

Fonte: Elaborado pelo autor, com base nos dados CEPEA, (2021).

A inclusão da AgL e não outra variável relacionada permite uma interpretação do impacto que a característica de forte participação da agropecuária da economia

brasileira tem sobre as emissões. Nas duas últimas décadas a participação do setor, sozinho, foi de aproximadamente um quarto da produção total de bens do país, como pode ser observado no Gráfico 2.

Segundo Angelo, Oliveira e Ghobil (2022) nos dois últimos anos, 2021 e 2022, as exportações do agronegócio superaram 35% do total das exportações do país. De posse dessa relação AgL vs CO₂e é possível verificar se a estratégia de incentivar o setor agropecuário como motor da economia adotada nas últimas décadas, é compatível com os acordos internacionais no entorno da preocupação climática mundial refletida no AP15.

3.2 METODOLOGIA

Esse trabalho usa séries temporais do período entre 1990 e 2018 para o Brasil. O método empregado é um modelo autorregressivo com defasagens distribuídas, (ARDL), também nominado como limites de integração, proposto por Pesaran, Shin e Smith, para testar a relação entre as variáveis econômicas e emissão de CO₂e.

3.2.1 Estacionariedade

As séries temporais são dados utilizados por economistas, no entanto, elas apresentam alguns problemas que precisam ser considerados para evitar interpretações equivocadas. Segundo Alam et al. (2016), as análises, assumem que as séries são estacionárias, no entanto, os fatos empíricos mostram o contrário. Portanto, há correlação serial entre as variáveis tornando as estatísticas *t* e *F* não apropriadas. Trabalhos que não levem em consideração essa hipótese podem sofrer de (i) problema da regressão espúria – alta chance de recusar a hipótese nula de não cointegração, quando não há cointegração nenhuma, indicando um R^2 alto e baixo valor da estatística Durbin-Watson, e (ii) estimativas ineficientes e inconsistentes de Mínimos Quadrados Ordinários (OLS) caso as variáveis não sejam cointegradas (GREENE, 2012, NKORO; UKO, 2016). A análise de cointegração requer que o conjunto de variáveis seja integrado de mesma ordem e suas combinações lineares sejam estacionárias. Se as séries não têm a mesma ordem então não há relação significativa entre elas.

Quando uma série possui raiz unitária, é dita não estacionária, isso significa que sua média e variância sofrem variação com o tempo. Pode-se dizer que a série não retorna para seu caminho determinístico ao longo do tempo; a série carrega efeitos de choques e pode crescer continuamente (GREENE, 2012).

Uma forma de contornar o problema da estacionariedade, é aplicar um processo de diferenciação tornando as variáveis estacionárias. Apesar de aceitável, essa técnica perde importantes relações de longo prazo entre as variáveis e de equilíbrio entre elas (GREENE, 2012, NKORO; UKO, 2016). Além disso, o processo de diferenciação numa série com tendência transfere-a para autocorrelação dos erros (GREENE, 2012).

Nkoro e Uko (2016) e Greene (2012) indicam o teste Dickey-Fuller aumentado (ADF) e o teste de Phillips-Perron (PP) para verificar a estacionariedade das variáveis. Ambos os autores salientam ser uma boa prática aplicar diferentes testes como forma de verificar o quão sensível são as conclusões.

Os autores, acima citados, também apontam que o teste ADF é considerado superior em relação ao Dickey-Fuller padrão (DF) para testar a raiz unitária. O ADF tem a peculiaridade de acomodar processos autorregressivos no termo de erro. A análise da estatística segue a seguinte formulação: se os valores absolutos encontrados são inferiores aos valores críticos padronizados, a série é dita não estacionária, portanto, segue um processo $I(1)$. Se o valor absoluto obtido da estatística é maior que o valor crítico então a série é constituída por um processo estacionário $I(0)$ e a hipótese nula deve ser rejeitada. As hipóteses podem ser formuladas como segue:

- a) H_0 : a variável segue um processo não estacionário, é $I(1)$.
- b) H_1 : a variável segue um processo estacionário, é $I(0)$

O teste PP é semelhante ao teste ADF, tem a mesma hipótese nula. Contudo o PP lê a correlação serial não-paramétrica, enquanto o ADF lê a correlação serial paramétrica.

3.2.2 Modelo Autorregressivo com Defasagens Distribuídas (ARDL)

Regularmente os economistas se deparam com dados de séries temporais, que possibilitam trabalhos empíricos. Assume-se a hipótese teórica de relação entre as variáveis em que a média e a variância são constantes ao longo do tempo, ou seja,

não sofrem efeitos sazonais que altere a dinâmica dos dados. No entanto, a realidade é bem mais cruel e a média e a variância não concordam com essa hipótese. A assunção errada dessas premissas, e aplicação das técnicas tradicionais de regressão, é fonte de inferências erradas ou regressão espúria (NKORO; UKO, 2016).

Um modelo econométrico tradicional, OLS, que relaciona as variáveis CO2e, PIB, PIB² *per capita*, EPRE e AgL pode ser descrito como:

$$CO2e_t = \alpha_0 + \alpha_1 PIBpp_t + \alpha_2 PIB^2pp_t + \alpha_5 AgL_t + \alpha_3 EPRE_t + \varepsilon_t \quad (1)$$

Onde CO2e é a emissão de dióxido de carbono equivalente em toneladas de petróleo, PIBpp e PIB²pp são o produto interno bruto *per capita* e seu quadrado, respectivamente, EPRE é a produção de energia primária renovável, AgL são terras sob uso agrícola como *proxy* para alterações do uso da terra e ε é um ruído branco.

Para o parâmetro α_1 o sinal esperado é positivo, enquanto para o α_2 o efeito esperado é negativo, representando a existência da relação CKA. Já o ponto da virada, ou de inflexão da CKA é dado pela derivada parcial do CO2e em relação ao GDP:

$$\frac{dCO2e}{dGDP} = \frac{\alpha_1}{2\alpha_2} \quad (2)$$

Apesar de aceitável, a técnica de diferenciação para estabilizar as séries, permitindo a aplicação dos métodos clássicos de OLS, perde importantes relações de longo prazo entre as variáveis e de equilíbrio entre elas e a remoção da tendência transfere a correlação para os erros (GREENE, 2012, NKORO; UKO, 2016).

O processo de cointegração, no longo prazo, verifica a relação entre duas variáveis que flutuam juntas. Sua dinâmica de curto prazo diz respeito aos seus desvios e como eles se relacionam com o longo prazo (NKORO; UKO, 2016, p. 71).

Alam et al. (2016) indicam que a abordagem padrão para verificar a cointegração são os testes de Engle e Granger e o teste de Johansen. Entretanto têm as seguintes debilidades: a abordagem de Engle e Granger é bivariada e não deveria ser empregada em análises multivariadas; a relação de longo prazo é testada usando OLS sem tornar as variáveis estacionárias, sujeitando-a a um viés da omissão da dinâmica que pode prejudicar o estimador; o método de Johansen é menos suscetível à crítica do viés da dinâmica, no entanto é criticada pela sensibilidade em relação ao número de defasagens incluídas e também pode ser de difícil interpretação no caso

da existência de mais de um vetor de cointegração. Ambos os testes são aceitáveis somente no caso de variáveis de mesma ordem de integração.

Pesaran, Shin e Smith (2001) propuseram um método de cointegração autorregressivo com defasagens distribuídas (ARDL), que, se propõe a resolver o problema da estacionariedade ao incluir no mesmo teste tanto em séries do tipo $I(0)$ como $I(1)$. Isso é obtido com o estabelecimento de limites de cointegração para cada um dos processos de estacionariedade. Outro problema resolvido é o da dinâmica de longo prazo, com a inclusão da correção de erros.

Segundo Saboori, Sulaiman e Mohd (2016), Ahmad et al. (2016) e Khan et al. (2021) o modelo ARDL possui uma série de vantagens sobre os modelos alternativos, a principal é não precisar de estabilizar a série. Para Alam et al. (2016) o uso do ARDL para verificar as relações de longo prazo e a natureza mutável das variáveis se justifica pelas seguintes características importantes:

(...) (i) as relações de cointegração basicamente são estimados usando OLS, sendo que essa estimativa é feita após a escolha da respectiva ordem de defasagem do modelo utilizado. (ii) Diferentemente da abordagem de Johansen e Juselius, esta técnica aplicada permanece estatisticamente significativa independentemente da natureza das variáveis serem $I(0)$ ou $I(1)$ ou mutuamente co-integradas. (iii) Em outra dimensão, é imperativo mencionar que o teste é necessário e válido em amostras de dados pequena e finita, mas, em essência, este procedimento de avaliação não será válido se existir uma série $I(2)$ dentro do modelo. (ALAM et al, 2016, p. 469, “tradução nossa”)

Para Ahmad et al. (2016), a simulação de Monte Carlo confirma que o ARDL é superior por produzir resultados não viesados para pequenas amostras. Além disso, pode ser estimado quando as variáveis explicativas são endógenas, ao inserir as defasagens tornando-o dinâmico.

Segundo Ben Jebli e Ben Youssef (2015):

(i) parâmetros de longo e curto prazo são estimados simultaneamente; (ii) problemas de endogeneidade são evitados; (iii) examina a relação de longo prazo entre as variáveis se os regressores são puramente $I(0)$, puramente $I(1)$ ou ambos; e (iv) fornece melhores resultados com amostra pequena do que outras técnicas de cointegração. (BEN JEBLI; BEN YOUSSEF, 2015, p. 179, “tradução nossa”)

Alam et al. (2016) indicam que apesar de o ARDL dispensar o teste de raiz unitária é importante fazê-lo, por um lado, para não haver surpresas com a ordem de integração das variáveis e, por outro lado, “para justificar a aplicação apropriada do

ARDL em relação a outras abordagens de cointegração.” (ALAM et al., 2016, p. 270, “tradução nossa”)

O ARDL testa a significância conjunta dos coeficientes no nível defasado da relação de longo prazo entre as variáveis. A primeira etapa do teste consiste em empregar um teste para verificar a hipótese nula que indica não haver cointegração, ou relação de longo prazo entre as variáveis $H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = 0$ contra a hipótese alternativa $H_1: \theta_1 \neq \theta_2 \neq \theta_3 \neq \theta_4 \neq \theta_5 \neq 0$.

$$\begin{aligned} \Delta CO2e = & \alpha_0 + \varphi_0 \\ & + \sum_{k=1}^n \alpha_{1k} \Delta CO2e_{t-k} + \sum_{k=0}^n \alpha_{2k} \Delta GDPpp_{t-k} + \sum_{k=0}^n \alpha_{3k} \Delta GDPSQpp_{t-k} \\ & + \sum_{k=0}^n \alpha_{4k} \Delta AgL_{t-k} + \sum_{k=0}^n \alpha_{5k} \Delta EPRE_{t-k} + \theta_1 CO2e_{t-1} + \theta_2 GDPpp_{t-1} \\ & + \theta_3 GDPSQpp_{t-1} + \theta_4 AgL_{t-1} + \theta_5 EPRE_{t-1} + \varepsilon_t \end{aligned} \quad (3)$$

Onde α_0 é o intercepto, φ_0 é um parâmetro de tendência, os demais α são coeficientes de cada variável explicativa para os vetores dos termos defasados, os θ são parâmetros de cada variável explicativa, k é o tamanho da defasagem de cada variável, t é o tempo e ε é o termo de erro.

Com base no resultado do teste de Wald, a estatística F para a existência de cointegração é comparada com os limites críticos dados por Pesaran, Shin e Smith (2001) para verificar a hipótese nula (H_0) contra a hipótese alternativa (H_1) formuladas como:

- i) H_0 : não existe cointegração entre as variáveis.
- ii) H_1 : existe cointegração entre as variáveis.

O teste da estatística F obtido é comparado com dois limites terminais. O primeiro valor crítico assume as variáveis como $I(0)$, é o limite crítico inferior (LCI). O segundo, assume $I(1)$ e é o limite crítico superior (LCS). A interpretação é a seguinte:

- i) Se $F > LCS$, então a H_0 pode ser rejeitada.
- ii) Se $F < LCI$, então não podemos rejeitar H_0 .
- iii) Se $LCI < F < LCS$ o teste é inconclusivo e a cointegração pode ser testada pela significância do termo de correção de erro (ECM).

A seleção do comprimento das defasagens é definida pelos critérios de informação de Akaike (AIC), critério de informação de Hannan-Quinn (HQC) e critério

bayesiano de Schwarz (SBIC) (BEN JEBLI; BEN YOUSSEF, 2015, NKORO; UKO, 2016, SABOORI; SULAIMAN; MOHD, 2016, KHAN et al., 2021).

Uma vez que a cointegração seja detectada, a equação do modelo de longo prazo permanece:

$$CO2e = \alpha_0 + \varphi_0 + \theta_1 CO2e_{t-1} + \theta_2 GDPpp_{t-1} + \theta_3 GDPSQpp_{t-1} + \theta_4 AgL_{t-1} + \theta_5 EPRE_{t-1} + \varepsilon_t \quad (4)$$

Para o curto prazo a equação passa a ser escrita com o termo de correção de erros:

$$\Delta CO2e = \beta_0 + \sum_{k=1}^n \beta_{1k} \Delta CO2e_{t-k} + \sum_{k=1}^n \beta_{2k} \Delta GDPpp_{t-k} + \sum_{k=1}^n \beta_{3k} \Delta GDPSQpp_{t-k} + \sum_{k=1}^n \beta_{4k} \Delta AgL_{t-k} + \sum_{k=1}^n \beta_{5k} \Delta EPRE_{t-k} + \gamma ECM_{t-1} + \tau_t \quad (5)$$

A equação final tem a forma

$$\Delta CO2e = \beta_0 + \varphi_0 + \sum_{k=1}^n \beta_{1k} \Delta CO2e_{t-k} + \sum_{k=1}^n \beta_{2k} \Delta GDPpp_{t-k} + \sum_{k=1}^n \beta_{3k} \Delta GDPSQpp_{t-k} + \sum_{k=1}^n \beta_{4k} \Delta AgL_{t-k} + \sum_{k=1}^n \beta_{5k} \Delta EPRE_{t-k} + \theta_1 CO2e_{t-1} + \theta_2 GDPpp_{t-1} + \theta_3 GDPSQpp_{t-1} + \theta_4 AgL_{t-1} + \theta_5 EPRE_{t-1} + \gamma ECM_{t-1} + \tau_t \quad (6)$$

O coeficiente do ECM, γ , mostra a velocidade do ajuste e indica o quão rápido a série atinge o equilíbrio de longo prazo. O valor esperado para o coeficiente de ajuste é negativo e significativo.

3.2.3 Testes dos resíduos

Concordando com Saboori, Sulaiman e Mohd (2016), serão empregados testes de diagnóstico e estabilidade para verificar a adequação do modelo.

A hipótese de homocedasticidade supõe que a variância do termo de erro condicional é constante e finita, e independe da observação da variável explicativa

(GREENE, 2012). A hipótese é premissa para o estimador dos parâmetros ser o melhor estimador linear não tendencioso (MELNT). Segundo Gujarati e Porter (2011) mesmo quebrada a hipótese o estimador ainda será linear e não tendencioso, contudo, deixa de ser o melhor estimador, demandando então proposições alternativas. Ainda que a heterocedasticidade seja mais comum nos modelos *cross section* (GREENE, 2012), será empregado o teste de heterocedasticidade geral de White, a fim de confirmar a hipótese para MELNT. O teste de White não depende da suposição de normalidade e procura rejeitar a hipótese nula (H_0) de homocedasticidade com base na distribuição de qui-quadrado.

A inexistência de autocorrelação é outra das hipóteses para MELNT, apesar de sua falha não tirar as características de ser linear e não tendencioso, ele pode não ser o melhor estimador (GUJARATI, 2011). Um modelo possui correlação serial quando o erro de qualquer uma das observações é influenciado pelo erro de outra observação. A forma mais difundida de testar a existência de correlação serial é aplicando o teste da estatística d de Durbin-Watson, entretanto para séries temporais não deve ser empregada se o modelo possuir variáveis autorregressivas e/ou não possuir intercepto. O teste indicado sob essas circunstâncias é o Breusch-Godfrey (GREENE, 2012). O teste Breusch-Godfrey assume que para H_0 não há correlação serial nos erros em nenhuma variável. Ele é baseado no valor crítico qui-quadrado. Se o valor qui-quadrado obtido for maior que o valor crítico qui-quadrado ao nível de significância escolhido, H_0 deve ser rejeitada.

Já a estabilidade dos coeficientes é testada aplicando o teste recursivo de soma cumulativa dos resíduos (CUSUM) e o teste recursivo de soma cumulativa dos resíduos quadrados (CUSUMSQ), que avalia o comportamento dos dados no entorno da média.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos testes e as discussões foram separadas em subseções para facilitar a compreensão em cada espectro, principalmente os resultados do modelo de cointegração.

4.1 RESULTADOS

Nesta seção são expostos os resultados dos testes empregados para estacionariedade, teste de limites de cointegração, parâmetros do ARDL, e diagnóstico dos resíduos. Exceto para a discussão dos parâmetros do ARDL, os demais testes se limitam a esta subseção.

4.1.1 Teste de raiz unitária para estacionariedade das séries

Apesar de que o modelo desobrigue um teste de raiz unitária, realizá-lo é uma forma de melhorar a fidelidade dos resultados e garantir que nenhuma variável rompa o critério $I(0)$ ou $I(1)$, não se tornando estacionária após a primeira diferença.

Os testes ADF e PP foram performados em sequência: incluindo os termos de tendência e a constante. Quando a tendência se mostrou irrelevante para o resultado, foi aplicado em seguida o teste apenas com a constante e quando a tendência e constante foram irrelevantes o teste foi performado sem elas. A ordem de integração de cada variável, por sua vez, foi definida com auxílio da matriz de defasagens, usando os critérios AIC, HQC e SBIC.

Os resultados apresentados na Tabela 2 indicam que apenas a variável AgL é estacionária $I(0)$, a hipótese nula deve ser recusada com significância de 1%, empregando o PP, sendo que para o ADF o resultado é divergente. Para as demais variáveis não pode ser rejeitada a hipótese nula com significância de 5%.

Quando o teste foi realizado para a primeira diferença, $I(1)$, a hipótese nula não pode ser rejeitada para nenhuma das variáveis a uma significância de pelo menos 5%, em ambos os testes. A tabela 3 mostra os resultados.

Tabela 2 - Testes de estacionariedade ADF e PP para variáveis em nível $I(0)$

Variáveis	ADF			PP		
	k	Trend (T), Constant (C)	z(t)	k	Trend (T), Constant (C)	z(t)
CO2e	3	T, C	- 2,961	3	no	- 0.348
PIB _{pp}	1	no	1,333	1	no	1.790
PIB ² _{pp}	2	no	1,002	2	no	1.304
AgL	2	T, C	- 2,084	2	T, C	- 4.945***
EPRE	1	T, C	- 3.373*	1	T, C	- 1.945

*, **, *** níveis de significância 0,1, 0,05 e 0,01, respectivamente

Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software Stata/SE 12.0.

Tabela 3 - Testes de estacionariedade ADF e PP para variáveis após a primeira diferença $I(1)$

Variáveis	ADF-test			PP-test		
	k	Trend (T), Constant (C),	z(t)	k	Trend (T), Constant (C),	z(t)
Δ CO2e	1	no	- 3,598***	1	no	- 3,922***
Δ PIB _{pp}	1	no	- 2,431**	1	no	- 3,158***
Δ PIB ² _{pp}	1	no	- 2,491**	1	no	- 3,141***
Δ AgL	1	no	- 2,097**	1	no	- 2,004**
Δ EPRE	0	C	- 4,184***	0	C	- 4,184***

*, **, *** níveis de significância 0,1, 0,05 e 0,01, respectivamente

Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software Stata/SE 12.0.

Os dados apresentados indicam que todas as variáveis são estacionárias de nível $I(0)$ ou de primeira diferença $I(1)$. Segundo Ben Jebli e Ben Youssef (2015), Alam et al. (2016), Ahmad et al. (2016), Saboori, Sulaiman e Mohd (2016), Nkoro e Uko (2016) e Khan et al. (2021) o ARDL é o melhor modelo a ser empregado nesse caso.

4.1.2 O teste de limites e os parâmetros obtidos no ARDL

O modelo autorregressivo com defasagens distribuídas (ARDL) foi aplicado com parcimônia, levando em consideração o processo de tendência e o intercepto no modelo. A primeira forma leva o termo de tendência e a constante, sendo que nenhum deles teve relevância estatística para ser mantido. Em seguida foi removida a tendência e aplicada a versão somente com a constante que, mais uma vez, foi irrelevante para o modelo. As três formas são:

- i) Forma 1: modelo incluindo o termo de tendência, ϕ_0 , e do intercepto, α_0 , equação 3.

- ii) Forma 2: inclui apenas o coeficiente do intercepto, α_0 , equação 3.
- iii) Forma 3: não inclui nenhum dos termos anteriores.

A aplicação do modelo ARDL sem tendência e constante é confirmada ao aplicar o teste de cointegração de longo prazo e obtendo um valor R de 0,9414 com um valor R-ajustado de 0,8615. O nível de fidelidade do modelo, indicado pela probabilidade do valor F estar correto, é significativo a 1 %.

Previamente as defasagens para cada uma das equações (formas 1, 2 e 3) foram definidas pelos critérios de informação AIC, HQC e SBIC. A ordem das defasagens foi (3 1 3 2 2) para CO₂e, PIB_{pp}, PIB²_{pp}, AgL e EPRE respectivamente. Os valores críticos obtidos para as estatísticas F e t são interpretados com base nos valores críticos de Pesaran, Shin e Smith (2001) para o caso 1, sem constante.

Os valores críticos obtidos, Tabela 4, sugerem a rejeição de H₀. O valor F obtido – F = 22,457 – está acima do limite crítico superior proposto, a uma significância de 1% - LCS_{0,01} 4,44 –, de forma que a hipótese nula de não haver cointegração de longo prazo não deve ser aceita. O valor t, também sugerido em Pesaran, Shin e Smith (2001), para reforçar a conclusão, tem a interpretação invertida do F. Para o t, H₀ deve ser rejeitada quando o valor crítico estiver abaixo do valor t padronizado. A estatística t encontrada – t = - 6,457 – é menor que o valor do limite crítico superior a 1% – LCS_{0,01} = - 4,23 – logo, confirma-se a rejeição de H₀.

Tabela 4 - Estatísticas obtidas para o modelo de cointegração de longo prazo

	Valores obtidos teste de limites	Limites padronizados	
		LCI I(0)***	LCS I(1)***
F-test	22,457	3,07	4,44
t-test	- 6,457	- 2,58	- 4,23

*** nível de significância de 0,01

Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software Stata/SE 12.0.

Uma vez que a relação de longo prazo foi confirmada, o teste seguinte inclui o ECM, equação 6, para verificar a velocidade do ajuste das defasagens. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados do ARDL teste de limites de cointegração para o curto e longo prazo

Relação	Variáveis	Coefficiente	Valor (t)	P > t
Longo Prazo	PIB _{pp}	4186868	5,54***	0,000
	PIB ² _{pp}	- 216,5851	- 5,26***	0,000
	AgL	- 5647,194	- 4,29***	0,001

	EPRE	- 40336,22	- 5,52***	0,000
Curto Prazo	CO2e	0,208	1,50	0,162
	PIB _{pp}	- 1813930	- 1,65	0,126
	PIB ² _{pp}	- 17,29277	- 2,70***	0,021
	AgL	15093,92	2,91***	0,014
	EPRE	24449,49	2,57***	0,026
Ajuste	ECM	- 0,845	- 6,46***	0,000

*** nível de significância de 0,001

Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software Stata/SE 12.0.

No longo prazo, o coeficiente PIB_{pp} apresentou sinal positivo, o que indica haver um aumento nas emissões quando ocorre crescimento do produto *per capita*. Já o PIB²_{pp} apresentou o sinal negativo esperado. Os dois coeficientes em conjunto confirmam a curva de Kuznets ambiental (CKA). O ponto de inflexão da curva de longo prazo, calculado pela equação 2, está na renda *per capita* de US\$ 9.665 de 2015. O coeficiente da produção de energia renovável indicou impacto positivo sobre as emissões de CO₂e, o crescimento da produção de energia renovável reduz as emissões no longo prazo, resultado em linha com o esperado teoricamente. Para a cobertura de áreas agrícolas, AgL, o coeficiente diverge do esperado, e seu sinal negativo indica que um aumento das áreas agrícolas, no longo prazo, pode ter o efeito de reduzir as emissões.

Para o curto prazo o coeficiente do CO₂e não é significativo assim como para o PIB_{pp}. Em se tratando do PIB²_{pp} o sinal negativo mostra haver uma inflexão, com redução das emissões, no entanto sozinho o coeficiente não permite concordar com uma CKA. O EPRE apresenta efeito positivo sobre as emissões no curto prazo, efeito ruim, pois o objetivo a ser perseguido é o de reduzir as emissões. Por fim, o coeficiente para AgL está em linha com o esperado, é positivo indicando que a expansão de terras agrícolas tem efeitos danosos de aumentar as emissões.

Os resultados de curto prazo são ajustados rapidamente após 1,2 ciclos. O coeficiente do ECM (- 0,845) condiz com o esperado sendo significativo e negativo. Ele mostra que 84,5% das oscilações de curto prazo são corrigidas logo no primeiro ciclo.

4.1.3 Resultados dos testes de diagnósticos dos erros

Os testes para os erros mostram estabilidade dos parâmetros, ausência de correlação serial e/ou heterocedasticidade e adequação do modelo, Tabela 6. O ajuste do modelo pode ser verificado pelo alto valor do R-ajustado, 0,9996, e se confirma na condução dos demais testes.

O valor da estatística Breusch-Godfrey (0,015) indica que a probabilidade de obter um valor qui-quadrado próximo de 0,015 é maior que 90%. O valor crítico para uma defasagem a 5% é de 3,84. Portanto, o valor obtido menor que o valor crítico não permite rejeitar H_0 , logo os erros não possuem correlação serial.

Para heterocedasticidade, o teste de White retorna um qui-quadrado de 26,00 quando o valor crítico qui-quadrado para 25 graus de liberdade a 5% é 37,65. Sendo o teste de White um teste de confirmação de H_0 – existência de heterocedasticidade, o valor obtido indica rejeição da hipótese. Portanto, os erros são homocedásticos.

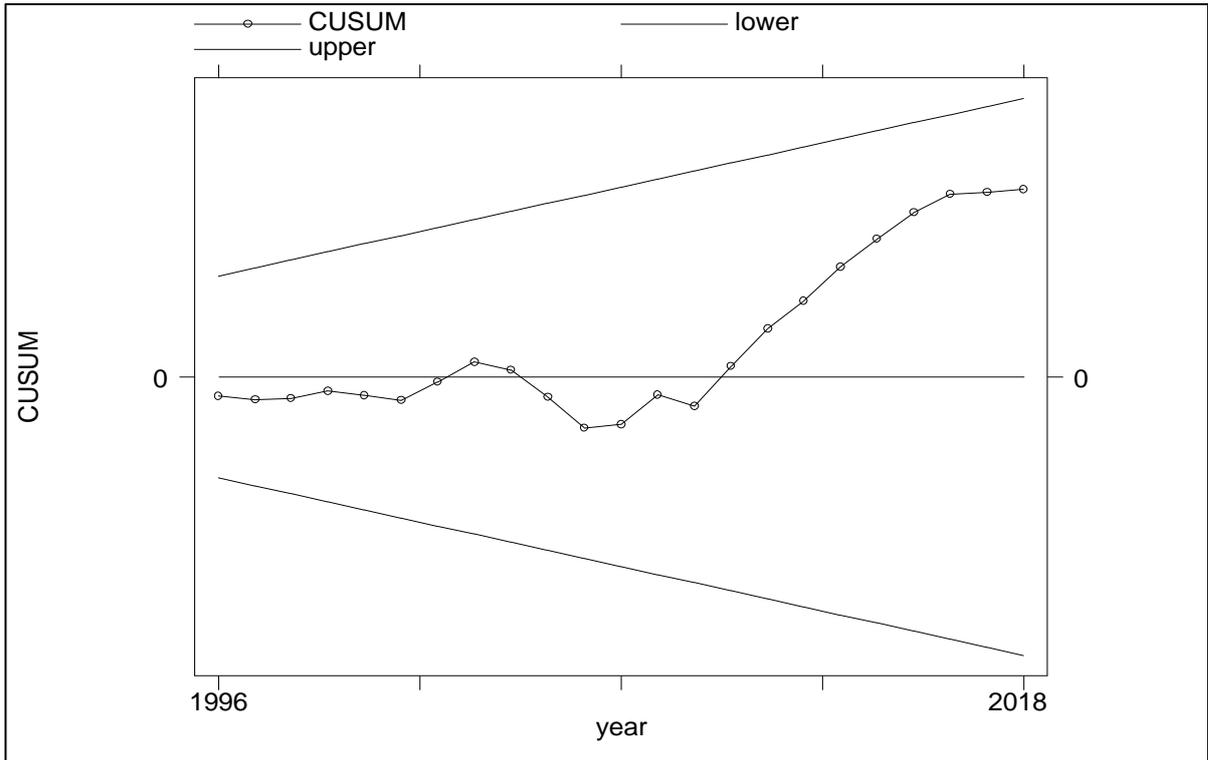
Tabela 6 - Resultados dos testes de diagnóstico do modelo

Testes de diagnóstico		
R-ajustado	0,9996	
R-quadrado ajustado	0.9991	
	Chi ²	Prob > Chi ²
Autocorrelação (Breusch-Godfrey)	0,015	0,9025
Heterocedasticidade (White)	26,00	0,4078

Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software Stata/SE 12.0.

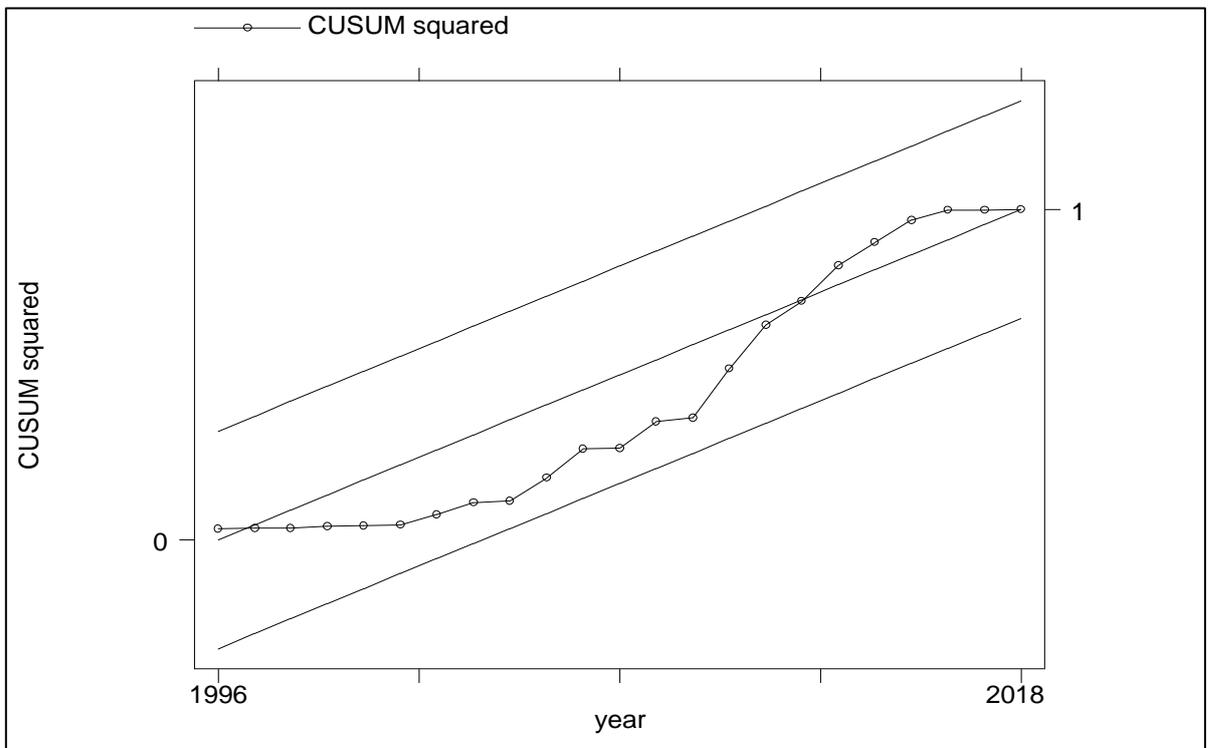
Por último o teste de quebras estruturais das somas cumulativas dos resíduos CUSUM e CUSUMSQ nos permite verificar a estabilidade dos parâmetros mostrando como o modelo se ajusta ao longo do tempo. A estabilidade é importante para que as decisões de política econômica ambiental sejam eficazes. As Figuras 7 e 8 mostram o comportamento dos parâmetros. O gráfico das somas contido dentro dos limites permite assumir que os modelos são bem-comportados.

Figura 33 - Soma cumulativa dos resíduos – CUSUM



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software Stata/SE 12.0

Figura 40 - Soma cumulativa dos resíduos quadrados – CUSUMSQ



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software Stata/SE 12.0

4.2 DISCUSSÕES

Nessa subseção serão discutidos os resultados obtidos no teste de cointegração ARDL, suas implicações e interrelações com outros trabalhos de mesma natureza.

4.2.1 Sobre os Resultados de Longo Prazo

Os coeficientes obtidos pelo modelo para PIB_{pp} e PIB²_{pp}, positivo e negativo, respectivamente, são consistentes com uma relação do tipo U-invertido no longo prazo. Isso significa que o aumento da renda *per capita* ao longo do tempo tem um impacto negativo para o meio ambiente nos estágios iniciais, mas, que, a partir de um certo nível a curva inflexiona e os aumentos da renda passam a ser positivos para o meio ambiente ao reduzir as emissões.

O resultado, positivo para a CKA de longo prazo, é consistente com aquele obtido por Bölük e Mert (2015), Al-mulali, Tang e Ozturk (2015), Zambrano-Monserrate et al. (2016) para o Brasil, Ahmad et al. (2016), Saboori, Sulaiman e Mohd (2016), Alam et al. (2016), Gómez e Rodríguez (2020) e Freire-Vinueza, Meneses e Cuesta (2020). Contudo, diverge dos coeficientes, positivos para as duas variáveis, no longo prazo, obtidos por Ben Jebli e Ben Youssef (2015), Morais (2019) e Evangelista et al. (2020) que refutam a CKA, eles encontraram um crescimento monotônico da poluição à medida que a renda cresce.

O nível de renda, calculado pela equação 2, onde a curva passa a decrescer é da ordem de US\$ 9.665 *per capita* de 2015. Valor acima do valor máximo da amostra, de US\$ 9.247, entretanto um pouco abaixo do valor encontrado por Bölük e Mert (2015), de US\$ 9.920, para a Turquia, e do valor encontrado, para o Brasil, por Freire-Vinueza, Meneses e Cuesta (2020), da ordem de US\$ 10.380 *per capita*.

Ainda que esse resultado mostre que o impacto negativo do crescimento no longo prazo possa melhorar, não pode ser visto como aval para uma despreocupação com a questão das emissões. É preciso levar em conta que as emissões ainda são positivas, e o objetivo assumido pelo Brasil perante o Acordo de Paris (AP15) é de redução das emissões em 30% abaixo dos níveis de 2005 até 2025 e em 45% até 2030, um horizonte temporal de 5 a 10 anos. Ademais, os melhores estudos

disponíveis sobre impactos dos GEE apontam o risco de irreversibilidade da degradação (IPCC, 2018). Para Zambrano-Monserrate et al. (2016):

Apesar de não haver evidências que justifiquem uma relação permanente e positiva entre crescimento econômico e degradação ambiental, de modo algum deve ser interpretado como favorável e concepção liberal de “crescimento econômico” (ZAMBRANO-MONSERRATE et al., 2016, p. 214, “tradução nossa”)

A produção de energia renovável tem impacto positivo sobre as emissões de CO₂e, reduz as emissões no longo prazo. O resultado se alinha ao esperado, e ao resultado obtido por Ben Jebli e Ben Youssef (2015) e Bölük e Mert (2015). Zambrano-Monserrate et al. (2016) encontraram resultado condizente para a produção de energia renovável de fontes hidroelétricas. A produção de energia renovável não gera grandes contingentes de gases poluentes, em partes o próprio processo de produção é responsável por algum abatimento das emissões; a cultura da cana, por exemplo, é capaz de captar parte dos gases que serão emitidos no processamento, já na fase de crescimento da planta. Outras fontes como a hidroelétrica, apesar do grande impacto inicial, se mostram muito eficientes em produzir energia causando pouco dano depois da instalação. Esse resultado seria mais positivo se a matriz energética renovável não viesse perdendo, ainda que de forma lenta, participação relativa na energia produzida pelo país (BEN, 2019).

Para a cobertura de áreas agrícolas, AgL, o coeficiente diverge do esperado ao indicar uma redução de emissões decorrente do aumento das área com cobertura agrícola, apesar de estar em linha com o coeficiente obtido por Ben Jebli e Ben Youssef (2017), Liu, Zhang e Bae (2017) para a produção agrícola na Argentina e quatro países da Ásia respectivamente. Morais (2019) usando o valor adicionado bruto da agricultura, chegou à conclusão similar aplicando FMOLS para o Brasil, contudo os resultados do modelo DOLS, também aplicado, convergiram para o esperado, levando-o a concluir que o segundo modelo seria preferível. Ben Jebli e Ben Youssef (2017) e Liu, Zhang e Bae (2017) justificam que a redução das emissões decorrente da expansão da agricultura pode estar relacionado a um maior emprego de combustíveis de matriz limpa na agricultura, apontam também que o aumento das áreas de cultivo diminui a pressão pelo emprego de fertilizantes e produtos fitossanitários, contribuindo para a redução das emissões a conclusão é corroborada pelos autores em outro estudo do mesmo ano para o Marrocos que apontou haver

aumento no uso de energia renovável quando há aumento da produção agrícola e quando há aumento da área plantada.

Outra explicação, para o efeito negativo do aumento das áreas sob cobertura agrícola nas emissões de longo prazo, pode ser tirada do trabalho de Biage e Almeida (2015) que analisaram o impacto de áreas florestais nas emissões. Eles explicaram o efeito perverso – aumento das emissões – em decorrência do aumento de áreas com cobertura florestal, como sendo resultado de um efeito disponibilidade: mais áreas florestais disponíveis significam maior possibilidade de conversão dessas áreas para outras finalidades, aumentando, portanto, as emissões. No caso da área sob cobertura agrícola, uma menor necessidade de novas conversões pode decorrer da maior área já disponível para o cultivo, resultando em uma frenagem das emissões por esse motivo.

Esse resultado é positivo, dado que o país tem no agronegócio seu mais importante setor. O PIB do agronegócio atingiu um terço do PIB nacional no ano de 2019 (CEPEA, 2020). Contudo é preciso manter o alerta, pois no curto prazo esse resultado não se sustenta, e o estudo ainda é o primeiro a incluir essa variável. Além do mais, existem efeitos graves que podem ser desencadeados pela perda de florestas e biodiversidade. Sendo recomendável portanto um aprofundamento nesse campo.

4.2.2 Sobre os Resultados de Curto Prazo

Para o curto prazo os coeficientes positivo para CO_2e e negativo para PIB_{pp} não possuem significância, já o resultado para o PIB^2_{pp} é negativo e significativo. Resultado condizente com o obtido por Zambrano-Monserrate et al. (2016), Saboori, Sulaiman e Mohd (2016). Bölük e Mert (2015) e Ben Jebli e Ben Youssef (2015) encontraram um efeito positivo do crescimento do PIB para as emissões neste horizonte temporal. Alguma divergência dos resultados obtidos nos diferentes estudos pode ser resultante da sensibilidade do modelo ao horizonte temporal e às variáveis empregadas.

Esse resultado corrobora a argumentação teórica de que a CKA é um fenômeno de longo prazo Bölük e Mert (2015) e Saboori, Sulaiman e Mohd (2016). O argumento ganha força quando em conjunto com o coeficiente de ajuste que, mostra um período de 1,2 ciclos, apenas, para o modelo voltar para o caminho de longo prazo.

O resultado para AgL está em linha com o esperado, o coeficiente positivo indica que aumentar as áreas agrícolas leva a aumento nas emissões. Esse resultado se analisado em conjunto com o resultado de longo prazo, confirma a argumentação sobre a causa do resultado contraditório naquele horizonte temporal. O impacto do aumento das áreas sob cobertura agrícola é grande no momento inicial, seja pelo método de conversão da área natural – queimadas, derrubada da mata, geração de resíduos – ou pela supressão das áreas capazes de fazer o abatimento de GEE, argumento ancorado nos resultados das emissões que apontam as mudanças no uso da terra e florestas como a principal fonte de emissões de gases (POTENZA et al, 2021).

EPRE apresenta efeito positivo sobre as emissões no curto prazo, efeito ruim, pois o objetivo a ser perseguido é o de reduzir as emissões. Este resultado está em linha com o identificado por Bölük e Mert (2015). Esse resultado pode ser atribuído ao efeito implantação das instalações de produção de energia limpa. Projetos iniciais de hidroelétricas por exemplo, causam grande impacto sobre os ecossistemas no entorno da localização. Outro fator gerador de GEE é a grande demanda de recursos primários durante a construção, como energia de máquinas e equipamentos, minerais etc.

De certa forma, condiz também com os resultados para o consumo total de energia, elencados por Biage e Almeida (2015) e Saboori, Sulaiman e Mohd (2016) que mostraram um grande aumento da demanda de energia em decorrência das transformações produtivas experimentadas pelas economias em desenvolvimento. Há uma pressão sobre a oferta de energia acelerando a construção de novas plantas, aumentando as emissões. O resultado positivo da matriz renovável, portanto, é mais bem refletido no longo prazo, ressalte-se que o tempo de retorno para a curva de longo prazo obtido é de somente 1,2 ciclos.

Ademais o coeficiente de ajuste, ECM, indica que eventuais oscilações de curto prazo tendem a voltar para o equilíbrio no longo prazo após 1,2 ciclos. Ou seja, o coeficiente (- 0,845) mostra que 84,5% dos choques são corrigidos ainda no primeiro ciclo, muito próximo do resultado obtido por Bölük e Mert (2015) de 82% (- 0,82).

Os resultados de curto prazo são favoráveis à tese defendida pela literatura empírica, colocando que a CKA é um fenômeno de longo prazo. Em conjunto, a CKA de longo prazo e os coeficientes de curto prazo, apesar de não indicarem uma contradição entre crescimento e compromisso com o meio ambiente no longo prazo, deixam evidente a dificuldade de conciliar as duas coisas.

Com relação as NDC assumidas perante o AP15, é mais desafiador ainda, pois o prazo é curto, e além de ainda não ter alcançado o ponto de inflexão, o compromisso assumido é de reduzir consideravelmente as emissões até 2025 e 2030.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho buscou compreender a relação existente entre variáveis que representam o crescimento econômico e as emissões de gases poluentes causadores de danos ambientais e como essa relação implica sobre as metas do AP15, empregou dados para o Brasil do período entre 1990 e 2018, se valendo de técnicas econométricas, sob a égide da teoria da curva de Kuznets ambiental.

Os resultados apontaram uma curva em forma de U-invertido no longo prazo, sendo que as emissões crescem com o crescimento econômico até atingir um pico, passando então a decrescer. O ponto de inflexão condiz com uma renda *per capita* de US\$ 9.665 de 2015. No curto prazo os coeficientes não foram significativos para permitir uma inferência semelhante.

Os coeficientes para cobertura de áreas agrícolas e produção de energia renovável foram negativos no longo prazo e positivos no curto prazo. No longo prazo aumentar as áreas agrícolas tende a reduzir as emissões da mesma forma que aumentar a produção de energia renovável. No curto prazo, as duas variáveis tendem a aumentar as emissões. Entretanto, o ajuste dos desvios de curto prazo, representado pelo coeficiente de correção de erros, mostra que em 1,2 ciclos as variáveis convergem para o resultado de longo prazo.

De posse dos resultados podemos inferir que é possível conciliar crescimento econômico e contenção de emissões no longo prazo, contudo, é preciso alguma cautela; o somatório das emissões até atingir o ponto de inflexão é temerário. No pico os danos acarretados podem colocar em xeque a sociedade, inclusive causando grandes problemas econômicos.

Outro entendimento possível é a dificuldade em atender ao compromisso assumido perante o AP15 de reduzir as emissões, em relação a 2005, em 37% até 2025 e em 43% até 2030. Mesmo estando próximo do ponto de inflexão, a meta ainda está distante, considerando que o somatório das emissões absolutas crescerá até a inflexão ampliando ainda mais o desafio.

Fica para trabalhos futuros, desenvolvidos a partir de então, a necessidade de aumentar o número de estudos, e incluindo novas variáveis, que representem políticas positivas para a redução de emissões. Também a construção de projeções e cenários que auxiliem numa melhor decisão das políticas econômicas e ambientais a serem empregadas.

REFERÊNCIAS

AHMAD, N. et al. Modelling the CO₂ emissions and economic growth in Croatia; is there any environmental Kuznets curve? **Energy**, vol. 123, mar. 2016, pp. 164-172. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.106>> Acesso em: 10 de mai. de 2022.

AL-MULALI, U.; TANG, C. F.; OZTURK, I. Estimating the Environmental Kuznets Curve hypothesis: evidence from Latin America and the Caribbean countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 50, 2015. pp. 918-924. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211500475X?via%3Dihub> Acesso em: 25 de nov. de 2021.

ALAM, Md. M. et al. Relationships among carbon emissions, economic growth, energy consumption and population growth: Testing Environmental Kuznets Curve hypothesis for Brazil, China, India and Indonesia. **Ecological Indicators**, vol. 70, novembro de 2016. pp. 466–479. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.043> Acesso em: 22 de fev. de 2022.

ANDRADE, D. C.; MOLLINA, P. V. Fronteiras planetárias e limites ao crescimento: algumas implicações de política econômica. **Revista Iberoamericana de Economia Ecológica**, vol. 22, 2014. pp. 69-84. Disponível em: <https://redibec.org/ojs/index.php/revibec/article/view/176> Acesso em: 04 de abr. de 2022.

ANGELO, J. A.; OLIVEIRA, M. D. M.; GHOBRI, C. N. Balança Comercial dos Agronegócios Paulista e Brasileiro, Primeiro trimestre de 2021. **Análises e Indicadores do Agronegócio**, São Paulo, v. 17, n. 4, p. 1-16, abr. 2022. Disponível em: <http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=16031> Acesso em: 10 de jun. de 2022.

BAYER, N. M.; URANGA, P. R. R.; FOCHEZATTO, A. A curva ambiental de Kuznets na produção de resíduos sólidos domiciliares nos municípios brasileiros, 2011 - 2015. **Economia e Sociedade**, Campinas, v.31, n.1 (74), jan.-abr. 2022. p. 129-142. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1982-3533.2022v31n1art06> Acesso em: 05 de abr. de 2022.

BEN JEBLI, M.; BEN YOUSSEF, S. Investigating the independence between non hydroelectric renewable energy, agricultura value added, and arable land use in Argentina. **MPRA Paper**, Manouba, n. 77513, mar. 2017. Disponível em: <https://mpr.ub.uni-muenchen.de/77513/> Acesso em: 20 de jan. de 2022.

_____. The environmental Kuznets curve, economic growth, renewable and non-renewable energy, and trade in Tunisia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, jul. 2015. pp. 173-185. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.049> Acesso em: 04 de nov. de 2021.

BIAGE, M.; ALMEIDA, H. J. F. Desenvolvimento e impacto ambiental: uma análise da curva ambiental de Kuznets. **Pesquisa e Planejamento Econômico**, v. 45, n. 3, dez 2015. pp. 505-556. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6100/5/PPE_v45_n03_Desenvolvimento.pdf Acesso em 01 de fev. de 2022.

BÖLÜK, G.; MERT, M. The renewable energy, growth and environmental Kuznets curve in Turkey: An ARDL approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 52, (2015) 587–595. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115007856> Acesso em: 01 de mai. de 2022.

BRASIL. Intended Nationally Determined Contribution. Brasília, DF, 2016. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/BRAZIL%20iNDC%20english%20FINAL.pdf> Acesso em: 13 de dez. de 2021.

_____. Nationally Determined Contribution (NDC). Brasília, DF, 2022. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Updated%20-%20First%20NDC%20-%20%20FINAL%20-%20PDF.pdf> Acesso em: 23 de jun. de 2022.

CALLEN, T. Gross Domestic Product: An Economy's All. **Finance & Development**, Washington, February 24, 2020. Disponível em: <https://www.imf.org/external/pubs/ft/fandd/basics/gdp.htm#:~:text=GDP%20measure%20the%20monetary%20value,the%20borders%20of%20a%20country>. Acesso em: 10 de jun. de 2022.

CASTRO, A. S.; ALVES, J. S.; CAIXETA, D. A. Crescimento econômico e emissões de CO₂ no BRICS: uma análise de cointegração em painel. **Economia Aplicada**, v. 23, n. 2, 2019. pp. 183-208. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/1980-5330/ea146203> Acesso em: 07 de jan. de 2022.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (CEPEA) E CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA AGRICULTURA E PECUÁRIA (CNA). PIB do agronegócio brasileiro de 1996 a 2021. Disponível em:

<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx> Acesso em: 10 de jun. de 2022.

CERETTA, P. S.; SARI, J. F.; CERETTA, F. C. C. Relação entre emissões de CO₂, crescimento econômico e energia renovável. **Desenvolvimento Em Questão**, v. 18, n. 50, 2020. pp. 268–286. Disponível em: <https://doi.org/10.21527/2237-6453.2020.50.268-28> Acesso em: 21 de jan. de 2022.

DE AZEVEDO, T. R. et al. SEEG initiative estimates of Brazilian greenhouse gas emissions from 1970 to 2015. **Sci Data** v. 5, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.45> Acesso em: 10 de jun. de 2022.

DINDA, S. Environmental Kuznets curve hypothesis: a survey. **Ecological Economics**, v. 49, 2004. pp. 431-455. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800904001570> Acesso em: 10 de out. de 2021.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2019 – BEN 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-Series-Historicas-Completas> Acesso em: 10 de dez. de 2021.

EVANGELISTA, I. R. et al. A relação entre emissão de CO₂ e PIB per capita: análise para os países sul-americanos no período de 1980 a 2009. **Revista de Economia**, v. 41, n. 74, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/re.v41i74.63671> Acesso em: 05 de fev. de 2021.

FREIRE-VINUEZA, C.; MENESES, K.; CUESTA, G. América Latina: un paraíso de la contaminación ambiental? **Revista de Ciencias Ambientales**, Vol. 55, n. 2, jul.-dec., 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.15359/rca.55-2.1> Acesso em: 14 de jan. de 2022.

GEORGESCU-ROEGEN, N. **O decrescimento**: entropia, ecologia, economia. Tradução Maria José Perillo Isaac. São Paulo: Editora SENAC São Paulo, 2012.

GÓMEZ, M.; RODRÍGUEZ, J. C. Analysis of the environmental Kuznets curve in the NAFTA countries, 1971 - 2014. **EconoQuantum**, vol. 17, núm. 2, jul-dez. pp. 57-79. Disponível em: <https://doi.org/10.18381/eq.v17i2.7151> Acesso em 01 de mai. de 2022.

GREENE, W. H. **Econometric analysis**. 7ed. Nova York: Prentice Hall 2012.

GROSSMAN, G. M.; KRUEGER, A. B. Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement. **National Bureau of Economic Research** (Working Paper No. 3914). Cambridge, 1991. Disponível em: https://www.nber.org/system/files/working_papers/w3914/w3914.pdf Acesso em: 25 de nov. de 2021.

_____. Economic growth and environment. **The Quarterly Journal of Economics**, May 1995. Disponível em: <https://academic.oup.com/qje/article-abstract/110/2/353/1826336> Acesso em: 10 de dez. de 2021.

GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Econometria Básica**. 5ed. Tradução Denise Durant, Mônica Rosemberg e Maria Lúcia G. L. Rosa. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2011.

IPCC, 2014: **Climate Change 2014**: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf Acesso em: 10 de nov. de 2021.

_____, 2018: **Global Warming of 1.5°C**. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SR15_Full_Report_HR.pdf Acesso em: 05 de out. de 2021.

KEEN, S. The appallingly bad neoclassical economics of climate Change. **Globalizations**, v. 18, n.7. pp. 1149-1177. Disponível em: [10.1080/14747731.2020.1807856](https://doi.org/10.1080/14747731.2020.1807856) Acesso em: 04 de out. de 2021.

KHAN, M. I. et al. Testing environmental Kuznets curve in the USA: what role institutional quality, globalization, energy consumption, financial development and remittances can play? New evidence from Dynamic ARDL simulations approach. **Front. Environ. Sci.**, 13 december 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.789715> Acesso em: 04 de mar. de 2022.

KUZNETS, S. Economic Growth and Income Inequality. **American Economic Review**, v.45, p.1-28. 1955. Disponível em: <https://assets.aeaweb.org/asset-server/files/9438.pdf> Acesso em: 08 de mai. 2022.

LINHARES, F. et al. A hipótese de Kuznets e mudanças na relação entre desigualdade e crescimento de renda no Brasil. **Pesquisa e Planejamento Econômico**, Vol. 42, No. 2, pp. 403-432, 2012. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/3333/4/PPE_v42_n03_Hipótese.pdf. Acesso em: 24 de abr. de 2022.

LIU, L.; ZHANG, S.; BAE, J. The impact of renewable energy and agriculture on carbon dioxide emissions: Investigating the environmental Kuznets curve in four selected ASEAN countries, **Journal of Cleaner Production**, 10 jul. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.086> Acesso em: 15 de mai. de 2022.

MALTHUS, T. **Princípios de Economia Política e Considerações sobre sua Aplicação Prática** – ensaio sobre a população. Traduções Regis de Castro Andrade, Dinah de Abreu Azevedo e Antonio Alvez Cury. São Paulo: Editora Nova Cultural, 1996.

MORAIS, A. E. A. A curva Ambiental de Kuznets para emissão de CO₂ no Brasil: uma análise com cointegração em painel. 2019. 134 f. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Mariana, 2019.

NKORO, E.; UKO, A. K. Autorregressive distributes laga (ARDL) cointegration technique: application and interpretation. **Journal of Statistical and Econometrics Methods**, v. 5, n. 4, 2016. pp. 63-91. Disponível em: https://ideas.repec.org/a/spt/stecon/v5y2016i4f5_4_3.html Acesso em: 29 de dez. de 2021.

PÁDUA, J. A. **Vivendo no antropoceno: incertezas, riscos e oportunidades**. In: Oliveira L. A. Museu do Amanhã. Rio de Janeiro: Edições de Janeiro, 2015. Disponível em: <https://museudoamanha.org.br/livro/10-vivendo-no-antropoceno.html> Acesso em: 05 de abr. de 2022.

PANAYOTOU, T. **Empirical Tests and Policy Analysis of Environmental Degradation at Different Stages of Economic Development**. World Employment Programme Research (Working Paper WEP 2-22/WP. 238). Geneva, 1993. Disponível em: http://www.ilo.org/public/libdoc/ilo/1993/93B09_31_engl.pdf Acesso em: 21 de nov. de 2021.

PEROBELLI, F. S.; FERREIRA NETO, A. B.; CORRÊA, Wi. L. Rotatori. Consumo de energia e crescimento econômico: uma análise do Brasil no período 1970-2009. **Análise Econômica**, v. 34, n. 65 (2016). Disponível em: <<https://doi.org/10.22456/2176-5456.44622>> Acesso em: 28 de jan. de 2022.

PESARAN, M. H.; SHIN, Y.; SMITH, R. J. Bounds testing approaches to the analysis of level relationships, **Journal of Applied Econometrics**, v. 16, n. 3, may-jun 2001. pp. 289-326. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2678547> Acesso em: 10 de out. de 2021.

POTENZA, R. F. et al. Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 – 2020. Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa, **Observatório do Clima**. 2021. Disponível em: https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG_9/OC_03_relatorio_2021_FINAL.pdf Acesso em: 10 de dez. de 2021.

RICARDO, D. **Princípios de Economia Política e Tributação**. Tradução de Paulo Henrique Ribeiro Sandroni. São Paulo: Editora Nova Cultural, 1996.

ROMEIRO, A. R. Desenvolvimento sustentável: uma perspectiva econômico-Ecológica. **Estudos Avançados**, vol. 26, n. 74, 2012. Disponível em: Acesso em: 14 de nov. de 2021.

SABOORI, B.; SULAIMAN, J.; MOHD, S. Environmental Kuznets curve and energy consumption in Malaysia: A cointegration approach, **Energy Sources**, Part B: Economics, Planning, and Policy, v. 11, n. 9, 2016. pp. 861-867. Disponível em: [10.1080/15567249.2012.662264](https://doi.org/10.1080/15567249.2012.662264) Acesso em: 20 de dez. de 2021.

SEEG - Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa, Observatório do Clima. Disponível em: <http://seeg.eco.br> Acesso em: 10 de dez. de 2021.

SHAFIK, N.; BANDYOPADHYAY, S. Economic growth and environmental quality: time-series and cross-country evidence. Policy, research working papers, no. WPS 904. World development report Washington, D.C., World Bank Group, 1992. Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/en/833431468739515725/Economic-growth-and-environmental-quality-time-series-and-cross-country-evidence> Acesso em 21 de nov. de 2021.

SILVA, C. M.; ARBILLA, G. Antropoceno: os desafios de um Novo Mundo. **Ver. Virtual de Quim.**, v. 10, n. 6, 2018. p. 1619-1647. Disponível em: <http://static.sites.s bq.org.br/rvq.s bq.org.br/pdf/v10n6a02.pdf> Acesso em: 18 de abr. de 2022.

SMITH, A.. **Teoria dos Sentimentos Morais**. Tradução Lya Luft. 2ª ed. São Paulo: Martins Fontes, 2015.

SOUZA, M. C. O.; CORAZZA, R. I. **Do Protocolo Kyoto ao Acordo de Paris: uma análise das mudanças no regime climático global a partir do estudo da evolução de perfis de emissões de gases de efeito estufa**. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*. v. 42, p. 52-80, dezembro 2017. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5380/dma.v42i0.51298> Acesso em: 10 de jan. de 2022.

SOUZA, W. L.; IRFFI, G.; ASEVEDO, M. D. G. Deforestation of the Atlantic Forest in the state of Ceará: analysis of the Environmental Kuznets curve from panel data, 2011 to 2017. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, vol. 60, n. 1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.229884> Acesso em: 03 de mar. de 2022.

STEFFEN, W.. Et al. The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review*, v. 2, n. 1, jan. 2015. p. 81-98. Disponível em: <https://doi.org/10.1177%2F2053019614564785> Acesso em: 08 de out. de 2021.

UNITED Nations, Department of Economic and Social Affairs. **World economic and social survey 2011: the great green technological transformation**. New York, 2011. Disponível em: https://www.un.org/en/development/desa/policy/wess/wess_current/2011wess.pdf Acesso em: 01 de mai. de 2022.

WORLD Bank. World Development Indicators. Washington, D.C. Disponível em: <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators#> Acesso em: 10 de dez. de 2021.

ZAMBRANO-MONSERRATE, M. A. et al. Relationship between Economic Growth and Environmental Degradation: Is there Evidence of an Environmental Kuznets Curve for Brazil?. **International Journal of Energy Economics and Policy**, 6 (2), 208–216. Disponível em: <https://www.econjournals.com/index.php/ijeeep/article/view/1850> Acesso em: 15 de dez. de 2021.