



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E CONTABILIDADE
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO ECONÔMICA DE FINANÇAS
PÚBLICAS

ELIS CARVALHO PENA

RELAÇÃO ENTRE EMISSÕES DE GÁS CARBÔNICO E RENDA NO
BRASIL

BRASÍLIA,
junho de 2022

ELIS CARVALHO PENA

**RELAÇÃO ENTRE EMISSÕES DE GÁS CARBÔNICO E RENDA NO
BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de Brasília como requisito para obtenção do título de mestre em Economia.

Área de Concentração: Gestão Econômica de Finanças Públicas

Orientador: Marcelo de Oliveira Torres

BRASÍLIA,

2022

ELIS CARVALHO PENA

**RELAÇÃO ENTRE EMISSÕES DE GÁS CARBÔNICO E RENDA NO
BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de Brasília como requisito para obtenção do título de mestre em Economia.

Aprovação em:

BANCA EXAMINADORA:

Professor Dr. Marcelo de Oliveira Torres

Departamento de Economia da Universidade de Brasília - UnB (Orientador)

Professora Dra. Milene Takasago

Departamento de Economia da Universidade de Brasília - UnB (Membro Interno)

Professor Dr. Lucas Vitor de Carvalho Sousa

Depto. Economia e Análise da Univ. Federal do Amazonas – UFAM (Membro Externo)

Professora Dra. Marina Delmondes Rossi

Departamento de Economia da Universidade de Brasília - UnB (Suplente)

Deus é o nosso refúgio e fortaleza, socorro bem-presente nas tribulações. Portanto, não temeremos, ainda que a terra se transtorne e os montes se abalem no seio dos mares; ainda que as águas tumultuem e espumejem e na sua fúria os montes se estremeçam. Há um rio, cujas correntes alegram a cidade de Deus, o santuário das moradas do Altíssimo. Deus está no meio dela; jamais será abalada; Deus a ajudará desde antemanhã.

[Salmos 46:1-5](#)

O quarto anjo derramou a sua taça sobre o sol, e foi-lhe dado queimar os homens com fogo. Com efeito, os homens se queimaram com o intenso calor, e blasfemaram o nome de Deus, que tem autoridade sobre estes flagelos, e nem se arrependeram para lhe darem glória.

[Apocalipse 16:8,9](#)

AGRADECIMENTOS

De todo trabalho realizado, talvez uma das partes mais difíceis seja lembrar quem nos apoiou a vencer os desafios. Graças a Deus, foram muitas pessoas. A primeira e a última de todas elas a quem devo agradecer é o meu Senhor Jesus Cristo. Ele é o princípio e o fim e nele nos movemos e por ele existimos. Essa dissertação começou com orações a Deus, para poder vencer o desânimo, a preguiça e conseguir estabelecer novas prioridades. Depois dEle, não há ordem pré-estabelecida de agradecimento.

Escolherei algumas pessoas: Golbery, um colega de trabalho, com quem trabalhei poucos meses, mas que me ensinou a escrever um projeto de mestrado. Minhas amigas e chefas, Fabiana Nomura, Viviane Vecchi e Yana Dumaresq, que autorizaram e apoiaram essa conquista. Um amigo próximo Gabriel Francisco e sua irmã Juliana Silva, que não me autorizaram a desistir e diziam: “Olha aqui, você vai terminar esse mestrado.” Meu querido Arman Yeltay, que além de me acompanhar nessa jornada, me apresentou muitos sites para fazer gráficos, organizar a bibliografia, consultar artigos científicos, possibilitando melhor uso do tempo escasso. Zenaide Ferreira, que gentilmente cedeu os dados de temperatura e precipitação por ano e municípios de interesse.

Agradeço também meus sobrinho e sobrinhas, que estabeleceram deliciosas pausas compulsórias. Amigos, colegas e amados: Helder Machado, Tiago Nascimento, Fernanda Tercetti, Fernanda Marciano, Marcella Karina e Júlio Cesar Pereira, por ouvirem algumas reclamações. Meu orientador, Marcelo Torres, que de fato direcionou o caminho a ser seguido por mim, doando seu tempo, emprestando livros e tendo disposição e atenção para realizar a orientação.

Merecem todo meu amor, meus pais: Edna Rocha e Roberto Pena (*in memoriam* agora ao final do mestrado), pelo apoio de cada dia, das formas mais variadas, eles levaram o fardo comigo e muitas vezes aliviaram meus outros afazeres em prol das infinitas leituras, escritas, versões, pensamentos de que um mestrado consiste. Eles são exemplos de fé viva, perseverança e amor. Meus irmãos, Claudio Carvalho, Erika Costa, Ettiane Pena e seus cônjuges Sandra Carvalho e Assuero Costa, agradeço o carinho e amor que nutre nosso relacionamento familiar.

Retomo o agradecimento a Deus, que trouxe para minha vida pessoas maravilhosas, desafios intensos, pesos de glória. Ele que encheu a minha vida de fé, esperança e amor. Por causa dEle, o maior desafio da minha vida é e continua sendo compartilhar o amor que generosamente recebi.

RESUMO

O Brasil é um dos maiores emissores globais de gases do efeito estufa (GEE), participando de uma lista que abrange países desenvolvidos e em desenvolvimento. O principal modelo que explica a relação entre crescimento econômico e poluição é a Curva de Kuznets Ambiental – *Environmental Kuznets Curve* (EKC) que preconiza uma relação de U-invertido entre um determinado indicador de poluição e renda. Nesse contexto, esta dissertação tem por objetivo analisar a hipótese subjacente ao modelo de EKC para o dióxido de carbono, um gás de efeito estufa, utilizando uma amostra de 4882 municípios brasileiros. Para tanto, utilizou-se o método de Regressão Linear Múltipla, com as variáveis explicativas PIB municipal *per capita* e as emissões líquidas de CO₂, para os anos 2000 e 2010. Os efeitos foram controlados com as seguintes variáveis: percentual da população urbana, frota de veículos, valor adicionado pela indústria, percentual de pessoas com 25 anos ou mais com ensino médio completo, média de precipitação anual, média de temperatura anual e uma *dummy* de tempo, de acordo com a disponibilidade de dados. Os resultados demonstraram que a relação entre renda e emissões de CO₂ não segue a Curva de Kuznets Ambiental clássica, no formato de U invertido. Em particular, os dados sugerem que a relação, embora estatisticamente insignificante, é crescente e sem ponto de inflexão, considerando os níveis de renda no período estudado de 2000 a 2010. Esse resultado é corroborado pela literatura especializada que, em sua maioria, demonstra a inexistência de um ponto de inflexão a partir do qual as emissões de gás carbônico reduziriam com o avanço do crescimento econômico. Uma das implicações desta evidência empírica é que não se deve aguardar passivamente o aumento da poluição ambiental enquanto os países seguem sua trajetória de desenvolvimento econômico. No caso brasileiro, cumpre formular políticas públicas que amenizem os impactos negativos da urbanização e ampliem preservação ambiental, reduzindo a temperatura média ambiental e alterações no regime de chuvas.

Palavras-chave: Curva de Kuznets Ambiental; Municípios brasileiros; Emissões de CO₂.

ABSTRACT

Brazil is one of the largest global emitters of greenhouse gases (GHG), taking part in a list that covers developed and developing countries. The main model that explains the relationship between economic growth and pollution is the Environmental Kuznets Curve (EKC), which advocates an inverted-U relationship between a given indicator of pollution and income. In this context, this dissertation aims to analyze the hypothesis underlying the EKC model for carbon dioxide, a greenhouse gas, using a sample of 4882 Brazilian municipalities. Therefore, the Multiple Linear Regression method was used, with the explanatory variables municipal GDP per capita and net CO₂ emissions, for the years 2000 and 2010. The effects were controlled with the following variables: percentage of urban population, fleet of vehicles, value-added by the industry, percentage of people aged 25 or over with high school education, average annual rainfall, average annual temperature and a time dummy, according to data availability. The results showed that the relationship between income and CO₂ emissions does not follow the classic Environmental Kuznets Curve, an inverted U shape. In particular, the data suggest that the relationship, although statistically insignificant, is increasing and without an inflection point, considering the income levels in the period studied from 2000 to 2010. This result is corroborated by the specialized literature, which for the most part demonstrates the inexistence of a turning point from which carbon dioxide emissions would decrease with the advance of economic growth. One of the implications of this empirical evidence is that one should not passively wait for the increase in environmental pollution while countries follow their path of economic development. In the Brazilian case, it is necessary to formulate public policies that mitigate the negative impacts of urbanization and expand environmental preservation, reducing the average environmental temperature and changes in the rainfall regime.

Key words: Environmental Kuznets Curve; Brazilian municipalities; CO₂ Emissions

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	8
CAPÍTULO 1. REVISÃO DA LITERATURA	12
1.1 Aspectos Gerais da EKC.....	12
1.2 Fatores Explicativos para a EKC e suas Variáveis Independentes ..	16
1.3 Teoria Econômica da Poluição.....	19
CAPÍTULO 2. DADOS E MÉTODOS.....	24
2.1 Métodos e Modelo Empírico.....	24
2.2 Amostra e Dados.....	26
CAPÍTULO 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES (ESTATÍSTICA INFERENCIAL)....	36
CONCLUSÃO.....	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

INTRODUÇÃO

O Brasil tem sofrido demasiada pressão internacional relacionada à degradação ambiental, especialmente no que tange ao desmatamento e incêndios florestais. De fato, o País se encontra na sétima posição entre os dez maiores poluidores mundiais, conforme ranking sobre emissões de gases do efeito estufa (GEE), referente ao ano de 2018, divulgado pelo *Climate Watch* (WRI, 2021). Entre os *top 10* encontramos a China, em primeiro lugar na lista de poluidores e segunda maior economia mundial. O segundo lugar fica com os Estados Unidos, que apresenta o maior Produto Interno Bruto (PIB) do mundo. Ambos os países respondem por 55% do total das emissões de gases do efeito estufa (GEE). Os outros países do *top 10* são: Índia (3º), União Europeia (4º), Rússia (5º), Indonésia (6º), Japão (8º), Irã (9º) e Coreia do Sul (10º). As posições dos países nesta lista variam um pouco quando se analisam somente as emissões de CO₂. O Brasil passa a ocupar a oitava posição, mas China e Estados Unidos permanecem na primeira e segunda posições, respectivamente, como os maiores poluidores mundiais do meio ambiente. A lista mencionada acima contém países desenvolvidos e em desenvolvimento.

Isto é particularmente interessante quando analisado à luz de um dos principais modelos teóricos sobre meio ambiente e crescimento econômico, a Curva de Kuznets Ambiental (EKC). Como será visto adiante, a EKC preconiza que países em desenvolvimento são mais poluidores que os países ricos, quando eles se encontram em níveis mais baixos de renda ou de industrialização, porque o crescimento econômico, o aumento do emprego e da renda da população são mais importantes que a preservação ambiental. Também, nesta fase, há maior intensidade de uso de tecnologias mais antigas e poluentes. A pressão institucional por preservação ambiental é insuficiente para mobilizar o poder legislativo na criação de leis de proteção ambiental e o executivo na aplicação coercitiva da lei. Em rápidas palavras, os países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento seriam “*too poor to be green*” (MARTÍNEZ-ALIER, 1995). O modelo da Curva de Kuznets Ambiental prevê um ponto de inflexão, a partir do qual o crescimento econômico leva o país a reduzir a emissão de poluentes, em níveis de renda mais elevados. Assim, ao longo da trajetória de desenvolvimento de um país, inicialmente o aumento de renda responde por maior degradação ambiental, até o ponto de inflexão, em que iniciará a queda nos níveis de poluição.

Essa dissertação tem por objetivo contribuir para o debate sobre a existência da EKC ao questionar se, no contexto brasileiro, a relação entre degradação ambiental, medida em emissões de gás carbônico, o mais importante gás do efeito estufa, e renda segue o padrão

preconizado pelo modelo. Para responder a essa pergunta, serão utilizados dados referentes a 4882 municípios bem como a quantidade de CO₂ emitida, o PIB *per capita* municipal e outras variáveis explicativas selecionadas de acordo com a literatura sobre o tema e a disponibilidade de dados para os anos de 2000 e 2010.

O modelo da Curva de Kuznets Ambiental carece de pelo menos duas variáveis, uma medida de degradação ambiental e outra de crescimento econômico. Nesta dissertação serão utilizadas, respectivamente, emissões de CO₂ líquidas (emissões menos remoções) e PIB municipal a preços de 2010. Quando consideramos o Brasil como um todo, é interessante notar que, entre os anos 2000 e 2010, a ordem de emissões líquidas mais relevantes provém de diferentes setores, conforme dados do SEEG. Em 2000, temos o seguinte: Mudança do Uso da Terra em Florestas (59%), Agropecuária (21%), Energia (14%), Processos Industriais (3,6%), Resíduos (2,4%). Já em 2010, o setor mais relevante gerador de emissões de CO₂ líquidas foi o de Agropecuária (45%), seguido por Energia (31,3%), Mudança de Uso da Terra e Florestas (9,7%), Processos Industriais (8%) e Resíduos (6%). As emissões líquidas dos 4882 municípios selecionados representaram, em 2000, 87,35% e, em 2010, 92,15% do total nacional. Igualmente importante para o desenho da Curva de Kuznets Ambiental é a medida de crescimento econômico. Os municípios selecionados representaram, em 2000, 90,56% do total do PIB *per capita* nacional e, em 2010, 90,51%. Idealmente, seria interessante analisar todos os municípios brasileiros, mas há limitações importantes de disponibilidade de dados, comentadas mais adiante. Percebe-se, então, que a amostra selecionada contém municípios mais de 90% do PIB *per capita* e das emissões nacionais, sendo a amostra bastante representativa.

O interesse em estimar a EKC para os grandes municípios brasileiros advém de razões do tamanho amostral, de políticas públicas e da atualidade das discussões internacionais em mudanças climáticas. A revisão da literatura mostra que os estudos realizados analisaram de 5 até duas centenas de unidades geográficas, em períodos que vão de 5 a 40 anos. O presente trabalho analisará 4882 municípios brasileiros, selecionados a partir da disponibilidade de dados para todas as variáveis. Um dos maiores estudos encontrados utilizou 276 unidades geográficas distintas (FUJII et al., 2018). Em termos de políticas públicas, cumpre destacar que o Brasil possui 5570 municípios, incluindo o Distrito Federal e o Distrito Estadual de Fernando de Noronha. Todos eles estão debaixo do mesmo arcabouço institucional, em termos de normas ambientais, educação, políticas de comércio exterior, migração, investimento estrangeiro, previdência, redução da pobreza, entre outros. Apesar das semelhanças institucionais, os municípios brasileiros apresentam elevada disparidade econômica. Assim, os

resultados encontrados poderão trazer uma nova compreensão dos fatores que promovem maior degradação ambiental, possibilitando a participação brasileira qualificada nos debates internacionais sobre mudanças climáticas. Isso pode contribuir para que o Brasil assuma compromissos equilibrados, sem prejudicar o seu desenvolvimento econômico, nem degradar desnecessariamente o meio ambiente local e global.

Em termos internacionais, as discussões sobre a relação entre degradação ambiental e desenvolvimento econômico permanecem vívidas. A preocupação com o aumento da temperatura da terra e suas consequências têm sido periodicamente reportadas pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Em agosto 2021, foi publicada a versão preliminar do 6º Relatório do IPCC (MASSON-DELMOTTE et al., 2021). O documento reafirma que a ação humana sobre a natureza é a principal causa das mudanças climáticas e que várias alterações já são irreversíveis. Mesmo se houvesse drástica redução nas emissões de gases do efeito estufa, seus efeitos não seriam perceptíveis no curto prazo. O relatório objetiva alertar os formuladores de políticas públicas sobre possíveis consequências de permanecer ou aumentar os níveis atuais de emissão de GEE e o consequente aumento de temperatura do planeta, simulado de 1 até 4°C. Como exemplos, aumentarão em intensidade, probabilidade e frequência eventos como: precipitações, inundações; secas em áreas agricultáveis e ecológicas, ocorrência de extremos de temperatura; elevação do nível dos oceanos e descongelamento de geleiras.

Ponderando essa preocupação excessiva com o aumento da temperatura mundial, Beckerman (BECKERMAN, 1992) afirmou que as atenções mundiais voltadas para o aquecimento global se constituem em distração sobre problemas ambientais ainda mais severos. Enquanto parte do mundo desenvolvido se preocupa em deixar um meio ambiente saudável para as futuras gerações, 75% da população mundial, que está em locais subdesenvolvidos, luta para obter água potável e saneamento, agora, no presente. Além disso, a população dos países desenvolvidos não se mostra interessada em renunciar suas facilidades, em nome das gerações futuras. Sem dúvidas, há um conflito de interesses entre as nações ricas e pobres e o bem-estar advindo do crescimento econômico para os dias atuais ou para as gerações futuras. Apesar dessas afirmações completarem quase trinta anos, elas continuam atuais. Para o autor, permanece o conceito de que o crescimento econômico geralmente leva à deterioração ambiental, nos estágios iniciais do processo. Porém, provavelmente, o único caminho válido para melhorar o meio ambiente, na maioria dos países, é torná-los ricos. O cabimento dessa afirmação de Beckerman é o que pretendemos verificar neste trabalho. Ou seja, no caso dos municípios brasileiros, o crescimento econômico é correlacionado com uma

queda nos níveis de poluição? Isso pode ser respondido por meio da eventual evidenciação da Curva de Kuznets Ambiental – EKC.

Esta dissertação inova ao utilizar dados de emissão de CO₂ contabilizados e publicados pelo SEEG - Sistema de Estimativa de Emissão de Gases de Efeito Estufa (AZEVEDO, 2019). Esta é uma iniciativa do Observatório do Clima que produz estimativas de emissões de GEE com base nas diretrizes do IPCC e as atribui por setor e municípios. Frequentemente, os trabalhos internacionais utilizam dados disponibilizados pelo Banco Mundial, atribuídos a países que são posteriormente comparados a seus pares. Esta pesquisa contribui para trazer evidência empírica sobre a Curva de Kuznets Ambiental aplicada ao Brasil a partir de dados de seus entes subnacionais. A literatura é farta em estudar a EKC para o Brasil em comparação com outros países, mas não é frequente encontrar estudos que usem dados de estados, municípios ou regiões brasileiras. Ademais, devido à não realização de censo mais recente, a disponibilidade de dados limita-se aos anos de 2000 e 2010.

Este trabalho está dividido em três capítulos. Após esta introdução, no Capítulo 1 está disposta a revisão da literatura com destaque para os aspectos gerais da EKC, seus fatores explicativos, variáveis independentes e a teoria econômica da poluição. No capítulo 2, os dados e os métodos serão apresentados, estando subdividido no tópico Métodos e Modelo Empírico e em outro intitulado Amostra e Dados. Já o capítulo 3 trata dos resultados e discussões. Após esses capítulos, seguem-se a conclusão e as referências bibliográficas.

CAPÍTULO 1. REVISÃO DA LITERATURA

1.1 Aspectos Gerais da EKC

Em 1955, Kuznets (KUZNETS, 1955) postulou que a desigualdade avança ao longo do crescimento econômico de um país até certo limiar, quando então, em um nível mais elevado de renda nacional, a desigualdade se reduz. Esse movimento pode ser representado por uma curva em formato de U invertido, chamada de Curva de Kuznets. Nos anos 1990, Grossman e Krueger (1991), ao avaliarem os impactos ambientais do NAFTA, evidenciaram essa relação invertida entre renda e três poluentes ambientais (SO₂, material particulado e fumaça fina). No caso em comento, a degradação ambiental aumentou com o crescimento econômico, para baixos níveis de renda nacional, até um ponto de inflexão (*turning point*), a partir do qual a degradação passou a reduzir para maiores níveis de renda (GROSSMAN; KRUEGER, 1991). Ainda nos anos 1990, Panayotou (PANAYOTOU, 1993) cunhou o termo *Environmental Kuznets Curve* (EKC) – Curva de Kuznets Ambiental, para designar a relação de U invertido entre degradação ambiental e o nível de renda de cada país.

Segundo Dinda (DINDA, 2004), a popularidade da Curva de Kuznets Ambiental provém da demonstração de que o crescimento econômico é compatível com a preservação ambiental, a partir de determinado nível de renda, quando a curva se mostra descendente. Essa constatação motivou pesquisadores a buscarem evidências empíricas para o entendimento de que a o crescimento econômico pode ser a solução para os problemas ambientais e não a sua causa, como frequentemente apontado por ambientalistas. Entretanto, como será visto adiante, os achados empíricos não são conclusivos e dependem do tipo de poluente estudado, se locais ou globais, das variáveis utilizadas na estimação da Curva e da unidade geográfica a que se refere. Principalmente quando se trata de poluentes globais como o CO₂, há autores que evidenciaram e os que não encontraram a EKC para o gás em comento.

A Curva de Kuznets Ambiental pode ser visualizada na **Figura 1** abaixo.

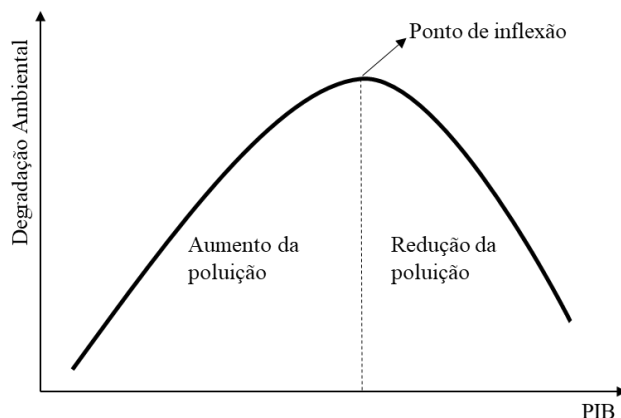


Figura 1: Curva de Kuznets Ambiental

Fonte: elaborado pela autora

Matematicamente, o U invertido pode ser explicado por uma equação de segundo grau, em que se relaciona um fator ambiental, representado no eixo Y, a um indicador de renda ou renda *per capita* no eixo X. No caso da Figura 1, o indicador de renda é o Produto Interno Bruto (PIB), implicando um sinal negativo do fator quadrático. O ponto de máximo (*turning point*) dessa curva é de especial interesse pois se refere ao nível de renda em que determinado país iniciará sua trajetória descendente em termos de degradação ambiental. López (1994) e Stern (2004) afirmam que poluentes locais são mais suscetíveis a demonstrarem uma curva em U invertido em relação à renda, pois se sujeitam à regulação ambiental de um mesmo país poluente. O mesmo não ocorreria para poluentes mais globais como o dióxido de carbono (LÓPEZ, 1994; STERN, 2004). Neumayer afirma que para um fator ambiental medido em CO₂ é possível que não haja ponto de inflexão próximo ou, ao menos, alcançável (NEUMAYER, 2004), o que resulta em uma reta ascendente. Segundo Stern (2004), matematicamente, os estudos que conseguiram evidenciar a Curva de Kuznets Ambiental para o CO₂ careciam de econometria mais robusta.

Diversos autores, ao realizarem suas revisões de literatura, comentam que os resultados empíricos para estimar a EKC frequentemente são ditos como inconclusivos (CARAVAGGIO, 2020; SHAHBAZ; SINHA, 2019; VAN ALSTINE; NEUMAYER, 2010). Por exemplo, Rasli (RASLI et al., 2018) desenha um indicador para poluição ambiental que agrega seis poluentes locais e globais. Em seu trabalho, a Curva de Kuznets Ambiental é evidenciada para poluentes locais, como o SO₂, CO, NO_x e N₂O e não encontrada para poluentes globais como CO₂ e emissões associadas ao volume de tráfego em ferrovias. Shahbaz e Sinha (2019) classificam os estudos nas categorias de presença ou de ausência da hipótese da EKC. A ausência de EKC ocorre em países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento, em que a

elasticidade-renda para exigências ambientais é baixa e por isso o nível de consciência ambiental também é baixo. A confirmação da hipótese de EKC ocorre em países em transição, emergentes ou desenvolvidos. Para esses países, a elasticidade-renda para exigências ambientais é crescente ou alta e por isso o nível de consciência ambiental também é elevado.

Já Van Alstine e Neumayer (2010) resumem a evidência empírica dos estudos em três tipos de curvas ideais qualitativas: reta decrescente (A), reta crescente (C) e curva U-invertida (B), conforme Figura 2.

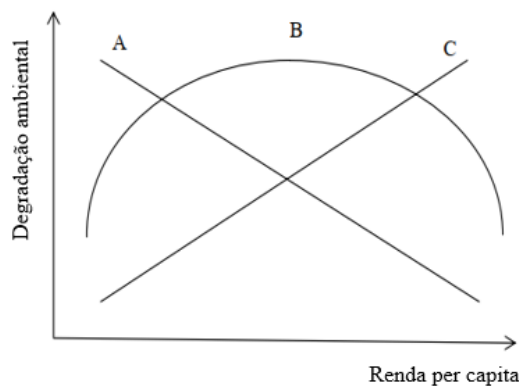


Figura 2: Curva de Kuznets Ambiental

Fonte: Van Alstine e Neumayer, 2010, adaptado pela autora

A reta decrescente (A) mostra melhorias inequívocas no meio ambiente com o aumento da renda *per capita*, como o acesso à água potável e saneamento. A reta crescente (C) mostra a deterioração ambiental com o aumento da renda. Por fim, a curva U-invertida (B) confirma a EKC e se evidencia o ponto de inflexão, com a renda máxima *per capita* conhecida. Os referidos autores consideram que ou os estudos confirmam a EKC ou os achados como as retas do tipo A e B sejam partes da EKC para um ponto de inflexão não conhecido. Essas curvas ideais seriam encontradas a partir dos valores e sinais assumidos pelos parâmetros das variáveis explicativas. Segundo Shahbaz e Sinha (SHAHBAZ; SINHA, 2019), a equação explicativa da Curva de Kuznets Ambiental é a que segue abaixo,

$$C_{it} = \alpha_i + \beta_1 Y_{it} + \beta_2 Y_{it}^2 + \beta_3 Y_{it}^3 + D_{it} + \epsilon_{it} \quad (1)$$

em que C significa as emissões de CO₂; Y é a renda ou produto, métrica para crescimento econômico; D são variáveis explicativas específicas e ϵ é o termo de erro. As letras subscritas *it* são os indivíduos e o tempo relacionados a dados em painel ou séries temporais. A letra α é a constante (intercepto) e β os parâmetros. Quanto aos parâmetros, a reta decrescente (A) é

encontrada quando $\beta_1 < 0$, $\beta_2 = \beta_3 = 0$. A reta crescente (C) ocorre quando $\beta_1 > 0$, $\beta_2 = \beta_3 = 0$. A curva U-invertida (B) acontece quando $\beta_1 > 0$, $\beta_2 < 0$ e $\beta_3 = 0$. Segundo os autores, ainda é possível encontrar as formas U (não invertido), N e ausência de relação entre as variáveis, quando os β assumem os seguintes valores, respectivamente: $\beta_1 < 0$, $\beta_2 > 0$ e $\beta_3 = 0$, $\beta_1 > 0$, $\beta_2 < 0$ e $\beta_3 > 0$ e $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$

Segundo Shahbaz e Sinha (2019) e Dinda (2004) é importante não somente considerar a existência da EKC, mas também a altura do ponto de inflexão, no caso da curva em U-invertido. Para isso, a literatura apresenta resultados tão divergentes e dependentes dos poluentes e das variáveis escolhidas, prejudicando implicações práticas quantitativas. Segundo Liu (LIU; YAN; ZHOU, 2016), o ponto de inflexão pode ser calculado pela fórmula $Y^* = e^{(-0.5 \beta_1/\beta_2)}$ e se refere à primeira derivada da equação (1). No caso brasileiro, apesar de o autor não ter calculado o ponto de inflexão, Aguilar-Bohórquez (AGUILAR-BOHÓRQUEZ et al., 2016) relata que a EKC pôde ser evidenciada para o Brasil somente no longo prazo, com variáveis como uso de energia renovável. No curto prazo, a variável Y (renda), Y^2 e Y^3 são estatisticamente não significativas. Alam (ALAM et al., 2016) evidenciou a Curva de Kuznets para o Brasil tanto no curto quanto no longo prazo, enfatizando que população é a principal variável explicativa.

A EKC trouxe certa esperança ao compatibilizar crescimento econômico com preservação ambiental. Uma interpretação crítica para esse modelo teórico se concentra no fato de que os países que atualmente estão em desenvolvimento poderiam crescer economicamente e deixar para resolver os problemas ambientais no futuro, porque alcançariam “passivamente” em algum momento o ponto de inflexão. Adverte-se que o ponto de inflexão pode estar tão distante que a degradação ambiental venha se tornar irreversível (VAN ALSTINE; NEUMAYER, 2010) e em conformidade com o alertado pelo relatório do IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*. O modelo afirma que um nível elevado de renda nacional beneficia o meio ambiente, a conclusão inadvertida é que o crescimento econômico poderia ser remédio suficiente para curar os problemas ambientais, sem se preocupar com como o país aumentará sua renda. Stern (STERN et al, 1996) relembra que melhorias na qualidade ambiental não seriam atingíveis para a maior parte da população mundial, que tem padrão de vida significativamente inferior ao ponto de inflexão, dessa forma haveria muito espaço para o crescimento desenfreado da poluição. O autor ainda destaca que a EKC ignora a via de mão dupla entre meio ambiente e produção, pois níveis elevados de poluição e desmatamento em algum momento afetará a disponibilidade de recursos produtivos, tornando o crescimento da

produção insustentável. Como será visto adiante, o uso dos recursos produtivos é um dos principais fatores explicativos para o formato da EKC.

1.2 Fatores Explicativos para a EKC e suas Variáveis Independentes

Conforme afirmado anteriormente, a Curva de Kuznets Ambiental (EKC) foi apresentada e se popularizou a partir da publicação de Grossman e Krueger (1991). Os autores relacionaram o nível de renda (variável independente) e degradação ambiental (variável dependente) e encontraram a forma gráfica de U-invertido, a Curva de Kuznets, originariamente observada para a relação entre renda familiar *per capita* e crescimento econômico nacional. Kuznets (KUZNETS, 1955) constatou que a disparidade de renda entre a parcela mais rica e mais pobre da diminui ao longo do crescimento econômico de um país. O mesmo raciocínio poderia ser aplicado para a relação degradação ambiental e renda, em que ao longo do crescimento econômico de um país, seria observado aumento na degradação ambiental até certo limite quando então a degradação reduziria em níveis econômicos mais elevados.

Segundo Grossman e Krueger (GROSSMAN; KRUEGER, 1991) e Shabaz e Sinha (SHAHBAZ; SINHA, 2019) a curva pode ser explicada a partir de três efeitos estruturais: escala, composição e técnica. O efeito escala ocorre quando há expansão da atividade econômica em um cenário de permanência do uso intensivo de recursos naturais, inclusive não renováveis, para suprir os processos produtivos. O resultado é o aumento na geração de subprodutos, lixo e resíduos industriais, provocando elevação dos danos ao meio ambiente. O autor também ressalta a visão dos ambientalistas, em que a necessidade de transportar os produtos fabricados ocorre à custa da queima de combustíveis fósseis, prejudicando, sobretudo, a qualidade do ar. Normalmente, o efeito escala é observado quando a economia é dependente do setor primário (agricultura) ou secundário (manufatura). O aumento de renda decorrente do efeito escala passa a gerar demandas por melhores condições ambientais provocando uma transição da economia, com o investimento em tecnologias mais limpas e aumento da urbanização. O impacto sobre o meio ambiente dependerá das vantagens comparativas de cada país. A tendência é que haja transferência das indústrias para onde tenha menor restrição regulatória, assim haverá aumento ou diminuição da degradação ambiental no local mais flexível ou mais rígido, respectivamente. Esse é o efeito composição.

A partir de então, há o crescimento do setor terciário (serviços) e a indústria passa a incorporar tecnologias de maior eficiência energética, exigindo maior intensidade de conhecimento. A necessidade de inovação exerce efeitos positivos sobre o meio ambiente, resultando no efeito técnica, caracterizado pelo maior investimento em atividades intensivas em conhecimento, com redução de atividades intensivas em capital. Nesse momento há

aumento da qualidade ambiental com o aumento da renda. Essas três fases correspondem a curva em U invertida da EKC, caracterizada pela intensidade dos seguintes fatores de produção: recursos naturais, tecnologia e conhecimento, respectivamente. Arraes (ARRAES; DINIZ; DINIZ, 2006) afirma que as explicações teóricas sobre a fase ascendente da curva têm boa aceitação e são bem intuitivas, pois o aumento de renda gera inevitavelmente mais poluição. Entretanto, quanto à fase descendente da EKC não há uniformidade suficiente na literatura, a não ser que se aceite *a priori* que, com o aumento de renda, necessariamente sejam adotadas tecnologias mais limpas.

Dinda (DINDA, 2004) cita outras explicações para o comportamento da curva de Kuznets. Uma delas é a elasticidade-renda da demanda por qualidade ambiental. O meio ambiente limpo e preservado pode ser tratado como um bem de luxo. Assim, os mais ricos teriam maior disposição a pagar por esses bens, bem como exigir, política e institucionalmente, maior proteção e regulação ambiental. Os mais pobres teriam demanda reduzida para a qualidade do meio ambiente. Segundo evidências empíricas, a elasticidade-renda seria menor do que um e dependente de outros fatores que não somente a renda. Dinda elenca também hipóteses relacionadas ao comércio internacional. Por exemplo: o aumento da escala de produção provoca aumento da poluição nos países menos desenvolvidos; fábricas mais poluentes transferem suas operações para países mais pobres, onde a regulação ambiental é mais frágil; o recebimento de investimento estrangeiro direto provocaria a entrada de tecnologias mais novas e mais limpas nos países em desenvolvimento, reduzindo a poluição; o aumento da renda e o emprego leva os agentes a exigirem maior regulação ambiental, o que reduzirá a poluição. O autor explora ainda a possibilidade de haver outro mecanismo além da transferência de fábricas poluentes. Haveria capacidade de migração dos consumidores de alta renda para locais distantes da poluição associada aos bens por eles consumidos.

Com um ponto de vista mais institucionalista, Dasgupta (DASGUPTA et al., 2002) afirma que a regulação ambiental é o principal fator explicativo para a queda da poluição enquanto o país cresce para níveis de renda média ou alta. A evidência empírica denota que os países ricos regulam mais e melhor, por terem pessoal capacitado e maior orçamento para garantir a força da lei. Já em termos de demandas sociais nesses países, uma vez que saúde e educação estão supridas, a população passa a exigir maior qualidade ambiental por vias formais ou informais. Esta última ocorre por meio de organizações não-governamentais ou grupos comunitários. O autor aponta também para a liberalização econômica; na forma de redução de subsídios a setores como o de geração de energia, indústria petroquímica e de aço; eliminação

de controle de preços; privatização de empresas estatais; como forma de aumentar a eficiência, promover economias de escala e, por conseguinte, desincentivar atividades poluentes.

Voltando ao raciocínio de Dinda (DINDA, 2004), a EKC se baseia em uma hipótese que resume o processo de crescimento econômico de um país no longo prazo. Ao longo de sua trajetória econômica, a renda de um país vai crescendo, enquanto a degradação ambiental aumenta, para níveis de renda mais baixo, até alcançar o ponto de inflexão, quando então a degradação passa a declinar, seguindo então a Curva de Kuznets. Ocorre que, ao se tomar variados países em diferentes estágios de crescimento, como acontece num recorte transversal, haverá grupos de países passando por estágios de renda baixa, média (inclusive próximas ao ponto de inflexão) e alta, associado ao respectivo nível de emissões poluentes, podendo seguir graficamente a Curva de Kuznets Ambiental. Importante destacar que alcançar níveis mais baixos de emissão ou de poluição não representa uma garantia de estabilidade para os países, pois além do U invertido, a EKC pode assumir a forma de “N”. Nesse caso, haveria uma relação entre emissão de poluentes (variável dependente) e o cubo do PIB (variável independente). Dinda (DINDA, 2004) aventou a possibilidade de o “N” significar que a redução das emissões se verifica com o aumento da renda de forma não permanente. Haveria assim dois pontos de inflexão, o primeiro em que a degradação ambiental começa a reduzir e o segundo, onde a emissão de poluentes volta a aumentar com o aumento da renda. Segundo Lorente e Alvarez (LORENTE; ALVAREZ-HERRANZ, 2016), este segundo aumento deve-se a retornos decrescentes do efeito técnica (obsolescência técnica), aumentando novamente o nível de poluição ambiental.

Quanto às variáveis independentes, o trabalho de Grossman e Krueger (1991) sobre o NAFTA utilizou o PIB *per capita*; características do local, como área central ou suburbana; destinação do lote, se industrial ou residencial; população; intensidade comercial e regime político, se comunista ou não. Após o trabalho desses autores, diversas pesquisas passaram a inserir outras variáveis explicativas para se estimar Curva de Kuznets Ambiental (EKC), sendo as mais frequentes renda, energia e população. Shahbaz e Sinha (SHAHBAZ; SINHA, 2019) relatam, a partir de revisão da literatura, variáveis como consumo de energia renovável ou fóssil, população rural ou urbana, grau de abertura econômica, nível de corrupção, escolaridade, taxa de mortalidade. Van Alstine e Neumayer (2010) comentam, também a partir da revisão de literatura, variáveis como partido político, democracia, presença de organizações não-governamentais ambientais e fatores que interferem no tamanho da população, como grau de escolaridade das mulheres e existência de seguro previdenciário. Neumayer (2004) afirma ainda a importância de incluir fatores geográficos como média das temperaturas mínimas e

máximas, no inverno e verão. Esses fatores refletem não somente causas antropogênicas, como demanda por energia, atividades industriais e de transporte e desmatamento – que reduz a quantidade de sumidouros de carbono, mas também as causas naturais. Na escolha das variáveis explicativas de um modelo, o importante é selecionar aquelas que são compatíveis com o contexto, ou seja, deve-se escolher variáveis que potencialmente possam afetar o nível de poluição ou o crescimento da renda. Por exemplo, no contexto de uma economia emergente, a urbanização é uma variável relevante (SINHA; SHAHBAZ; BALSALOBRE, 2019).

Shahbaz e Sinha (2019) concluem que os estudos apontam para o consumo de energia como principal variável explicativa para o crescimento econômico e a degradação ambiental. Halkos (HALKOS; STERN; TZEREMES, 2016) enfatiza o tamanho da população e o PIB *per capita* como os determinantes mais relevantes para as ineficiências ambientais. O autor encontrou, para os Estados Unidos, que a ineficiência ambiental decresce com o aumento da população e do PIB_{pc} até determinado limite, a partir do qual a tendência pode ser revertida. Halkos utilizou ainda as variáveis emprego total, energia e estoque de capital, para calcular um indicador de nível de ineficiência ambiental. Já Lui (LIU; YAN; ZHOU, 2016), encontrou que o grau de urbanização, medido por meio do nível população urbana e área construída territorial, como determinantes do crescimento econômico e da poluição na China.

Observando-se as variáveis explicativas consideradas pela literatura, percebe-se que os estudos passaram a compreender não somente variáveis econômicas e ambientais, mas também aquelas que se referem ao modelo institucional. Isto é condizente com os fatores explicativos para a EKC, vistos nesta seção, que não decorrem dos efeitos estruturais da economia. A seguir, será apresentado como a teoria econômica lida com a questão ambiental, destacando-se a disposição a pagar dos agentes por qualidade ambiental sob o pressuposto de maximização de utilidade e os efeitos que a ação governamental pode exercer sobre a EKC.

1.3 Teoria Econômica da Poluição

Quando se trata de tipo de bens existentes na economia, consideram-se as características de exclusão e rivalidade. Se um bem é tido como excludente, é possível impedir o seu uso por alguém. Já nos bens rivais, o uso de uma unidade do produto reduz as possibilidades de uso por outra pessoa. Considerando essas duas características os bens podem ser classificados como bens privados, bens públicos, recursos comuns e bens artificialmente escassos, observe a seguir a **Figura 3**.

	Rivais	Não Rivais
Excludentes	Bens Privados: Casas Carros Alimentos	Bens Artificialmente Escassos: TV por assinatura Parques privados
Não Excludentes	Recursos Comuns: Meio Ambiente Pastagens Ar puro	Bens Públicos: Defesa Nacional Praças públicas Estradas

Figura 3: Classificação dos Bens

Fonte: elaborado pela autora, com base em Mankiw

Para este trabalho, interessa sobretudo o recorte de bens ou recursos comuns. O meio ambiente preservado, o ar puro e os rios e mares em condições de banho e pesca são caracterizados como bens não excludentes e rivais, portanto classificados como recursos comuns. Esses bens sujeitam-se ao esgotamento ou à poluição excessiva, se puderem ser livremente utilizados. Essa questão foi tratada por Hardin (HARDIN, 1968) no artigo intitulado *The Tragedy of the Commons* (Tragédia dos Comuns). O autor afirma que se cada agente econômico buscar maximizar sua utilidade quando do uso de recursos comuns, a consequência esperada é o seu esgotamento ou poluição em excesso. Em outras palavras, o homem racional ao utilizar um recurso comum se apropria integralmente de seus benefícios, mas divide ou sociabiliza os custos, já que considera somente os custos privados de suas ações e não os custos que suas ações provocam a terceiros, os chamados custos externos ou externalidades negativas. Na margem, os benefícios auferidos são sempre maiores que os custos e o resultado é o esgotamento dos recursos quando todos os agentes agem da mesma forma. Ou seja, o agente racional e seu coletivo (o mercado) falham, pois a decisão de usar e o de quanto usar de um recurso comum não leva em consideração os reais custos de suas ações. Segundo Hardin, a solução perpassa, dentre outras medidas, pela definição e estabelecimento de direitos de propriedade.

Por definição, externalidade ocorre quando as transações entre comprador e vendedor afetam terceiros (a sociedade) não envolvidos na transação e esse custo não é sinalizado por meio de preços. Assim, o equilíbrio de mercado não é eficiente, ou seja, a solução

de mercado não maximiza bem-estar. As externalidades podem ser positivas ou negativas. No caso da poluição, há externalidade negativa, pois seu impacto sobre a sociedade é prejudicial. Na presença de externalidades negativas, o custo social é maior que o custo privado e, portanto, a quantidade de equilíbrio é inferior à quantidade ótima que maximizaria os benefícios sociais¹. Isso pode ser visualizado na **Figura 4** abaixo.

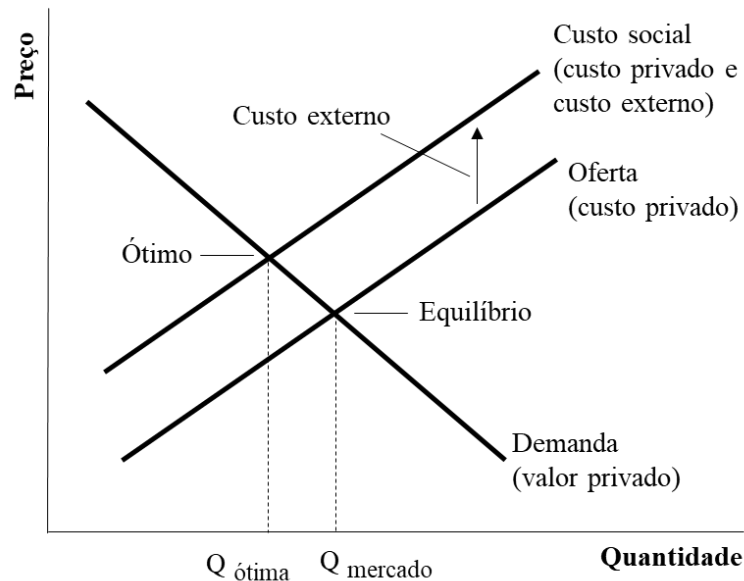


Figura 4: Equilíbrio na presença de externalidade negativa

Fonte: elaborado pela autora, com base em Mankiw

Ainda na **Figura 4**, considere um mercado de um determinado bem hipotético, com a quantidade produzida representada no eixo X, os valores monetários (preços e custos) representados no eixo Y e as respectivas curvas de oferta e demanda de mercado. A curva de oferta de mercado (“Oferta”) é construída com base nas curvas de custo marginal privado de todos os produtores do bem hipotético e a curva de demanda de mercado (“Demanda”), com base nas curvas de demanda dos consumidores do bem. Essas curvas representam as disposições marginais a pagar por unidades adicionais do bem, ou seja, os benefícios marginais. Assume-se que para qualquer nível de quantidade produzida, a sociedade incorre em custos marginais privados e em externalidades negativas, já que a produção do bem gera poluição. O somatório destes custos é representado pela curva de custo marginal social

¹ Quando os impactos sobre a sociedade são benéficos, trata-se de externalidade positiva, como é o caso do capital humano e investimentos em educação. Nesses casos, o valor social do bem excede seu valor privado, logo a quantidade ótima é superior à quantidade de equilíbrio.

(“Custo social”). No ponto de equilíbrio (“Equilíbrio”), também chamado de equilíbrio competitivo, a sociedade escolhe produzir e consumir uma tal quantidade do bem (“ Q_{mercado} ”) até o ponto onde o custo marginal privado, representado pela curva de oferta, se iguala ao benefício marginal, representado pela curva de demanda. Já no ponto ótimo que considera tanto os custos privados quanto os custos externos, a quantidade escolhida de equilíbrio ficaria à esquerda do ponto de equilíbrio competitivo (“ $Q_{\text{ótimo}}$ ”). Assumindo que poluição seja diretamente proporcional à quantidade produzida, pode-se concluir pela **Figura 4** que o mercado com externalidades negativas polui em excesso, quando comparado às emissões que seriam produzidas no ponto de equilíbrio ótimo.

Conforme proposto por Hardin (1968), uma solução possível para minimizar a poluição consiste na definição de direitos de propriedade. O autor, porém, sinaliza que o ar e as águas não podem ser cercados (privatizados), ensejando outros tipos de medidas como a imposição de leis, não necessariamente proibitivas, mas que estimulem certo comportamento; ou de impostos sobre produtos, tornando mais barato preservar que poluir o meio ambiente. Nesta linha, as ações governamentais para minimizar os efeitos da poluição podem ser divididas em dois grandes grupos: restrições quantitativas para emissões baseadas em políticas de comando-e-controle (regulamentação) e estabelecimento de políticas de mercado, como a instituição de impostos corretivos e subsídios ou de licenças negociáveis. Mankiw (MANKIW, 2013) exemplifica com os veículos automotivos a política de comando e controle e a solução de mercado com a instituição de impostos corretivos. Os governos podem regulamentar padrões de emissão de poluentes por carros e motos, estabelecendo limites máximos ou estimulando a adoção de certas tecnologias. Adicionalmente, tributa-se gravosamente a gasolina, o que limita o uso do veículo e conseqüentemente reduz congestionamentos, acidentes de trânsito e poluição pela queima de combustíveis. No caso da instituição de subsídios, o objetivo é favorecer atividades que promovam externalidades positivas, como é o caso do FIES – Fundo de Financiamento ao Estudante do Ensino Superior, que facilita a obtenção de grau superior em faculdades privadas, e a Tarifa Social de Energia Elétrica, para consumidores de baixa renda, possibilitando o acesso à luz e energia elétrica. Um exemplo para as licenças negociáveis é a comercialização de créditos de carbono, estabelecida pelo Protocolo de Kyoto, que se constitui na compra e venda entre países de direitos de poluir, a fim de contribuir para os objetivos globais de sustentabilidade.

Leal, (LEAL et al., 2015), ao estudar políticas públicas relacionadas aos ciclos econômicos brasileiros e a poluição, afirma que o custo de mitigar as emissões de dióxido de carbono é mais baixo do que o impacto da poluição sobre a produção econômica, justificando

a ação governamental. O autor também sugere a adoção de políticas ambientais dinâmicas, em que os impostos e os limites quantitativos de emissões podem ser aumentados em períodos de expansão econômica e diminuídos em períodos de recessão. Leal (2015) pontua ainda a vantagem política das restrições quantitativas, por ser politicamente menos custoso flexibilizar tetos de emissões do que aumentar impostos nos períodos de expansão econômica.

Conforme explanado, a teoria econômica da poluição mostra que os bens comuns estão sujeitos à exaustão ou à poluição, sendo inevitável a tragédia dos comuns, caso não haja intervenção governamental efetiva. Algumas soluções possíveis são a definição de direitos de propriedade e a imposição de medidas que promovam a apropriação das externalidades, como o estabelecimento de impostos corretivos e padrões de emissão. Essas medidas correspondem a um cenário institucional em que a sociedade passa a demandar de seus governantes qualidade ambiental e que as ações dos agentes econômicos incorporem não somente o custo privado, mas também o custo externo. Tal comportamento se direcionaria para a redução das emissões no sentido do equilíbrio ótimo, reduzindo a probabilidade de ocorrência da tragédia dos comuns. Este cenário corresponderia a segunda parte da EKC, em que o aumento da renda amplia a consciência ambiental e reduziria os níveis de poluição.

Panayotou (PANAYOTOU, 1997) ilustra graficamente a relação entre renda e meio ambiente em diferentes cenários institucionais. Para o autor, os direitos de propriedade bem definidos, a apropriação das externalidades nos preços (mediante impostos) e a remoção de subsídios aos setores poluentes achatam a Curva de Kuznets Ambiental e a deslocam para baixo, reduzindo o nível de poluição ambiental. De maneira contrária, os direitos de propriedade mal definidos, a não apropriação das externalidades nos preços e a concessão de subsídios a setores poluentes deslocam a EKC para cima, para níveis de maior poluição ambiental.

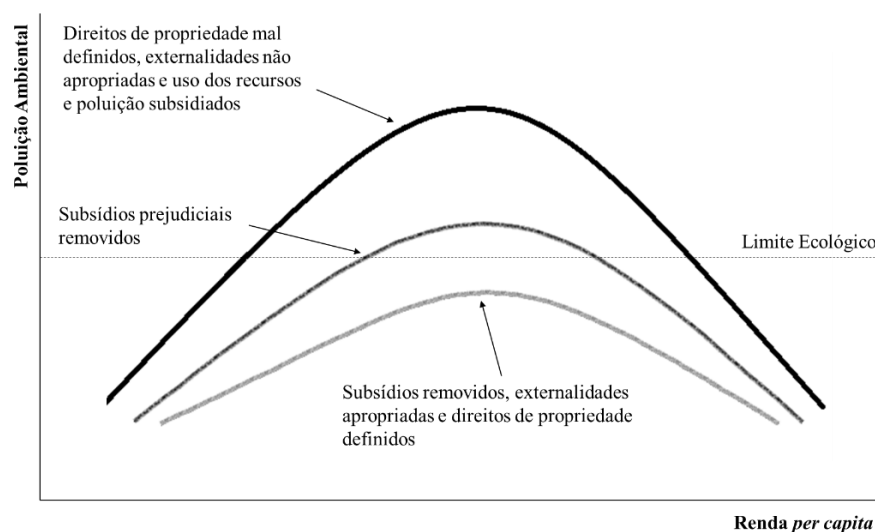


Figura 5: Renda e meio ambiente em diferentes cenários institucionais

Fonte: elaborado pela autora, com base em Panayotou (1997)

Yandle (YANDLE; et al., 2002) resume a hipótese da EKC sob a ótica de bens e recursos comuns e da elasticidade-renda da demanda pela preservação (ou qualidade) ambiental. A Curva de Kuznets Ambiental postula que nos estágios iniciais de desenvolvimento, o preço dos recursos naturais é baixo. Sua utilização intensiva provoca exaustão ou esgotamento ambiental, como previsto pela Tragédia dos Comuns. A escassez desses recursos comuns promove aumento da disposição a pagar por maior qualidade ambiental. Assim a quantidade demandada por um meio ambiente preservado aumenta com o aumento da renda. Nesse contexto, é importante observar que os insumos que formam a preservação ambiental, como qualidade da água e do ar, são gratuitos, não excludentes e rivais caracterizando-se com recursos comuns. Mas a qualidade ambiental *per se* se comporta como um bem de luxo, pois quanto maior a renda, maior a quantidade demandada, tendo demanda elástica e maior do que um. No próximo capítulo, seguiremos para os dados observacionais e métodos utilizados.

CAPÍTULO 2. DADOS E MÉTODOS

2.1 Métodos e Modelo Empírico

A revisão de literatura realizada por Shahbaz e Sinha (2019) afirma haver uma ampla gama de métodos para se estimar a EKC para o CO₂, com modelos baseados em dados em corte transversal, painel e séries de tempo. Como crescimento econômico é, por definição, um fenômeno que se expressa ao longo do tempo, é importante permitir que a dimensão temporal seja incluída na análise, com a construção de modelos baseado em dados em painel ou séries de tempo. A análise quantitativa desenvolvida nesta dissertação inclui a dimensão temporal ao se basear em um painel de 4882 municípios para os anos de 2000 e 2010 e incluir uma *dummy* de tempo, mas faz o uso de técnicas de estimação de mínimos quadrados ordinários (MQO) em vez do uso de técnicas econométricas específicas para dados em painel. Ou seja, aplica-se a técnica de *pooled – ols* (MQO em dados empilhados). Neste caso, embora variáveis de controle estejam inseridas na análise, não se considera explicitamente efeitos fixos e heterogeneidade não observada. Vale atentar, portanto, para o fato de que as estimativas que serão apresentadas abaixo não representam necessariamente a magnitude de efeitos causais, mas sobretudo de correlação entre as emissões e as variáveis explicativas.

Em termos gerais, a Curva de Kuznets Ambiental pode ser traçada a partir de uma equação que relaciona uma variável indicativa de poluição (C) em função da renda (Y), conforme a equação (2), expressa adiante. Como há outras variáveis correlacionadas com Y , é importante que elas sejam incluídas no modelo, de forma a permitir que seus efeitos sobre C sejam isolados dos efeitos de interesse, que são os de Y sobre C . Em (2) essas variáveis são representadas por $j = 1, \dots, J$, variáveis no vetor \mathbf{X} . Além dessas, o modelo de análise pode incluir $l = 1, \dots, L$, outras variáveis incluídas no vetor \mathbf{Z} , que potencialmente contribuem para o aumento de emissões, como aquelas associadas ao clima e à geografia, por exemplo.

$$C = f(Y, \mathbf{X}, \mathbf{Z}) \quad (2)$$

Seguindo Holtz-Eakin e Selden (1995) a forma funcional para (2) pode ser baseada em uma equação quadrática, como a representada em (3).

$$C_{it} = \beta_0 + \beta_1 Y_{it} + \beta_2 Y_{it}^2 + \beta_j' \mathbf{X}_{it} + \beta_z' \mathbf{Z}_{it} + \epsilon_{it} \quad (3)$$

Onde, C_{it} refere-se à emissão de CO_2 em determinado espaço geográfico i no ano t ; β_0 é o intercepto, β_1 e β_2 são os parâmetros a serem estimados; Y é a renda em i ; β_j e β_z são os vetores que incluem os parâmetros associados às variáveis em \mathbf{X} e em \mathbf{Z} , respectivamente.

A fim de dar maior flexibilidade ao modelo, permitindo como resultado todas as especificações da EKC, muitos autores utilizam a forma funcional cúbica, apresentada no início desta dissertação, e que pode ser calculada a partir da equação (4), a seguir:

$$C_{it} = \beta_0 + \beta_1 Y_{it} + \beta_2 Y_{it}^2 + \beta_3 Y_{it}^3 + \beta_j' \mathbf{X}_{it} + \beta_z' \mathbf{Z}_{it} + \epsilon_{it} \quad (4)$$

Nesta dissertação, para estimação da EKC, foi utilizado o modelo mais próximo da equação (4), que emprega a forma cúbica da renda (Y). O indicador de poluição selecionado são as emissões de CO_2 e o indicador de renda (Y) é o PIB *per capita*. A estimação da EKC ocorreu mediante regressão linear múltipla com erros padrão robustos com o uso estimador de White para o erro padrão (WOOLDRIDGE, 2004). Incorporou-se ao modelo a variável PIB *per capita* elevado à primeira, segunda e terceira potências, para capturar eventual relação linear, em U-invertido ou em N entre as variáveis dependente e explicativas. A regressão linear foi estimada por meio do software Stata, utilizando-se o comando para estimações com estimadores de mínimos quadrados ordinários (REGRESS).

Mais adiante, em seção própria, será feita a descrição detalhada dos dados e das variáveis selecionadas. Para os propósitos da presente seção, cumpre apresentar o modelo de equação que foi utilizado nesta dissertação.

$$\begin{aligned} \ln C_{it} = & \beta_0 + \beta_1 \ln Y_{it} + \beta_2 \ln Y_{it}^2 + \beta_3 \ln Y_{it}^3 + \beta_4 PPU_{it} + \beta_5 FV_{it} + \\ & \beta_6 VAI_{it} + \beta_7 PPNI_{it} + \beta_8 PMA_{it} + \beta_9 TMA_{it} + \beta_{10} DT + \epsilon_{it} \end{aligned} \quad (5)$$

Onde \ln é o logaritmo natural, C = Emissões de CO₂, Y = PIB *per capita*. Para as variáveis em **X**, PPU = percentual da população urbana, FV = frota de veículos, VAI = valor adicionado pela indústria, $PPNI$ = proporção de pessoas por nível de instrução; para as variáveis em **Z**, PMA = precipitação média anual, TMA = temperatura média anual e DT = *dummy* de tempo, que assume valor 0 para o ano 2000 e 1 o ano 2010. O subscrito i refere-se ao município i e “ t ” representa os anos de 2000 e 2010. O modelo é, portanto, log-log na variável renda e log-nível com relação as demais variáveis. Com isso, as estimativas sobre os efeitos da variável de interesse (renda) representam elasticidades.

O cálculo da regressão linear com erros padrão robustos foi realizado para considerar a hipótese de existência de heteroscedasticidade; ou seja, de que a variância dos erros condicionada aos valores das variáveis explicativas não é constante. Em presença da heteroscedasticidade, o estimador calculado via MQO continua não viesado, mas não é eficiente, prejudicando a inferência estatística por meio de Teste t de Student e F. A estimação da regressão com erros padrão robustos ajusta o modelo de MQO, permitindo o uso das estatísticas t e F. No caso deste trabalho, considerando o tamanho da amostra, de 9764 observações, a estatística t se aproxima da distribuição normal.

2.2 Amostra e Dados

A seguir serão apresentados, geograficamente, nas **Figuras 6 e 7**, os municípios escolhidos para esta pesquisa por nível de emissão de CO₂, gás que representa mais de 60% do total de gases causadores do efeito estufa, para os anos de 2000 e 2010. Na análise de ambas as figuras, cumpre perceber que, de maneira geral, os municípios reduziram seu nível de emissão. Observe que, na amplitude da escala de cores, os valores mínimos e máximos diminuíram. Isso também pode ser observado na **Tabela 2**, mais adiante, que contém as estatísticas descritivas. Pela análise das figuras em comento, observa-se que entre os anos de 2000 e 2010, São Félix do Xingú (PA) permaneceu como o grande emissor de CO₂, apesar de

ter reduzido seu nível de emissão de 24.615 para 15.520 Mton. Marabá (PA), Cáceres (MT) e Juara (MT) também reduziram seu nível de emissão em uma década. Já Manaus (AM) e Recife (PE) aumentaram seu nível de emissão. São Paulo, entre 2000 e 2010, continuou sendo um dos maiores emissores nacionais de gás carbônico, mantendo valores superiores a 17.000 Mton em uma década.

Emissões Municipais Ano 2000

Emissões Ano 2000 (10^3 ton)

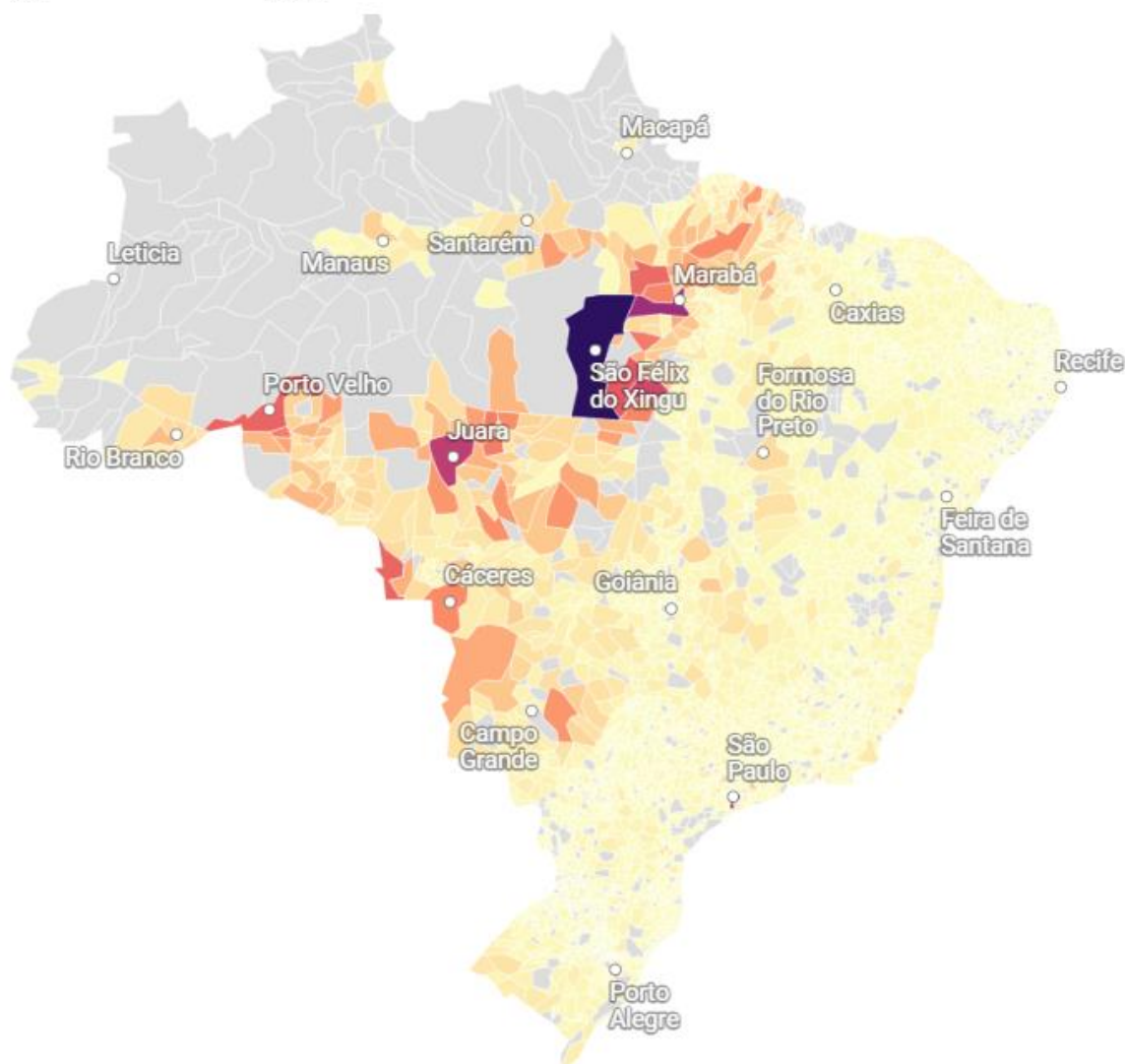


Figura 6: Emissões Municipais de Gás Carbônico – CO₂, Ano 2000

Fonte: elaborado pela autora, com datawrapper.de

Emissões Municipais Ano 2010

Emissões Ano 2010 (10^3 ton)

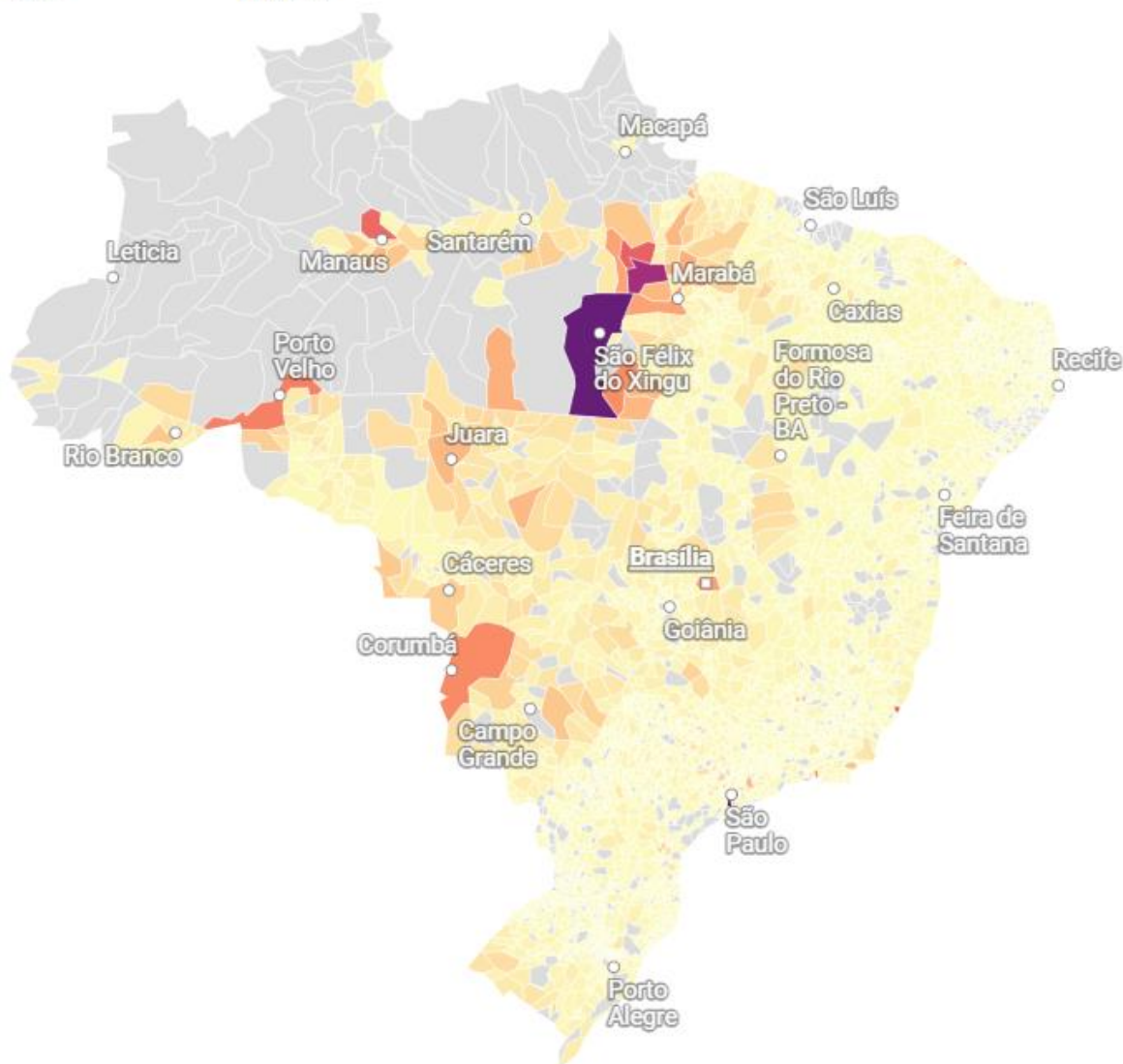


Figura 7: Emissões Municipais de Gás Carbônico – CO₂, Ano 2010

Fonte: elaborado pela autora, com datawrapper.de

Com relação às variáveis utilizadas em (5), as emissões de CO₂ foram medidas na unidade *Global Warming Potential* (GWP), que equivale à 1 tonelada de CO₂, e obtidas no site do SEEG (Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa). O PIB foi calculado em reais, a preços constantes de 2010, dividido pela respectiva população, resultando no PIB *per capita*, elevado ao quadrado e ao cubo, para fins de aplicação ao modelo da EKC, e obtido no site do Ipeadata. O percentual da população urbana foi obtido

pela divisão da população urbana sobre a total, a partir de dados dos Censos 2000 e 2010. Provém também dos Censos a proporção de pessoas por nível de instrução, que, no caso desta pesquisa, foi utilizado o percentual de pessoas com 25 anos ou mais com ensino médio completo. A frota de veículos por municípios estava disponível no site do Ministério da Infraestrutura (Renavam) apenas para o ano de 2010. Para o ano 2000, estavam disponíveis dados agregados por Unidades da Federação (Estados) e não por municípios. Já no ano de 2001, os dados estavam distribuídos por municípios. Assim, o valor municipalizado para o ano 2000 foi calculado interpolando-se os percentuais por município do ano 2001 para cada UF do ano de 2000. A frota de veículos para o ano 2000 trata, portanto, de uma estimativa. Não havia dados disponíveis para todos os municípios do ano 2001, interpolado para 2000, culminando com sua exclusão da amostra selecionada.

O valor adicionado pela indústria estava disponível no site Ipeadata e compreende a indústria de transformação e extrativa mineral, construção civil e serviços industriais de utilidade pública, calculado a preços básicos. Temperatura e precipitação foram coletadas na plataforma *Global Climate Monitor* (CAMARILLO-NARANJO et al., 2019). A inclusão da variável frota de veículos indica a queima de combustíveis fósseis, o valor adicionado pela indústria representa a demanda por energia, que no Brasil é majoritariamente renovável. Temperatura e precipitação são variáveis não econômicas que podem influenciar a necessidade por aquecedores, ventiladores, ar-condicionado, bombas d'água, relacionando-se também com a demanda por energia. Não foram selecionadas variáveis relativas à produção agropecuária, porque, apesar de disponíveis, frequentemente apresentavam valores municipais iguais a zero, já que na amostra há municípios muito urbanizados, e que tornaria o painel desbalanceado. Por fim, adicionou-se uma *dummy* de tempo, para captar as diferenças entre os anos objeto de análise. Todos esses dados foram acessados entre julho e agosto de 2021.

Segue a **Tabela 1**, que contém informações sobre as variáveis utilizadas neste trabalho.

Tabela 1: Variáveis utilizadas na pesquisa

Variável	Descrição	Unidade	Fonte
Emissões de Gás Carbônico (CO ₂)	Emissões de CO ₂ líquidas das remoções (não inclui outros GEE) para os setores de energia, agropecuária, processos industriais, resíduos e mudança de uso da terra.	Global Warming Potencial (GWP) em Giga toneladas (Gton)	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG)

PIB <i>per capita</i>	PIB Municipal a preços constantes no ano base 2010, dividido pela população total.	Em Mil Reais	Ipeadata
Percentual da População Urbana	População urbana dividida pelo total da população do município, em percentagem.	Não há.	Ipeadata
Frota de Veículos	Somatório dos veículos licenciados.	Em mil unidades	Ipeadata
Valor Adicionado pela Indústria	Diferença entre o valor bruto de produção e o consumo intermediário absorvido pela indústria de transformação e extrativa mineral, construção civil e serviços industriais de utilidade pública.	Bilhões de Reais	Ipeadata
% Pessoas por Nível de Instrução	Percentual de pessoas de 25 anos ou mais com ensino médio completo e superior incompleto.	Não há.	IBGE
Precipitação Média Anual	Valores mensais de precipitação somados e divididos por doze meses.	Milímetros cúbicos (mm ³)	<i>Global Climate Monitor</i>
Temperatura Média Anual	Valores mensais de temperatura somados e divididos por doze meses	Graus Celsius (°C)	<i>Global Climate Monitor</i>
Tempo	Utilizou-se uma <i>dummy</i> igual a zero para o ano 2000 e um para o ano de 2010	Não se aplica	Não se aplica

Fonte: elaborado pela autora

A disponibilidade de dados minimamente organizados constituiu-se em grande desafio. Foram aventadas possibilidades de se utilizar variáveis como “anos médio de escolaridade” por se considerar a educação como variável capaz de interferir na demanda ou conscientização por um meio ambiente preservado. Entretanto, esse indicador foi descontinuado no Censo de 2010 e substituído pela “proporção de pessoas por nível de instrução”. Escolheu-se então para o nível de instrução “pessoas de 25 anos ou mais com ensino médio completo e superior incompleto”. Conforme a revisão da literatura, o consumo de energia é um dos principais contribuintes para as emissões de CO₂. Alguns estados, como Pernambuco e São Paulo, atribuem aos seus municípios o consumo de energia elétrica e os dados estão disponibilizados na internet para os anos de interesse (2000 e 2010). Porém, não foram encontrados dados de consumo de energia para todos os grandes municípios brasileiros, nos anos de interesse. Algumas vezes, a informação encontrada fica fora do intervalo considerado,

como por exemplo os municípios do Estado do Pará, cujos dados estão disponíveis a partir de 2011. Como na maior parte dos municípios o consumo de energia não estava disponível, preferiu-se excluir a variável a utilizar dados desbalanceados.

Uma nuance dessa questão é a baixa disponibilidade de dados íntegros e organizáveis de forma automatizada, revelando a necessidade de reduzir o escopo deste trabalho. Inicialmente, planejou-se calcular a EKC para os 5570 municípios brasileiros, incluindo o Distrito Federal e o Distrito Estadual de Fernando de Noronha, pois os dados de emissões de CO₂ e de PIB estão disponíveis para esses indivíduos. Mas obstáculos variados surgem quando se usa fonte de dados diferente. Um deles é a menção dos municípios por códigos do IBGE, que pode não estar presente em certa base de dados, ou menção de municípios pelo seu nome, resultando em incongruências em caso de municípios homônimos, como é o caso de Bom Jesus (presente em cinco estados diferentes, a saber: PI, PB, RN, SC, RS) ou em virtude de acentuação, como “São José do Rio Preto” e “Sao Jose do Rio Preto” – mesmo município, mas não reconhecido como tal em base de dados diferente. Em termos práticos, esses obstáculos culminaram na necessidade de ler mais de 9000 linhas e pouco mais de uma dezena de colunas de Excel, onerando a tempestividade deste trabalho e implicando a exclusão de alguns municípios, especialmente aqueles que continham dados zerados, não disponíveis ou negativos.

Para se investigar as características dos municípios analisados e as mudanças ocorridas entre 2000 e 2010, será apresentada a seguir a **Tabela 2** com as estatísticas descritivas. Cumpre destacar que os dados estão empilhados (*pooled*) e, portanto, trata dos mesmos municípios em tempos diferentes. Assim será possível perceber o que ocorreu com as variáveis selecionadas para este estudo, principalmente em termos de emissões e PIB per capita municipal, ao longo de 10 anos.

Tabela 2: Estatística Descritiva

Variável	Ano	Média	Mediana	Desvio padrão	Variância	Mínimo	Máximo
EMISSIONES GWP	2000	340.43	79.20	1055.63	1.11E+06	0.71	24651.00
	2010	219.84	70.82	647.01	4.19E+05	0.04	18409.47
PIB PERCAPITA (Y) (em R\$1000)	2000	9.33	7.25	10.26	105.30	1.59	279.25
	2010	12.97	10.13	13.83	191.24	2.41	296.79
POPULAÇÃO URBANA (*%)	2000	0.60	0.60	0.23	0.05	0.02	1.00
	2010	0.65	0.66	0.22	0.05	0.04	1.00
FROTA DE VEICULOS (em 1000 unidades)	2000	5,736	703	62,155	3.86E+09	0.86	3.78E+06
	2010	12,512	2,057	107,490	1.16E+10	20	6.39E+06
VALOR ADIC INDÚSTRIA (em bilhões)	2000	124,447.89	6,099.17	1,303,241.38	7.98E+07	249.42	7.98E+07
	2010	175,379.92	7,060.88	1,232,490.58	1.52E+12	282.80	5.79E+07
% ENS MED COMPL	2000	9.03	8.36	4.58	20.94	0.25	35.74
	2010	16.30	15.39	6.02	36.20	3.52	47.46
PRECIP MÉDIA ANUAL	2000	124.97	131.34	41.06	1685.90	27.29	335.95
	2010	118.81	126.50	43.12	1859.48	29.65	257.64
TEMP MÉDIA ANUAL (°C)	2000	23.24	23.60	2.89	8.35	14.74	27.83
	2010	23.76	24.04	3.02	9.09	15.28	28.67

Fonte: elaborado pela autora

Considerando os dados acima, cumpre observar que houve diminuição da média de emissões de CO₂ e aumento da média do PIB *per capita*, entre os anos de 2000 e 2010, praticamente na mesma proporção (em torno de 1/3), mas em sentidos opostos. Há diminuição das emissões também nos valores mínimos e máximos de um ano para outro. Adicionalmente, houve redução da dispersão, observada pela queda do desvio padrão. Assim, durante a década em comento, os municípios brasileiros emitiram menos gás carbônico e de forma mais homogênea entre si (menor desvio padrão e menor amplitude entre máximos e mínimos).

Os resultados da estatística descritiva mostram também o aumento na média do PIB *per capita* entre 2000 e 2010, o que é compatível com o desempenho econômico brasileiro do período. As medidas de dispersão como desvio padrão, variância e amplitude entre máximos e mínimos indicam ampliação na desigualdade entre os municípios mais pobres e mais ricos, durante a década em comento. A distribuição dos municípios por classes de PIB *per capita* poderá ser observada graficamente mais adiante, nos **Gráficos 1 e 2**. As estatísticas para a população entre os anos 2000 e 2010 são bastante uniformes em todas as suas medidas de tendência central e de dispersão. Destaca-se que, como a amostra compreende quase a totalidade dos municípios brasileiros, há ampla variação entre máximos e mínimos, com

municípios contendo menos de dois centésimos por cento de sua população morando em áreas urbanas até aqueles com 100%.

A frota de veículos aumentou e o valor adicionado pela indústria também teve ampliação expressiva. Os níveis educacionais, que indicam o percentual de pessoas de 25 anos ou mais com nível médio completo, também cresceram entre 2000 e 2010. Esses aumentos nas três variáveis são compatíveis com o período de crescimento econômico observado por meio do PIB per capita. Apesar de o percentual de concluintes ter aumentado, o nível educacional dos municípios permanece baixo, alcançando em média menos de 17% da população aplicável. Os municípios que atingiram o maior percentual de educação foi Paço do Lumiar (MA) (47,46% em 2010) e o menor Santa Cecília (PB) (0,25% em 2000). Respectivamente, sobre esses dois municípios, cumpre destacar que seus PIB *per capita* não são muito divergentes, perfazendo aproximadamente R\$ 3200,00 (em 2000) e R\$ 3090,00 (em 2010), ambos os valores a preços de 2010. Como será visto adiante, precipitação e temperatura são as variáveis que mais contribuem para explicar o modelo da Curva de Kuznets Ambiental. Entretanto, para fins de estatística descritiva, comenta-se que ambas variaram pouco ao longo da década.

Os municípios foram divididos em quartis com relação ao PIB, criando quatro categorias de municípios. O primeiro quartil (Q_1) delimita o grupo de municípios que representa os 25% mais pobres de toda a amostra, classificados como “muito pobres”. O segundo quartil (Q_2) contém o grupo dos 25% a 50% municípios um pouco menos pobres, ou simplesmente “pobres”. O limite superior desse quartil é a mediana, que divide a amostra pela metade do número de observações (50%). No terceiro quartil (Q_3) está o grupo de municípios cuja renda está entre 50 e 75% dos valores, denominados “ricos”, e acima do Q_3 estão os 25% municípios mais ricos, intitulados “muito ricos”. Na **Figura 8**, foram destacados alguns municípios que pularam mais de uma categoria. As setas iniciam no ano de 2000 e terminam no ano de 2010, assim é possível perceber se determinado município melhorou ou piorou na década em comento. Conforme a figura, quatro municípios melhoraram ao longo da década, saindo de “muito pobres” para “ricos” e oito saltaram de “pobres” para muito “ricos”. Itagibá (BA) foi o município que teve a maior variação do período, melhorando 274%. Outros nove municípios fizeram o sentido contrário, caindo da categoria “muito rico” para pobre ou de “rico” para “muito pobre”. Destaca-se Fortim (CE), com a maior queda entre os municípios dispostos no gráfico.

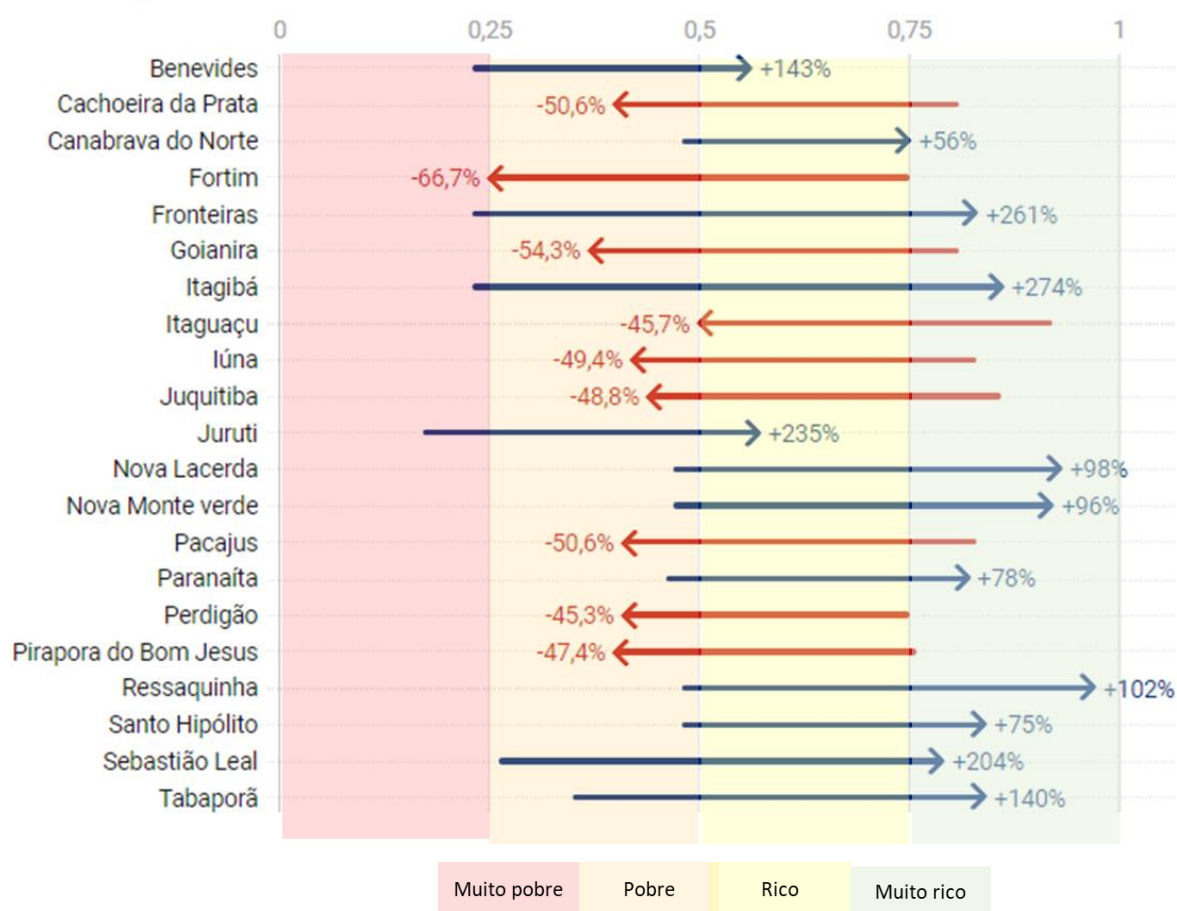


Figura 8: Alteração de quartis em municípios selecionados, de 2000 para 2010

Observação: as setas iniciam no ano 2000 e terminam em 2010.

Fonte: elaborado pela autora

Os **Gráficos 1 e 2** abaixo mostram a distribuição de municípios dentro de classes de PIB *per capita* para o ano de 2000 e 2010, respectivamente. Em ambos os gráficos, pode ser observada a distribuição bastante desigual dessa variável. Mais da metade dos municípios está abaixo da média, a saber: 9,07 em 2000 e 12,72 em 2010 (em milhares de unidades). Conforme esperado, a classe mais frequente é aquela relacionada ao menor nível de renda, e, quanto maior a renda per capita menor a quantidade de municípios em cada classe. Os elevados níveis de concentração de renda no Brasil são amplamente conhecidos, nesses gráficos, observa-se também que há pouquíssimos municípios com níveis de renda sobremodo elevado. Considerando a Curva de Kuznets Ambiental, os municípios mais abastados seriam os responsáveis pela diminuição das emissões de CO₂, pois eles teriam iniciado sua trajetória descendente de poluição ao longo do seu crescimento econômico. Entretanto, pode ser observado que a maioria dos municípios está em nível de renda bem baixo, levando à suposição de que o Brasil ainda estaria na parte ascendente da EKC.

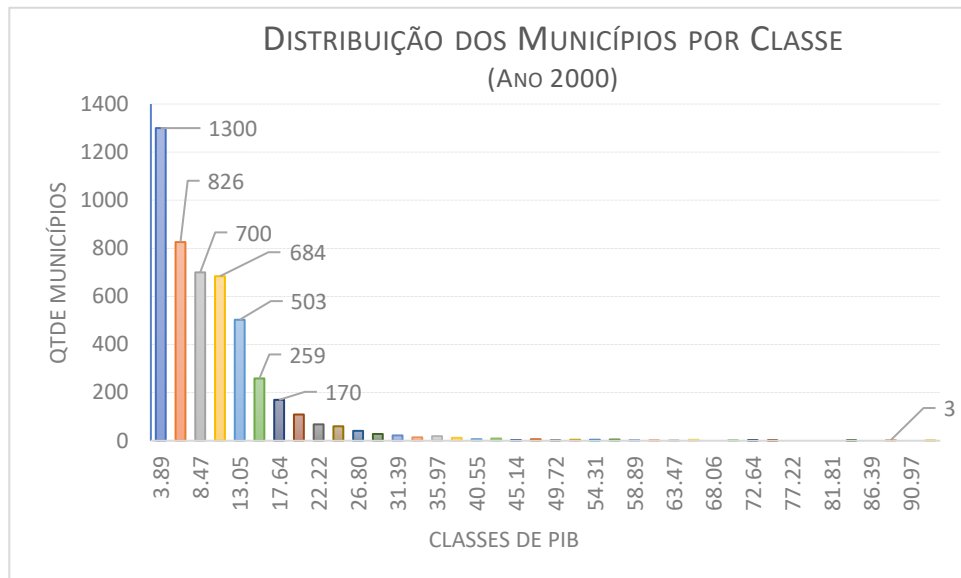


Gráfico 1: Distribuição dos Municípios por Classes de PIB *per capita* (Ano 2000)

Fonte: elaborado pela autora

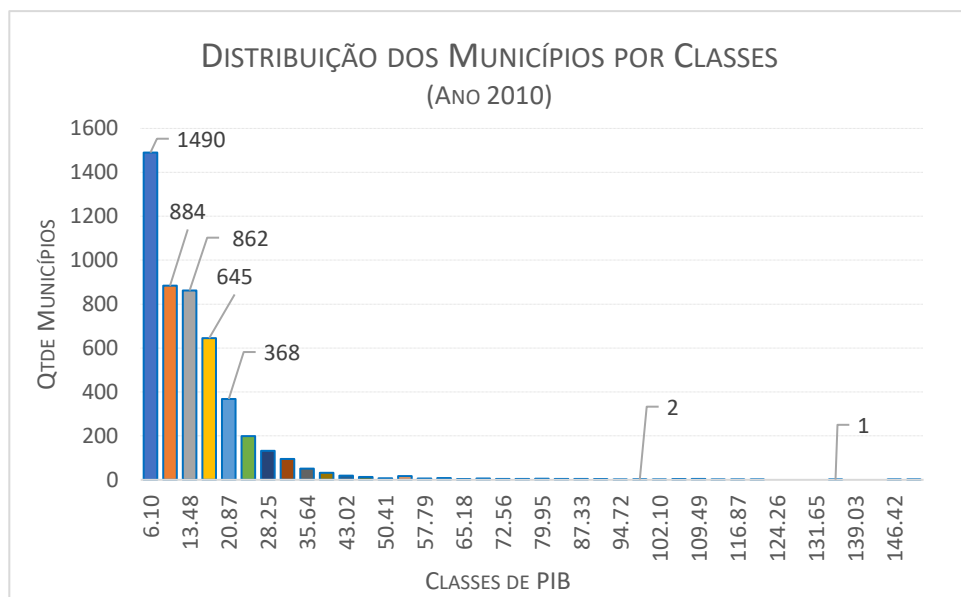


Gráfico 2: Distribuição dos Municípios por Classes de PIB *per capita* (Ano 2010)

Fonte: elaborado pela autora

CAPÍTULO 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES (ESTATÍSTICA INFERENCIAL)

A partir da equação (5), chegou-se às estimativas dispostas na **Tabela 3**, abaixo, contendo os resultados da regressão linear múltipla:

Tabela 3: Resultados da Regressão Linear Múltipla

Ln (Emissões de CO ₂)	Coefficientes
Ln PIB <i>per capita</i>	3.404 (4.338)
Ln PIB <i>per capita</i> ²	0.897 (3.225)
Ln PIB <i>per capita</i> ³	-1.554 (2.801)
% População Urbana	-0.879** (0.302)
% População Urbana ²	0.7978*** (0.250)
Frota de Veículos	9.73e ⁻⁰⁷ (9.27e ⁻⁰⁷)
Valor Adicionado pela Indústria (em bilhões reais)	6.89e ⁻⁰⁸ (5.28e ⁻⁰⁸)
% Ensino Médio Completo	1.585 (0.892)
% Ensino Médio Completo ²	4.619** (2.536)
Precipitação Média Anual	0.0112*** (0.0004)
Temperatura Média Anual	0.187*** (0.005)
Dummy	0.6134*** (0.032)
Constante	-2.875 (0.1738)

Entre parênteses () = Erro padrão. *p<0.10; **p<0.05 e ***p<0.01

Considerando os dados da tabela acima, pode-se observar a relação entre emissões, PIB *per capita*, PIB *per capita*² e PIB *per capita*³. Embora não haja significância estatística a níveis usuais para nenhuma dessas variáveis, os dados sugerem uma relação positiva entre PIB *per capita* e emissões. Apenas para fins ilustrativos, pode-se calcular a derivada de emissões sobre a renda, a fim de conhecer a magnitude do efeito de uma variável sobre a outra. Assim, 1% de aumento na renda provoca uma variação de 0,88% nas emissões, avaliada na média de Y ao longo do tempo e do espaço de 11,15. Veja a seguir, o cálculo da derivada em comento:

$$\frac{d\ln\hat{C}}{d\ln Y} = \frac{3,404}{\bar{Y}} + 2 * \frac{0,897}{\bar{Y}} - 3 * \frac{-1,554}{\bar{Y}} = \frac{3,404}{11,15} + 2 * \frac{0,897}{11,15} - 3 * \frac{-1,554}{11,15} = 0.884\%.$$

Considerando, contudo, a ausência de significância estatísticas aos níveis usuais, não dá para afirmar, ao menos do ponto de vista estatístico, que o PIB afeta os padrões de emissão, uma vez controlando para as outras variáveis explicativas. Temos, contudo, que ser cuidadosos para não chegarmos à conclusão de que PIB não é uma variável relevante para explicar emissões. Por exemplo, se fizermos a mesma regressão, mas sem os termos quadrático e cúbico para PIB, a estimativa para LnPIB se torna bastante significativa. O que explica essa situação é que a inclusão de LnPIB² e LnPIB³ torna as variáveis muito correlacionadas entre si, inflando os erros-padrão. Ademais, as estatísticas-*t* relacionadas aos seus coeficientes ficam mais baixas, denotando um problema de multicolinearidade. Tendo em vista a revisão da literatura, não parece razoável afirmar a inexistência de relação entre renda e emissões, exceto pelas conclusões de AGUILAR-BOHÓRQUEZ et al., 2016, que afirma que a EKC não pode ser evidenciada em curto prazo no Brasil. Portanto, pode-se interpretar que, apesar da fraca significância estatística, o Brasil ainda está em um estágio bastante incipiente de seu desenvolvimento econômico, compatível com primeira parte da Curva de Kuznets Ambiental (porção ascendente), antes de seu ponto de inflexão.

As demais variáveis explicativas foram inseridas neste modelo na relação log-nível, pois importa apenas tentar isolar o efeito delas sobre o PIB e não suavizar eventuais não linearidades ou provocar uma distribuição mais próxima da normal. Assim, no que tange à relação emissões e percentual da população urbana (PPU), o resultado esperado seria positivo, ou seja, quanto maior o grau de urbanização maior o nível de emissões. Nesse sentido, foi necessário investigar o comportamento do percentual da população urbana (PPU) elevado à primeira e à segunda potências, para simular altos e baixos níveis de população urbana. As estimativas $\hat{\beta}_{ppu}$ e $\hat{\beta}_{ppu^2}$ apresentaram sinais negativo e positivo, respectivamente. Portanto, a níveis mais altos de urbanização ($\hat{\beta}_{ppu}$), aumentos no percentual da população urbana diminuem as emissões de CO₂, ao tempo em que, para em região pouco urbanizadas ($\hat{\beta}_{ppu^2}$), aumentos adicionais tendem a provocar aumentos nas emissões. O resultado dessas variáveis indica significância estatística de 5% e 1%, respectivamente.

Alam (ALAM et al., 2016) encontrou resultados semelhantes. Ao testar a EKC para o Brasil, Índia, China e Indonésia, o autor afirma que o crescimento da população tem uma relação negativa com emissões para o Brasil num modelo linear da EKC e positiva no modelo quadrático, tanto no curto quanto no longo prazo. Comentando ainda sobre a relação

negativa entre emissões e urbanização, FUJII et al. (2018) considera que em nível subnacional, as cidades de alta renda poderão exibir redução da emissão de poluentes. O autor justifica que os cidadãos fazem escolhas compatíveis com melhor eficiência energética na compra de seus aparelhos eletrônicos e carros. Adicionalmente, as cidades podem adotar medidas para redução da congestão de tráfego e a distribuição de energia ocorre de maneira mais eficiente com a difusão de redes inteligentes.

Conforme esperado, a frota de veículos (FV) contribui positivamente para o aumento das emissões de CO₂, como pode ser observado a partir do sinal positivo e da magnitude da estimativa $\hat{\beta}_{fv} = 9.73e^{-07}$. A variável em comento está em milhares de unidade, não é significativa aos níveis estatísticos usuais, entretanto tem elevada significância econômica. A frota de veículos pode ser considerada uma proxy para consumo de combustíveis fósseis, pois sua queima nos motores à combustão é uma importante fonte de geração de poluentes. No Brasil, o transporte de cargas e de pessoas ocorre principalmente pelo modal rodoviário. Segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2008), o setor de transportes tem baixo índice de aproveitamento energético, trazendo externalidades negativas na forma de maior emissão de poluentes, maior custo final dos produtos, maior dependência da importação de combustíveis e prejuízos no desempenho da balança comercial.

Neste trabalho, emissões e valor adicionado da indústria (VAI) corresponde a um $\hat{\beta}_{vai}$ igual a $6.89e^{-08}$, mas não tem significância estatística. Isso significa que quanto maior a agregação de valor pela indústria na economia municipal maior as emissões de CO₂. De acordo com o modelo teórico da EKC, se a indústria for mais poluente e atrasada tecnologicamente, ela colaborará para o aumento de emissões. Se for de tecnologia mais limpa, a indústria provocará redução na emissão de poluentes. Considerando o sinal do $\hat{\beta}_{vai}$, observa-se que emissões e valor adicionado pela indústria se referem a uma indústria mais poluente e atrasada tecnologicamente. Segundo a Abimaq (apud FIESP, 2014), a idade média do parque fabril brasileiro é de 17 anos, enquanto a dos países mais avançados como Alemanha e Estados Unidos, a idade média do parque industrial é de 4 e 7 anos respectivamente. Apesar dessa discussão, o valor adicionado pela indústria não tem significância estatística nos níveis usuais.

À semelhança do ajuste realizado para a variável percentual de população urbana, para simular altos e baixos níveis educacionais, elevou-se a variável percentual de pessoas com ensino médio completo (a rigor, percentual de pessoas com 25 anos ou mais com ensino médio completo e superior incompleto - PPNI) à primeira e à segunda potências. Conforme os sinais das estimativas, tanto em níveis muito baixos de educação formal quanto

em níveis mais altos, o aumento da escolaridade provoca aumento das emissões de CO₂, mas ambos os resultados não são significativos aos níveis usuais. Cumpre lembrar da seção de **Dados e Métodos**, que, menos de 1/5 da população de 25 anos ou mais tem ensino médio completo. Já que o nível educacional é sobretudo baixo, as estratégias para aumentá-lo muito provavelmente provocarão aumento nas emissões de CO₂. Outro ponto de destaque é que os sinais de $\hat{\beta}_{ppni}$ e $\hat{\beta}_{ppni^2}$ são os mesmos de $\hat{\beta}_{pib}$ e $\hat{\beta}_{pib^2}$, pois o esperado é que os níveis educacionais aumentem com o aumento da renda.

As penúltimas variáveis de controle são climáticas e tratam da média de precipitação e temperatura anuais. Elas foram incluídas no modelo a fim de se avaliar os fatores locais que afetam as emissões de forma não econômica. Ambas as variáveis independentes são positivamente relacionadas com emissões de CO₂ e apresentam significância estatística a 1%. Precipitação é um dos fatores afetados pelo nível de emissão natural de CO₂ e o aumento de 1% no regime de chuvas aumenta emissões em 1,12%. Já a temperatura apresenta magnitude de 0.1870. Ou seja, o aumento de um grau na média de temperatura anual aumenta emissões em 18,7%. Sem dúvidas, a temperatura é o fator local que mais contribui para o aumento das emissões de CO₂, seja por causas naturais ou antropogênicas. Este achado reforça o entendimento do relatório do IPCC, de que adotar medidas para redução da temperatura da terra, que no caso ocorre por redução das atividades geradoras de GEE, ameniza o aquecimento global e suas consequências danosas sobre a população humana e ecossistemas naturais.

Por fim, inseriu-se no modelo econométrico uma *dummy* de tempo, atribuindo-se valor zero para o ano 2000 e um para 2010, para simbolizar a diferença de emissões médias entre os anos, mantendo-se as demais variáveis constantes. Observa-se que o transcorrer de uma década aumenta emissões em 61,34%, com grau de confiança de 99%.

Considerando esses resultados e que os municípios brasileiros estão debaixo do mesmo arcabouço institucional, essas variáveis de controle estatisticamente significativas ajudam a sinalizar a relevância de políticas públicas, muitas delas já existentes, em temas como urbanização e preservação ambiental – que afetam os fatores climáticos de temperatura e precipitação. Por exemplo, o desmatamento excessivo impacta a temperatura atmosférica local e o regime de chuvas, alterando o plantio e a colheita de alimentos. Da urbanização decorrem múltiplos desafios como saneamento básico e emissão de poluentes industriais e veiculares. Apesar desses breves comentários em políticas públicas, Dinda (2004) afirma que é difícil desenhar essas políticas baseadas na EKC, porque o modelo não informa sobre os fatores que tornam a curva descendente ou achatada, nem impede o surgimento de novos poluentes, quer locais ou globais. Apesar disso, EKC continua sendo um interessante insumo para o debate

sobre o dilema entre meio ambiente e crescimento econômico, mas o verdadeiro desafio continua sendo possibilitar que os países cresçam de maneira mais sustentável e menos poluidora.

CONCLUSÃO

A Curva de Kuznets Ambiental (EKC) postula que a poluição ambiental aumenta até determinado ponto de inflexão, a partir do qual, com o aumento da renda, a degradação diminui, perfazendo um formato de U-invertido. Este trabalho se propôs a investigar a existência da EKC pelo método da regressão linear múltipla de emissões de CO₂ no PIB *per capita* municipal. Foram selecionados 4882 municípios brasileiros, perfazendo mais de 90% da população, da renda e das emissões brasileiras. A literatura é farta em resultados que confirmam ou negam a hipótese de existência da EKC, dependendo do tipo de poluente investigado, dos métodos aplicados e das variáveis de controle selecionadas.

A pergunta de pesquisa consistia em saber se a degradação ambiental, medida em CO₂, o mais relevante gás do efeito estufa, aumentou ou diminuiu com o avanço do padrão de renda. Os resultados demonstraram que a relação entre renda e emissões de CO₂ não segue a Curva de Kuznets Ambiental clássica, no formato de U invertido. Em particular, os dados sugerem que a relação, embora estatisticamente insignificante, é crescente e sem ponto de inflexão, considerando os níveis de renda no período estudado de 2000 a 2010. Assim, dado que foi utilizada a quase totalidade dos municípios brasileiros, para os anos em comento, os resultados obtidos podem ser interpretados como se o país estivesse ainda em níveis baixos de desenvolvimento econômico, em que o crescimento do PIB provoca aumento das emissões. Portanto, como não se evidenciou o U invertido da Curva de Kuznets Ambiental, não se pode afirmar que com o crescimento da renda, haverá redução da poluição ambiental, conforme crítica elaborada por Stern (1996).

O caso brasileiro sugere que o país ainda se encontra em um estágio de incompatibilidade entre preservação ambiental e desenvolvimento econômico. Assim, de certa forma, o caminho para maior qualidade ambiental perpassa sobretudo pela aplicação de políticas ambientais efetivas em compasso com o crescimento econômico, já que este *per se* não é suficiente para engendrar naturalmente melhorias ambientais, decorrentes da mitigação dos desafios da urbanização, promoção da utilização de tecnologias mais limpas por parte do setor produtivo, criação de leis ambientais mais efetivas pelo poder legislativo e maior demanda

por qualidade ambiental pela população em geral. Tal entendimento é consistente com a literatura, que afirma que quando o poluente é o CO₂ talvez não haja ponto de inflexão próximo, ou que esse ponto é tão alto que não seria alcançável, não havendo trajetória descendente para os níveis de poluição.

Quanto às variáveis de controle, os resultados indicam que em regiões já muito urbanizadas, o aumento da população diminui emissões e em locais pouco urbanizados, ocorre o contrário, o aumento da população aumenta emissões. Isso é compatível com o entendimento de economias de escala relacionadas à alta densidade urbana e a necessidade de mitigação dos desafios decorrentes da urbanização precária em locais pouco urbanizados. Temperatura e precipitação consistem em variáveis não econômicas que aumentam emissões por vias naturais ou antropogênicas, impactando, por exemplo, os períodos de safra de alimentos e a demanda por energia para reduzir o calor. Considerando que os municípios brasileiros estão debaixo do mesmo arcabouço institucional, essas variáveis de controle ajudam a sinalizar a importância de políticas públicas de preservação ambiental, possibilitando o desenvolvimento econômico brasileiro sustentável.

Conforme apresentado, a poluição é um problema econômico, pois gera externalidades negativas que não são apropriadas por meio dos preços de mercado. Além disso, o meio ambiente é um recurso comum, sujeito à poluição. Conforme proposto por Hardin, a solução perpassa pela definição dos direitos de propriedade. Isso achata a EKC e a desloca para baixo. A qualidade ambiental também pode ser entendida como um bem de luxo, pois sua demanda aumenta com o aumento da renda, por vias formais ou informais. As respostas para o dilema entre desenvolvimento econômico e qualidade ambiental não são simples, nem replicáveis aos países em desenvolvimento a partir da experiência de países desenvolvidos. Sobretudo porque entre esses dois tipos de países há interesses divergentes, com os mais pobres desejando crescer e melhorar as condições sanitárias hoje e os mais ricos almejando deixar um meio ambiente limpo para as futuras gerações, sem renunciar a suas facilidades agora. Este impasse se reflete nos debates internacionais sobre mudanças climáticas. A Curva de Kuznets Ambiental se mostra como um interessante modelo teórico para auxiliar as discussões sobre o tema no Brasil, mas cumpre lembrar que seus resultados são inconclusivos, conforme apresentado na revisão da literatura.

Por fim, vale salientar que este trabalho teve como inovação utilizar dados de emissão de CO₂ contabilizados e publicados pelo SEEG - Sistema de Estimativa de Emissão de Gases de Efeito Estufa. Esta é uma iniciativa do Observatório do Clima que produz estimativas de emissões de GEE com base nas diretrizes do IPCC e as atribui por setor e municípios. A

maioria dos trabalhos internacionais utiliza como fonte de dados aqueles disponibilizados pelo Banco Mundial. Adicionalmente, a pesquisa contribuiu para trazer evidência empírica sobre a Curva de Kuznets Ambiental aplicada ao Brasil a partir de dados dos entes subnacionais. A literatura é farta em estudar a EKC para o Brasil em comparação com outros países, mas não é frequente encontrar estudos que usem dados dos estados, municípios ou regiões brasileiras. Como limitações tem-se o curto período de disponibilidade dos dados, apenas 2000 e 2010, em virtude da não ocorrência de censo posterior a essa última data e a não utilização de métodos econométricos mais robustos, para inferir causalidade ou estimar a melhor especificação do modelo. Portanto, esse último ponto seria uma sugestão para pesquisas futuras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR-BOHÓRQUEZ, J. et al. Relationship Between Economic Growth and Environmental Degradation: Is there an Environmental Evidence of Kuznets Curve for Brazil? **International Journal of Energy Economics and Policy**, v. 6, n. 2, p. 208–216, 2016.

ALAM, M. 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**, v. 70, p. 466–479, 1 nov. 2016.

APUD FIESP. **Indústria briga para renovar máquinas**. Disponível em: <<https://www.fiesp.com.br/sindimilho/noticias/industria-briga-para-renovar-maquinas/#:~:text=Enquanto%20a%20idade%20m%C3%A9dia%20das,perto%20da%20maioridade%3A%2017%20anos.>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

ARRAES, R. A.; DINIZ, M. B.; DINIZ, M. J. T. Curva ambiental de Kuznets e desenvolvimento econômico sustentável. **RER**, v. 44, n. 3, p. 525–547, 2006.

AZEVEDO, T. **SEEG Brasil**. Disponível em: <<http://seeg.eco.br/download>>. Acesso em: 13 jun. 2021.

BECKERMAN, W. Economic Growth and the Environment: Whose Growth? Whose Environment? **World Development**, v. 20, n. 4, p. 481–496, 1992.

CAMARILLO-NARANJO, J. M. et al. The global climate monitor system: from climate data-handling to knowledge dissemination. **International Journal of Digital Earth**, v. 12, n. 4, p. 394–414, 3 abr. 2019.

CARAVAGGIO, N. Economic growth and the forest development path: A theoretical re-assessment of the environmental Kuznets curve for deforestation. **Forest Policy and Economics**, v. 118, 1 set. 2020.

CNT. **Transporte de Cargas no Brasil - Ameaças e Oportunidades para o Desenvolvimento do País**. Disponível em: <<https://portal.tcu.gov.br/biblioteca-digital/transporte-de-cargas-no-brasil-ameacas-e-oportunidades-para-o-desenvolvimento-do-pais.htm>>. Acesso em: 24 fev. 2022.

DASGUPTA, S. et al. Confronting the Environmental Kuznets Curve. **Journal of Economic Perspectives**, v. 16, n. 1, p. 147–168, 2002.

DINDA, S. Environmental Kuznets Curve hypothesis: A survey. **Ecological Economics**, v. 49, n. 4, p. 431–455, 1 ago. 2004.

FUJII, H. et al. An analysis of urban environmental Kuznets curve of CO2 emissions: Empirical analysis of 276 global metropolitan areas. **Applied Energy**, v. 228, p. 1561–1568, 15 out. 2018.

GROSSMAN, J. M.; KRUEGER, A. B. **Environmental Impacts of North America Free Trade Agreement**. [s.l: s.n.].

HALKOS, G. E.; STERN, D. I.; TZEREMES, N. G. Population, economic growth and regional environmental inefficiency: Evidence from U.S. states. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 4288–4295, 2016.

HARDIN, G. The Tragedy of the Commons. **Source: Science, New Series**, v. 162, n. 3859, p. 1243–1248, 1968.

IBGE. **Produto Interno Bruto - PIB**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

KUZNETS, S. Economic Growth and Income Inequality. **American Economic Association**, v. 45, n. 1, p. 1–28, 1955.

LEAL, R. A. et al. Ciclos econômicos e emissão de CO2 no Brasil: Uma análise dinâmica para políticas ambientais ótimas. **Revista Brasileira de Economia**, v. 69, n. 1, p. 53–73, 2015.

LIU, Y.; YAN, B.; ZHOU, Y. Urbanization, economic growth, and carbon dioxide emissions in China: A panel cointegration and causality analysis. **Journal of Geographical Sciences**, v. 26, n. 2, p. 131–152, 1 fev. 2016.

LÓPEZ, R. Environment as a factor of Production - The Effects of Economic Growth and Trade Liberalization. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 27, p. 163–184, 1994.

LORENTE, D. B.; ALVAREZ-HERRANZ, A. An Approach to the Effect of Energy Innovation on Environmental Kuznets Curve: An Introduction to Inflection Point. **Bulletin of Energy Economics**, p. 225–233, 2016.

MANKIW, N. G. **Princípios de Microeconomia**. 3. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

MARTÍNEZ-ALIER, J. The environment as a luxury good or “too poor to be green”? **Ecological Economics**, v. 13, p. 1–10, 1995.

MASSON-DELMOTTE, V. , et al. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis IPCC 2021: Summary for Policy Makers**. [s.l: s.n.].

NEUMAYER, E. National carbon dioxide emissions: geography matters. **Area**, v. 36, n. 1, p. 33–40, 2004.

PANAYOTOU, T. Demystifying the environmental Kuznets curve: Turning a black box into a policy tool. **Environment and Development Economics**, v. 2, n. 4, p. 465–484, 1997.

PANAYOTOU, THEODORE. **Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development**. [s.l.] International Labour Office, 1993.

RASLI, A. M. et al. New toxics, race to the bottom and revised environmental Kuznets curve: The case of local and global pollutants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 3120–3130, 1 jan. 2018.

SHAHBAZ, M.; SINHA, A. Environmental Kuznets curve for CO2 emissions: a literature survey. **Journal of Economic Studies**, v. 46, n. 1, p. 106–168, 7 jan. 2019.

SINHA, A.; SHAHBAZ, M.; BALSALOBRE, D. Data Selection and Environmental Kuznets Curve Models - Environmental Kuznets Curve Models, Data Choice, Data Sources, Missing Data, Balanced and Unbalanced Panels. In: **Environmental Kuznets Curve (EKC): A Manual**. [s.l.] Elsevier, 2019. v. Chapter 7p. 65–83.

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

STERN, D. I.; COMMON, M. S.; BARBIER, E. B. Economic Growth and Environmental Degradation: The Environmental Kuznets Curve and Sustainable Development. **World Development**, v. 24, n. 7, p. 1151–1160, 1996.

VAN ALSTINE, J. D.; NEUMAYER, E. **The environmental Kuznets curve**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/48910224>>.

WOOLDRIDGE, J. M. **Introdução à Econometria uma abordagem moderna**. 4. ed. [s.l.] Thomson Learning, 2004.

WORLD RESOURCES INSTITUTE (WRI). **Historical GHG Emissions**. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?chartType=percentage&end_year=2018&gases=all-ghg®ions=WORLD&start_year=1990>. Acesso em: 21 set. 2021.

YANDLE, B.; VIJAYARAGHAVAN, M.; BHATARRAI, M. **YANDLE - Environmental Kuznets Curve: A primer PERC Research Study**. [s.l.: s.n.].